

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
АРХИТЕКТОНСКИ ФАКУЛТЕТ

Неда М. Соколовић

ИСПИТИВАЊЕ КОНСТРУКТИВНИХ КАРАКТЕРИСТИКА И
МОГУЋНОСТИ ПРИМЕНЕ КОМПОЗИТНИХ ПЛОЧА ОД ДРВЕТА У
АРХИТЕКТУРИ ЕГЗОСКЕЛЕТА

Докторска дисертација

Београд, 2022.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF ARCHITECTURE

Neda M. Sokolović

EXAMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF WOOD-BASED
COMPOSITE PANELS AND ANALYZING POSSIBILITIES OF ITS
APPLICATION IN EXOSKELETON STRUCTURES

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2022.

Ментор

Др Ненад Шекуларац, редовни професор
Универзитет у Београду – Архитектонски факултет

Чланови комисије

Др Јелена Ивановић-Шекуларац, редовни професор
Универзитет у Београду – Архитектонски факултет

Др Дејан Васовић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Архитектонски факултет

Др Ивана Гавриловић-Грмуша, редовни професор
Универзитет у Београду – Шумарски факултет

Изјава захвалности

Пре свега, велику захвалност дугујем свом професору и ментору, др Ненаду Шекуларицу. Професоре, хвала Вам на поверењу, подрици и несебично пруженом знању током дугогодишње сарадње у настави, посвећености, конструктивним критикама и свој великодушној и безрезервној помоћи током докторских студија и израде докторске дисертације. Посебно хвала на подстицају и охрабрењу да истрајем у овом процесу до краја. Велика је привилегија и част имати таквог ментора и пријатеља.

Професорки др Јелени Ивановић-Шекуларац на добронамерним професионалним и животним саветима, подрици, смерницама и свим драгоценим сугестијама током израде дисертације. Професорки др Ивани Гавриловић-Грмуша на свесрдној помоћи и пажљивој посвећености током рада на дисертацији, а посебно на експерименталном делу у лабораторијама Шумарског факултета. Професору др Дејану Васовићу за подршку, савете и смернице током рада.

Захвалност на гостопримству и помоћи дугујем колегама из Лабораторије за својства дрвета и Лабораторије за испитивање иверица – Шумарског факултета. Професору др Владиславу Здравковићу хвала за подршку и конструктивне критике током рада на испитивању материјала.

Захваљујем се представницима привреде за обезбеђен материјал неопходан за истраживање у оквиру докторске дисертације, „Мареi“ Београд, „Пирамида“ Сремска Митровица и „VisaProm“.

Хвала свим колегама и пријатељима на подрици и разумевању током овог процеса. Посебно хвала пре свега пријатељима, др Миодрагу Грбићу и Ани Контић за дискусију, конструктивне разговоре и подршку.

Највећу, неизмерну захвалност за безусловну помоћ, подршку и разумевање, на које сам увек могла да рачунам, дугујем пре свега својој породици. Свом супругу, Александру. Хвала на помоћи током рада на дисертацији, хвала што си ми огромна подршка и ослонац, што си ми помогао да истрајем током овог не једноставног периода и осећам се заштићено и безбрижно. Бескрајно хвала мами и тати што сам данас овде где јесам. Ова теза је круна вишегодишњег учења, студирања и рада током кога сте ми пружили безусловну љубав и подршку, хвала за сваки подстицај.

Ову дисертацију посвећујем свом највећем остварењу, Алекси, непресушном извору моје снаге и мотивације, који је био моја звезда водилца у овом процесу и сваким својим осмехом давао мотив да у њему и истрајем.

Неда М. Соколовић

*Београд,
новембар 2022.*

Рад на овој докторској дисертацији започет је у оквиру пројекта Министарства просвете, науке и технолошког развоја (МПНТР) (ТР 36038 – Развој методе израде пројектне и извођачке документације инсталационих мрежа у зградама компатибилне са ВІМ процесом и релевантним стандардима, а комплетиран је у оквиру институционалног модела финансирања истраживача МПНТР којим се остварује општи интерес за Републику Србију у оквиру Лабораторије за архитектонско инжењерство – Проблеми конструисања архитектонских објеката и Лабораторије архитектонског простора – Форма, функција и материјализација на Универзитету у Београду – Архитектонском факултету.

Формирање узорака и експериментално испитивање конструктивних карактеристика материјала подржано је од стране „Мареі“ доо., „Пирамида“ доо. и „VisaProm“ доо. који су обезбедили неопходан материјал, као и од стране Универзитета у Београду – Шумарског факултета који је омогућио рад у лабораторијама.

ИСПИТИВАЊЕ КОНСТРУКТИВНИХ КАРАКТЕРИСТИКА И МОГУЋНОСТИ ПРИМЕНЕ КОМПОЗИТНИХ ПЛОЧА ОД ДРВЕТА У АРХИТЕКТУРИ ЕГЗОСКЕЛЕТА

Сажетак теме докторске дисертације

Технолошки напредак одувек је био подстицај иновативног дизајна у архитектури. Развој нових материјала и технологија један је од највећих покретача архитектонске мисли, а развој процеса пројектовања комплексних архитектонских структура и развитак нових архитектонских форми условљен је напретком у овој области. Задатак тезе је да се провере и унапреде могућности формирања конструктивних материјала насталих комбиновањем традиционалних и савремених материјала који имају примену у градитељству. Добијени резултати представљаће основ за даље истраживање у области пројектовања структура архитектонских објеката.

Основни грађевински материјали су материјали добијени из природе – камен, дрво и земља. Напретком технологије у XX веку доминантни материјали у градњи постају челик и армирани бетон. Технолошки напредак у XX-ом и почетком XXI-ог века у архитектуру употребу уводи полимерне материјале, чија све већа тенденција постаје примена у формирању конструктивних елемената.

Дрво, као природни материјал, задржао се кроз историју као један од најчешће употребљаваног материјала у грађевинарству, првенствено због лаке доступности, али и због својих одличних физичких и механичких карактеристика. Дугогодишња и континуирана примена, као и развој других производа који се добијају од дрвета као основне сировине, подстакнути су технолошким развојем и новим тржишним захтевима. Данас се из дрвета, као основног материјала, добија велики број производа на бази дрвета, чије су основне предности рационалнија примена дрвне сировине и унапређене физичке и механичке особине у односу на монолитно дрво. Посебно су значајни производи на бази дрвета добијени од слојева фурнира, фурнирске плоче (plywood) и ламелирана фурнирска грађа (laminated veneer lumber - LVL). Ови производи се додатно издвајају од други плочастих материјала на бази дрвета због својих механичких и естетских особина.

Фурнирске плоче и LVL грађа су производи на бази дрвета добијени међусобним лепљењем слојева фурнира. Предност ових производа огледа се у побољшању одређених конструктивних карактеристика у односу на плоче од пуног дрвета, а првенствено у смањењу ограничења материјала условљених његовом анизотропношћу. Предност ових плоча огледа се у умањењу основних недостатака које се уочавају у монолитној грађи: грешке дрвета су распоређене кроз плочу или елиминисане у производњи, смањена је варијабилност у карактеристикама и уједначеније су механичке карактеристике производа у подужном и попречном правцу. Примена плоча на бази фурнира у архитектури може бити: конструктивна (примарна) и неконструктивна (секундарна). Конструктивна примена за израду гредних елемената или елемента испуне I-гредних носача, хоризонталних и вертикалних дијафрагми за укрућење, док је неконструктивна у виду подне, зидне и кровне, облоге. Плочасти материјали на бази дрвета најчешће су секундарни елементи конструкције, који служе за прихватање и пренос оптерећења на носеће конструктивне елементе, или за повећање стабилности дрвених структура.

Мала сопствена тежина и добре механичке карактеристике подстакле су истраживање примене плочастих производа на бази дрвета као носећег елемента конструкције у структури љуски и набора. Формирање оваквих структура од плоча на бази дрвета доприноси уштеди материјала и рационалном конструктивном решењу. У циљу истраживања у свету је формирано свега неколико просторних структура код којих фурнирске и/или LVL плоче

представљају једини конструктивни елемент који чине једновремено конструкцију и омотач објекта. Због димензионалних ограничења плоча, објекти реализовани као просторне структуре, у конструктивном систему љуске или набора, формиран су од међусобно повезаних мањих равних сегмената плоча од фурнира. Ови објекти обликовани су тако да конструктивни елементи нису оптерећени искључиво аксијалним силама, већ се као доминантна оптерећења јављају моменти савијања, што је могуће управо избором дрвета као конструктивног материјала. Сви реализовани објекти су у домену истраживања и на њима се могу приметити ограничења у распонима и носивости читавих структура, што је последица веза између плоча, као и конструктивних карактеристика плоча на бази дрвета.

Истраживање у овој области инспирисано је развојем нових материјала и технологија и њиховом применом на неконвенционалне начине као носећи конструктивни елемент архитектонских објеката. Опсервацијом начина примене плоча на бази фурнира у архитектури, али и њиховом применом у другим областима, наилази се на одсуство њихове примене као примарног конструктивног елемента. Разлог томе су њихове перформансе, које су иако добре за ширу примену као секундарни елементи конструкције који немају носећу улогу, недовољно су добре за употребу као примарни елементи конструкције. Управо то је иницирало идеју за побољшањем механичких својстава плоча на бази фурнира интеграцијом са материјалима на бази полимера и формирањем новог композитног производа побољшаних механичких карактеристика, првенствено модула еластичности, као и чврстоће на савијање и чврстоће на смицање, чиме би се створио нови производ са могућношћу његове апликације за остварење различитих архитектонских форми. Развој овог материјала допринео би унапређењу архитектонских и грађевинских решења, прошириле би се могућности избора материјала и подстакао процес пројектовања архитектонских просторних форми.

Досадашња истраживања примене полимерних материјала за ојачање конструктивних елемената спроведена су првенствено за армирано-бетонске и зидане конструкције, у нешто мањој мери за дрвене конструкције, а врло ограничене информације доступне су за испитивања у области композитних плоча на бази дрвета, фурнирских плоча и LVL-а. Претходна истраживања у овом пољу подразумевају неколико експерименталних истраживања, публикованих и приказаних у литератури, којима се тежило проналажењу оптималног начина формирања композитне плоче на бази фурнира, а као резултат добијен је производ са побољшаним одређеним механичким карактеристикама. Поред успешних експерименталних истраживања производ није примењен у даљим истраживањима у архитектури, нити су испитивани начини његове имплементације као носећег конструктивног елемента. Ово истраживање би допунило ту неистражену област и на тај начин допринело проширењу могућности формирања архитектонских објеката где би носећи конструктивни елемент био танкослојни омотач формиран од композитних плоча на бази дрвета.

Циљ истраживања је да се испитају и анализирају механичке особине композитног плочастог материјала формираног ламелирањем фурнира са полимерима армираним карбонским или стакленим влакнима, његове предности и ограничења, а првенствено да се укаже на могућности његове примене у архитектури као носеће опне - егзоскелета.

У оквиру ове тезе, користећи експериментални метод истраживања вршиће се провера могућности побољшања одређених механичких својстава која су неопходна за конструктивну примену, дефинисана на основу претходно извршене анализе могућности неконвенционалне примене плоча на бази фурнира у архитектури. Механичке карактеристике материјала добијене експерименталним путем даље ће се тестирати нумерички, кроз симулационе моделе и примере примене као елемената конструкције архитектонских објеката, како би се доказале могућности и оправданост примене тестираног материјала. Истовремено ће се кроз поменуте симулационе моделе испитати њихова носивост и просторна стабилност када су формиран од неојачаних плоча на бази фурнира (фурнирских плоча и LVL-а) како би се извршила међусобна анализа и поређење резултата, а у циљу препознавања потенцијала примене

ојачаног композитног материјала. Добијени резултати унапређења представљаће главни допринос рада. Овим истраживањем истаћи ће се механичке особине композитних плоча на бази дрвета и препознаће се потенцијали њихове примене у архитектури. Истраживање ће представљати темељ за будућа истраживања у области примене композитних плоча на бази фурнира унапређених конструктивних карактеристика за формирање просторних структура.

Кључне речи: плоче на бази фурнира, LVL плоче, карбонска влакна, ојачане LVL плоче, механичке особине, конструктивни елементи, просторне структуре, симулациони модел.

Научна област: Архитектура и урбанизам

УДК: 674.812-419.3:624.001.1(043.3)

INVESTIGATION OF STRUCTURAL CHARACTERISTICS AND POSSIBILITIES OF USING WOOD-BASED COMPOSITE PANELS IN EXOSKELETON ARCHITECTURE

Abstract

Technological development has always encouraged innovation processes in architecture. Development of new materials and technologies applied is one of decisive initiators of architectural thought. Moreover, expansion of complex architectural structures and forms is conditioned by development in the field of new materials and technologies. Therefore, the main objective of this doctoral thesis is investigation and promotion of new structural composites that combine both traditional and contemporary materials, followed by their application in the area of building constructions. Results obtained will define the basis for further investigation in the field of architectural structures' design.

Long-lasting architecture in human history was based on the use of naturally occurring materials- stone, wood and earth. Technological development of 20th century resulted in the predominant use of steel and reinforced concrete in building industry. Furthermore, with the beginning of the new 21st century, materials based on polymers were developed, rapidly finding their implementation in the area of structural materials.

Wood, as naturally occurring material, had a continuity of use through history as one of the most used building materials, as a result of its availability, as well as superior physical and mechanical characteristics. Long lasting and continuous use of wood and wood-based products was influenced by both technological development and market demands. Nowadays, there is variety of wood-based products, whose main advantages lie in rational use of raw materials and improved physical and mechanical characteristics when compared to solid timber. Veneer-based products, namely plywood and laminated veneer lumber (LVL) are particularly significant in the area of timber constructions, due to their superb mechanical and aesthetical characteristics when compared to the other wood-based panels.

Plywood and LVL are products made of wood, created by merging veneer layers. The main advantage if these products is reflected in their improved structural characteristics when compared to solid timber panels, which is a result of their decreased anisotropy. Furthermore, the main defects of solid timber panels are improved in veneer-based ones: timber faults are arranged through the panel or eliminated completely, variability of structural characteristics in longitudinal and transversal direction is reduced leading to more uniform behavior of elements. Application of veneer-based products in architecture can be structural (primary) or non-structural (secondary). Regarding their structural role, they can be used as beams, as an infill of I-beams, diaphragms and shear walls. On the other hand, their non-structural role is as floor, wall or roof covering material. Wood-based panels are mainly used as non-structural elements, whose role is to transfer load to structural elements and increase overall stability of timber structures.

Low self-weight as well as good mechanical characteristics encouraged research in the field of structural use of wood-based panels applied in the architecture of both shell and shed structures. Design of these structures, made of wood-based panels contributes to minimizing material usage and more rational use of structure. Aiming to contribute to the field, only a few spatial structures were formed whose all structural elements were made of plywood and/or LVL. Withal, these materials represent covering material as well. Due to dimensional limitations of panels, above-mentioned structures created were formed of small length planar elements. Structural elements do not have predominantly axial stresses, but bending moments, which was possible by careful selection of timber as structural material used. All these structures were built for the sake of scientific research.

Therefore, what could be observed are limitations of span and carrying capacity of structures, as a result of panel joints, as well as structural characteristics of material applied.

Research in this field is encouraged by development of new materials and technologies, and their non-conventional application as a structural element of architectural object. Literature review of veneer-based panels use in architecture, as well as their application in other fields, indicated lack of their use as a structural element. The main reason is that these products do have very good characteristics when applied as non-structural elements, whilst insufficiently good for structural use. This observation initiated the idea for improving mechanical characteristics of veneer-based panels by integrating them with polymer-based materials. Establishing new composite with improved mechanical characteristics, mainly modulus of elasticity, flexural and shear strength, would lead to expansion of use of veneer-based products and possibilities of more complex structures design. Development of this composite would broaden possibilities of materials' selection used for structural elements and initiate more diverse architectural forms.

Polymer-based materials are used mainly for strengthening reinforced concrete elements, less for strengthening timber structures, and only with fewer information regarding their use for wood-based materials, plywood and LVL. Literature review in the field indicate a few experimental campaigns, published and discussed. The main aim of research carried out was finding the optimal method of veneer-based panel formation in order to improve their mechanical characteristics. Nevertheless, in spite of successful experimental research, this material was not applied in further research in architecture, nor possible ways of its implementation as structural element were investigated. This research aims to fill the gap identified and contribute to the possibilities of application of composite wood-based panels as structural element of architectural objects.

This doctoral thesis aims to investigate and analyze mechanical characteristics of composite panel materials, created by merging veneer-based panels with polymers reinforced with carbon and glass fibers, its advantages and limitations, and mainly to indicate possible uses of this composite as a structural element in exoskeleton architecture.

In the light of above-mentioned, experimental method will be used in order to verify possibilities for improvement of mechanical characteristics, decisive for their structural application. Mechanical characteristics obtained through experimental campaign will be further tested numerically, by creating 3D simulation models where possibilities and validity of material tested will be verified. Furthermore, above-mentioned 3D models will be created from both unreinforced and polymer-reinforced veneer-based panels, aiming to analyze and compare their stability and carrying capacity. Results obtained will be the main outcome of this doctoral thesis. Moreover, this experiment will shed the light on mechanical characteristics of veneer-based panels and their potential use in architecture. This research will represent the basis for further research in the field of veneer-based composite panels whose improved mechanical characteristics will expand possibilities of their use in architectural practice.

Key words: veneer-based panels, LVL panels, carbon fibers, reinforced LVL panels, mechanical characteristics, structural elements, spatial structures, 3D simulation model

Scientific field: Architecture and Urbanism

UDK: 674.812-419.3:624.001.1(043.3)

1. Увод	1
1.1 Проблем и предмет истраживања.....	4
1.2 Циљеви истраживања	4
1.3 Задаци истраживања	5
1.4 Полазне хипотезе	5
1.5 Научне методе истраживања	6
1.6 Научна оправданост и очекивани резултати истраживања	7
ЦЕЛИНА ПРВА.....	8
2. Плоче на бази фурнира	9
Настанак, развој и формирање.....	9
2.1 Композитни производи на бази дрвета, дефинисање и класификација	9
2.2 Фурнири	15
2.2.1 Историјски развој.....	15
2.2.2 Врста, класификација и техника израде фурнира.....	16
2.3 Плочасти производи на бази фурнира	19
2.3.1. Фурнирске плоче (PW)	19
2.3.2 Ламелирана фурнирска грађа (LVL)	37
3. Плоче на бази фурнира	49
Развој и примена у архитектури	49
3.1 Архитектура егзоскелета, дефиниција и појам	49
3.2 Примена плоча на бази фурнира у архитектури	51
3.2.1 Кровне, подне и зидне облоге.....	51
3.2.2 Елементи за укрућење - хоризонталне и вертикалне дијафрагме	54
3.2.3 Гредни елементи	62
3.2.4 Просторне структуре	65
3.3 Потенцијали примене плоча на бази фурнира у архитектури	87
4. Плоче на бази фурнира унапређених конструктивних карактеристика.....	91
Композитни производи на бази фурнира и полимера армираним влакнима.....	91
4.1 Полимери ојачани влакнима, дефиниција и појам	91
4.1.1 Саставни делови FRP композита.....	91
4.2 Композитни производи на бази фурнира и полимера армираним влакнима - приказ претходних истраживања	96
4.2.1 Плоче на бази фурнира + CFRP	98
4.2.2 Плоче на бази фурнира + GFRP.....	104

4.2.3	Плоче на бази фурнира и полимера армираног карбонским и стакленим влакнима (CFRP/GFRP).....	109
4.3	Упоредна анализа претходних истраживања	110
4.4	Адхезиви за носеће дрвене конструкције	114
4.4.1	Дефиниција, појам, настанак и развој.....	114
4.4.2	Врсте и класификације	115
4.4.3	Избор адхезива и апликација	123
4.4.4	Испитивање примене различитих врста адхезива у композитима на бази дрвета и FRP-а	126
ЦЕЛИНА ДРУГА		128
5. Експериментална анализа конструктивних карактеристика ојачаних плоча на бази фурнира		129
	LVL плоче ојачане полимерима армираним карбонским влакнима.....	129
5.1	Програм експерименталих истраживања	129
5.2	Испитивање физичких и механичких својстава адхезива.....	129
5.3	Дефинисање начина формирања контролних узорака и ојачаних LVL плоча	137
5.2.1	Физичка и механичка својства употребљених материјала	138
5.2.2	Композитне LVL плоче – испитивање ојачаних и неојачаних плоча.....	139
5.4.	Експериментално утврђивање физичких и механичких својстава композитног производа	155
5.4.1	Одређивање влажности дрвета	156
5.4.2	Одређивање смицајне чврстоће у равни плоче	157
5.4.3	Одређивање савојне чврстоће у равни плоче и модула еластичности при савијању	158
5.4.4	Одређивање чврстоће на смицање управно на раван плоче	160
5.4.5	Одређивање притисне чврстоће паралелно и управно на влакна спољашњих листова фурнира.....	162
5.4.6	Одређивање затезне чврстоће паралелно влакнима спољашњих листова фурнира.....	163
5.5	Приказ и интерпретација резултата експерименталног истраживања	164
5.5.1	Чврстоћа на смицање у равни плоче	164
5.5.2	Савојна чврстоћа у равни плоче и модул еластичности при савијању.....	176
5.5.3	Чврстоћа на смицање управно на раван плоче.....	192
5.5.4	Притисна чврстоћа у равни плоче	200
5.5.5	Затезна чврстоћа у равни плоче паралелно влакнима спољашњих листова фурнира.....	212
5.6	Дискусија резултата.....	219

6. Анализа могућности употребе ојачаних плоча на бази фурнира као носећег конструктивног елемента.....	225
Примена ојачаних LVL плоча као егзоскелета архитектонског објекта	225
6.1. Примена ојачаних плоча на бази фурнира у конструкцијама формираним од гредних елемената.....	227
6.1.1 Симулациони модел 1 – димензионисање егзоскелета применом ојачаног LVL-а	227
6.1.2 Симулациони модел 2 – димензионисање егзоскелета применом ојачаног LVL-а	239
6.1.3 Симулациони модел 2 – димензионисање егзоскелета применом неојачаног LVL-а	245
6.1.3 Дискусија резултата	251
7. Закључак.....	254
7.1 Дискусија	254
7.2 Закључна разматрања	259
7.3 Смернице за даља истраживања	260
ПРИЛОЗИ.....	261
Преглед ознака	306
Акроними.....	306
Симболи	307
Попис илустрација.....	309
Попис табела	319
Литература	324
Стандарди.....	331
Биографија	332
Изјава о ауторству	
Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада	
Изјава о коришћењу	

Дрво као грађевински материјал помиње се у најранијим списима о градитељској делатности човека и поред камена био је најзаступљенији материјал за грађење. Његова примена данас, упркос развоју савремених материјала попут армираног бетона и челика, и даље има велику примену у грађевинарству. Томе доприноси његова још увек лака доступност у физичком као и у финансијском погледу, лака обрада и велике могућности обликовања, добре физичке и механичке особине, првенствено мала запреминска тежина и велика чврстоћа у случају дејства силе у смеру паралелно влакнима, као и висок ниво естетских перформанси.¹ Обновљивост дрвне сировине и карактеристика биоразградивости чине овај производ још конкурентнијим у будућности, а првенствено у контексту заштите животне средине и парадигме енергетске ефикасности и одрживости.

Смањење резерве и велика ограничења у доступности стабала, као и дугачак временски период потребан за њихово обнављање могу се негативно одразити на градитељство. У погледу примене дрвета у грађевинским конструкцијама постоје ограничења материјала условљена његовом анизотропношћу, као и варијабилношћу карактеристика носивости изазваном присуством природних грешака у структури дрвета. Како би се проблеми ове врсте умањили, приступило се дугогодишњем и континуираном развоју производа на бази дрвета, који је подстакнут технолошким развојем и новим тржишним захтевима. Данас из дрвета као основног материјала произилази велики број производа на бази дрвета, а чије су предности рационалнија примена дрвне сировине и формирање производа чија својства могу бити пројектована, унапред планирана уз побољшање одређених физичких и механичких особина.

Постоје различите врсте плоча на бази дрвета, од чега је у архитектури посебно значајна конструктивна композитна грађа формирана од слојева фурнира: фурнирске плоче (plywood - PW) и ламелирана фурнирска грађа (енгл. laminated veneer lumber - LVL). Фурнирске плоче представљају један од квалитетнијих слојевитих композита на бази дрвета настале лепљењем слојева фурнира у међусобној оријентацији влакана под углом од 90°. У поређењу са плочама од пуног дрвета основна и најважнија предност фурнирских плоча је што су физичке и механичке карактеристике плоче у подужном и попречном правцу прилично једнаке, при чему је смањена могућност цепања плоче, и омогућена је израда плоча већих димензија. Наизменична оријентација слојева фурнира резултира приближно једнакој крутости и димензионалној стабилности плоче у оба њена правца – подужном и попречном, чиме су механичка својства, првенствено чврстоћа на притисак, затезање и крутост плоче приближне у оба њена правца.² Поред слојевитих композита насталих спајањем слојева фурнира управне оријентације влакана (фурнирских плоча), јављају се и композитни производи настали спајањем фурнира са паралелном оријентацијом влакана (ламелирана фурнирска грађа - LVL). Лепљењем слојева фурнира са паралелном оријентацијом влакана у лонгитудиналном правцу, или до 20% слојева фурнира попречно оријентисаних, најчешће уз помоћ фенол-формалдехидног везива, добијамо ламелирану фурнирску грађу - LVL.³ Предност производа насталих на неки од ова два начина је могућност стварања високих и дугих елемената велике чврстоће. Њихова све већа примена у грађевинској индустрији резултат је могућности примене дебла (трупаца) смањеног обима и потребе за формирањем елемената већих дужина.

¹ Milan Gojković i Dragoslav Stojić, *Drvene konstrukcije* (Beograd: Građevinski fakultet: Grosknjiga, 1996).

² John A. Youngquist, „Wood-Based Composites and Panel Products“ у *Wood Handbook - Wood as an Engineering Material*, уредник Forest Product Laboratory (Ontario: Algrove Publishing, 2002), 207-238.

³ Štefo Šorn, „LVL kao mogućnost supstitucije masivnog drveta“, *Prerada drveta* br.13(2006): 23-28.

Предност композитних плоча на бази дрвета огледа се у њиховој димензионалној стабилности, односно знатно смањеном утезању и бубрењу плоче у подужном и попречном правцу у односу на плочу од пуног дрвета, што је директно резултат начина њиховог формирања и оријентације влакана у слојевима плоче. Унакрсним постављањем слојева фурнира спречава се померање и деформација појединачних слојева у равни плоче, лонгитудиналана оријентација влакана једног листа фурнира спречава тангенцијалне промене њему управног листа.⁴ Утезање и бубрење фурнирске плоче кроз њену трећу димензију, дебљину плоче, исто је као и код плоче од пуног дрвета. Структура плоче пружа добру могућност при остварењу веза помоћу вијака или ексера, где је могућност цепања плоче дуж влакана смањена унакрсном оријентацијом влакана у међуслојевима. Мала сопствена тежина фурнирске плоче (4.40-7.60 kN/m³) и висока специфична чврстоћа материјала представљају велику предност и из тог разлога оне су веома заступљене у грађевинарству.⁵

Примена плоча на бази фурнира у архитектури може бити конструктивна и неконструктивна. Конструктивна примена огледа се у могућности примене фурнирских плоча за пријем гравитационог оптерећења и оптерећења од нормалних сила (латералног оптерећења) и као такве најчешће се користе као дијафрагме или зидови за укрућење. Овакви елементи доминантно су изложени напонима смицања под утицајем оптерећења у равни плоче, при чему се у случају прекорачења напона деформације јављају кроз цео попречни пресек плоче. Плочасти материјали на бази дрвета најчешће се примењују као неконструктивна грађа за секундарне елементе конструкције који служе за прихватање оптерећења и пренос на носеће конструктивне елементе, или за укрућење дрвених структура.

Мала сопствена тежина и добре механичке карактеристике подстакле су испитивање могућности шире примене плочастих производа на бази дрвета, као носећег елемента конструкције у архитектури егзоскелета, где носећа конструкција постаје спољна структура објекта. Формирање оваквих структура од плоча на бази дрвета доприноси уштеди материјала и рационалном коришћењу конструкције. У циљу истраживања примене фурнирских и LVL плоча и формирања просторних структура од лаких материјала у свету је формирано свега неколико архитектонских структура код којих примењене плоче представљају једини конструктивни елемент који чини како конструкцију и омотач објекта. Овакви објекти пројектују се као просторне структуре – љуске или набори, код којих су примарни конструктивни елементи површински. Сви до сада формиран објекти су павиљонског карактера, реализовани у циљу истраживања и на њима се могу приметити ограничења у распонима и у погледу носивости читавих структура, што је последица како веза између плоча, тако и конструктивних карактеристика плоча на бази дрвета.

Неједнаке конструктивне карактеристике панела у два правца могу бити недостатак конструкције са површинским преношењем оптерећења, односно у конструктивној примени фурнирских плоча као носећег елемента у просторним структурама. Простор за унапређење ових истраживања огледа се у могућности примене унапређеног материјала побољшаних конструктивних карактеристика, код кога су готово уједначене физичко-механичке карактеристике елемената у оба правца. Технике ојачања фурнирске плоче, у циљу њене примене као елемента конструкције спомињу се први пут 1970-их година, када АПА (American Plywood Association) спроводи прва испитивања ојачања фурнирске плоче полимерима армираним стакленим влакнима.⁶

Полимерни материјали армирани влакнима (Fiber Reinforced Polymer – FRP) представљају релативно нову класу композитних материјала насталих комбинацијом

⁴ J.C.F. Walker, „Wood panels: plywoods.“ у *Primary wood processing: principles and practice*, аутор J.C.P. Walker, B.G. коаутор: Butterfield, T.A.G. Langrish, J.M. Harris и J.M. Uprichard (London: Chapman & Hall, 1993), 377-416.

⁵ Thomas E. McLain, „Structural Wood Panels.“ у *Wood engineering and construction handbook*, уредник Keith F. Farherty и Thomas G. Williamson (New York: McGRAW-HILL, INC, 1999.)

⁶ William M. Bulleit, „Reinforcement of wood materials: A review“, *Wood and Fiber Science* (1984): 391-397.

полимерне матрице која се понаша као везиво и доприноси дуктилности и жилавости влакана (стаклених, карбонских или араמידних) који преузимају већи део оптерећења повереног композитном елементу. Ојачање дрвених конструктивних елемената синтетичким материјалима на бази полимера у циљу побољшања њихових механичких карактеристика тема је великог броја истраживања још од 1960. године. Пионирима идеје ојачање дрвене грађе полимерним материјалима сматрају се Вангад 1964. (Wangaard F.F.) и Библис 1965. (Biblis E.J.) који су прва ојачања дрвета полимерним материјалима испитивали употребом полимера армираног стакленим влакнима (Glass Fiber Reinforced Polymer - GFRP).⁷

Крајем 1990-их и почетком 2000-их година полимери армирани влакнима (FRP) постају више економски доступни на светском тржишту, чиме се подстичу нова истраживања у овој области. Данас се полимери армирани влакнима могу наћи на тржишту као готови фабрички производи, најчешће са влакнима оријентисаним у једном правцу (траке) или у два правца (тканине). Траке-ламинати прихватају оптерећења у подужном правцу, тј. у правцу свог пружања, те на тај начин имају оптималну чврстоћу и крутост која зависи од уграђене количине влакана, док тканине прихватају оптерећење у више праваца, у зависности од правца пружања влакана. Досадашња истраживања у области ојачања дрвених конструкција полимерима армираним влакнима у највећем броју усмерена су првенствено ка ојачању конструктивних елемената од монолитног дрвета апликацијом FRP-а, чиме се примарно испитују ојачања конструкције на савијање, смицање и затезање управно на влакна. Поред поменутих истраживања, у нешто мањем броју постоје и она чији је предмет испитивање конструктивних карактеристика ојачаних композитних производа на бази пуног дрвета, првенствено ламелираних дрвених носача.

Мали број истраживања усмерен је на ојачања композитних производа на бази дрвета полимерима армираним влакнима, а нарочито ојачање слојевитих плоча од дрвета. Постојећа истраживања која анализирају тему ојачања плоча на бази фурнира (фурнирске плоче и LVL), могу се класификовати у две групе истраживања. Прва група представља она истраживања која се базирају на испитивању адхезива и везивних материјала који се могу користити како у формирању ламелиране дрвене грађе, тако и у ламелираној конструктивној грађи ојачаној материјалима на бази полимера армираног влакнима. Друга група базира се на истраживању механичких својстава ојачаних композитних елемената, која се могу поделити на истраживања ојачањем полимерима армираним карбонским влакнима и стакленим влакнима.

Својства ојачаних плоча на бази фурнира зависе од више услова: врсте синтетичких влакана употребљених за ојачање, оријентација синтетичких влакана у плочи, количине синтетичких влакана, броја слојева влакана и њиховог положаја у плочи, врсте примењеног фурнира, броја слојева фурнира, оријентација слојева фурнира, употребљених адхезива итд. Ојачање плоче на бази дрвета може се реализовати карбонским или стакленим влакнима и то: у једном правцу - тракама-ламинатима и у два и више праваца - тканином. Постављање ојачања може се вршити по спољним слојевима плоче, у унутрашњим сљубницама између фурнира или њиховом комбинацијом. Предност ојачања плоча на бази фурнира путем полимера армираног влакнима су добре механичке особине влакана које утичу на побољшање конструктивних карактеристика плоча, као и њихова веома мала димензија попречног пресека, те се ојачање постиже формирањем изузетно танких композитних слојева ($\approx 0,2$ mm). Овај производ и поред успешних експерименталних истраживања није даље развијан применом у архитектури, нити су испитивани начини његове имплементације као носећег елемента конструкције, те у том смислу ова област није до сада довољно истражена и постоји простор за даља истраживања и унапређења овог материјала.

⁷ исто, 391-397.

1.1 Проблем и предмет истраживања

Примена полимера армираног влакнима за ојачање конструктивних елемената, а посебно елемената дрвених конструкција захтева посебну пажњу. Веома је важно одредити најбољу позицију и положај фурнирске плоче као конструктивног елемента у конструктивном склопу како би се извршио адекватни метод ојачања фурнирске плоче и тиме утицало на побољшање одређене носивости конструктивног елемента. У зависности од положаја постављања ојачања и позиционирања FRP-а у одређени положај у конструкцији плоче може се утицати на побољшање одређених механичких својстава конструктивног елемента архитектонских објеката. Битан је правилан одабир композитног материјала којим ће се вршити ојачање, односно адекватан избор FRP елемента. FRP елементи се на тржишту могу наћи у облику трака - ламина или у облику мрежа – тканина, осим наведеног могу се лабораторијски направити са различитом оријентацијом влакана, што неће бити предмет овог истраживања. Из свега наведеног, избор методе и материјала ојачања у директној вези су са анализом конструктивних карактеристика које један елемент треба да задовољи, како би постао носећи елемент конструктивног склопа.

Предмет истраживања у оквиру овог рада представља истраживање могућности формирања композитних плоча на бази фурнира ојачаним полимерима армираним стакленим или карбонским влакнима (C/G FRP), односно испитивање могућности примене овог материјала у формирању конструктивних елемената у архитектонским објектима. Посебна пажња усмерена је на утврђивање ефикасне методе ојачања и адекватног избора примењених материјала како би се добио производ чије су физичке и механичке особине знатно унапређене у односу на неојачану плочу на бази фурнира, а који би могао да преузме конструктивну улогу у архитектури. Након формирања узорака, испитивања су усмерена на анализу понашања ојачаних плоча на бази фурнира при савијању и смицању.

Проблем истраживања представља дефинисање конструктивних карактеристика новог материјала, као и истраживања његових могућности и ограничења приликом примене у формирању елемената примарне конструкције у конструктивном склопу (плоче у конструкцијама са просторним преношењем оптерећења – љуске и набори, површинског или линијског елемента скелетних конструкција). Нове могућности примене испитане су нумеричком анализом кроз симулационе моделе.

1.2 Циљеви истраживања

На основу наведених разлога за истраживање проблематике о примени плоча на бази фурнира ојачаних полимерима армираним влакнима, основни научни циљеви истраживања у оквиру овог рада су проширивање сазнања о могућностима и ограничењима примене новог композитног материјала приликом формирања елемената конструкције. Циљ је унапређење пројектантских решења и слобода реализације конструкција афирмацијом поменутих материјала у формирању конструктивних елемената, првенствено носећих елемената архитектонских структура.

Циљ истраживања је да се експериментално испитају и анализирају механичке особине композитног плочастог материјала формираног ламелирањем фурнира са полимерима армираним карбонским влакнима, а првенствено да се укаже на могућности његове примене као конструктивног елемента носеће опне у виду љуске или набора, егзоскелета архитектонских објеката. Поред наведеног, циљ тезе је афирмација новог композитног материјала унапређених конструктивних карактеристика и испитивање нове могућности њихове примене у архитектури. Циљ рада је да се укаже на потенцијале употребе овог материјала у реализацији објеката. Сви циљеви у оквиру рада су у складу научног сазнања.

1.3 Задаци истраживања

Задаци истраживања дефинисани су на основу претходно идентификованих проблема и утврђених циљева истраживања и груписани су према целинама истраживања, а то су:

I Утврђивање начина примене плоча на бази фурнира у архитектури и могућности унапређења њених конструктивних карактеристика:

- I.1 Прикупљање и систематизација релевантних извора о предмету рада, конструктивним карактеристикама плоча на бази фурнира и анализа начина њихове примене као елемента конструкције у архитектури, дефинисање предности и недостатака.
- I.2 Анализа материјала који учествују у формирању композитног производа - фурнира, адхезива и FRP-а како би се извршио преглед могућности и начина унапређења конструктивних карактеристика плоча на бази фурнира у циљу њихове примене као примарног елемента конструкције у архитектури.
- I.3 Приказ претходних истраживања у овој области са анализом конструктивних карактеристика формираног композитног материјала, помоћу којих ће се уочити недостаци у резултатима претходних истраживања и унапредити у даљем експерименталном испитивању.

II Експериментална анализа конструктивних карактеристика ојачаних плоча на бази фурнира:

- II.1 Дефинисање начина формирања узорака за експериментално утврђивање карактеристика композитног материјала.
- II.2 Експериментално утврђивање конструктивних карактеристика новоформираног материјала - анализа савојне чврстоће у слоју плоче и управно на слој плоче, анализа чврстоће на смицање у слоју лепка и управно на плочу.
- II.3 Прикази и евалуација резултата добијених експерименталним испитивањем механичких карактеристика материјала и њихова нумеричка анализа. Утврђивање степена побољшања носивости и крутости ојачаних плоча на бази фурнира у односу на неојачане и формирање прегледа резултата испитивања (табеле и графикони).

III Истраживање, анализа и доношење закључака о могућности примене плоча формираних од фурнира ојачаних полимерима армираним влакнима у архитектури:

- III.1 Развој симулационог нумеричког и просторног модела архитектонског објекта за испитивање и анализу понашања ојачаних носача.
- III.2 Анализа могућности примене испитаног материјала као конструктивног елемента архитектонских објеката.
- III.3 Утврђивање предности и недостатака испитаног материјала као и доношење закључака и дефинисање смерница за његову даљу примену и унапређење приликом формирања конструктивних елемената архитектонских објеката.

1.4 Полазне хипотезе

Полазећи од методолошки исправног става - да је хипотеза условљена предметом истраживања, пре свега научним циљем, садржај хипотезе се заснива на анализи претходних истраживања и претходно дефинисаном предмету и проблему истраживања.

Основна хипотеза истраживања је да се ојачањем плоча на бази фурнира уметањем полимера армираним влакнима побољшавају механичке карактеристике плоча на бази фурнира, те да се она као таква може користити као примарни конструктивни елемент

архитектонских објеката. Поред наведеног, дефинише се и да се побољшање чврстоће на смицање ојачаних плоча може остварити постављањем ојачања у два правца.

Секундарна хипотеза истраживања дефинише да плоча на бази фурнира ојачана полимерима армираним влакнима може бити једини носећи елемент у форми егзоскелета у архитектонском склопу.

1.5 Научне методе истраживања

За истраживање у оквиру тезе која се односи на анализу конструктивних карактеристика и могућности примене композитних плоча формианих од фурнира и полимера армираним влакнима, а у циљу провере постављених хипотеза, примењене су следеће методе истраживања:

- У првом делу рада који дефинише коришћене материјале за формирање новог композитног материјала као и анализу претходних истраживања у овој области примењује се *теоријско истраживање засновано на анализи* садржаја научне и стручне литературе. У овом делу истражују се начини употребе плоча на бази фурнира у архитектонским конструкцијама, њихове предности и недостаци, као и могућности ојачања у циљу побољшања њихових механичких карактеристика. На основу података прикупљених из литературе врши се упоредна анализа конструктивних карактеристика класичних плоча на бази фурнира и композитних плоча од фурнира и полимера ојачаних влакнима. Овим се уочавају недостаци и дефинишу начини формирања епрувета за даља експериментална истраживања.
- У другом делу рада *експерименталним лабораторијским испитивањима* утврђују се физичке и механичке особине новог композитног производа. У овом делу успоставља се методологија за начине ојачања плоча на бази фурнира у зависности од потреба за побољшањем одређених конструктивних карактеристика. *Компаративном анализом* резултата добијених испитивањем ојачаних и неојачаних плоча на бази фурнира врши се нумеричка анализа и евалуација добијених резултата. Добијени резултати примењују се у даљем испитивању тестираног материјала као елемента структуре.
- У трећем делу рада предвиђа се испитивање материјала кроз два модела истраживања. Први модел подразумева *симулациони нумерички модел* архитектонске просторне структуре, кроз који се анализирају утицаји и понашања конструктивних елемената формианих од ојачаних плоча на бази фурнира. Другим моделом испитују се конструктивне карактеристике материјала, стабилност и понашање структуре употребом *симулационог просторног модела*. Анализом понашања симулационих модела испитују се погодности примене тестираног материјала у различитим архитектонским конструкцијама, као површински носећи елемент љуски и набора, или као линијски гредни елементи. Међусобним поређењем добијених резултата доносе се закључци и препоруке о могућностима и начинима примене ојачаних плоча на бази дрвета као конструктивног елемента архитектонских објеката.

Резултати истраживања о могућности употребе композитних материјала на бази фурнира и полимера армираног влакнима приликом формирања конструктивних елемената архитектонских објеката приказују се кроз синтезу сазнања, тј. кроз сумирање и интерпретацију претходних сазнања и резултата као и нових сазнања до којих се дошло испитивањем у оквиру овог научног рада.

1.6 Научна оправданост и очекивани резултати истраживања

Истраживање се односи на проблематику могућности формирања новог композитног материјала и оправданост његове примене као носећег елемента конструктивног склопа, а тиме и архитектонског објекта у целини, чиме је ово истраживање научно и друштвено оправдано.

Основни допринос истраживања огледа се у дефинисању начина формирања плочастог композитног производа на бази фурнира и полимера армираног влакнима, са додатно побољшаним механичким особинама на савијање у равни плоче и смицање управно на раван плоче. Други допринос истраживања представља проширивање производног асортимана грађевинских материјала који се могу користити у пројектовању и реализацији архитектонских структура што доприноси привредном развоју.

Резултати истраживања су значајни за дрвну индустрију и процес производње производа на бази дрвета у економској исплативости и рационалнијем коришћењу дрвних резерви. Предност овог композитног производа огледа се у коришћењу технички слабијег дрвета чиме се омогућава ефикаснија употреба дрвних сировина и његова већа искоришћеност. Овим се омогућава ефикаснија употреба дрвних сировина, а да се при томе добије производ уједначеног квалитета и бољих физичких и механичких карактеристика од првобитног дрвета од кога је настао, што представља економски и еколошки допринос.

У другом делу рада резултати истраживања настали кроз испитивање конструктивних карактеристика материјала у архитектонским структурама приказују се кроз дефинисање смерница и препорука за пројектовање и грађење архитектонских објеката применом новодобијеног композитног материјала. Овакви резултати подразумевају подстицај и афирмацију за унапређење и примену композитних материјала у архитектонској пракси.

Научни допринос и очекивани резултати су следећи:

- систематизација до сада стечених знања у овој области,
- идентификација и објашњење свих чинилаца који дефинишу квалитет композитног материјала на бази фурнира и полимера армираног влакнима (FRP-a),
- систематизација и класификација свих релевантних анализираних података који су у функцији добијања смерница за побољшање механичких особина плоча на бази фурнира,
- побољшање механичких особина плоча на бази фурнира у циљу њихове примене као носећег елемента конструктивног склопа,
- успостављање методологије за начине ојачања плоча на бази фурнира у зависности од потреба за побољшањем одређених конструктивних карактеристика,
- дефинисање могућности, ограничења, принципа и препорука за примену новог композитног материјала као носећег елемента конструкције архитектонских објеката,
- могућност примене стечених знања у области архитектонског пројектовања и архитектонског конструкторства,
- сагледавање могућности и постављање смерница за даља истраживања у овој области.

ЦЕЛИНА ПРВА

Плоче на бази фурнира

2. Плоче на бази фурнира

Настанак, развој и формирање

2.1 Композитни производи на бази дрвета, дефинисање и класификација

Технологије прераде дрвета своје најраније трагове бележе у древном Египту, где су ручно сечени танки листови ретких врста дрвета - фурнири, употребљавани за облагање намештаја произведеног од локалне врсте дрвета. Поред Египћана међу првима фурнирску плочу правили су и у древној Кини⁸. Ипак, композитни производи какве ми данас познајемо, настају тек крајем XIX и почетком XX века, када долази до развоја машина, алата и целокупне технологије прераде дрвета. Из потреба да се достигне значајно квантитативно и квалитативно искоришћење дрвне сировине последњих деценија значајно је унапређена технологија прераде дрвета, а самим тим развијени и иновативни композитни дрвни производи, који примену имају како у различитим гранама индустрије, тако и у грађевинарству.

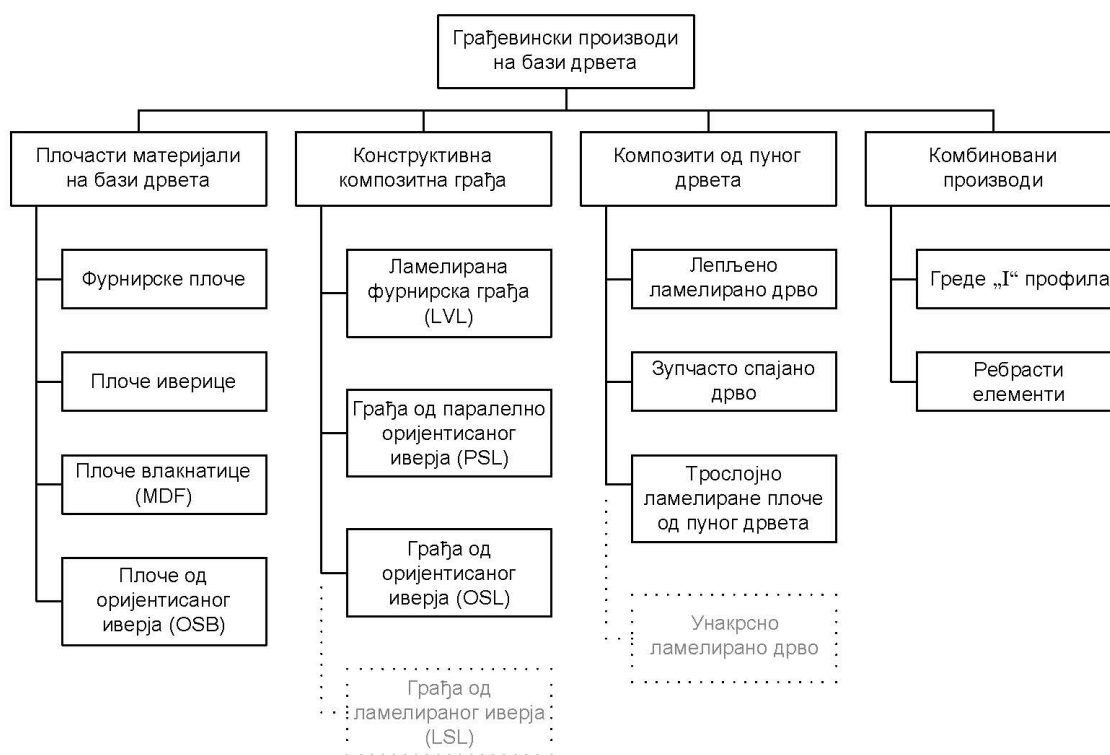
Према дефиницији коју успостављају Барбу, Рех и Ирл (Barbu, M., Reh, R., Irle, M.) композитни производи на бази дрвета су плочасти производи од материјала на бази лигноцелулозе, специјално произведени за индустријску употребу као делови намештаја, за употребу у грађевинарству као зидна облога, преграда, језгро или облога врата и сл. и за конструктивну употребу на оним местима где њихова димензија, дебљина и механичке карактеристике могу да задовоље потребне захтеве.⁹ С обзиром да дрвна индустрија тежи да развије што већи спектар производа на бази дрвета како би се на најрационалнији начин искористила дрвна сировина и на тај начин смањила експлоатација дрвног ресурса, композитни производи се формирају и у виду других елемената, а не само у виду плочастих материјала. Стога под појмом композитни производ на бази дрвета можемо сматрати све производе од дрвета чији су саставни делови међусобно спојени лепљењем.

Најсистематичнију класификацију композитних производа на бази дрвета који примену имају у грађевинарству постављају Бодиг и Џејн (Bodig J., Jayne A.B.)¹⁰, класификујући композитне на бази дрвета у четири категорије, на основу врсте материјала за израду композита, њихових димензија и начина услојавања (сл.1). Како би се направила потпуна систематизација, подела је допуњена са два производа који нису били обухваћени – *грађа од ламелираног иверја* (Laminated Strand Lumber - LSL) и *унакрсно ламелирано дрво* (Cross-laminated timber – CLT), а чија се интензивнија примена може уочити у грађевинској индустрији у последње две деценије.

⁸ Borch I., Keuning D, etc., *Skins for Buildings*, BIS Publishers, Amsterdam, 2004., стр. 90.

⁹ Marius C. Barbu, Roman Reh, Mark Irle, „Wood-Based Composites“ у *Research Developments in Wood Engineering and Technology*, ед. Alfredo Aguilera, J. Paulo Davim (Hershey PA: Engineering Science Reference, 2014), 2.

¹⁰ J. Bodig, & B. A. Jayne, *Mechanics of wood and wood composites* (New York: Van Nostradam Reinhold Company Publisher, 1982)., цитирано код Marius Barbu, Roman C. Reh, и Mark Irle, „Wood-Based Composites“ у *Research Developments in Wood Engineering and Technology*, ед. Alfredo Aguilera, J. Paulo Davim (Hershey PA: Engineering Science Reference, 2014), 13.



Слика 1. Грађевински производи на бази дрвета¹¹

Плочасти материјали на бази дрвета представљају композитне производе добијене међусобним лепљењем мањих комада дрвета (фурнира, иверја, дрвних влакана), синтетичким адхезивима, при чему настају фурнирске плоче, плоче иверице или плоче влакнатице. Код ових производа су основни недостаци дрвета, који се могу приметити у монолитној грађи, знатно умањени и грешке дрвета су распоређене кроз плочу или елиминисане у производњи, смањена је варијабилност у карактеристикама, уједначеније су механичке карактеристике производа у подужном и попречном правцу, а димензије производа су теоретски неограничене, односно условљене су алатима и техникама производње.¹²

Прве композитне плоче настају тек крајем XIX века, од остатака дрвета током обраде, међусобно спајаних лепком на бази албумина (природни лепкови животињског порекла, добијани из крви) и пресованих на високим температурама.¹³ Даљи развој и унапређење плоча искључиво је био у вези са развојем технологије обраде дрвета, а за формирање производа употребљавани су лепкови на природној бази. Прекретницом у развоју композитних производа може се сматрати 1934. година, када долази до проналаска синтетичких адхезива уреа-формалдехида и фенол-формалдехида. Композитне плоче улазе у ширу примену тек

¹¹ Илустрација према истраживању аутора, преведено и допуњено. Преузето из J. Bodig, & Jayne, B. A. *Mechanics of wood and wood composites*. New York: Van Nostrand Reinhold Company Publisher, 1982. цитирано код Barbu, Marius C., Reh, Roman, и Mark Irle, „Wood-Based Composites“ у *Research Developments in Wood Engineering and Technology*, ед. Alfredo Aguilera, J. Paulo Davim (Hershey PA: Engineering Science Reference, 2014), 13.

¹² H.E. Desch и J.M. Dinwoodie, *Timber, Structure, Properties, Conversion and Use* (London: Macmillan Press Ltd, 1996).

¹³ Прва композитна плоча на бази дрвета, названа „вештачко дрво“ направљена је у Немачкој, 1887. године, када је Хабард (Hubbard) помоћу лепка на бази албумина спојио отпад од прераде дрвета, у виду иверја, а потом га пресовао на високим температурама.

Irle Mark и Marius C. Barbu, „Wood-Based Panel Technology“ у *Wood-Based Panels - An Introduction for Specialists*, ед. H. Thoemen, M. Irle, M. Sernek (London: Brunel University Press, 2010.), 84-85.

након Другог светског рата, када је дошло до унапређења технологије сечења дрвне грађе и развоја синтетичких адхезива, те је тиме омогућена њихова индустријска производња.¹⁴

Конструктивна композитна грађа је заједнички назив за грађу добијену слојевитим лепљењем фурнира или крупнијег иверја помоћу синтетичких адхезива. Ламелирана фурнирска грађа и грађа од паралелно оријентисаног иверја (parallel strand lumber – PSL) су композитни производи формирани постављањем листова фурнира или иверја тако да је оријентација влакана у листовима увек паралелна подужној оси производа. Карактеристика ових производа је што се формирају од дугих листова фурнира (LVL, PSL) или делова фурнирског плашта који не мора имати пуну ширину (PSL) и код којих је укупна дебљина знатно мања од ширине и дужине, и креће се до 7.5 mm¹⁵. LVL композитна грађа патентирана је 1936. године у Швајцарској за формирање конструктивних елемената, а своју највећу примену налази у потребама авио-индустрије¹⁶. LVL је прво направљен за пропелере за авионе и друге летелице у току Другог светског рата, а његова примена у грађевинарству је доживела експанзију 70-их година XX века¹⁷. Данас се користи као изузетно јака компонента за разне типове конструкција.

Технологија производње грађе од ламелираног иверја и грађа од оријентисаног иверја, као и сам производ веома су слични плочама од оријентисаног иверја (OSB), а основна разлика је у димензији иверја које улази у производњу. Иверје које се употребљава за производњу OSB и LSL композитне грађе знатно је већих димензија од оног употребљеног за производњу OSB плоча, те се њихова употреба огледа на местима која захтевају висока механичка својства.¹⁸

Композити од пуног дрвета је заједнички назив за лепљено ламелирано дрво и унакрсно ламелирано дрво, формирано међусобним лепљењем дрвених ламела, код првог паралелно оријентисаних, док је код другог оријентација ламела унакрсна, под углом од 90°. Унакрсно ламелирано дрво индустријски је производ новијег датума, док идеја за настанак композитног производа који је претеча лепљеног ламелираног дрвета датира из 1928. године - Француска, када је Еми (Ему, А.Р.) формирао лучне структуре механичким повезивањем ламела помоћу стега и вијака, и на тај начин формирао један носач.¹⁹ Ипак, први патент ламелираног носача везује се за 1906. годину, када је немачки столар Ото Хецер (Karl Friedrich Otto Hetzer) из Вајмара формирао ламелирани лучни носач помоћу казеинског лепка, добијеног из крављег млека, са додатком минералних елемената.²⁰ Савремена технологија производње лепљеног ламелираног дрвета и његова шира примена подстакнута је развојем фенол-резорцинолног адхезива, 1942. године.

Истраживање у оквиру овог рада усмериће се на анализу механичких карактеристика плоча на бази фурнира, њихову примену у архитектури, као и потребе за њиховим ојачањем а у циљу примене као примарног конструктивног елемента. Фурнирске плоче, као и остали композити на бази дрвета имају дугогодишњу и континуирану линију развоја, која се, како је већ претходно уочено, може пратити кроз неколико праваца. Први правац развоја ових производа условљен је првенствено константним усавршавањем техника сечења и љуштења

¹⁴ Исто, 85.

¹⁵ Р. М. Sretenović, „Утицај потражње композитних производа од дрвета у Европи на тржиште дрвених производа у Србији.“, (докtorsка дисертација, Универзитет у Београду: Шумарски факултет, 2015), 9-15.

¹⁶ Irle Mark и Marius C. Barbu, „Wood-Based Panel Technology“ у *Wood-Based Panels - An Introduction for Specialists*, ed. H. Thoemen, M. Irle, M. Sernek (London: Brunel University Press, 2010.), 86.

¹⁷ Matilda McQuaid, *Shigeru Ban*, Phaidon Press Limited, London, 2005., стр. 90.

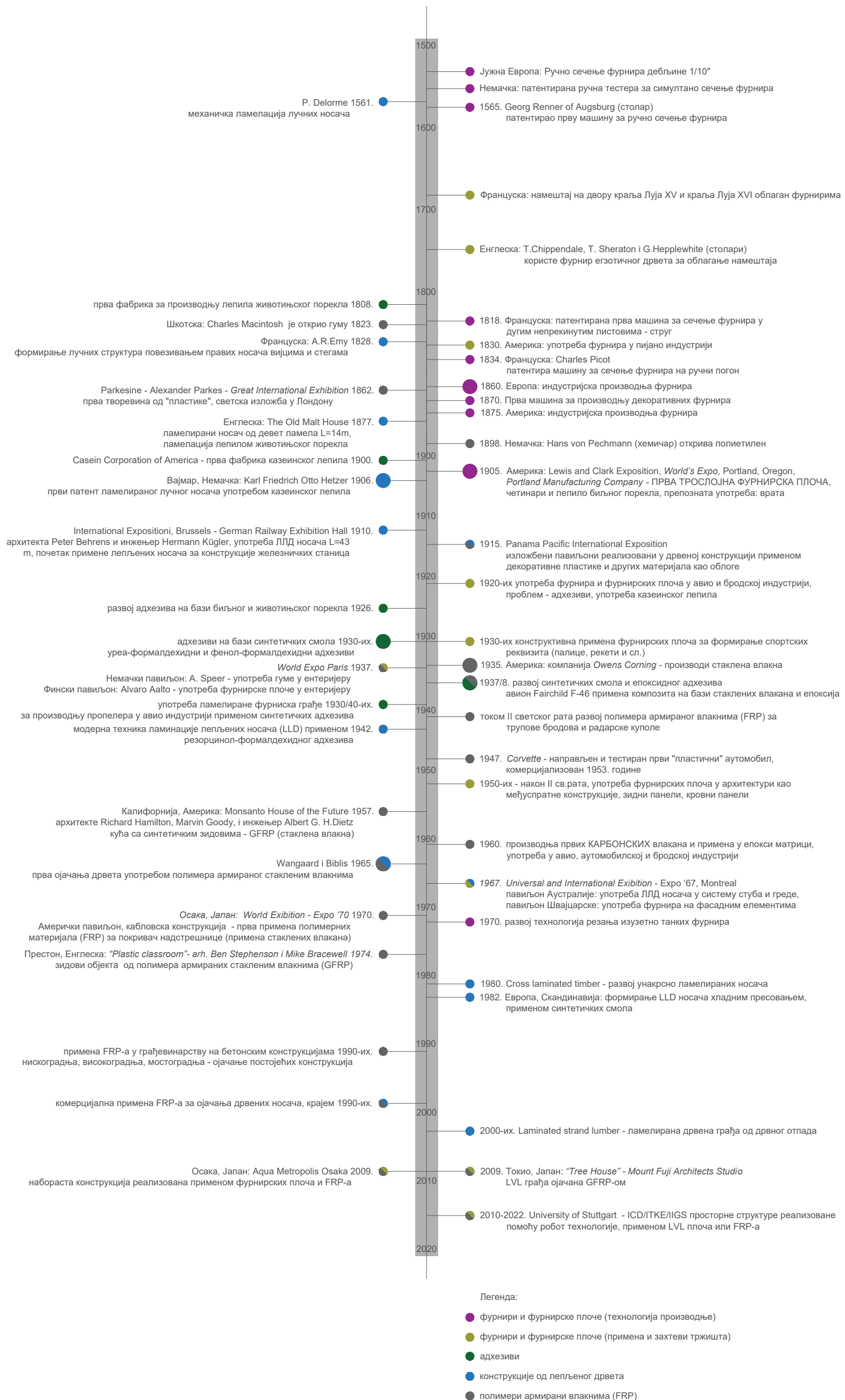
¹⁸ Р. М. Sretenović, „Утицај потражње композитних производа од дрвета у Европи на тржиште дрвених производа у Србији.“, (докtorsка дисертација, Универзитет у Београду: Шумарски факултет, 2015), 9-15.

¹⁹ Alessandra, Mongelli, „A New Wood Roofing System Marac's Barracks and Colonel Armand Rose Emy's Innovation System“, *Proceedings of the Second International Congress on Construction History* (Exeter, UK: Short Run Press, 2006.) 2241-2260.

²⁰ Renate Preising, „Otto Hetzer - Pionier des Holzleimbau. Ein Patent wird 100 Jahre alt“, *Bauen mit Holz* 108/6 (2006): 34-36.

фурнира које су самим тим донеле велики допринос самом процесу и производној технологији слојевитих плоча. Други правац у директној је вези са развојем адхезивних материјала који су се кроз историју примењивали у дрвној индустрији, а чији се значајан допринос огледа у побољшању квалитета физичких и механичких особина слојевитих плоча. Трећи правац развоја производа је његова условљеност врстом, квалитетом и доступношћу дрвне сировине која је примарни чинилац производа. Док четврти, и не мање битан правац развоја, представља константну потребу тржишта за што бољим перформансама плоча ради њихове шире примене. Међусобна зависност и веза четири поменути чиниоца, као и производи који су настајали њиховом применом, хронолошки су приказани на слици 2.

Слика 2. Хронолошки развој плоча на бази фурнира и композитних плоча на бази фурнира



2.2.1 Историјски развој

Фурнири представљају танке листове дрвета дебљине од 0.3 до 6 mm који се специјалним процесима механичке обраде добијају резањем облице. Претпоставља се да употреба фурнира датира од 3000 година пре нове ере. Најранији трагови прераде дрвета у виду фурнира пронађени су у гробницама Египатских фараона, међу којима и Тутанкамонова гробница у којој је његов трон ламелиран листовима фурнира. Бележи се и да је краљица Клеопатра VII као дар Гај Јулију Цезару поклонила сто пресвучен фурниром.²¹ Египћани су још у то време дрво сматрали за ретку сировину, коју су изузетно ценили због његових естетских карактеристика, а употребљавали су листове фурнира ретких врста дрвета за облагање намештаја произведеног од локалне врсте дрвета или других материјала.

Током дуге историје већих помака у унапређењу технологије сечења и примене фурнира, готово да није ни било. Ренесансни период подстиче развој различитих уметничких дисциплина, те оживљава употребу фурнира у уметничком раду, на исти начин као и раније, ламелирањем намештаја произведеног од лошије врсте дрвета. Током друге половине XVI века у Немачкој долази до унапређења у области технологије сечења фурнира, те се 1562. године патентира ручна тестера за симултано сечење, а 1565. Џорџ Рена (George Renner) из Нинберга, патентира машину за механичко сечење фурнира на водени погон. Ова машина имала је могућност сечења фурнира у дебљини 3 mm. XVII и XVIII век обележила је употреба фурнира за производњу скупогеног намештаја у Италији и Француској, што је посебно видљиво на комадима намештаја који су произведени за француски двор у време владавине краља Луја XV и краља Луја XVI, а чији се примерци и данас чувају у музеју Лувр у Паризу.²² Средином XIX века обележила је интензивна примена фурнира у пијано индустрији, како на тлу Европе, тако и у Америци.

Ручна производња фурнира сечењем, примењивала се све до 1818. године када је у Француској патентирана прва машина за сечење фурнира у дугим непрекинутим листовима – струг, која је помоћу ножа за сечење могла да произведе фурнир из дебла које ротира.²³ Шарл Пико (Charles Picot) 1834. године патентира и развија прву машину за сечење фурнира, која тек након 30 година унапређења улази у примену за индустријску производњу фурнира. Прва машина за производњу декоративних фурнира патентирана је 1870. године.²⁴ Ови патенти обележили су XIX век представљајући прве алате за машинску производњу фурнира, који су током XX века значајно унапређени и данас се примењују у савременој индустријској производњи. Унапређење алата за сечење фурнира омогућило је производњу фурнира бољег квалитета и повећало обим његове примене.

²¹ Franz F. P. Kollmann, „Veneer, plywood and laminates“ у *Principles of Wood Science and Technology II: Wood Based Materials*, уредник Franz F. P. Kollmann, Edward W. Kuenzi и Alfred J. Stamm (Berlin: Springer-Verlag, 1975), 154-283.

²² исто, 154-283.

²³ Franz F. P. Kollmann, „Veneer, plywood and laminates“ у *Principles of Wood Science and Technology II: Wood Based Materials*, уредник Franz F. P. Kollmann, Edward W. Kuenzi и Alfred J. Stamm (Berlin: Springer-Verlag, 1975), 154-283.

Mark Irle и Marius C. Barbu, „Wood-Based Panel Technology“ у *Wood-Based Panels - An Introduction for Specialists*, уредник Н. Thoemen, М. Irle и М. Sernek (London: Brunel University Press, 2010), 1-94.

²⁴ Mark Irle и Marius C. Barbu, „Wood-Based Panel Technology“ у *Wood-Based Panels - An Introduction for Specialists*, уредник Н. Thoemen, М. Irle и М. Sernek (London: Brunel University Press, 2010), 1-94.

2.2.2 Врста, класификација и техника израде фурнира

Производња фурнира данас представља специјалан процес механичке прераде дрвета, поступком стругања, сечења или љуштења. Два најчешћа начина за добијање фурнира су љуштењем и сечењем, а примењени поступак зависи од начина употребе фурнира. У посебну групу фурнира спадају авионски фурнири (листови дебљине 0.22 mm до 1.50 mm), микрофурнири (листови дебљине од 0.08 mm до 0.1 mm), фајн-лајн фурнири, а за чију производњу се примењује посебна технологија, као и фурнири за акумулаторе који се добијају поступком љуштења или сечења веће дебљине (од 1.6 до 3.2 mm).²⁵ Фурнири који се користи у даљој производњи производа на бази дрвета, у највећем проценту сировина се израђују од тврдог дрвета листопадних шума. Највећи произвођач фурнира у свету је Америка, која је уједно и највећи потрошач фурнирских плоча. Примена четинарског дрвета при производњи фурнира огледа се најчешће у употреби за декоративне сврхе. Сматра се да данас у свету постоји више од 90 000 врста тврдог дрвета, али се само око 100 врста користи у индустрији за производњу фурнира.

Према Колману (Kollmann) производња фурнира, на основу примене, може се класификовати у три велике групе:²⁶

1. фурнири за облагање
2. комерцијални фурнири за производњу фурнирских плоча
3. фурнири за амбалаже и контејнере

Фурнири за облагање добијају се поступком сечења, и то најчешће вертикалним ножем.²⁷ Ови фурнири се неретко називају и племенити фурнири, јер служе као декоративни фурнири за облагање других производа на бази дрвета, као њихово лице. Осим тога племенити фурнир се најчешће производе од племенитих врста дрвета. Сировине од којих се добијају племенити фурнири су дрвне врсте које одликује естетски изражена текстура и боја, попут ораха, трешње, храста, махагонија и јавора, као и других егзотичних врста као што је зебрано, афрормозије, венге, ваје и сл. Ови фурнири су по природи веома танки, а њихова оптимална дебљина је 0.9 mm.²⁸

Комерцијални фурнири најчешћу примену имају у производњи фурнирских плоча, као и других сендвич плоча са завршном обрадом од фурнира. Добијају се техникама стругања или љуштења, у дебљинама од 1.3 mm до 4.8 mm. У Америци највише су у употреби фурнири дрвета тупело, амбра, црни тупело, бреза, топола, врвени и бели храст и сл.²⁹, док су код нас заступљене врсте буква, топола, липа, бреза и јова³⁰.

Амбалажни фурнири употребљавају се за производњу амбалаже, као и за производњу и облагање плоча од којих се склапају контејнери (бродски, камионски и сл.). Ова врста фурнира најчешће се добија техником љуштења, а према Колману за ове потребе користи се

²⁵ Михаило Николић, *Фурнири и слојевите плоче* (Београд: Универзитет у Београду, Шумарски факултет, 2004), стр. 1.

²⁶ Franz F. P. Kollmann, „Veneer, plywood and laminates,“ у *Principles of Wood Science and Technology II: Wood Based Materials*, уредник Franz F. P. Kollmann, Edward W. Kuenzi, Alfred J. Stamm (Berlin: Springer-Verlag, 1975), 158.

²⁷ Више о поступку производње фурнира сечењем у поглављу 2.2.2.1. Сечени фурнир

²⁸ Franz F. P. Kollmann, „Veneer, plywood and laminates,“ у *Principles of Wood Science and Technology II: Wood Based Materials*, уредник Franz F. P. Kollmann, Edward W. Kuenzi, Alfred J. Stamm (Berlin: Springer-Verlag, 1975), 158.

Михаило Николић, *Фурнири и слојевите плоче* (Београд: Универзитет у Београду, Шумарски факултет, 2004), стр. 3-5.

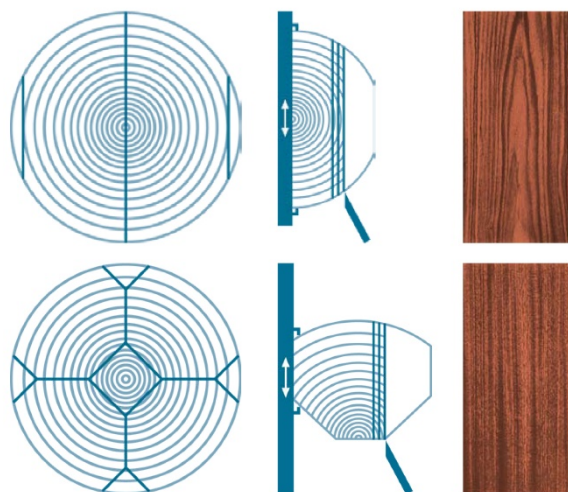
²⁹ Franz F. P. Kollmann, „Veneer, plywood and laminates,“ у *Principles of Wood Science and Technology II: Wood Based Materials*, уредник Franz F. P. Kollmann, Edward W. Kuenzi, Alfred J. Stamm (Berlin: Springer-Verlag, 1975), 158.

³⁰ Михаило Николић, *Фурнири и слојевите плоче* (Београд: Универзитет у Београду, Шумарски факултет, 2004), стр. 6-13.

1/3 укупне светске производње фурнира. Врсте од којих се добијају ови фурнири су тупело, буква, платан и храст, а неретко и неке меке врсте попут јужног и жутог бора или дуглазије.³¹

2.2.2.1 Сечени фурнир

Сечени фурнири су танки листови дрвета дебљине од 0.5 до 1 mm. Добијају се техником сечења на фурнирском ножу.³² Према начину сечења разликују се блистаче и бочнице, где се блистачама сматрају листови добијени сечењем трупца у смеру или приближно смеру сржних зрака (радијални или приближно радијални рез), док се бочницама сматрају листови добијени сечење у правцу тангенте на годове (тангенцијални рез).



Слика 3. Добијање фурнира техником сечења из пола трупца (горе) и из четврт трупца (доле)³³

Сечени фурнир (резани фурнир) је сечен из пола или четврт трупца у једном слоју одједном.³⁴ (Сл. 3) Нож може бити постављен паралелно или управно у односу на правац влакана. Постоје три типа фурнирских ножева: хоризонтални ножеви, вертикални ножеви и коси фурнирски ножеви (под углом).³⁵ За израду сечених фурнира узимају се најчешће оне врсте које на неком од правца сечења истичу своја естетска својства, пре свега боју и текстуру. Углавном су то лишћари: липа, храст (лужњак и китњак), орах, јасен, јавор, брест, ређе топола, буква, бреза и кестен; од четинара као сировина која се код нас користи за сечени фурнир је бор. Егзотичне врсте које се користе за сечени фурнир су аводире, аниноре, афрорморзија, кото, венге, зебрано, тиама, косипо, сапели, лимба, кедар и сл. Ови фурнири најчешће се користе за декоративно облагање дрвених плоча, које се даље користе при изради намештаја, у ентеријерима као зидна или плафонска облога, као и за завршни слој код ламелног паркета.

³¹ Franz F. P. Kollmann, „Veneer, plywood and laminates,“ у *Principles of Wood Science and Technology II: Wood Based Materials*, уредник Franz F. P. Kollmann, Edward W. Kuenzi, Alfred J. Stamm (Berlin: Springer-Verlag, 1975), 158.

³² Михаило Николић, *Фурнири и слојевите плоче* (Београд: Универзитет у Београду, Шумарски факултет, 2004), стр. 3.

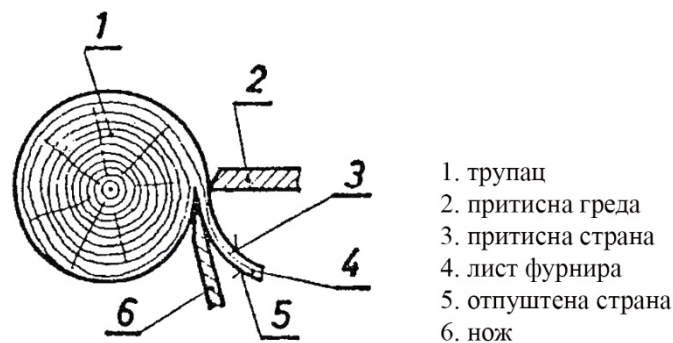
³³ André Wagenführ, Steffen Tobisch, Rico Emmler, Beate Buchelt, Tino Schulz, *Furnier im Innenausbau* (Initiative Furnier + Natur e.V. (IFN), Dresden 2011), 10.

http://tudresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/ihp/hft/download/publications/Furnier (доступно 07. Фебруара 2014.)

³⁴ Јелена Ивановић-Шекуларац, *Дрво у савременој архитектури* (Београд: Универзитет у Београду, Архитектонски факултет, 2017), стр. 56.

³⁵ Михаило Николић, *Фурнири и слојевите плоче* (Београд: Универзитет у Београду, Шумарски факултет, 2004), стр. 41.

Љуштени фурнир представља кружно сечени фурнир, који се добија помоћу ротирајуће тестере која цео трупац реже фиксним ножем.³⁶ Приликом љуштења нож продире у трупац паралелно са кором или под врло малим углом у односу на годове. Фурнири добијени на овај начин су центрично љуштени фурнири или слепи фурнири, а у пракси се још и називају конструкциони фурнири. На слици 4 приказан је начин добијања љуштених фурнира из целог дебла, са описом елемената. При љуштењу веома је важно да притисна греда којом се притиска дебло буде добро постављена у односу на врх оштрице ножа, како би љуштика излазила цела, неиспуцана. У случају неправилног постављања притисне греде могу се догодити оштећења на љуштици, односно отпуштена страна може бити избраздана или испуцана, чиме се знатно смањују механичка својства фурнира.³⁷ Фурнир се може љуштити и из половине, трећине или четвртине трупаца, али то није уобичајен поступак (сл.5).



Слика 4. Добијање фурнира техником љуштења из целог трупаца³⁸

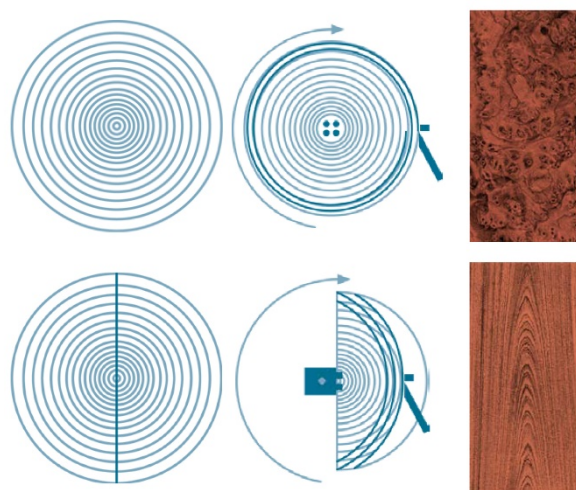
Поред центричне, постоји и ексцентрична техника љуштења која се користи за добијање племенитих фурнира. Љуштени фурнири заузимају око 90% укупне производње фурнира, а употребљавају се најчешће за израду фурнирских плоча. Најчешће домаће врсте које се употребљавају за израду фурнира техником љуштења су, од лишћара: буква, топола, липа, бреза и јова; а од четинара: смрча, јела, бор, ариш. Егзотичне врсте које се добијају на овај начин су најчешће фурнири самбе, фрамуре, иломбе и окуме.³⁹

³⁶ Јелена Ивановић-Шекуларац, *Дрво у савременој архитектури* (Београд: Универзитет у Београду, Архитектонски факултет, 2017), стр. 56.

³⁷ Михаило Николић, *Фурнири и слојевите плоче* (Београд: Универзитет у Београду, Шумарски факултет, 2004), стр. 100-101.

³⁸ Преузето из Михаило Николић, *Фурнири и слојевите плоче* (Београд: Универзитет у Београду, Шумарски факултет, 2004), стр. 101.

³⁹ исто, 101-106.



Слика 5. Добијање фурнира техником љуштења из целог трупца (горе) и из пола трупца (доле)⁴⁰

2.3 Плочасти производи на бази фурнира

Производи на бази фурнира који се данас најчешће употребљавају у конструктивне сврхе су плоче формиране од слојева фурнира – фурнирске плоче и ламелирана фурнирска грађа (LVL). Предност производа насталих лепљењем слојева фурнира је могућност стварања елемената велике чврстоће, теоретски без димензионалног ограничења. Све већа примена ових композитних производа у грађевинској индустрији последица је смањења обима дебла (трупаца) и потребе за формирањем грађе већих дужина.

2.3.1. Фурнирске плоче (PW)

2.3.1.1 Појам и класификација

Фурнирске плоче су плоче израђене од најмање три међусобно слепљена фурнирска листа (трослојна плоча), чија су дрвна влаканца најчешће постављена у међусобној оријентацији под углом од 90° .⁴¹

Континуиран развој овог производа може се пратити кроз неколико праваца. Први правац развоја условљен је првенствено константним усавршавањем техника сечења и љуштења фурнира и тиме допринеле самом процесу и производној технологији слојевитих плоча. Други правац у директној је вези са развојем адхезивних материјала који су се кроз историју примењивали у дрвној индустрији, а чији се значајан допринос огледа у побољшању квалитета физичких и механичких особина слојевитих плоча. Трећи правац развоја производа је његова условљеност врстом, квалитетом и доступности дрвне сировине која је примарни чинилац производа. Док четврти, и не мање битан, представља константна потреба тржишта за што бољим перформансама плоча ради њихове шире примене.

⁴⁰ André Wagenführ, Steffen Tobisch, Rico Emmler, Beate Buchelt, Tino Schulz, *Furnier im Innenausbau* (Initiative Furnier + Natur e.V. (IFN), Dresden 2011), 10.

http://tudresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/ihp/hft/download/publications/Furnier (доступно 07. Фебруара 2014.)

⁴¹ Михаило Николић, *Фурнири и слојевите плоче* (Београд: Универзитет у Београду, Шумарски факултет, 2004), стр. 183.

Данас фурнирске плоче представљају један од квалитетнијих слојевитих композита на бази дрвета. Формирају се у стандардним дебљинама⁴² од 6.35–28 mm⁴³, а за њихово формирање употребљавају се фурнири дебљине од 2-6 mm⁴⁴, међусобно слепљени адхезивом. Према броју слојева фурнирске плоче могу се поделити на трослојне плоче (триплекс), или вишеслојне плоче (мултиплекс), са најчешћим бројем слојева 5, 7, 9.⁴⁵ Фурнирске плоче најчешће се производе у димензијама 1220 mm x 2440 mm. Осим наведених, производња плоча на бази фурнира према потреби може се вршити и у другим димензијама.

Према намени фурнирске плоче се дела на плоче за општу намену (неконструкцијску примену) и плоче за конструкцијску примену.⁴⁶ Фурнирске плоче које се примењују за општу намену, а посебно декоративне фурнирске плоче најчешће су формиране тако да су спољни фурнири (лице плоче) декоративни фурнири тропских врста тврдог дрвета, док је језгро фурнирске плоче меко дрво. За израду конструкцијских фурнира у највећем проценту користи се меко дрво. За формирање грађевинске фурнирске плоче код нас могу се употребити фурнири следећих врста дрвета: брезе, букве, јове, тополе, јеле, смрче, бора, лимбе, макоре, махагонија, окоуме или врсте дрвета са истом или већом отпорношћу на климатске утицаје.⁴⁷ У Америци се дефинише преко 70 врста дрвета чији се фурнири могу применити у конструкцијским плочама, међу којима су најчешће примењивани: дуглазија, јела, ариш, меки бор и сл.

Према условима примене конструкцијске и неконструкцијске фурнирске плоче могу бити: фурнирске плоче за употребу у сувим условима, фурнирске плоче за употребу у влажним срединама, фурнирске плоче за употребу у спољним срединама.⁴⁸ Прецизнија класификација фурнирских плоча за конструктивну примену дефинисана је према стандарду SRPS EN 12369-2:2012 – где се дефинишу три употребне класе плоча у зависности од изложености плоча спољашњим утицајима средине:

- класа 1: дефинисана је садржајем влаге која одговара температури од 20°C, и релативној влажности средине која прелази 65% само неколико недеља годишње,
- класа 2: дефинисана је садржајем влаге која одговара температури од 20°C, и релативној влажности средине која прелази 85% само неколико недеља годишње,

⁴² Према ауторима фурнирске плоче се формирају у дебљинама од 16-76 mm.

Lars Berglund и Roger M. Rowell, „Wood Composites.“ *Handbook of wood chemistry and wood composites*, уредник Roger M. Rowell (Boca, USA: CRC Press, 2005.), погл. 10.

⁴³ Judith J. Stalnakер и Ernest C Harris, „Plywood and Similar Wood Products“ у *Structural design in wood* (New York: Springer-Verlag New York Inc., 1997), 249.

⁴⁴ J.C.F. Walker, „Wood panels: plywoods.“ у *Primary wood processing: principles and practice*, аутор J.C.P. Walker, B.G. коаутор: Butterfield, T.A.G. Langrish, J.M. Harris и J.M. Uprichard (London: Chapman & Hall, 1993), 377-416.

⁴⁵ Михаило Николић, *Фурнири и слојевите плоче* (Београд: Универзитет у Београду, Шумарски факултет, 2004), стр. 183.

⁴⁶ Подела фурнирских плоча према категоријама дефинисаним важећим стандардима који се примењују у Републици Србији - Институт за стандардизацију Србије, „SRPS EN 636:2015 -Фурнирске плоче (шперплоче) — Спецификације“ (Београд:2015).

Прецизнија класификација направљена је у стандардима Сједињених Америчких Држава, где се фурнирске плоче према намени класификују на две категорије: 1.конструкцијске и индустријске, 2.фурнирске плоче од тврдог дрвета и декоративне плоче. (John A. Youngquist, „Wood-Based Composites and Panel Products“ у Wood Handbook - Wood as an Engineering Material, едитор Forest Product Laboratory, (Ontario: Algrove Publishing, 2002), 214.

⁴⁷ Наведене врсте дрвета преузете су из повученог стандарда : Институт за стандардизацију Србије, „SRPS U.D0.001/1:1987- Пројектовање и извођење дрвених конструкција - Материјали за израду дрвених конструкција - Технички услови – Измене” (Београд:1987, датум повлачења 30.08.2016). Није ступио на снагу заменски стандард.

⁴⁸ Институт за стандардизацију Србије, „SRPS EN 636:2015 -Фурнирске плоче (шперплоче) — Спецификације“ (Београд:2015).

- класа 3: климатски услови који доводе до већег садржаја влаге у односу на класу 2.

Важећи стандарди⁴⁹ фурнирске плоче које се користе у пројектовању конструкција класификују и дефинишу носивост фурнирске плоче у односу на четири параметра: савојну чврстоћу паралелну и управну на влакна, као и модул еластичности паралелно и управно на влакна спољашњих листова фурнира. Наведена класификација приказана је у табелама 1 и 2.

Табела 1. Класификација фурнирских плоча према вредности чврстоће на савијање⁵⁰

Класа (F)	Минималне вредности чврстоће на савијање $f_{m,k}$ (N/mm ²)
F 3	3
F 5	5
F 10	10
F 15	15
F 20	20
F 25	25
F 30	30
F 40	40
F 50	50
F 60	60
F 70	70
F 80	80

Табела 2. Класификација фурнирских плоча према вредности модула еластичности⁵¹

Класа (E)	Минималне вредности модула еластичности $E_{m,mean}$ (N/mm ²)
E 5	500
E 10	1 000
E 15	1 500
E 20	2 000
E 25	2 500
E 30	3 000
E 40	4 000
E 50	5 000
E 60	6 000
E 70	7 000
E 80	8 000
E 90	9 000
E 100	10 000
E 120	12 000
E 140	14 000

⁴⁹ Институт за стандардизацију Србије, „SRPS EN 636:2015 -Фурнирске плоче (шперплоче) — Спецификације“ (Београд:2015), и Институт за стандардизацију Србије, „SRPS EN 12369-2:2012 Плоче на бази дрвета - Карактеристичне вредности за пројектовање конструкција - Део 2: Фурнирске плоче (шперплоче)“ (Београд:2012).

⁵⁰ Институт за стандардизацију Србије, „SRPS EN 12369-2:2012 Плоче на бази дрвета - Карактеристичне вредности за пројектовање конструкција - Део 2: Фурнирске плоче (шперплоче)“ (Београд:2012).

⁵¹ Институт за стандардизацију Србије, „SRPS EN 12369-2:2012 Плоче на бази дрвета - Карактеристичне вредности за пројектовање конструкција - Део 2: Фурнирске плоче (шперплоче)“ (Београд:2012).

Наведене вредности механичких карактеристика – чврстоће на савијање и модула еластичности дефинисаних класа фурнирских плоча приказане у табелама 1 и 2 морају се кориговати помоћу коефицијената за класу и период трајања оптерећења.⁵² Класификација времена и трајања оптерећења на конструкцијама приказана је у Табели 3. Коефицијенти који се примењују за прорачун дрвених конструкција према класи и времену трајања оптерећења (k_{mod} , k_{def}) дефинисани су Европским стандардом за пројектовање дрвених конструкција Еврокод 5 – SRPS EN 1995-1-1/NA:2017 Део 1-1: Опште – Заједничка правила и правила за зграде – национални прилог.

Табела 3. Класификација трајања оптерећења⁵³

Класа трајања оптерећења	Период трајања оптерећења	Примери оптерећења
Трајно	Дуже од 10 година	Сопствена тежина
Дугорочно	Од 6 месеци до 10 година	Терет (storage)
Средњерочно	Од недељу до 6 месеци	Покретна оптерећења
Краткорочно	Краће од недељу дана	Снег ^a и ветар
Тренутно	—	Инцидентно оптерећење

^a У подручјима која имају изузетно велика оптерећење од снега дужи временски период, део оптерећења треба посматрати као средњорочно

2.3.1.2 Конструкција фурнирских плоча

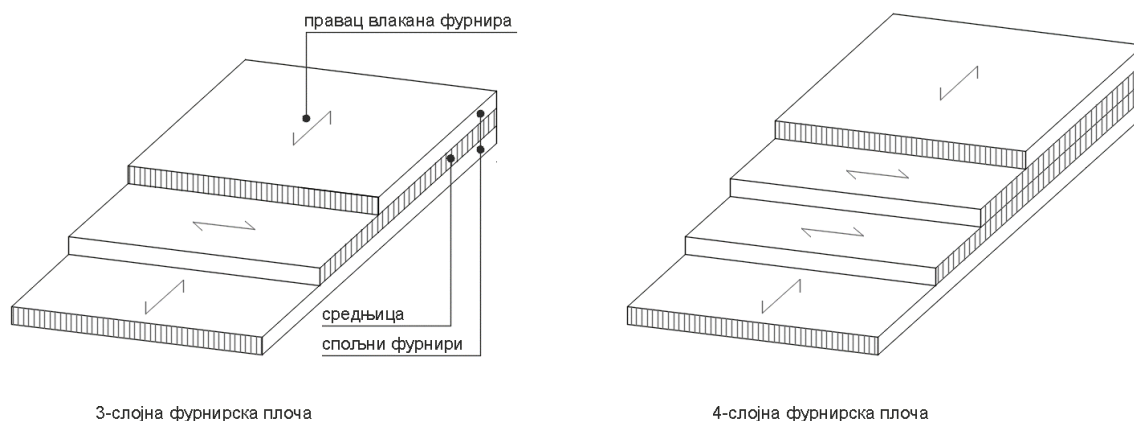
Најважније правило при конструкцији фурнирских плоча је правило симетрија плоче. По правилу фурнирске плоче се израђују у непарном броју слојева фурнира, тако да се неутрална оса композитног производа налази у слоју дрвета. У односу на неутралну осу обе стране фурнирске плоче морају бити симетричне, тј. са обе стране фурнири морају бити једнаке дебљине, једнако удаљени од осе, истог правца протезања влаканаца, исте влажности, врсте дрвета и технике израде.⁵⁴ Приликом формирања фурнирских плоча правац влакана спољашњих листова фурнира (лица фурнира) оријентише се у правцу дуже странице фурнирске плоче. Могуће је у одређеним случајевима формирати и плоче са парним бројем слојева, најчешће четворослојне, с тиме да су влаканца два средишња слоја оријентисана у истом правцу и тако оријентисана формирају један слој (сл.6)⁵⁵.

⁵² Институт за стандардизацију Србије, „SRPS EN 12369-2:2012 Плоче на бази дрвета - Карактеристичне вредности за пројектовање конструкција - Део 2: Фурнирске плоче (шперплоче)“ (Београд:2012).

⁵³ Преузета, модификована и допуњена табела – Институт за стандардизацију Србије, „SRPS EN 12369-2:2012 Плоче на бази дрвета - Карактеристичне вредности за пројектовање конструкција - Део 2: Фурнирске плоче (шперплоче)“ (Београд:2012).

⁵⁴ Михаило Николић, *Фурнири и слојевите плоче* (Београд: Универзитет у Београду, Шумарски факултет, 2004), стр. 189.

⁵⁵ Judith J. Stalnaker и Ernest C Harris, „Plywood and Similar Wood Products“ у *Structural design in wood* (New York: Springer-Verlag New York Inc., 1997), 249.



Слика 6. Конструкција трослојне и четворослојне фурнирске плоче

Правило непарног броја слојева дрвета у фурнирској плочи узроковано је анизотропношћу овог материјала, односно његовим физичким и механичким особинама у лонгитудиналном, тангенцијалном и радијалном правцу. Ово је посебно видљиво приликом утезања и бубрења фурнира, где та разлика код појединих врста дрвне грађе може да се креће и у односу тангенцијално:радијално:лонгитудинално=20:12:1. Како би се смањила анизотропност фурнирске плоче, фурнири се постављају у слојевима оријентисаним под углом од 90° у односу на први суседни слој. Оваквом оријентацијом утиче се на смањење бубрења, односно постиже се уједначеније понашање плоче у два правца услед промене влажности средине.⁵⁶ Унакрсним постављањем слојева спречава се кретање и деформација појединачних слојева у равни плоче пошто лонгитудиналана оријентација влакана једног листа фурнира спречава тангенцијалне промене њему управног листа.⁵⁷ Утезање и бубрење фурнирске плоче кроз њену трећу димензију, дебљину плоче, исто је као и код плоче од пуног дрвета. Неизменична оријентација слојева фурнира резултира приближно једнакој крутости и димензионалној стабилности плоче у оба њена правца – подужном и попречном, а тиме су механичка својства, првенствено чврстоћа на притисак и затезање и крутост плоче приближне у оба њена правца. Уколико бисмо поставили само два слоја фурнира приликом утезања или бубрења долазило би до торзионог увртања слојева међусобно, те је неопходно обезбедити непаран број слојева, како би се постигао баланс приликом физичких промена.

Већа дебљина плоче може се постићи повећањем дебљине слоја фурнира, или постављањем фурнира у више слојева. Постављањем фурнира у више слојева добија се уједначенија, хомогенија структура плоче, а однос попречног и подужног правца мења се у односу на слојеве на следећи начин: 3-слојна плоча 2:1, 5-слојна плоча 3:2, 7-слојна плоча 4:3, чиме је показано да седмослојна плоча има однос најприближнији понашању хомогеној структури (у оба правца једнако).⁵⁸

У поређењу са плочама од пуног дрвета основна и најважнија предност фурнирских плоча је што су физичке и механичке карактеристике плоче у подужном и попречном правцу прилично једнаке, при чему је смањена могућност цепања плоче, и омогућена је израда плоча већих димензија.⁵⁹ Осим наведеног, међусобним укрштањем слојева фурнира у конструкцији

⁵⁶ Irle Mark и Marius C. Barbu, „Wood-Based Panel Technology“ in *Wood-Based Panels - An Introduction for Specialists*, ed. H. Thoemen, M. Irle, M. Sernek (London: Brunel University Press, 2010.), 74-75.

⁵⁷ J. Walker, „Wood panels: plywoods“, у *Primary wood processing: principles and practice* (London: Chapman & Hall, 1993), 377-416.

⁵⁸ Irle Mark и Marius C. Barbu, „Wood-Based Panel Technology“ in *Wood-Based Panels - An Introduction for Specialists*, ed. H. Thoemen, M. Irle, M. Sernek (London: Brunel University Press, 2010.), 74-75.

⁵⁹ John A. Youngquist, „Wood-Based Composites and Panel Products.“ у *Wood Handbook - Wood as an Engineering Material*, едитор Forest Product Laboratory (Ontario: Algrove Publishing, 2002.), 207-238.

фурнирских плоча повећана је стабилност плоче кроз њене слојеве, односно смањена је могућност цепања фурнирских листова, чиме са аспекта формирања веза између елемената фурнирске плоче постају погодне за примену механичких спојних средстава – ексера, вијка и сл. Начини и правила формирања веза између елемената применом механичких спојних средстава (ексера и вијака), дефинисани су стандардима за извођење дрвених конструкција и исти се примењују и за плоче на бази дрвета.

2.3.1.3 Процес формирања фурнирских плоча

Фурнирске плоче формирају се поступком врућег пресовања слојева фурнира и адхезива при притиску од 1.0 МПа према Ирлу и Барбу (Irle Mark и Marius C. Barbu)⁶⁰ или од 1.2 – 1.4 МПа према Волкру (J.CF.Walker)⁶¹, температура и време пресовања варирају у зависности од типа адхезива. Притисак приликом пресовања је највећи при почетку циклуса пресовања, док се током циклуса постепено смањује како би се спречила компресија панела и задржала дебљина плоче. Нешто мањи притисак потребан је за дрво мање густине, а већи за дрво веће густине. Температура пресовања за адхезиве на бази амида – уреа-формалдехида (urea-formaldehyde – UF) и меламин-формалдехида (melamine-formaldehyde – MF) се креће у интервалу од 100-120°C, након оваквог пресовања панели се хладе, односно раздвајају једни од других да би се на собној температури охладиле. Адхезиви на бази фенола захтевају нешто више температуре пресовања, око 160°C, а након тога плоче се постављају једне на друге, односно врши се поступак врућег складиштења, како би међусобно одржавале температуру још неко време. Време које је потребно за пресовање фурнирске плоче зависи од дебљине плоче и рачуна се 1 минут (const.) + 30 секунди за сваки милиметар слоја фурнирске плоче.⁶²

$$t = 60 + d \times 30 [s], \text{ где је } d \text{ укупна дебљина плоче изражена у } mm$$

2.3.1.4 Конструктивне карактеристике фурнирских плоча

Физичка својства

Физичка својства фурнирских плоча разликују се међусобно у зависности од типа фурнира и броја слојева, али и од физичких својстава масивног дрвета које је употребљено за формирање фурнирске плоче.

Запреминска маса фурнирске плоче зависи од врсте дрвета које се користи за формирање плоче, као и од процентуалног учешћа одређених врста уколико је фурнирска плоча формирана од различитих дрвених врста. Осим врсте дрвета на запреминску масу утиче број слојева фурнира, дебљина фурнира, количина употребљеног лепка као и специфични притисак у преси и температура пресовања приликом формирања фурнирских плоча. Фурнири мање дебљине више се упресују под притиском због веће пластичне деформације. Порастом броја слојева, код исте дебљине плоче, расте и утицај лепка. Порастом дебљине плоче, због боље упресованости и веће количине лепка, смањује се запреминска маса плоче, те тако нека трослојна фурнирска плоча дебљине 1.50 cm има запреминску масу 0.791 g/cm³, док иста плоча

⁶⁰ Irle Mark и Marius C. Barbu, „Wood-Based Panel Technology“ in *Wood-Based Panels - An Introduction for Specialists*, ed. H. Thoemen, M. Irle, M. Sernek (London: Brunel University Press, 2010.), 74-75.

⁶¹ J.CF. Walker, „Wood panels: plywoods“, Погл. 11 у *Primary wood processing: principles and practice*, аутор J.C.P. Walker, B.G. coauthors: Butterfield, T.A.G. Langrish, J.M. Harris и J.M. Uprichard, (London: Chapman & Hall, 1993), 377-416.

⁶² Irle Mark и Marius C. Barbu, „Wood-Based Panel Technology“ in *Wood-Based Panels - An Introduction for Specialists*, ed. H. Thoemen, M. Irle, M. Sernek (London: Brunel University Press, 2010.), 84-85.

дебљине 3.00 cm има запреминску масу 0.719 g/cm^3 . Специфична тежина фурнирских плоча формираних од наведених врста дрвета износе:⁶³

- ариш 7.60 kN/m^3 ,
- буква 6.50 kN/m^3 ,
- бреза 6.40 kN/m^3 ,
- липа 5.90 kN/m^3 ,
- бор 5.40 kN/m^3 ,
- топола 4.40 kN/m^3 .

Упијање воде зависи од врсте дрвета и броја слојева фурнира. Према Николићу⁶⁴, упијање је веће код фурнирских плоча са већим бојем слојева, без обзира на дебљину фурнирске плоче. Ово можемо повезати са тиме да је упијање плоче највеће кроз њен попречни пресек, односно по ивицама плоче, уколико ивице нису третиране тако да спрече упијање воде. Када имамо попречни пресек са већим бројем слојева фурнира, самим тим ће и упијање плоче бити веће.

Бубрење и утезање је у директној вези са упијањем, с тим што је у односу на монолитно дрво код фурнирских плоча бубрење и утезање смањено у подужном и попречном правцу, односно у равни плоче. Унакрсним постављањем слојева фурнира спречава се померање и деформација појединачних слојева у равни плоче, лонгитудиналана оријентација влакана једног листа фурнира спречава тангенцијалне промене њему управног листа. Бубрење и утезање је и даље изражено на трећој димензији плоче - кроз попречни пресек, односно по дебљини плоче, где је понашање плоче приближно једнако понашању монолитног дрвета.

Топлотна својства фурнирских плоча у директној су вези са количином и типом примењеног адхезива при конструкцији плоче. Специфична топлота фурнирских плоча већа је од специфичне топлоте монолитног дрвета. Кофицијент топлотне проводљивости је нижи код фурнирских плоча у односу на монолитно дрво, а разлог томе је укрштање слојева фурнира које се јавља у конструкцији плоче.⁶⁵

Звучна својства фурнирских плоча су веома добра, те овај материјал због својих акустичких својстава има примену при облагању зидова концертних дворана, студија, позоришта и сл., због своје добре способности упијања звука, као и у изради музичких инструмената.

Механичка својства

“Под појмом механичка својства дрвета подразумевају се она својства која се манифестују под утицајем спољашњих сила.”⁶⁶ Као и физичка, механичка својства фурнирских плоча у директној су зависности од врсте дрвета које је употребљено за формирање плоче, броја слојева фурнира, запреминске масе, влажности дрвета, примењеног адхезива, конструкције фурнирске плоче и процеса производње плоче.

Када посматрамо саму конструкцију фурнирске плоче уочавамо да механичке карактеристике фурнирске плоче и плоче од пуног дрвета, истих димензија, не могу бити једнаке. Фурнирска плоча има мању чврстоћу на савијање, притисак и затезање у односу на плочу од пуног дрвета, а разлог томе је управна оријентација суседних слојева фурнира у

⁶³ Михаило Николић, *Фурнири и слојевите плоче* (Београд: Универзитет у Београду, Шумарски факултет, 2004), стр. 272.

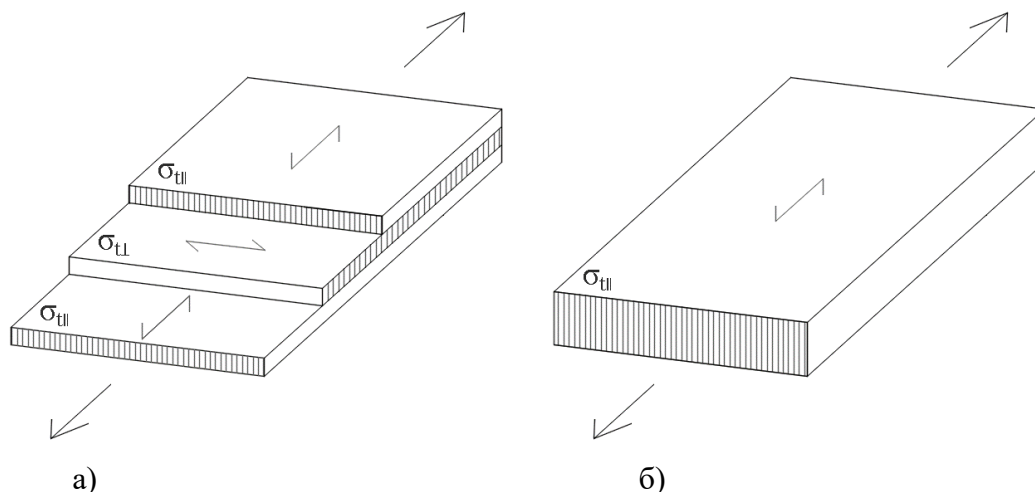
⁶⁴ исто, 273.

⁶⁵ исто, 274.

⁶⁶ Milan Gojković, *Drvene konstrukcije* (Beograd: Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1983), str.22.

фурнирским плочама. Предност фурнирских плоча је тежња ка уједначенијим механичким карактеристикама у подужном и попречном правцу плоче.

Поменули смо да се приликом формирања фурнирских плоча правац влакана спољашњих листова фурнира (лица фурнира) оријентише у правцу дуже стране фурнирске плоче. Приликом излагања фурнирске плоче дејству спољашњих сила, напрезања ће преузети они слојеви фурнира чија су влакна паралелна правцу напрезања плоче, док ће они слојеви који су оријентисани управно на правац напрезања у јако малој мери допринети чврстоћи плоче (сл.7а). Слојеви фурнира који преузимају већа напрезања, односно чија су влакна оријентисана паралелно правцу напрезања, називају се ефективни слојеви. Код плоча од пуног дрвета, сва влакана су постављена у истој оријентацији, и приликом дејства спољашњих сила у правцу влакана, напрезања ће примати целокупна плоча (сл.7б).



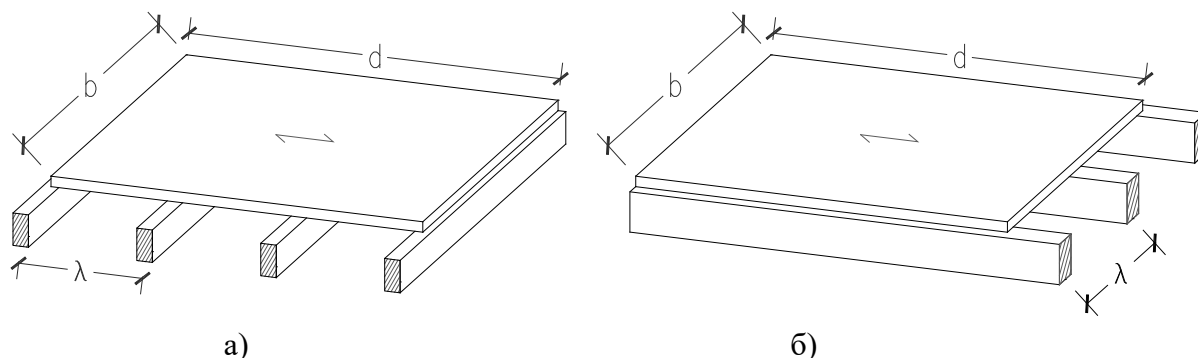
Слика 7. Напрезања у: а) фурнирској плочи, б) плочи од пуног дрвета

Како фурнирска плоча углавном има непаран број слојева фурнира, једна оријентација плоче ће увек бити снажнија, односно отпорност на напрезање је увек боља по једној страници плоче. Водећи рачуна о томе да су влакна спољашњих листова фурнира увек паралелна подужној страни плоче, на овај начин плоча је отпорнија када напрезања делују у њеној подужној равни. Наведеном доприносе две чињенице, механичке карактеристике дрвета и број слојева фурнира чија су влакна оријентисана паралелно напрезању. Механичке карактеристике дрвета, а првенствено модул еластичности и отпорност на затезање) боље су и до неколико пута у правцу подужном на влакна, у односу на правац попречан влакнима дрвета. У конструкцији плоче увек имамо већи број слојева фурнира чија су влакна оријентисана паралелно дужој страници плоче, при томе су та влакна на ивицама плоче, односно удаљенија су од неутралне осе.⁶⁷ Може се закључити да када напрезања делују у правцу дуже стране плоче, фурнирска плоча има већи број слојева чија су влакна постављена паралелно напрезањима, тиме фурнирска плоча има већи број „ефективних“ слојева. Свака фурнирска плоча има своју јачу и слабију оријентацију (сл.8), те се при пројектовању и извођењу конструкција пажња мора посветити оријентацији фурнирске плоче. Фурнирска плоча приказана на слици 8.а) има већи број слојева фурнира чија су влакна постављена паралелно напрезању од фурнирске плоче приказане на слици 8.б), а самим тим је то и јача оријентација фурнирске плоче. На слици 8.а), уколико претпоставимо да је плоча трослојна, имамо два ефективна слоја, то су спољни слојеви плоче (лице и наличје плоче), док

⁶⁷ За више информација погледати у:

- Youngquist, John A, „Wood-Based Composites and Panel Products“, у Wood Handbook - Wood as an Engineering Material, аутор Forest Product Laboratory, (Ontario: Algrove Publishing, 2002), 207-238.
- Donald E. Breyer, Kenneth J. Fridley, и Kelly E. Cobeen, „Wood Structural Panels.“ у *Design of Wood Structures ASD*, поглавље 8, (New York: McGraw-Hill, 1998).

је у случају оријентације плоче приказане на слици 8.б) средишњи слој фурнирске плоче ефективни слој. Према свему наведеном, пожељно је да фурнирске плоче у конструктивном склопу буду изложене напрезањима која делују по подужном правцу плоче, а то су подужно савијање, подужно затезање и друго.



Слика 8. Оријентација фурнирске плоче у односу на напрезање управно на раван плоче:
а) јака оријентација фурнирске плоче, б) слабија оријентација фурнирске плоче⁶⁸

Фурнирске плоче у конструкцијама могу бити изложене напрезањима која делују у равни плоче или управно на раван плоче. Напрезања којима су најчешће изложене фурнирске плоче примењене у грађевинарству су притисак и затезање, савијање и смицање.

Важећи стандарди у Србији⁶⁹ у области плоча на бази дрвета, као што су плоче-влакнатице, плоче-иверице и фурнирске плоче (шперплоче), а који дефинишу терминологију, класификацију, мере, методе испитивања и захтеве квалитета, ослањају се на међународне и европске стандарде у овој области. У оквиру ових стандарда дефинишу се следеће механичке карактеристике:⁷⁰

- савојна чврстоћа (у правцу управно на раван плоче) (енгл. *bending*):
у правцу влакана спољашњег слоја фурнира $f_{m,0}$
и управно на правац влакана $f_{m,90}$,
- затезна чврстоћа (у равни плоче) (енгл. *tension*):
у правцу влакана спољашњег слоја фурнира $f_{t,0}$
и управно на правац влакана $f_{t,90}$,
- притисна чврстоћа (у равни плоче) (енгл. *compression*):
у правцу влакана спољашњег слоја фурнира $f_{c,0}$
и управно на правац влакана $f_{c,90}$,
- чврстоћа на смицање:
управна на раван плоче (енгл. *panel shear*) f_v ,
у равни плоче (енгл. *planar shear*) f_r .

Повучени стандарди из области пројектовања дрвених конструкција⁷¹ подробније су дефинисали механичке карактеристике плоча на бази фурнира, укључујући дефинисање свих напрезања како у равни плоче, тако и у правцу управном на раван плоче. У Табели 4. приказане су вредности основних допуштених напона за грађевинске фурнирске плоче. У случају заједничког деловања оптерећења групе 1 (основних) и оптерећења групе 2 (допунских),

⁶⁸ Стрелица на цртежу означава правац оријентације влакана спољашњих слојева фурнира.

⁶⁹ Стандарде доноси Институт за стандардизацију Србије, Комисија D089 Плоче на бази дрвета.

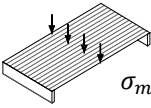
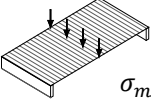
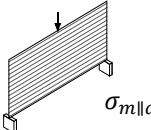
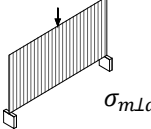
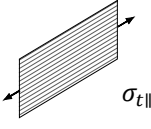
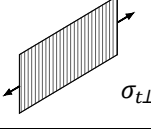
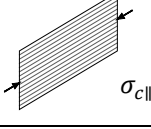
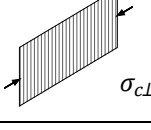
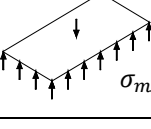
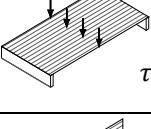
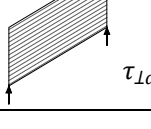
⁷⁰ Институт за стандардизацију Србије, „SRPS EN 12369-2:2012 Плоче на бази дрвета - Карактеристичне вредности за пројектовање конструкција - Део 2: Фурнирске плоче (шперплоче)“ (Београд:2012).

⁷¹ Стандарде доноси Институт за стандардизацију Србије, Комисија U250-5,6 Прорачун дрвених и зиданих конструкција

допушта се повећање допуштених напона за 15%. У случају заједничког деловања оптерећења групе 1, групе 2 и групе 3 допушта се повећање допуштених напона за 30%. Употреба фурнирских плоча допуштена је без ограничења ако су услови највеће влажности фурнирских плоча у експлоатацији до 18%.⁷²

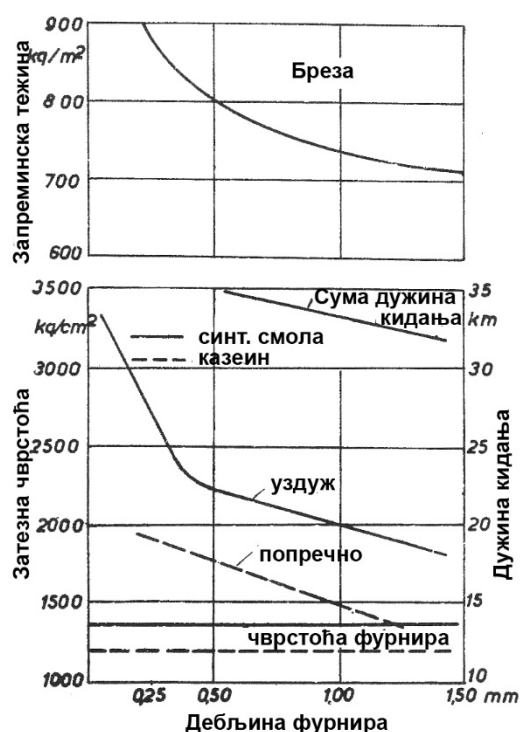
⁷² Институт за стандардизацију Србије, „SRPS U.C9.200/1:1987 *Пројектовање и извођење дрвених конструкција - Конструкције од монолитног дрвета и плоча - Измене*“ (Београд:1987, повучен 2012). Стандард је замењен стандардом *SRPS EN 1995-1-1:2012 Еврокод 5 — Пројектовање дрвених конструкција — Део 1-1: Општа правила и правила за зграде* (Београд, 2012) који не дефинише вредности основних допуштених напона за грађевинске фурнирске плоче.

Табела 4. Основни допуштени напони за грађевинске фурнирске плоче (N/cm^2)⁷³

Редни број	Врста напрезања и положај влакана покровног фурнира (види скице)	Оптерећења из Групе 1	Оптерећења из Групе 1+2	
1	Савијање управно на раван плоче	 $\sigma_{m\parallel d}$	1300	1495
		 $\sigma_{m\perp d}$	500	575
2	Савијање у равни плоче	 $\sigma_{m\parallel d}$	900	1035
		 $\sigma_{m\perp d}$	600	690
3	Затезање у равни плоче	 $\sigma_{t\parallel d}$	800	920
		 $\sigma_{t\perp d}$	400	460
4	Притисак у равни плоче	 $\sigma_{c\parallel d}$	800	920
		 $\sigma_{c\perp d}$	400	460
5	Притисак управан на раван плоче	 $\sigma_{m\perp d}$	300	345
6	Смицање у равни плоче	 $\tau_{\parallel d}$	90	103
7	Смицање управно на раван плоче	 $\tau_{\perp d}$	180	207

⁷³ Основних допуштених напона за грађевинске фурнирске плоче (N/cm^2). Институт за стандардизацију Србије, „SRPS U.C9.200/1:1987 Пројектовање и извођење дрвених конструкција - Конструкције од монолитног дрвета и плоча - Измене“ (Београд:1987, повучен 2012).

Доминантни механички утицаји који се јављају код фурнирских плоча су *чврстоћа на затезање паралелно влаканцима спољашњих листова фурнира* ($\sigma_{t\parallel}$) и *чврстоћа на затезање управно на влаканца спољашњих листова фурнира* ($\sigma_{t\perp}$). На затезну чврстоћу утиче врста дрвета, дебљина слојева фурнира, техника израде фурнира, влажност, количина и врста примењеног адхезива. Запреминска маса фурнирске плоче управно је пропорционална затезној чврстоћи плоче (сл.9). Порастом запреминске масе, повећава се затезна чврстоћа плоче како паралелно, тако и управно на влакна. Са смањењем дебљине фурнира, код исте дебљине плоче, повећава се чврстоћа на затезање у свим правцима.⁷⁴ Ово може бити директна последица веће количине лепка која се у том случају јавља у плочи, као и његове боље пенетрације у тање слојеве фурнира, чиме се попуњавају микро пукотине које се могу наћи на листовима фурнира. Такође, напрезања кроз слојеве се боље распоређују у тањим слојевима фурнира, код којих су техником производње отклоњене све грешке које се могу појавити у дрвету. Код исте дебљине плоче са тањим листовима фурнира јавља се већи број слојева, чиме се повећава затезна чврстоћа и постаје уједначенија у једном и другом правцу.



Слика 9. Утицај запреминске масе, дебљине фурнира и врсте адхезива на затезну чврстоћу фурнирске плоче⁷⁵

Такође, затезна чврстоћа је већа код оних фурнирских плоча где су фурнири добијени техником сечења, јер се овом техником добијају мање дубине напрслина фурнира него што је то случај код технике љуштења. На чврстоћу плоче утиче и влажност, зато што је у директној вези са постојаношћу примењеног лепка. Повећањем влажности нагло опада чврстоћа на затезање. Плоче формиране применом синтетичког адхезива имају и до 30% већу чврстоћу на затезање од плоча формираних казеинским или албуминским лепковима.⁷⁶

⁷⁴ Михаило Николић, *Фурнири и слојевите плоче* (Београд: Универзитет у Београду, Шумарски факултет, 2004), стр. 277.

⁷⁵ преузето из Михаило Николић, *Фурнири и слојевите плоче* (Београд: Универзитет у Београду, Шумарски факултет, 2004), стр. 278.

⁷⁶ исто, 272.

При димензионасању фурнирских плоча оптерећених на притисак или затезање у прорачун су укључени само они слојеви фурнира чија су влакна паралелна правцу напрезања. Амерички АРА (The Engineered Wood Association) стандард дефинише табелу у којој су дефинисане вредности механичких својстава фурнирских плоча (Табела 5). У случајевима да је фурнирска плоча изложена аксијалном напрезању у равни плоче под углом од 45°, дозвољени напон износиће 1/6 дозвољеног напона затезања или 1/3 дозвољеног напона притиска. За сваки други случај вредности дозвољених напона добијају се интерполацијом претходно дефинисаних дозвољених напона. За фурнирске плоче формиране од различитих врста дрвета посебно се морају утврдити затезне и притисне чврстоће, али се апроксимативно може користити вредност од 70% претходно дефинисаних чврстоћа. Уколико димензионишемо плоче димензија мањих од 20/60 cm, критична сила се мора умањити за 50%.⁷⁷

Табела 5. Дозвољени напони за фурнирске плоче у складу са америчким стандардом PS PS-95 за грађевинску и индустријску фурнирску плочу. Напрезања се заснивају на уобичајеном трајању оптерећења и на уобичајеним конструкцијским применама где су плоче ширине 60 cm (24") или веће⁷⁸

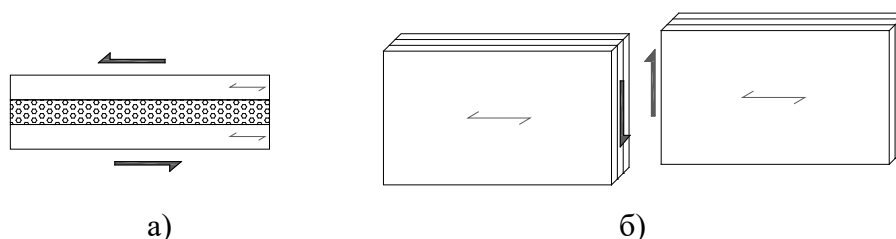
Врста напрезања	Класа завршних фурнира	Напрезања у фурниру (N/mm ²)				
		S-1		S-2		S-3
		Влажна средина	Сува средина	Влажна средина	Сува средина	Сува средина
Савијање управно на раван плоче F_b Затезање у равни плоче F_t Паралелно или управно на спољне листове (за угао 45° користити вредност 1/6 F_t)	1	9.80	13.80	8.20	11.40	11.40
	2,3	6.75	9.65	5.65	8.30	8.30
	4	6.50	9.20	5.40	7.65	7.65
Притисак у равни плоче F_c Паралелно или управно на спољне листове (за угао 45° користити вредност 1/3 F_c)	1	6.70	11.30	6.20	10.60	10.60
	2	5.00	8.30	4.70	7.60	7.60
	3	4.20	7.30	4.00	6.80	6.80
	4	4.20	6.90	4.00	6.50	6.50
Смицање управно на раван плоче F_v Паралелно или управно на спољне листове (за угао 45° користити вредност 2 F_v)	1	1.05	1.30	1.05	1.30	1.10
	2,3	0.85	0.95	0.85	0.95	0.85
	4	0.75	0.90	0.75	0.90	0.80
Смицање у равни плоче F_s Паралелно или управно на спољне листове (за угао 45° користити вредност 1-1/3 F_s)	структурални	0.45	0.50	0.45	0.50	-
	остали	0.30	0.35	0.30	0.35	0.33
Модул смицања G Паралелно или управно на спољне листове (за угао 45° користити вредност 4 G)	1	485	620	485	620	565
	2	415	520	415	520	470
	3	345	415	345	415	380
	4	310	345	310	345	310
Притисак управно на раван $F_{c\perp}$ Управно на спољне листове	1	1.45	2.35	1.45	2.35	2.35
	2,3	0.95	1.45	0.95	1.45	1.45
	4	0.70	1.10	0.70	1.10	1.10
Модул еластичности при савијању у равни плоче E Паралелно или управно на спољне листове	1	10345	12410	10345	12410	12410
	2	8960	10345	8960	10345	10345
	3	7585	8275	7585	8275	8275
	4	6200	6895	6200	6895	6895

⁷⁷ Judith J. Stalnaker, Ernest C. Harris, „Plywood and Similar Wood Products“ у *Structural design in wood*, (New York: Springer-Verlag New York Inc., 1997), 258.

⁷⁸ Judith J. Stalnaker, Ernest C. Harris, „Plywood and Similar Wood Products“ у *Structural design in wood*, (New York: Springer-Verlag New York Inc., 1997), 258.

Код фурнирске плоче можемо препознати две врсте смицања – смицање у равни плоче (енгл. *rolling shear*; *interlaminar shear*; *planar shear*) и смицање управно на раван плоче (енгл. *shear through thickness*; *panel shear*), што је приказано на слици 10. Смицање у равни плоче – представља смицање које настаје при оптерећењу управном на површину плоче. Јавља се у средишњем (енгл. *crossband*) слоју, односно у слоју у коме су влакна оријентисана у попречном правцу у односу на спољне листове фурнира и оријентацију плоче. Последица је мање чврстоће на смицање управно на влакна у односу на чврстоћу на смицање паралелну влакнима. Овакво смицање јавља се у фурнирским плочама које се користе као подне облоге. Ипак, уколико су спољашњи листови фурнира постављени паралелно ослонцима, влакна у спољним листовима биће подужно оријентисана, односно до смицања ће доћи у спољним слојевима. Смицање управно на раван плоче – дефинисано је као смицање под утицајем оптерећења у равни плоче (енгл. *edgewise*). Оштећења при овој врсти смицања јављају се кроз цео попречни пресек плоче (све њене слојеве), а не само унутрашње. Елементи који су највише изложени поменутој врсти смицања су дијафрагме, испуна (ребро) I-носача или сандучасте греде формиране од две фурнирске плоче и гредица.⁷⁹

Код смицања управно на раван плоче за прорачун се не користи номинална, већ ефективна дебљина плоче при смицању⁸⁰, која зависиности је од неколико фактора, а најзначајнији су број и дебљина адхезивних слојева као и врста дрвета од којег је формирана плоча. Плоче са већим процентом адхезива имају већу отпорност на смицање, јер адхезиви доприносе увећању, док код плоча састављених од различитих фурнира различитих дрвених врста имамо смањену чврстоћу на смицање у унутрашњим (мање квалитетним) слојевима. Такође, чврстоћа на смицање може се повећати у зависности од начина постављања плоче у конструктивни склоп.⁸¹



Слика 10. Смицање код плоча на бази фурнира а) у равни плоче, б) управно на раван плоче

Савијање у равни и управно на раван плоче

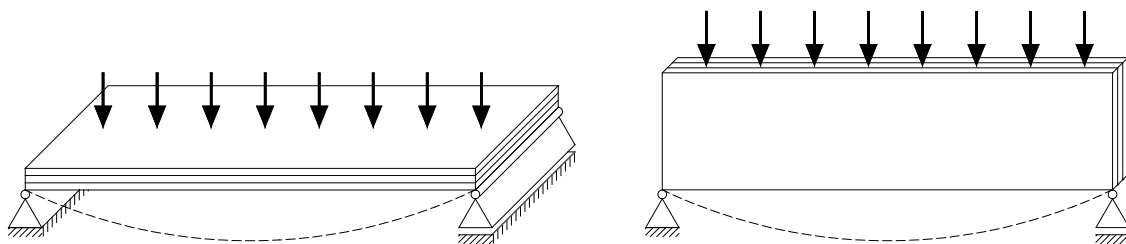
Када говоримо о еластичним својствима фурнирских плоча модули еластичности плоча различити су у попречном и подужном правцу плоче, мада се са порастом броја слојева та разлика смањује. На еластична својства такође утичу врста дрвета, број слојева фурнира и примењени адхезив. Савијање фурнирских плоча у зависности од намене фурнирских плоча може се јавити као последица оптерећења која делују управно на раван плоче – *савијање управно на раван плоче* (енгл. *flatwise bending*), најчешће јавља код плоча које се користе као подне и кровне облоге, или као последица оптерећења које делује у равни плоче – *савијање у*

⁷⁹ Judith J. Stalnaker, Ernest C. Harris, „Plywood and Similar Wood Products“ у *Structural design in wood*, (New York: Springer-Verlag New York Inc., 1997), 260.

⁸⁰ APA – The Engineered Wood Association (некада American Plywood Association) дефинисала је Таблице геометријских карактеристика попречних пресека ефективних слојева фурнирских плоча у зависности од правца дејства оптерећења (Effective section properties for plywood), а у сагласности са Америчким стандардима (PS-95). У наведеним таблицама изражена је ефективна дебљина панела при смицању.

⁸¹ Judith J. Stalnaker, Ernest C. Harris, „Plywood and Similar Wood Products“ у *Structural design in wood*, (New York: Springer-Verlag New York Inc., 1997), 260.

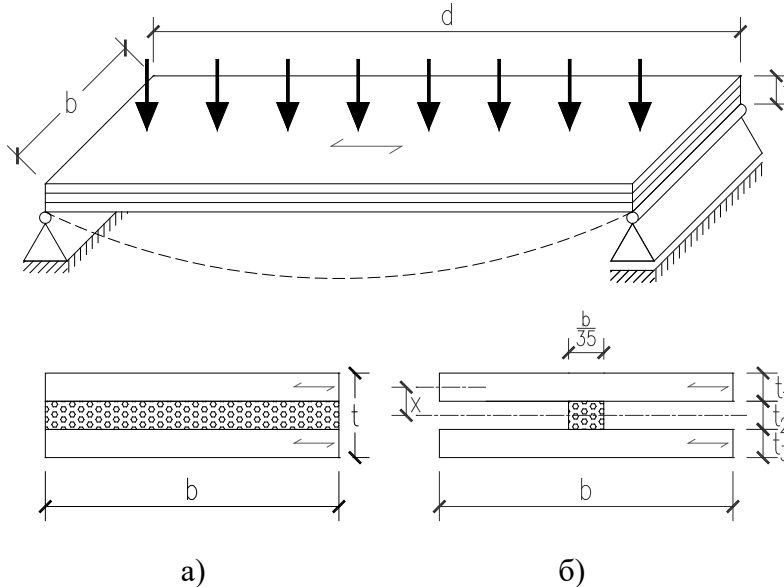
равни плоче (енгл. *edgewise bending*), јавља се код зидних облога, дијафрагми или I-гредних носача формираних од фурнирских плоча (сл.11). Код оба од наведених, савијања могу бити паралелна или управна на правац влакана завршних слојева фурнира.⁸²



Слика 11. Савијање управно на равну плочу и савијање у равни фурнирске плоче

Одређивање геометријских карактеристика фурнирских плоча

Прорачун момента инерције фурнирске плоче када се савијање јавља управно на равну плочу паралелно влакнима спољних листова фурнира, односно када оптерећење делује управно на површину плоче врши се по принципу прорачуна момената инерције сложених I носача. На следећем примеру трослојне фурнирске плоче биће објашњени принципи прорачуна момента инерције у наведеном случају⁸³.



Слика 12. Савијање управно на равну фурнирску плочу – а) поперчни пресек плоче, б) трансформисани поперчни пресек

На слици 12.а) приказан је стварни поперчни пресек трослојне фурнирске плоче стандардних димензија b/d , док је на слици 12.б) приказан редуковани пресек исте плоче. Прорачун момента инерције врши се на основу листова фурнира који ефективно учествују у преношењу напрезања, односно оних слојева чија су влакна оријентисана у правцу напрезања, као и дела слојева чија су влакна оријентисана управно на правац напрезања. Површина

⁸² Judith J. Stalnaker, Ernest C. Harris, „Plywood and Similar Wood Products“ у *Structural design in wood*, (New York: Springer-Verlag New York Inc., 1997), 249-268.

⁸³ Општи пример прорачуна трослојне фурнирске плоче изведен је на основу примера прорачуна фурнирске плоче приказаног код Judith J. Stalnaker, Ernest C. Harris, „Plywood and Similar Wood Products“ у *Structural design in wood*, (New York: Springer-Verlag New York Inc., 1997), 257-258.

попречног пресека која активно учествује у прихватању оптерећења приказана је на слици 12.б) као трансформисани попречни пресек. Код приказаног пресека, дефинишу се следећи елементи:

- ширина плоче (b) и дужина плоче (d),
- прорачунска дебљина плоче (t), дефинише се као номинална дебљина плоче минус $\frac{1}{2}$ толеранције одступања дебљине плоче. Толеранција одступања дебљине плоче дефинисане су стандардом⁸⁴ SRPS EN 315:2010, а приказане су у Табели 6,
- дебљина слоја или слојева фурнира чија је оријентација влакана паралелна напрезању, израчунава се на основу таблицама дефинисане минималне површине попречног пресека фурнира у пресеку, за одређени правац (A_{\parallel}), где је b номинална (производна) ширина плоче:

$$b \times t_1 + b \times t_3 = A_{\parallel}$$

$$t_1 = t_3 \rightarrow t_1 = 0.5 \times \frac{A_{\parallel}}{b}$$

У свим таблицама за фурнирске плоче које је издала American Plywood Association (APA) ове површине су дефинисане, као што су дефинисани и моменти инерције (I) за сваки тип плоче, те се већина вредности читава таблично. У нашим прописима не постоје такве таблице, али не постоји ни толико врста фурнирских плоча на тржишту.

- прорачунска дебљина средишњег слоја t_2 представља остатак до прорачунске дебљине плоче t :

$$t_1 + t_2 + t_3 = t$$

- прорачунска ширина средишњег слоја, чија су влакна управно оријентисана на правац напрезања, једнака је $1/35$ ширине панела, што проистиче из односа модула еластичности:

$$E_{\perp} = \frac{E_{\parallel}}{35} \rightarrow b_2 = \frac{b}{35}$$

На основу свега наведеног може се изразити формула за прорачун момената инерције трослојне фурнирске плоче:

$$I = 2 \times \left(\frac{b \times t_1^3}{12} + b \times t_1 \times x^2 \right) + \frac{b}{35} \times \frac{t_2^3}{12}$$

Према приказаном принципу прорачуна момента инерције трослојне фурнирске плоче може се одредити моменат инерције за сваку плочу, с тиме што се прорачун усложњава повећањем броја слојева плоче. Применом овог принципа може се одредити и моменат инерције плоче када оптерећење делује управно на правац влакана спољних листова фурнира. Вредности минималних момената инерције за оба правца дејства оптерећења у равни плоче изражени су таблично за типске врсте плоча које имају широку примену у пракси.⁸⁵ Сталнејкр и Харис (J.J. Stalnaker, E.C.Harris) напомињу да се моменти инерције добијени на овај начин или преузети из таблица не могу користити при димензионисању носача оптерећених на савијање, јер је њихова вредност приближна, због апроксимације која је употребљена

⁸⁴ Институт за стандардизацију Србије, „SRPS EN 315:2010 -Фурнирске плоче (шперплоче) — Толеранција димензија“ (Београд:2010).

⁸⁵ APA – Таблице геометријских карактеристика попречних пресека ефективних слојева фурнирских плоча у зависности од правца дејства оптерећења (Effective section properties for plywood).

приликом прорачуна односа модула еластичност. Ови моменти инерције могу се користити за проверу деформација плоча оптерећених на овај начин.⁸⁶

Табела 6. Толеранција одступања дебљине плоче према SRPS EN 315:2010⁸⁷

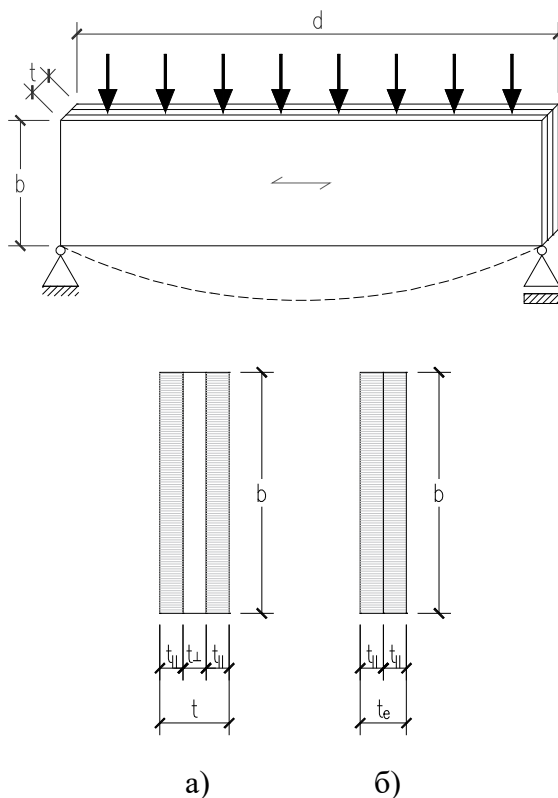
Номинална дебљина плоче (t) mm	Небрушени панели (<i>Unsanded panels</i>)		Брушени панели (<i>Sanded panels</i>)	
	Толеранција дебљине за један панел mm	Толеранција номиналне дебљине mm	Толеранција дебљине за један панел mm	Толеранција номиналне дебљине mm
≥ 3 ≤ 12	1,0	+ (0,8 + 0,03 t) - (0,4 + 0,03 t)	0,6	+ (0,2 + 0,03 t) - (0,4 + 0,03 t)
> 12 ≤ 25	1,5	+ (0,8 + 0,03 t) - (0,4 + 0,03 t)	0,6	+ (0,2 + 0,03 t) - (0,4 + 0,03 t)
> 25 ≤ 30	1,5	+ (0,8 + 0,03 t) - (0,4 + 0,03 t)	0,8	+ (0,0 + 0,05 t) - (0,4 + 0,05 t)
> 30	1,5	+ (0,8 + 0,03 t) - (0,4 + 0,03 t)	0,8	+ (0,0 + 0,03 t) - (0,4 + 0,03 t)

Момент инерције фурнирске плоче када се *савијање јавља у равни плоче* (енгл. *edgewise bending*), односно када оптерећење делује у правцу равни плоче, а на њену ивицу, прорачунава се по принципу момената инерције правоугаоног попречног пресека. На следећем примеру биће објашњени принципи прорачуна момента инерције у наведеном случају.

На слици 13. приказана је фурнирска плоча стандардних димензија b/d на којој оптерећење делује у равни плоче, Слика 13.а) приказује стварни попречни пресек трослојне фурнирске плоче, док је на слици 13.б) приказан редуковани пресек исте плоче који се користи при димензионисању. Прорачун момента инерције врши се на основу листова фурнира који ефективно учествују у преношењу напрезања, односно оних слојева чији је правац пружања влакана паралелан равни у којој се јављају напрезања носача узрокована савијањем.

⁸⁶ Judith J. Stalnaker, Ernest C. Harris, „Plywood and Similar Wood Products“ у *Structural design in wood*, (New York: Springer-Verlag New York Inc., 1997), 255.

⁸⁷ Институт за стандардизацију Србије, „SRPS EN 315:2010 - Фурнирске плоче (шперплоче) — Толеранција димензија“ (Београд: 2010), стр.4.



Слика 13. Савијање у равни плоче – а) попречни пресек плоче, б) трансформисани попречни пресек

Принципи прорачуна момената инерције:⁸⁸

- Производна ширина плоче (b) и производна дужина плоче (d) дефинисане су стандардима.
- Прорачунска дебљина плоче (t_e), дефинише се као збир номиналних дебљина слојева фурнира код којих је правац пружања влакана паралелан равни у којој се јављају напрезања носача узрокована савијањем.
- Дебљина слоја или слојева фурнира чија је оријентација влакана паралелна напрезању, израчунава се на основу таблицама дефинисане минималне површине попречног пресека фурнира у пресеку, за одређени правац (A_{\parallel}), где је b номинална (производна) ширина плоче.

$$b \times t_1 + b \times t_3 = A_{\parallel}$$

$$t_1 + t_3 = t_e \rightarrow t_e = \frac{A_{\parallel}}{b}$$

На основу свега наведеног може се изразити формула за прорачун момената инерције трослојне фурнирске плоче:

$$I = \frac{t_e \times b^3}{12}$$

Према приказаном принципу прорачуна момента инерције трослојне фурнирске плоче може се одредити момент инерције за сваку плочу код које се јавља савијање у равни плоче⁸⁹,

⁸⁸ Општи пример прорачуна трослојне фурнирске плоче изведен је на основу примера прорачуна фурнирске плоче приказаног код Judith J. Stalnaker, Ernest C. Harris, „Plywood and Similar Wood Products“ у *Structural design in wood*, (New York: Springer-Verlag New York Inc., 1997), 257-258.

⁸⁹ Judith J. Stalnaker, Ernest C. Harris, „Plywood and Similar Wood Products“ у *Structural design in wood*, (New York: Springer-Verlag New York Inc., 1997), 257.

с тиме што се ширина ефективних слојева те мења у зависности од броја слојева фурнира. Применом овог принципа може се одредити и моменат инерције плоче када су влакна спољних листова фурнира оријентисана управно на раван у којој се јављају напрезања носача под дејством савијања.

2.3.2 Ламелирана фурнирска грађа (LVL)

2.3.2.1 Појам и класификација

Ламелирана фурнирска грађа (eng. laminated veneer lumber - LVL) је композитни производ на бази дрвета формиран од најмање три међусобно слепљена фурнирска листа са паралелном оријентацијом влакана у лонгитудиналном правцу. Ламелирана фурнирска грађа може садржати до 20% слојева фурнира чија су влакна попречно оријентисана.

Ламелирана фурнирска грађа као нови материјал на бази дрвета настаје 1940-их година, када се примењује као материјал за производњу делова за авионе велике чврстоће.⁹⁰ Овај материјал убрзо због своје лаке обрадивости, природног изгледа, добрих и уједначених механичких карактеристика, налази примену у производњи површина закривљене геометрије. Даљи развој овог производа бележи се 1970-их година, када креће његово интензивније тестирање, чиме и производња, те се он између '70-их и '80-их година XX века појављује као комерцијално доступан материјал на тржишту Северне Америке.⁹¹ Има конструктивну функцију у виду појасних штапова оптерећених на затезање у решеткастим носачима или као део горњих и доњих појасева сложених I-носача.⁹² Након '90-их година XX века долази до његове шире примене као материјала за израду намештаја, али и примене за конструктивне и неконструктивне елементе у архитектонским структурама.

Према истраживањима, LVL се почетком '70-их година XX века формирао од слојева фурнира дебљине до 12.7 mm, да би се већ '90-их година индустријски примењивао у дебљинама од 2.5 mm до 3.2 mm.⁹³ Данас се за производњу овог материјала примењују фурнири дебљине 2.5 mm, 3.2 mm, 3.5 mm.⁹⁴ Према важећем Европском стандарду да би се елемент користио као конструктивни, максимална дебљина сваког слоја фурнира може да износи 6 mm, а минималан број слојева износи пет.⁹⁵ За производњу LVL-а најчешће се примењују фурнири дебљине 3.2 mm, добијени поступком љуштења.⁹⁶ Ширина и дужина ових производа су теоретски неограничене, а ограничавајући фактори су транспорт и процес производње, односно величина и врста преса на којима се ови елементи производе. У зависности од димензије производа, лепљена ламелирана грађа може бити формирана у виду следећих елемената: плоча, дасака, греда.

Класификација LVL-а према намени подељена је у две категорије – грађа за конструкцијску примену (слично лепљеном ламелираном дрвету) и грађа за општу намену (неконструкцијску примену), за општу примену у конструкцијама као неносећи елемент. Према условима употребе лепљена ламелирана грађа класификује се у три категорије грађе за

⁹⁰ Russell C., Moody, Roland Hernandez, и Jen Y. Liu, „Glued Structural Members“ у *Wood handbook: wood as an engineering material*, уредник U.S. Forest Products Laboratory, (Almonte, Ontario: Algrove Publishing, 2002), 240.

⁹¹ Stefo Šorn, „LVL kao mogućnost supstitucije masivnog drveta“, *Prerada drveta* 13(2006): 23-28.

⁹² H. Sasaki, и A.A. Abdullahi, „Lumber: Laminated Veneer“, у *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, (Elsevier, 2016).

⁹³ Russell C., Moody, Roland Hernandez, и Jen Y. Liu, „Glued Structural Members“ у *Wood handbook: wood as an engineering material*, уредник U.S. Forest Products Laboratory, (Almonte, Ontario: Algrove Publishing, 2002), 240.

⁹⁴ Stefo Šorn, „LVL kao mogućnost supstitucije masivnog drveta“, *Prerada drveta* 13(2006): 23-28.

⁹⁵ Институт за стандардизацију Србије, „SRPS EN 14374:2012- Дрвене конструкције—Конструкцијско ламелирано фурнирско дрво—Захтеви“ (Београд:2012).

⁹⁶ Stefo Šorn, „LVL kao mogućnost supstitucije masivnog drveta“, *Prerada drveta* 13(2006): 24,

примену у: сувим условима (LVL/1), влажним срединама (LVL/2) и спољним срединама (LVL/3).⁹⁷

За производњу ламелиране фурнирске грађе може се употребити било која врста дрвета, ипак најчешће се за производњу конструкцијског LVL-а примењују четинари као меке врсте дрвета или листари као тврдо дрво мале и средње запреминске масе. LVL представља материјал који још увек није у потпуности истражен, те се данашња истраживања усмеравају и на испитивање механичких својстава применом различитих врста дрвета, попут еукалиптуса, тополе, букве, гамхара, албизије и осталих аутентичних врста за одређена подручја.⁹⁸

Као и код фурнирских плоча, можемо закључити да ће квалитет ламелиране фурнирске грађе, њене физичке и механичке особине, а самим тим и област њене примене зависити од следећих фактора:

1. броја слојева фурнира и њихове дебљине,
2. врсте фурнира које су примењене у конструкцији плоче,
3. броја слојева фурнира чија су влакана оријентисана управно на правац влаканаца у већинском броју слојева,
4. квалитета фурнира,
5. врсте адхезива.

2.3.2.2 Конструкција ламелиране фурнирске грађе

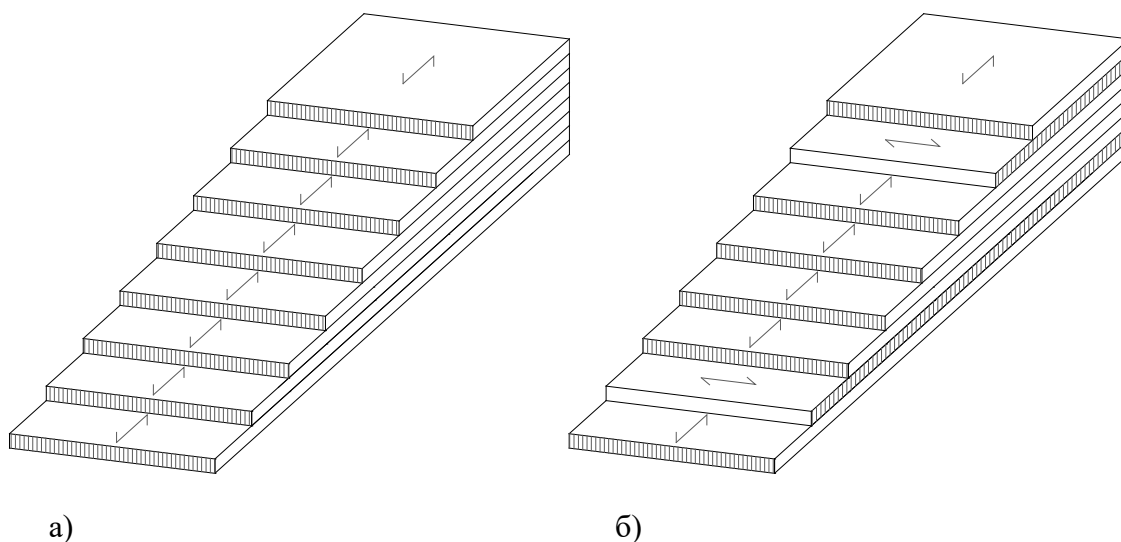
Ламелирана фурнирска грађа као композитни производ на бази дрвета формиран је од тањих слојева фурнира, међусобно слепљених по дужини и ширини, тако да су спојеви фурнира позиционирани смакнуто, на међусобном минималном растојању од 10 cm.⁹⁹ На овај начин грешке дрвета су распоређене кроз читав попречни пресек елемента, чиме је смањена варијабилност у конструктивним карактеристикама и добијен елемент веће чврстоће и бољих механичких карактеристика у односу на монолитно дрво. Смањивањем спојева фурнира дуж елемента избегава се слабење елемента на једном месту, месту споја фурнира. На овај начин смањење чврстоће композитног производа узроковано методом његове производње и ограничењем димензија фурнирских листова, смањено је на минимум.

Ламелирана фурнирска грађа, за разлику од фурнирске плоче, сачињена је од слојева фурнира паралелно оријентисаних (сл.14.а). Приликом формирања ламелиране фурнирске грађе, као и код фурнирских плоча правац влакана спољашњих листова фурнира (лица фурнира) оријентише се у правцу дуже стране композитног производа. На овај начин постиже се његова максимална чврстоћа у правцу распона. Када је то потребно, у складу са пројектантским захтевима за унапређење конструктивних карактеристика и у другом правцу композитног производа, може се формирати ламелирана фурнирска грађа у чијој ће конструкцији неки слојеви фурнира бити управно оријентисани у односу на смер влакана спољашњих фурнирских листова (сл.14.б). Попречно оријентисани фурнирски листови увек се постављају тако да се испоштује правило симетрије плоче.

⁹⁷ Институт за стандардизацију Србије, „SRPS EN 14279:2010 - Ламинирана грађа од фурнира(LVL) - Дефиниције, класификација и спецификације“ (Београд:2010).

⁹⁸ Bekir Cihad Bal, и İbrahim Bektaş, „The effects of wood species, load direction, and adhesives on bending properties of laminated veneer lumber“, *BioResources* 7(3)(2012): 3104-3112.

⁹⁹ Štefo Šorn, „LVL kao mogućnost supstitucije masivnog drveta“, *Prerada drveta* 13(2006): 23-28.



Слика 14. Конструкција ламелиране фурнирске грађе

а) са свим слојевима паралелно оријентисаним, б) са одређеним слојевима управно оријентисаним

Приликом формирања фурнирске плоче мора се поштовати правило непарних броја слојева, односно правило симетрије тако да се оса симетрије пролази кроз средишњи лист фурнирске плоче. Литература о процесима формирања ламелиране фурнирске грађе ни у једном тренутку не дефинише правило непарног броја фурнира у склопу елемента. Раније поменути прописима¹⁰⁰ дефинише се да је шест минималан број слојева фурнира за формирање конструкцијског LVL-а. На основу наведеног можемо закључити да ламелирана фурнирска грађа може и не мора да садржи непаран број слојева фурнира у свом попречном пресеку, али да се приликом њеног формирања са одређеним процентом слојева управно оријентисаних на правац елемента мора поштовати правило симетрије, како би елемент имао уједначене конструктивне карактеристике и једнаку дистрибуцију напрезања кроз свој целокупни попречни пресек.

2.3.2.3 Процес формирања ламелиране фурнирске грађе

Процес производње ламелиране фурнирске грађе у највећој мери је сличан процесу производње фурнирских плоча. Ламелирана фурнирска грађа може се формирати и истим пресема које се примењују за производњу фурнирских плоча, чиме су димензија производа ограничене, или у континуираним топлим пресема, чиме се добијају елементи велике дужине. Време и температура пресовања зависе од врсте дрвета, дебљине слојева фурнира, количине и врсте примењеног адхезива.

2.3.2.4 Конструктивне карактеристике ламелиране фурнирске грађе

Физичка својства

Физичка својства ламелиране фурнирске грађе слична су својствима фурнирских плоча, а међусобно се разликују у зависности од врсте дрвета, типа, броја и дебљине фурнира и примењеног адхезива. Како су физичка својства фурнирских плоча у претходном сегменту рада детаљно објашњена овде неће бити предмет анализе.

¹⁰⁰ Институт за стандардизацију Србије, „SRPS EN 14374:2012- Дрвене конструкције—Конструкцијско ламелирано фурнирско дрво—Захтеви“ (Београд:2012).

Као и физичка, механичка својства LVL-а у директној су зависности од врсте дрвета од кога су израђени фурнири, броја слојева фурнира, запреминске масе, влажности дрвета, примењеног адхезива, конструкције фурнирске плоче и процеса производње плоче. Механичка својства LVL-а формираног са само паралелном оријентацијом влакана, врло често се пореде са механичким својствима монолитног или лепљеног ламелираног дрвета, док се механичка својства LVL-а са постојањем влакана управно оријентисаних на правац напрезања пореде са механичким својствима фурнирских плоча.

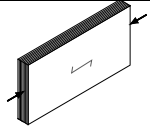
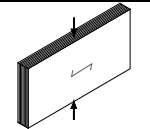
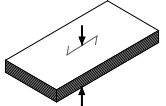
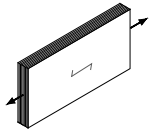
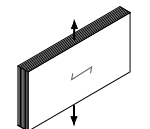
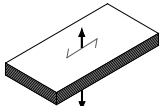
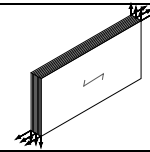
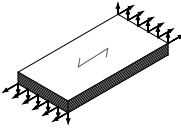
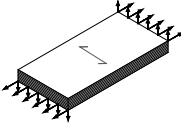
С обзиром да ламелирана фурнирска грађа има много већи број слојева фурнира чија су влакна оријентисана паралелно дужој страници елемента, правилан начин оријентације елемента у конструктивном склопу је такав да он буде изложен напрезањима која делују по његовом подужном правцу, а то су подужно савијање, подужно затезање и друго. Дакле, приликом пројектовања и извођења конструкција треба тежити да положај ослонаца елемента буде управан на правац пружања влакана његових спољашњих фурнирских листова. При одређеним захтевима могу се елементи оријентисати по свом слабијем правцу, што није чест случај у пракси, управо због њихове смањене чврстоће и носивости у правцу управном на влакна.

Као и фурнирске плоче, ламелирана фурнирска грађа у конструкцијама може бити изложена напрезањима која делују у равни елемента или управно на његову раван. Напрезања којима могу бити изложени елементи формирано од LVL-а приказана су у Табели 7. Вредности основних допуштених напона напрезања ламелиране фурнирске грађе формиране од свих паралелно оријентисаних слојева приказане су у Табели 8, док су вредности основних допуштених напона напрезања ламелиране фурнирске грађе са одређеним бројем слојева управно оријентисаним приказани у Табели 9.

Табела 7. Могућа напрезања којима могу бити изложени елементи формирано од LVL-а¹⁰¹

Редни број	Врста напрезања и положај влакана покровног фурнира (види скице)	Ознака	
		SRPS	EN
1	Савијање у равни плоче Модул еластичности	$\sigma_{m\parallel}$ E_{\parallel}	$f_{m,0,edge}$ S $E_{m,0,edge}$
	Савијање у равни плоче Модул еластичности Смицање у равни плоче	$\sigma_{m\perp}$ E_{\perp} $\tau_{m\parallel}$	$f_{m,90,edge}$ $E_{m,90,edge}$ $f_{v,90,edge}$
2	Савијање управно на раван плоче Модул еластичности	$\sigma_{m\parallel}$ E_{\parallel}	$f_{m,0,flat}$ $S_{m,flat}$ $E_{m,0,flat}$
	Савијање управно на раван плоче Модул еластичности	$\sigma_{m\perp}$ E_{\perp}	$f_{m,90,flat}$ $E_{m,90,flat}$

¹⁰¹ Преузета, модификована и допуњена табела из *Laminated veneer lumber (LVL) bulletin: New European strength classes*. Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. and Federation of Finnish Woodworking Industries, 2019.

3	Притисак у равни плоче		$\sigma_{c\parallel}$	$f_{c,0}$ $E_{c,0}$
			$\sigma_{c\perp}$	$f_{c,90,edge}$ $E_{c,90,edge}$
4	Притисак управан на раван плоче		$\sigma_{c\perp}$	$f_{c,90,flat}$ $E_{c,90,flat}$
5	Затезање у равни плоче		$\sigma_{t\parallel}$	$f_{t,0}$ $E_{t,0}$
			$\sigma_{t\perp}$	$f_{t,90,edge}$ $E_{t,90,edge}$
6	Затезање управно на раван плоче		$\sigma_{t\perp}$	$f_{t,90,flat}$ $E_{t,90,flat}$
7	Смицање управно на раван плоче		τ_{\perp}	$f_{v,0,edge}$ $G_{0,edge}$
8	Смицање у равни плоче Модул смицања		τ_{\parallel}	$f_{v,0,flat}$ $S_{v,flat}$ $G_{0,flat}$
			τ_{\perp}	$f_{r,90,flat}$ $G_{90,flat}$

Табела 8. Вредности основних допуштених напона напрезања ламелиране фурнирске грађе формиране од свих паралелно оријентисаних слојева фурнира (LVL-P)¹⁰²

Врста напрезања и положај влакана покровног фурнира ^A		Симбол	Јединице	LVL 32 P	LVL 35 P	LVL 48 P	LVL 50 P	LVL 80 P
Чврстоћа на савијање	у равни плоче, паралелно влакнима (висина 300 mm)	$f_{m,0,edge,k}$	N/mm ²	27	30	44	46	75
	управно на раван плоче, паралелно влакнима	$f_{m,0,flat,k}$	N/mm ²	32	35	48	50	80
	коэффицијент димензионалне стабилности	S	–	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Чврстоћа на загезање	паралелно влакнима (дужина 3000 mm)	$f_{t,0,k}$	N/mm ²	22	22	35	36	60
	управно на влакна, у равни плоче	$f_{t,90,edge,k}$	N/mm ²	0.5	0.5	0.8	0.9	1.5
Чврстоћа на притисак	паралелно влакнима, употребна класа 1	$f_{c,0,k}$	N/mm ²	26	30	35	42	69
	паралелно влакнима, употребна класа 2 ^B	$f_{c,0,k}$	N/mm ²	21	25	29	35	57
	управно на влакна, у равни плоче	$f_{c,90,edge,k}$	N/mm ²	4	6	6	8.5	14
	управно на влакна, управно на раван плоче (искључујући бор)	$f_{c,90,flat,k}$	N/mm ²	0.8	2.2	2.2	3.5	12
	управно на влакна, управно на раван плоче, бор	$f_{c,90,flat,k,pine}$	N/mm ²	MDV ^B	3.3	3.3	3.5	–Г
Чврстоћа на смицање	управно на раван плоче, паралелно влакнима	$f_{v,0,edge,k}$	N/mm ²	3.2	3.2	4.2	4.8	8
	у равни плоче, паралелно влакнима	$f_{v,0,flat,k}$	N/mm ²	2.0	2.3	2.3	3.2	8
Модул еластичности	паралелно влакнима	$E_{0,mean}^A$	N/mm ²	9600	12000	13800	15200	16800
	паралелно влакнима	$E_{0,k}^B$	N/mm ²	8000	10000	11600	12600	14900
	управно на влакна, у равни плоче	$E_{c,90,edge,mean}^E$	N/mm ²	MDV ^B	MDV ^B	430	430	470
	управно на влакна, у равни плоче	$E_{c,90,edge,k}^3$	N/mm ²	MDV ^B	MDV ^B	350	350	400
Модул смицања	управно на раван плоче, паралелно влакнима	$G_{0,edge,mean}$	N/mm ²	500 ^Ж	500 ^Ж	600	650	760
	управно на раван плоче, паралелно влакнима	$G_{0,edge,k}$	N/mm ²	300 ^Ж	350 ^Ж	400	450	630
	у равни плоче, паралелно влакнима	$G_{0,flat,mean}$	N/mm ²	320 ^Ж	380 ^Ж	380	600	850
	у равни плоче, паралелно влакнима	$G_{0,flat,k}$	N/mm ²	240 ^Ж	270 ^Ж	270	400	760
Густина		ρ_{mean}	kg/m ³	440	510	510	580	800
		ρ_k	kg/m ³	410	480	480	550	730

¹⁰² *Laminated veneer lumber (LVL) bulletin: New European strength classes.* Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. and Federation of Finnish Woodworking Industries, 2019.

Табела 9. Вредности основних допуштених напона напрезања ламелиране фурнирске грађе са одређеним бројем управно оријентисаних слојева (LVL-C)¹⁰³

Врста напрезања и положај влакана покривног фурнира ^A		Симбол	Јединице	LVL 22 C	LVL 25 C	LVL 32 C	LVL 36 C	LVL 70 C	LVL 75 C
Чврстоћа на савијање	у равни плоче, паралелно влакнима (висина 300 mm)	$f_{m,0,edge,k}$	N/mm ²	19	20	28	32	54	60
	управно на раван плоче, паралелно влакнима	$f_{m,0,flat,k}$	N/mm ²	22	25	32	36	70	75
	коэффициент димензионалне стабилности	S	—	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
	управно на раван плоче, управно на влакна	$f_{m,90,flat,k}$	N/mm ²	MDV ^B	MDV ^B	7	8	32	20
Чврстоћа на затезање	паралелно влакнима (дужина 3000 mm)	$f_{t,0,k}$	N/mm ²	14	15	18	22	45	51
	управно на влакна, у равни плоче	$f_{t,90,edge,k}$	N/mm ²	4	4	5	5	16	8
Чврстоћа на притисак	паралелно влакнима, употребна класа 1	$f_{c,0,k}$	N/mm ²	18	18	18	26	54	64
	паралелно влакнима, употребна класа 2 ^b	$f_{c,0,k}$	N/mm ²	15	15	15	21	45	53
	управно на влакна, у равни плоче	$f_{c,90,edge,k}$	N/mm ²	8	8	9	9	45	23
	управно на влакна, управно на раван плоче (искључујући бор)	$f_{c,90,flat,k}$	N/mm ²	1.0	1.0	2.2	2.2	16	16
	управно на влакна, управно на раван плоче, бор	$f_{c,90,flat,k,pine}$	N/mm ²	MDV ^B	MDV ^B	3.5	3.5	— ^г	— ^г
Чврстоћа на смицање	управно на раван плоче, паралелно влакнима	$f_{v,0,edge,k}$	N/mm ²	3.6	3.6	4.5	4.5	7.8	7.8
	у равни плоче, паралелно влакнима	$f_{v,0,flat,k}$	N/mm ²	1.1	1.1	1.3	1.3	3.8	3.8
	у равни плоче, управно на влакна	$f_{v,90,flat,k}$	N/mm ²	MDV ^B	MDV ^B	0.6	0.6	MDV ^B	MDV ^B
Модул еластичности	паралелно влакнима	$E_{0,mean}^d$	N/mm ²	6700	7200	10000	10500	11800	13200
	паралелно влакнима	$E_{0,k}^e$	N/mm ²	5500	6000	8300	8800	10900	12200
	управно на влакна, у равни плоче	$E_{c,90,edge,mean}^h$	N/mm ²	MDV ^B	MDV ^B	2400	2400	MDV ^B	MDV ^B
	управно на влакна, у равни плоче	$E_{c,90,edge,k}^j$	N/mm ²	MDV ^B	MDV ^B	2000	2000	MDV ^B	MDV ^B
	управно на влакна, управно на раван плоче	$E_{m,90,flat,mean}$	N/mm ²	MDV ^B	MDV ^B	1200	2000	MDV ^B	MDV ^B
	управно на влакна, управно на раван плоче	$E_{m,90,flat,k}$	N/mm ²	MDV ^B	MDV ^B	1000	1700	MDV ^B	MDV ^B
Модул ул сми	управно на раван плоче, паралелно влакнима	$G_{0,edge,mean}$	N/mm ²	500 ^ж	500 ^ж	600	600	820	820

¹⁰³ Преузето из *Laminated veneer lumber (LVL) bulletin: New European strength classes*. Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. and Federation of Finnish Woodworking Industries, 2019.

	управно на раван плоче, паралелно влакнима	$G0,edge,k$	N/mm ²	300 ^ж	300 ^ж	400	400	660	660
	у равни плоче, паралелно влакнима	$G0,flat,mean$	N/mm ²	70 ^ж	70 ^ж	80	120	430	430
	у равни плоче, паралелно влакнима	$G0,flat,k$	N/mm ²	55 ^ж	55 ^ж	60	100	380	380
	у равни плоче, управно на влакна	$G90,flat,mean$	N/mm ²	MDV ^Б	MDV ^Б	22	22	MDV ^Б	MDV ^Б
	у равни плоче, управно на влакна	$G90,flat,k$	N/mm ²	MDV ^Б	MDV ^Б	16	16	MDV ^Б	MDV ^Б
Густина		ρ_{mean}	kg/m ³	440	440	510	510	800	800
		ρ_k	kg/m ³	410	410	480	480	730	730

Напомене:

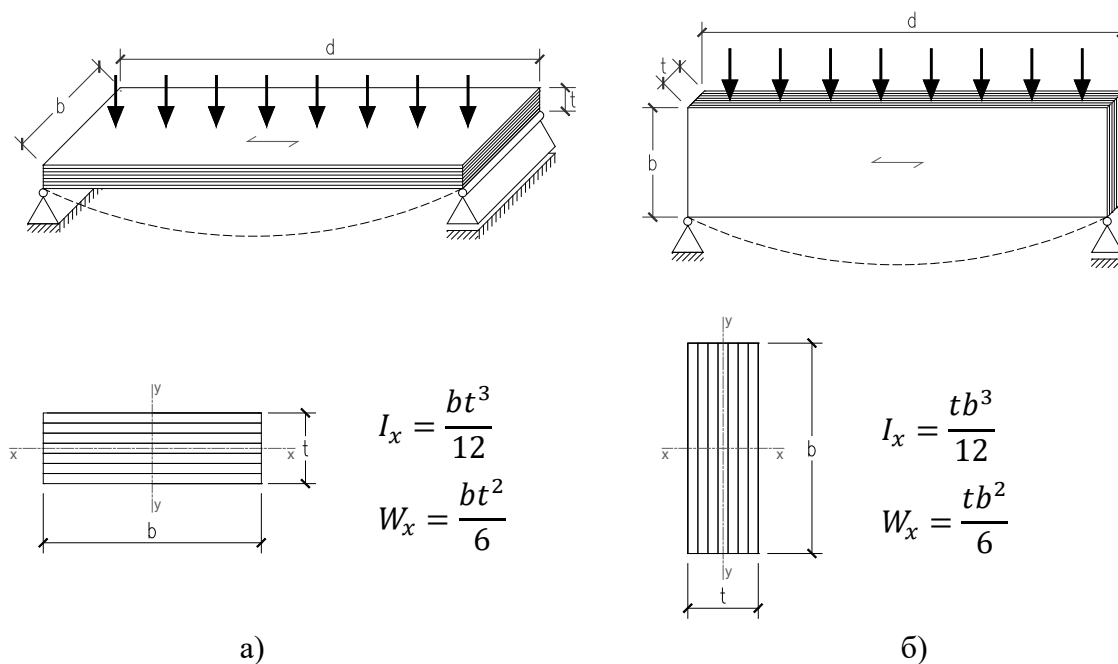
- А. Додатна механичка својства која нису обухваћена у овој табели, могу се дефинисати као појединачне вредности.
- Б. Вредност се може применити и у употребној класи 1.
- В. Механичко својство се не дефинише као општа вредност, већ као декларисана вредност појединачног произвођача (MDV).
- Г. Вредност се не дефинише за БОР.
- Д. Односи се на $Em,0,edge,mean$, $Et,0,mean$, $Em,0,flat,mean$, и $Ec,0,mean$.
- Ђ. Односи се на $Em,0,edge,k$, $Et,0,k$, $Em,0,flat,k$, и $Ec,0,k$.
- Е. Односи се на $Et,90,edge,mean$.
- Ж. Својство не треба тестирати уколико сва остала својства задовољавају минималне вредности за класу чврстоће.
- З. Односи се на $Et,90,edge,k$.
- И. Односи се на $Em,90,edge,mean$, $Et,90,edge,mean$ и $Ec,90,edge,mean$.
- Ј. Односи се на $Em,90,edge,k$, $Et,90,edge,k$ и $Ec,90,edge,k$.

Одређивање геометријских карактеристика при димензионисању носача од ламелиране фурнирске грађе

У конструкцијској примени најчешће се примењују LVL носачи формиран од паралелно оријентисаних слојева фурнира. Одређивање геометријских карактеристика на овај начин формираног носача врши се по принципима одређивања геометријских карактеристика правоугаоног попречног пресека. При одређивању момента инерције, као и отпорног момента у прорачун се укључују сви слојеви фурнира, односно целокупни попречни пресек елемента (сл.15).¹⁰⁴

Изузетак представља ламелирана фурнирска грађа која по одређеним захтевима садржи неколико слојева фурнира управно оријентисаних на правац плоче. У том случају, у дистрибуцији напрезања приликом изложености елемента оптерећењу фурнири који доминантно преузимају напрезања, тј. „ефективни“ слојеви су они слојеви у којима су влакна фурнира оријентисана паралелно подужном правцу елемента (сл.16). Фурнири оријентисани управно у малој мери учествују у дистрибуцији напона и прихватању напрезања.

¹⁰⁴ EWPAА, *Design Guide: Structural Plywood and LVL*, (EWPAА - Engineered Wood Products Association of Australasia, Australia: 2018), 54.



Где је: I_x –момент инерције плоче око осе x , W_x –отпорни момент око осе x ,
 t –дебљина плоче, b –ширина плоче.

Слика 15. Одређивање геометријских карактеристика попречног пресека ЛВЛ-а
 а) хоризонтална и б) вертикална оријентација

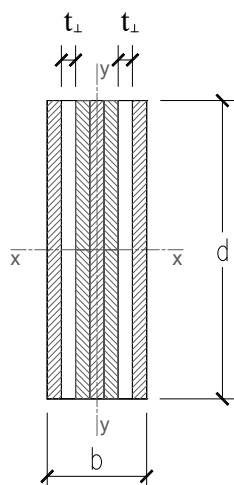
Поступци одређивања геометријских карактеристика попречног пресека, тј. одређивање „ефективне“ површине фурнира у попречном пресеку врши се по принципима одређивања истог у конструкцијама фурнирских плоча¹⁰⁵ и биће приказани кроз даље анализе механичких својстава елемената. Димензионисање елемената врши се по истим принципима димензионисања елемената од монолитног дрвета, с тим што се у обзир морају узети корективни коефицијенти дефинисани стандардима за прорачун дрвених конструкција.¹⁰⁶

Притисак и затезање LVL-а

При димензионирању ламелиране фурнирске грађе која је изложена аксијалним притискајућим или затезућим силама, у прорачун су укључени само они слојеви фурнира чија су влакна паралелна правцу напрезања. Слојеви фурнира са влакнима управно оријентисаним на правац напрезања се изостављају у прорачуну геометријских карактеристика носача. Детаљан начин прорачуна геометријских карактеристика приказан је на слици 16.

¹⁰⁵ EWPAА, *Design Guide: Structural Plywood and LVL*, (EWPAА - Engineered Wood Products Association of Australasia, Australia: 2018), 55.

¹⁰⁶ У Србији тренутно важећи стандард: Институт за стандардизацију Србије „SRPS EN 1995-1-1:2012, Еврокод 5 – Пројектовање дрвених конструкција – Део 1-: Општа правила и правила за зграде“ (Београд:2012) и Институт за стандардизацију Србије „SRPS EN 1995-1-1:2012/A2:2016 - Еврокод 5 – Пројектовање дрвених конструкција – Део 1-: Општа правила и правила за зграде – Измена 2“ (Београд:2016).



$$I_x = \frac{(b - 2 \times t_l) \times d^3}{12}$$

$$W_x = \frac{(b - 2 \times t_l) \times d^2}{6}$$

$$A_e = (b - 2 \times t_l) \times d$$

Где је: I_x –ефективни момент инерције плоче око осе x , W_x –ефективни отпорни момент око осе x , A_e –ефективна површина попречног пресека, t_l –слојеви попречно оријентисани, b –ширина елемента, d –висина елемента.

Слика 16. Поступак одређивања геометрије попречног пресека LVL-а са слојевима управно оријентисаним напрезању

Смицање у равни и управно на раван LVL-а

Конструкција ламелиране фурнирске грађе врло је слична конструкцији фурнирске плоче, из разлога што је основни чинилац композитног материјала фурнирски слојеви међусобно повезани адхезивом. Самим тим и код овог материјала могу се јавити две врсте смицања – смицање у равни плоче (енгл. *rolling shear; interlaminar shear; planar shear*) и смицање управно на раван плоче (енгл. *shear through thickness; panel shear*). Утицај на смичућу чврстоћу елемента може имати врста дрвета, број слојева фурнира, њихова дебљина, као и врста и количина примењеног адхезива.

У неким истраживања испитиван је утицај дебљине фурнира на смичућу чврстоћу LVL-а. Доказано је да се са повећањем дебљине фурнира добијају мања слабљења чврстоће конструктивног елемента, као и да се утиче на смањење отпорности на смицање. Наведено се јавља као последица начина резања фурнирске грађе. Приликом љуштења фурнира у дебљим фурнирским листовима долази до микро пукотина, које чине отворенију структуру и које се под напрезањем елемента могу проширити. Исте пукотине у структури дрвета проблем могу направити и код лепљеног ламелираног дрвета. Уколико су слојеви фурнира тањи, пукотине су мање утицајне и најчешће су близу слоја адхезива, те се напрезања лакше распоређују кроз слојеве.¹⁰⁷ Код тањих слојева фурнира уколико и дође до мањих пукотина и оштећења на фурниру, приликом nanoшења адхезива и у самом процесу лепљења, адхезив боље пенетрира у микропукотине, чиме се смањује могућност даљег ширења пукотина, а напрезања се распоређују како кроз слојеве фурнира тако и кроз адхезив.

Смицање у ламелираној фурнирској грађи формираној од свих слојева фурнира паралелно оријентисаних врши се кроз целокупну површину попречног пресека, те се тиме и геометријске карактеристике одређују на тај начин, што је претходно описано и приказано на слици 15. Према ЕWРАА одређивање геометријских карактеристика код смицања у равни и смицања управног на раван LVL-а формираних са одређеним бројем слојева управно

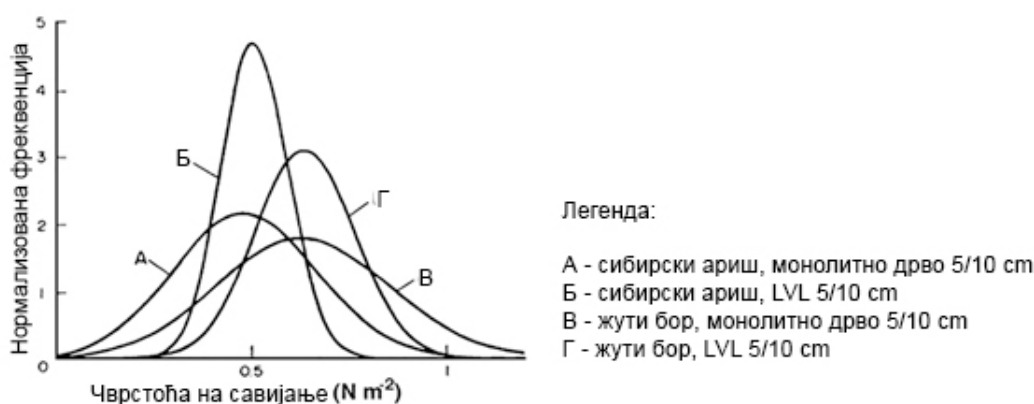
¹⁰⁷ Citra Yanto Ciki Purba, Guillaume Pot, Joffrey Viguiet, Julien Ruelle, Louis Denaud, и Meriem Fournier, „MECHANICAL PROPERTIES OF LAMINATED VENEER LUMBER (LVL) MADE OF SECONDARY QUALITY OAK AND BEECH: THE EFFECT OF VENEER THICKNESS“, *World Conference of Timber Engineering*, (Seoul, Republic of Korea, 2018).

оријентисаним на правац елемента, разликује се у зависности од врсте смицања које се у њему јавља. Код смицања у равни плоче активним се сматра целокупни попречни пресек елемента, док се код смицања управно на раван, а које се најчешће јавља као последица у елементима оптерећеним на савијање, „ефикасном“ површином сматра површина слојева фурнира код којих су влакна паралелно оријентисана у односу на правац елемента. Прорачун је идентичан прорачуну геометријских карактеристика – ефективне површине при смицању управно на раван фурнирских плоча.¹⁰⁸

Савијање у равни и управно на раван LVL-а

Еластична својства ламелиране фурнирске грађе сличнија су еластичним својствима монолитног дрвета, иако су знатно унапређена у односу на монолитно дрво. Модули еластичности LVL-а различити су у попречном и подужном правцу елемента. Доминантан модул еластичност је у подужном правцу, паралелном влакнима, док је у попречном правцу знатно смањен, па код LVL-а са свим слојевима фурнира оријентисаним у истом правцу E_{\parallel} може бити и до 30 пута веће од E_{\perp} .¹⁰⁹ Значајно смањење ове разлике постиже се уметањем слојева фурнира управно оријентисаних на правац елемента.

На слици 17. приказан је дијаграм савојне чврстоће добијен поређењем савојне чврстоће монолитног дрвета и ламелиране фурнирске грађе, добијене из истог трупца. Утврђено је да порастом броја слојева расте и савојна чврстоћа материјала. На дијаграму се уочава да је драстичније побољшање еластичних својстава постигнуто формирањем ламелиране фурнирске грађе нижег квалитета трупца (А и Б). Савојна чврстоћа LVL-а формираног од дрвета бољих механичких карактеристика – жутог бора, јесте унапређена у односу на монолитно дрво, али је степен унапређења много мањи него што је то случај са сибирским аришем.¹¹⁰



Слика 17. Дијаграм савојне чврстоће монолитног дрвета и LVL-а формираног из истог трупца¹¹¹

Као и код фурнирских плоча, на еластична својства LVL-а такође утичу врста дрвета, број слојева фурнира, дебљина и оријентација фурнира и примењени адхезив. С обзиром да је

¹⁰⁸ EWPAА, *Design Guide: Structural Plywood and LVL*, (EWPAА - Engineered Wood Products Association of Australasia, Australia: 2018), 55.

¹⁰⁹ Податак добијен на основу таблице Класа чврстоће LVL-а приказане у: *Laminated veneer lumber (LVL) bulletin: New European strength classes*. Ingenieur- Holzbau and Finnish Woodworking Industries, 2019.

¹¹⁰ Н. Sasaki, и А.А. Abdullahi, „Lumber: Laminated Veneer“, у *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, (Elsevier, 2016).

¹¹¹ преузето из Н. Sasaki, и А.А. Abdullahi, „Lumber: Laminated Veneer“, у *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, (Elsevier, 2016).

ламелирана фурнирска грађа материјал који је још увек у фази испитивања, и даље се истражују начини како би се унапредила његова еластична својства.¹¹²

LVL носачи, попут фурнирских плоча, могу бити изложени напрезању насталом под дејством оптерећења које делује управно на раван елемента, или у његовој равни. *Савијање управно на раван* (енгл. *flatwise bending*), најчешће се јавља код плочастих елемената формираних од LVL-а, примењених као подне и кровне облоге. *Савијање у равни плоче* (енгл. *edgewise bending*), јавља се код плочастих елемената - зидних облога, дијафрагми, I-гредних носача (средишњег вертикалног елемента), бочних страница дрвених сандучастих носача сложеног попречног пресека примењених као гредни елементи, или код LVL-а у виду гредних елемената.

Када је елемент формиран од LVL-а изложен напонском стању савијања у равни плоче, у пријему и дистрибуцији напона учествују „ефективни“ слојеви, чија су влакна паралелна правцу напрезања у елементу. Прорачун геометријских карактеристика врши се на исти начин као што је објашњено на слици 16. У случају изложености елемента савијању управном на раван плоче, за димензионисање примењују се редуковане површине попречног пресека, и на основу тога су израчунати отпорни моменти и моменти инерције. Ефективна површина се израчунава као трансформисани попречни пресек – слојеви са влакнима паралелно оријентисаним се израчунавају у целокупној површини, док је ширина слојева управно оријентисаних на правац напрезања једнака $1/35$ ширини панела, што проистиче из односа модула еластичности $E_I = \frac{E_{II}}{35} \rightarrow b_2 = \frac{b}{35}$.¹¹³ Принцип прорачуна идентичан је претходно приказаном принципу прорачуна за фурнирску плочу (погледати поглавље *Одређивање геометријских карактеристика фурнирских плоча*, слика 12. – Савијање управно на раван фурнирске плоче).

¹¹² Bekir Cihad Bal, и İbrahim Bektaş, „The effects of wood species, load direction, and adhesives on bending properties of laminated veneer lumber“, *BioResources* 7 (3)(2012): 3104-3112.

¹¹³ EWPAА, *Design Guide: Structural Plywood and LVL*, (EWPAА - Engineered Wood Products Association of Australasia, Australia: 2018), 55.

3. Плоче на бази фурнира

Развој и примена у архитектури

3.1 Архитектура егзоскелета, дефиниција и појам

Од самог почетка производње композитних плоча на бази дрвета, пре свега фурнирских плоча, а касније и ламелиране фурнирске грађе ови материјали имају примену у пољу архитектуре, не само унутрашње, у виду намештаја, већ и у конструктивном склопу објеката, као конструктивни или неконструктивни елементи. Претходно је поменуто да елементи произведени од материјала на бази фурнира могу имати конструктивну улогу, као елементи који прихватају и преносе оптерећења у конструкцији, најчешће као вертикалне и хоризонталне дијафрагме, гредни носачи или део носача сложеног попречног пресека, али и неконструктивну улогу, у виду кровне, подне или зидне облоге. Све наведено може се сматрати конвенционалним начинима примене плоча на бази фурнира. Ипак, постоје и други начини примене плоча на бази фурнира, за које можемо слободно рећи да су неконвенционални начини примене, а то је пре свега у форми носеће спољашње опне просторних структура – егзоскелета.

Егзоскелет (грчки: $\acute{\epsilon}\xi\omega$ – $\acute{\epsilon}\chi\delta$ – изван, споља) је назив за спољну, носећу структуру изван тела, а унутар које се налази организам и која заправо чини његову подупирућу структуру. Појам егзоскелет у многе науке и дисциплине попут медицине, али и гране технике посебно у роботiku и архитектуру улази процесима биомимикрије природе. У животињском свету постоје ендо и егзо скелетни организми. Ендоскелетни систем је најчешћи систем кичмењака, костур који чини главну унутрашњу носећу структуру организма, и помоћу њега омогућена су сва механичка кретања. Егзоскелетни системи су системи структурне потпоре мањих животиња, најчешће мекушаца или зглавкара, који представљају њихов оклоп.¹¹⁴

У животињском свету егзоскелет је најчешће спољни, лагани омотач, повезан са другим деловима организма, а чија је улога првенствено да штити организам од спољашњих утицаја – од прекомерне изложености сунчевој светлости, температури, дехидратацији или физичким и механичким оштећењима. Улога егзоскелета најчешће је сложена, те може бити конструктивна, термална, естетска, функционална и др. Дени и МекФекцн (M.Denny и A.McFadzean) наводе да су скелети мекушаца – љуштуре, најчешће формирано од калцијум-карбоната, док антроподи свој егзоскелет – кутикулу, формирају од хитинских влакана, ојачаних протеинима или биоминералима. Неретко кутикула може бити састављена из неколико слојева, формирајући ендо и егзо кутикулу. Спољашњи слој кутикуле напрегут је на притисак, док је унутрашњи слој напрегнут на затезање.¹¹⁵ Директна аналогија може се уочити и у архитектури, у понашању конструктивних елемената, посебно линијских и површинских елемената оптерећених на савијање.

Процесом биомимикрије можемо дефинисати да је егзоскелет у архитектури спољашња структура која уједно постаје носећа конструкција објекта, а њена улога није само улога статичког и конструктивног елемента, већ она постаје структурални омотач који може да реши сложене скупове проблема интегришући у себе различите грађевинске системе.¹¹⁶ Егзоскелет

¹¹⁴ Mark Denny и Alan McFadzean., “Structural Engineering”, *Engineering Animals: how life works*, (Cambridge, Massachusetts: The Belknap Press of Harvard University Press, 2011), 35-57.

¹¹⁵ Mark Denny и Alan McFadzean., “Structural Engineering”, *Engineering Animals: how life works*, (Cambridge, Massachusetts: The Belknap Press of Harvard University Press, 2011), 35-57.

¹¹⁶ Giuliana Scuderi, „Adaptive building exoskeletons: A biomimetic model for the rehabilitation of social housing“, *International Journal of Architectural Research* 9 (1) (2015): 134-143.

представља заправо омотач објекта чија је улога конструктивна и представља опну која делимично или потпуно дели спољашњи и унутрашњи простор објекта. Егзоскелет дефинише естетске вредности формирајући геометрију објекта, његов облик и експресију, а формиран у виду опне потпуно постаје термички омотач, тј. контролише енергетске перформансе објекта. Егзоскелет у свом примарном значењу, употребом само спољашње структуре објекта, без интеграције са унутрашњом конструкцијом – ендоскелетом примењује се код свега неколико конструктивних система, а то су пре свега системи просторних површинских структура – љуске, набори и реципрочне структуре. Могућности формирања егзоскелетних структура применом плоча на бази фурнира још увек се развијају и унапређују кроз експериментална истраживања просторних структура.

Анализирајући процесе и промене понашања егзоскелетних структура животињског света, уочава се важна карактеристика ових организама, а то је способност њиховог прилагођавања променама. Егзоскелети најчешће путем механичких рецептора (сензила) нервном систему достављају информације о променама средине којима се морају прилагодити. На основу добијених информација егзоскелетни системи врше модификације које се најчешће огледају у промени дебљине егзоскелета, промени крутости или оријентације влакана.¹¹⁷ Веома честа појава је задебљање љуштуре или кутикуле на одређеним местима која су доминантно изложена напрезањима. Разматрани начин понашања тешко је примењив на архитектонским структурама, посебно са конструктивног аспекта, односно, не постоје начини на којима би конструкција мењала своје механичке карактеристике током експлоатације. Ипак, оваква понашања у конструкторству се предвиђају анализом и дизајном конструкција, чиме се претходно претпостављају могуће изложености конструкција различитим утицајима. Предност егзоскелетних архитектонских структура пројектованих од плоча на бази фурнира може се огледати у чињеници да постоји могућност примене истог материјала различитих конструктивних карактеристика. У зависности од потреба које материјал мора да задовољи да би се формирала нека структура, могу се применити различити композитни материјали на бази дрвета, првенствено фурнирске плоче или LVL плоче, формиране од различитих врста дрвета, дебљина, броја слојева фурнира, примењеног адхезива и сл. Такође, могу се разматрати и различити начини за побољшање механичких карактеристика одређеног материјала, па се сходно томе структуре могу формирати комбинованом употребом плоча на бази фурнира и истих плоча унапређених конструктивних карактеристика, односно плоча на бази фурнира ојачаних полимерним влакнима.

Поулин (М. Pawlyn) наводи да је још једна велика предност егзоскелетних организама, а која би се могла одразити и на архитектуру, управо структура самог материјала од кога је сачињен егзоскелет. Егзоскелет – љуштуре или кутикула никада није сачињена од хомогених материјала. Природа је развила систем у коме се формира матрица са ћелијским елементима – хемотитима, који имају изузетну отпорност на пуцање. Сваки елемент има тачку у својој структури у којој се пукотина зауставља, те је на тај начин веома тешко да се пукотине концентришу на једном месту у структури, већ се оне и ако постоје равномерно распоређују читавом површином опне.¹¹⁸ Кроз даља истраживања унапређења материјала на бази фурнирских плоча и побољшања њихових механичких карактеристика разматраће се начини формирања пукотина и оштећења материјала, чиме ће се анализирати и могућности унапређења или спречавања наведених деформација. Егзоскелет у животињском свету најчешће је формиран у виду љуске. На основу тога, аналогија у оквиру рада поставиће се и са структуралним карактеристикама љуски и кутикула животињског света. Важно је напоменути да су сви егзоскелети формиран тако да се максимално искористи ефикасност елемента, са минималном количином материјала. Управо љуске карактерише оптималан однос

¹¹⁷ Giuliana Scuderi, „Adaptive building exoskeletons: A biomimetic model for the rehabilitation of social housing“, *International Journal of Architectural Research* 9 (1) (2015): 134-143.

¹¹⁸ Michael Pawlyn, *BIOMIMICRY in ARCHITECTURE*, (Newcastle: RIBA Enterprises Ltd, 2016), 16.

механичке чврстоће материјала од кога је формирана и његове сопствене тежине. Све наведено је од пресудне важности и може пружити значају предност у избору материјала на бази дрвета за формирање егзоскелетних архитектонских структура.

3.2 Примена плоча на бази фурнира у архитектури

Плоче на бази фурнира у архитектонским објектима могу имати различите примене. Највећа и најчешћа је примена неконструкцијских фурнирских плоча је у виду зидне, подне, плафонске или кровне облоге. Ове плоче могу прихватити мања оптерећења и пренети их даље до потконструкције, али се не сматрају конструктивним плочама, а њихова дебљина је у функцији распона потконструкције на којој су постављене.

Конструкцијске фурнирске плоче примену налазе у формирању хоризонталних и/или вертикалних дијафрагми, тј. бочних зидова за укрућење објекта или завршних слојева пода преко међуспратне потконструкције чији су елементи постављени на нешто већем распону. Код оваквих примена фурнирске плоче заједно са елементима потконструкције – оквирним структурама формирају систем способан да прихвати хоризонталне силе које делују на конструкцију. Неретко конструкцијске фурнирске плоче користе се и у виду линијских – гредних елемената. Уобичајена је примена фурнирске плоче за формирање сложених I гредних носача или сандучастих носача правоугаоног попречног пресека. Позиција фурнирских плоча код оваквих носача је у виду ребра (I носачи) или бочних страница (носачи сандучастог попречног пресека). Ипак, као гредни носачи чешће се примењује елементи ламелиране фурнирске грађе и то у свом пуном попречном пресеку, управо због својих механичких карактеристика посебно изражених у једном правцу.

Неконвенционални начини примене фурнирских и LVL- плоча сагледавају се у њиховој примени као носећи елементи у просторним егзоскелетним структурама, пре свега у конструкцијама љуски и набора, као и реципрочним конструкцијама.

3.2.1 Кровне, подне и зидне облоге

Облоге од плоча на бази фурнира могу бити зидне, подне, плафонске или кровне. За елементе облоге примењују се неконструкцијске фурнирске плоче, а данас их све чешће замењују OSB плоче. Као што је претходно наведено неконструкцијске фурнирске плоче најчешће су плоче чија су завршна лица декоративни фурнири, и постављају се као декоративни елементи облоге (*поглавље 2.3.1. Фурнирске плоче (PW), 2.3.1.1 Појам и класификација*). На местима где се предвиђа прихватање оптерећења путем фурнирске плоче и његова даља дистрибуција на елементе потконструкције, или где је фурнирска плоча уједно и завршна облога и елемент укрућења у конструкцији примењују се искључиво конструкцијске фурнирске плоче.

Зидне облоге подразумевају примену фурнирских плоча као завршног елемента зида, најчешће у унутрашњим просторима. За овакав начин примене оне морају испуњавати пре свега захтеване естетске перформане. Фурнирске плоче у зидним структурама ослањају се директно на зидну конструкцију, најчешће вертикалне или хоризонталне дрвене гредне елементе, међусобно постављене на малим растојањима. У систему зидних облога фурнирске плоче могу бити и елемент потконструкције – међуслој или подслој, који ће утицати на повећање конструктивне чврстоће и стабилности зидног елемента, а на који ће се директно постављати завршна фасадна облога или декоративна зидна облога. У том случају фурнирске плоче које су примењене као међуслој, морају бити конструкцијске плоче за примену у грађевини, које морају имати способност прихватања и преношења оптерећења. Као међуслој,

фурнирске плоче се постављају посебно на углове објеката грађених применом скелетне дрвене конструкције, како би се конструктивно укрутили и стабилизовали углови.¹¹⁹

Фурнирска плоча као подна или плафонска облога прати претходно описану примену фурнирских плоча као зидних облога. Оне могу бити завршни слојеви у међуспратним конструкцијама, при чему посебно можемо имати подну и плафонску облогу, између којих остаје скривена међуспратна конструкција, или фурнирска плоча може бити уједно подна и плафонска облога, при чему је међуспратна потконструкција видљива у ентеријеру. У овом случају фурнирска плоча је конструкцијска плоча, прима оптерећења и преводи их даље на елементе потконструкције, а у зависности од размака елемената потконструкције мора се дефинисати и њена носивост. Такође је веома важна и оријентација фурнирске плоче. Фурнирске плоче се морају оријентисати по свом јачем правцу, односно спољашњи листови фурнира плоча морају бити управно оријентисани на правац пружања гредних носача на које се плоча ослања. Пожељно је да се гредни носачи (ребра) постављају на међусобно малим растојањима. Одабир фурнирске плоче при дизајну и прорачуну оваквих структура врши се на основу угиба плоче у пољу, под дејством једнакоподељеног оптерећења.

Фурнирске плоче у елементима подне облоге могу имати и позицију међуслоја, слоја који се директно ослања на гредну међуспратну конструкцију, а преко кога се постављају остали завршни слојеви пода. Такође, може се користити у виду заробљене оплате у међуспратним дрвеним конструкцијама, када се преко фурнирске плоче постављају равнајући слојеви или таванице од лаких бетона.¹²⁰

Веза фурнирских плоча и потконструкције остварује се најчешће механичким спојним средствима – ексерима, или применом лепка, чиме се лепљењем фурнирске плоче за гредне носаче ствара Т пресек, који повећава крутост и носивост гредних елемената.¹²¹ Приликом пројектовања потребно је предвидети да спој две фурнирске плоче буде директно на ослонцу – гредном елементу. Ипак, уколико је немогуће избећи, постоје решења у којима се може формирати спој два елемента у самом пољу, применом Н металних клипси као спојним средством.¹²²

Посебан вид примене фурнирских плоча у дрвеним скелетним конструкцијама је при формирању лепљених напрегнутих панела (*glued stressed-skin panels*). Панели су релативно танки, односно имају малу статичку висину, а обликовани су тако да могу да приме притисак и затезање приликом дејства сила савијања на панел.¹²³ Ови панели производе се искључиво као префабриковани панели, а њихова конструкција сачињена је од конструкцијских фурнирских плоча и дрвене грађе, која је постављена у виду ребара. Производе се три врсте напрегнутих панела – једнострани (сл.18.а), двострани (сл.18.б) и Т-панели (слика 18.в). У оваквим конструкцијама фурнирске плоче имају функцију облоге, док са конструктивног аспекта преузимају оптерећења и велики део савојних напрезања. Дрвена грађа у овим панелима постављена је виду ребара и преузима смичућа напрезања. У конструкцији панела веома је важно пажњу усмерити на везу између фурнирске плоче и ребра, јер би и мала смицања између ових спојева угрозила стабилност читавог панела и повећала његове деформације. Из тог разлога веза између плоче и ребра остварује се искључиво као

¹¹⁹ Thomas E. McLain, „Structural Wood Panels.“ у *Wood engineering and construction handbook*, уредник Keith F. Farherty и Thomas G. Williamson, поглавље 7.4 (New York: McGRAW-HILL, INC, 1999.).

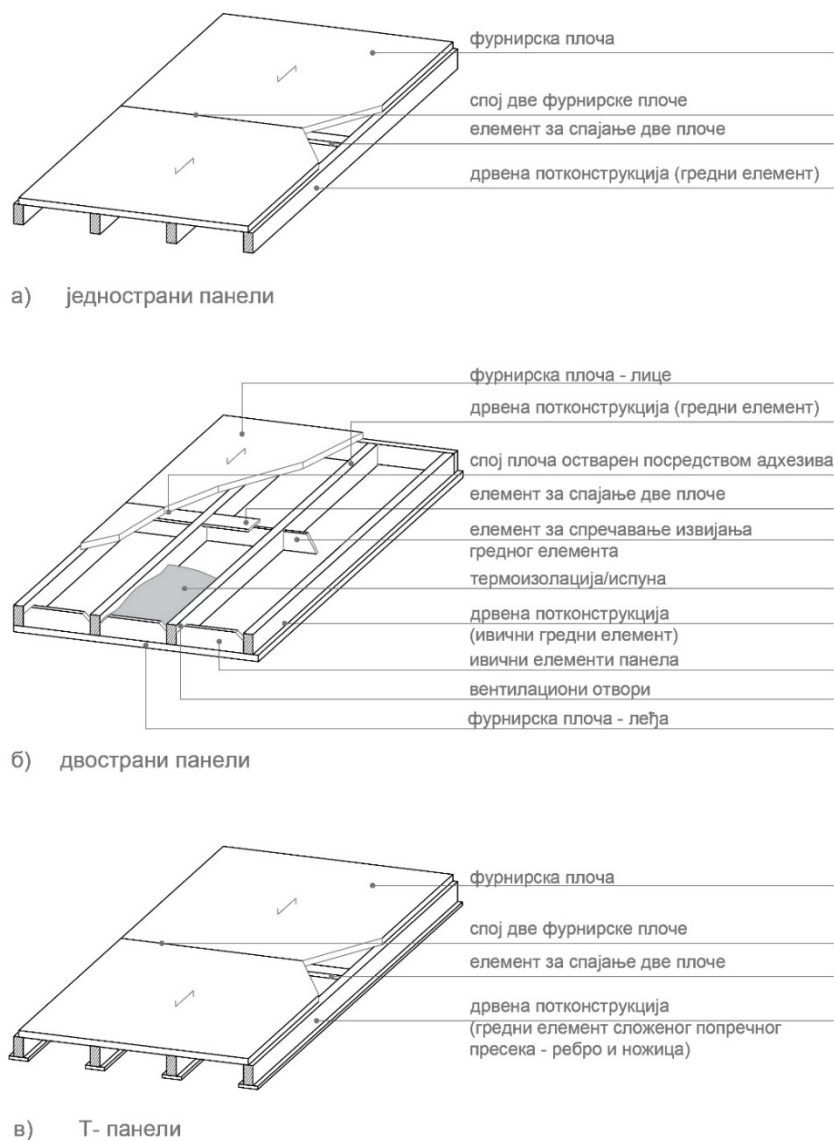
¹²⁰ исто, поглавље 7.4.

¹²¹ исто, поглавље 7.4.

¹²² Donald E. Breyer, Kenneth J. Fridley, и Kelly E. Cobeen, „Wood Structural Panels.“ у *Design of Wood Structures ASD*, поглавље 8.9., (New York: McGraw-Hill, 1998).

¹²³ Thomas E. McLain, „Structural Wood Panels.“ у *Wood engineering and construction handbook*, уредник Keith F. Farherty и Thomas G. Williamson, поглавље 7.4 (New York: McGRAW-HILL, INC, 1999).

крута веза, посредством адхезива.¹²⁴ Фурнирске плоче у овако формираним панелима постављене су по својој неповољној оријентацији, односно влакна спољних листова фурнирских плоча паралелна су подужном правцу ребара, паралелна су влакнима у ребрима који чине конструкцију панела.¹²⁵ Оријентација плоча на овај начин није уобичајена, али је овде условљена повећањем чврстоће на смицање у слоју састава панела, адхезива и ребра. Фурнирска плоча оријентисана тако да су листови њених спољашњих фурнира оријентисани паралелно правцу пружања влакана потконструкције омогућава бољи пренос смичућих напрезања, кроз више слојева плоче. Ово је веома важно када је панел пројектован као композитни носач и има улогу прихватања и преношења смичућих напрезања, а не само гравитационог оптерећења, што је случај код плоча које имају искључиво улогу облоге.



Слика 18. Лепљени напрегнути дрвени панели: а) једностранни, б) двострани, в) Т-панели¹²⁶

¹²⁴ APA - The Engineered Wood Association, *Design And Fabrication Of Plywood Stressed-Skin Panels*, (Tacoma, Washington: APA - The Engineered Wood Association, 1996), 7.

¹²⁵ Thomas E. McLain, „Structural Wood Panels.“ у *Wood engineering and construction handbook*, уредник Keith F. Farherty и Thomas G. Williamson, поглавље 7.4 (New York: McGRAW-HILL, INC, 1999); Donald E. Breyer, Kenneth J. Fridley, и Kelly E. Cobeen, „Wood Structural Panels.“ у *Design of Wood Structures ASD*, поглавље 8.9., (New York: McGraw-Hill, 1998).

¹²⁶ Ауторска илустрација по узору на *Figure 1. Typical Two-Sided Stressed-Skin Panel* из APA - The Engineered Wood Association, *Design And Fabrication Of Plywood Stressed-Skin Panels*, (Tacoma, Washington: APA - The Engineered Wood Association, 1996), 6.

Панели се могу формирати као равни или као закривљени и примену имају у кровним, подним и зидним системима, закривљеним кровним конструкцијама, као и структурама љуски и набора. Најчешће се користе у кровним или подним системима од 3.66 m – 9.75 m, као и у наборастим конструкцијама распона од 30 m и више.¹²⁷ Димензија самог панела условљена је распонем гредног елемента, као и смичућим напрезањима у панелу. Најзаступљенији у примени су двострани панели, чије је језгро врло често испуњено минералном вуном, пенама или другим материјалима који пружају термичку и звучну изолацију. Такође, честа је и примена једностранних панела, док су најмање заступљени Т-панели.

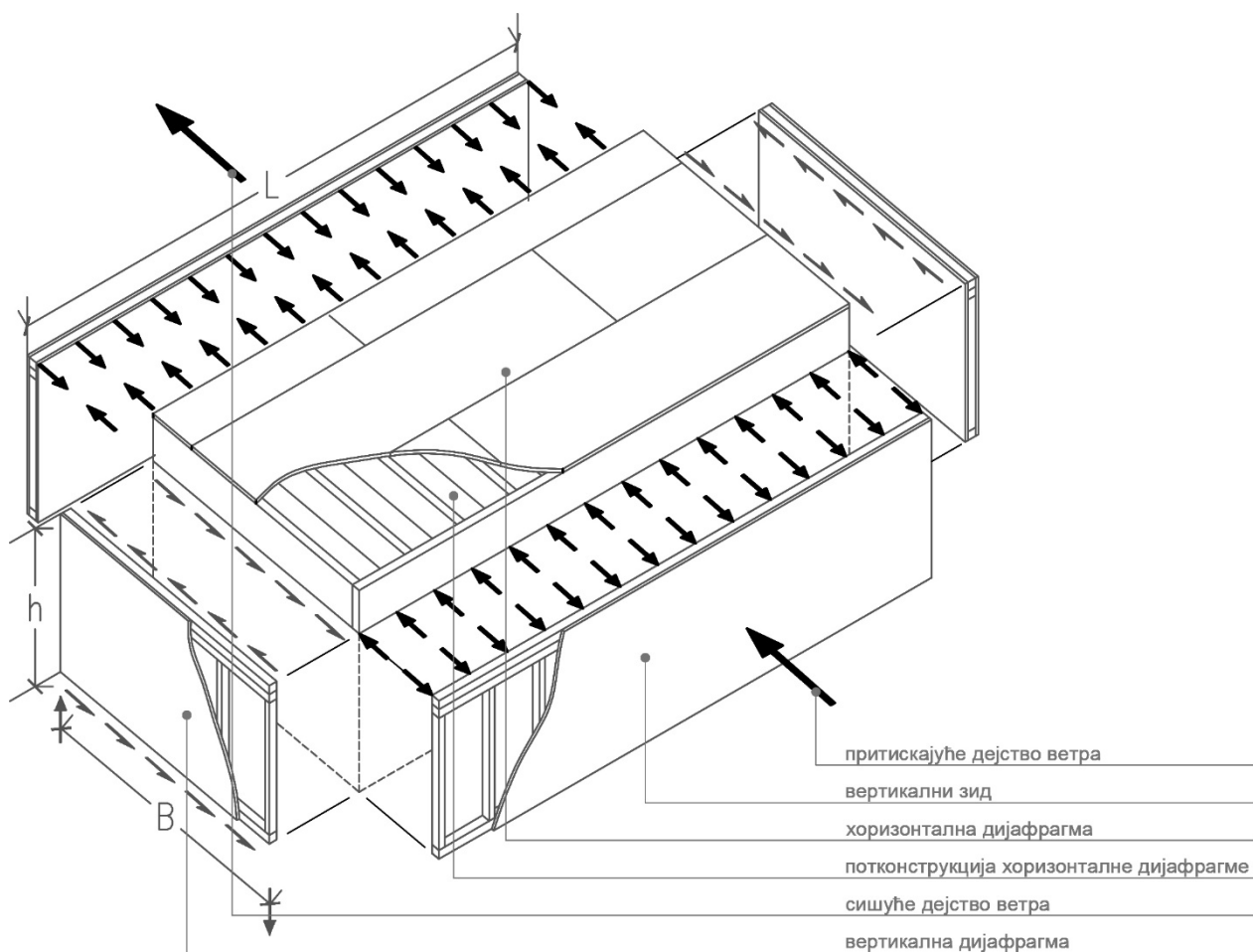
3.2.2 Елементи за укрућење - хоризонталне и вертикалне дијафрагме

Изложеност конструкција хоризонталним силама, насталих најчешће дејством ветра или сеизмичких сила, захтева пројектовање и обликовање конструкције тако да њени конструктивни елементи могу да подрже и прихвате хоризонталне силе, те да их пренесу до ослонаца. Стабилност вертикалних елемената конструкције (зидова) при изложености хоризонталним силама условљена је стабилношћу других елемената тог конструктивног склопа (међуспратне или кровне конструкције) и њиховом отпорношћу, крутошћу и могућношћу да прихвате утицаје у својој равни, те их преко вертикалних елемената дистрибуирају у ослонце.

Површински елементи пројектовани тако да могу да прихвате оптерећења која делују у равни елемента називају се дијафрагме. Дијафрагме представљају елементе за укрућење које повећавају стабилност и чврстоћу конструкције. У дрвеним структурама могу се пројектовати од линијских елемената (подашчавањем под углом формирају се површине које имају функцију дијафрагме), или од површинских елемената (плоча на бази дрвета, најчешће фурнирских или OSB плоча). На оба наведена начина постиже се повећање крутости објекта.

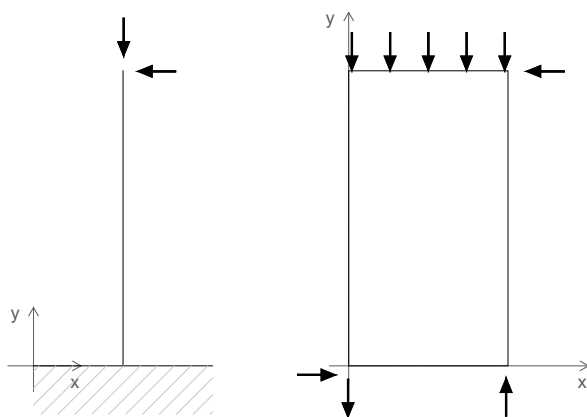
Дијафрагма у односу на положај у конструкцији може бити: вертикална (зидне конструкције), хоризонтална (међуспратне конструкције) и кровна дијафрагма (елемент кровне конструкције). Зидне, међуспратне или кровне конструкције формиране од плоча на бази дрвета, код дрвених структура имају вишеструку улогу – као елементи потконструкције, облоге или дијафрагме. Систем прихватања и преношења хоризонталног оптерећења које делује на дрвену скелетну конструкцију приказан је на слици 19. Хоризонталне дијафрагме прихватају утицаје у својој равни и преносе их на вертикалне дијафрагме.

¹²⁷ Thomas E. McLain, „Structural Wood Panels.“ у *Wood engineering and construction handbook*, уредник Keith F. Farherty и Thomas G. Williamson, поглавље 7.4 (New York: McGRAW-HILL, INC, 1999).



Слика 19. Прихватање хоризонталног оптерећења вертикалним и хоризонталним дијафрагмама у рамовској дрвеној конструкцији¹²⁸

Вертикалне дијафрагме представљају зидове који су крути у својој равни и који могу да пренесу латералне силе до ослоња. Приликом конструисања и димензионисања статичка схема вертикалне дијафрагме може се заменити статичким системом конзолног носача (сл.20).

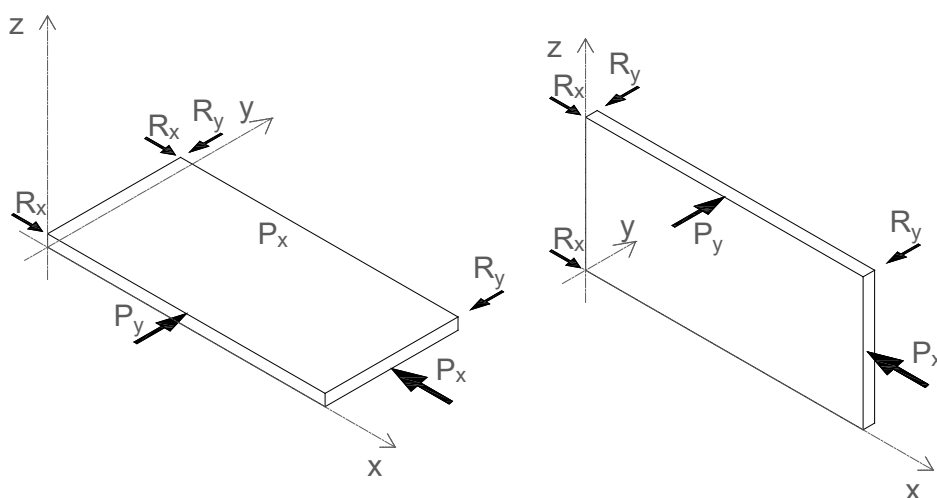


Слика 20. Статичка схема вертикалне дијафрагме

Дијафрагме у дрвеним конструктивним склоповима не могу бити формиране само од једне фурнирске плоче, због њене мале дебљине и немогућности да прихвати сва напрезања.

¹²⁸ преузето из Diekmann, E.F., „Diaphragm and shearwalls.“ погл. 8 у *Wood engineering and construction handbook*, уредник Keith F. Farherty и Thomas G. Williamson, (New York: McGRAW-HILL, INC, 1999.).

Дијафрагме се пројектују тако да морају да подрже смицање и савијање. Управо ово условљава њихово формирање у виду сложене конструкције – панела, чија је конструкција приказана на слици 22. Дијафрагме морају бити пројектоване тако да могу прихватити хоризонталне силе, тј. силе које делују у њеној равни, по њене обе осе – x , y (сл.21). Када говоримо о оним формираним од плоча на бази дрвета, морају се пројектовати тако да могу прихватити напрезања у равни у оба правца, паралелно влакнима или управно на влакна, без обзира на оријентацију спољних листова фурнира у односу на потконструкцију дијафрагме (сл.22). Ипак, правило је да се правац влакана спољних листова фурнирске плоче оријентише управно на правац осе потконструкције, чиме сама фурнирска плоча има бољу носивост у правцу преношења оптерећења, посебно гравитационог. Обликовање дијафрагми у дрвеним конструкцијама, систем прихватања оптерећења и његовог дистрибуирања кроз све елементе кроз литературу најчешће се поистовећује са системом челичних I-носача или H-носача¹²⁹, а што такође одговара и елементима сандучастог попречног пресека.



Слика 21. Схематски приказ оптерећења хоризонталне и вертикалне дијафрагме

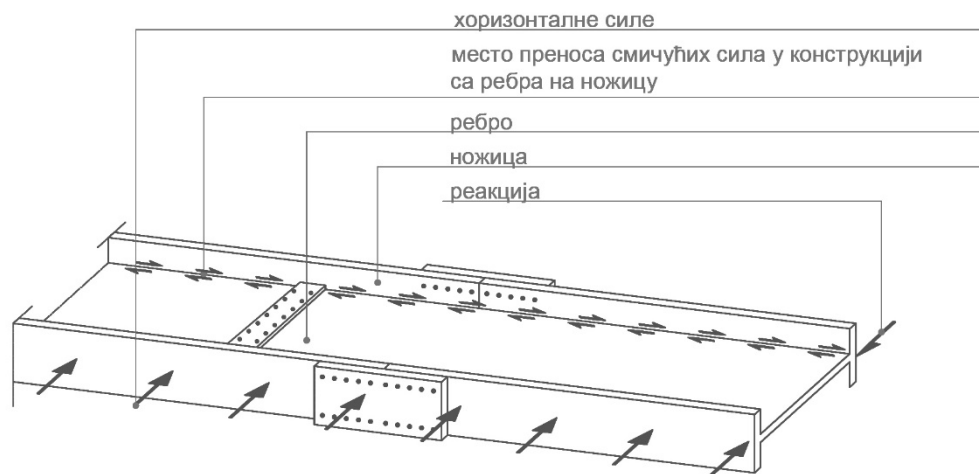
Аналогија преношења оптерећења I-носача примењена на дијафрагме код дрвених конструкција приказана је на слици 22. Ова конструкција дијафрагме може се упростити на следеће елементе: фурнирску плочу и рамовску потконструкцију чији су елементи постављени паралелно и управно правцу дејства силе. Фурнирска плоча у архитектонском смислу представља облогу, док посматрајући са конструктивног аспекта има функцију елемента који прихвата оптерећења. Напрезање које прихвата фурнирска плоча путем смицања преноси се на потконструкцију. Целокупно смицање у дијафрагми дешава се управо у површинском елементу облоге, односно у фурнирској плочи. Због наведеног, прави се аналогија између фурнирске плоче у дијафрагми и ребра челичних I-носача који прихватају смицање које се јавља у елементу под дејством оптерећења, док савијање у елементу прихвата ножица носача. Елементи потконструкције у дрвеној дијафрагми пројектују се тако да могу да прихвате моменте савијања који се у њој јављају. Сматра се да плоча није у могућности да преузме моменте, те се моменте у плочи занемарују, а моменте у дијафрагми преузимају ивични елементи рамовске конструкције управни на правац дејства силе. Улога рамовске потконструкције у дијафрагми је и да дистрибуира реакције са хоризонталне на вертикалну дијафрагму, или из вертикалне дијафрагме у ослонце. Могу се формирати и дијафрагме са потконструкцијом постављеном само у једном правцу, али се код таквих дијафрагми, при

¹²⁹ Diekmann, E.F., „Diaphragm and shearwalls.“ у *Wood engineering and construction handbook*, уредник Keith F. Farherty и Thomas G. Williamson, поглавље 8.4, (New York: McGRAW-HILL, INC, 1999); Donald E. Breyer, Kenneth J. Fridley, и Kelly E. Cobeen, „Wood Structural Panels.“ у *Design of Wood Structures ASD*, поглавље 9., (New York: McGraw-Hill, 1998).

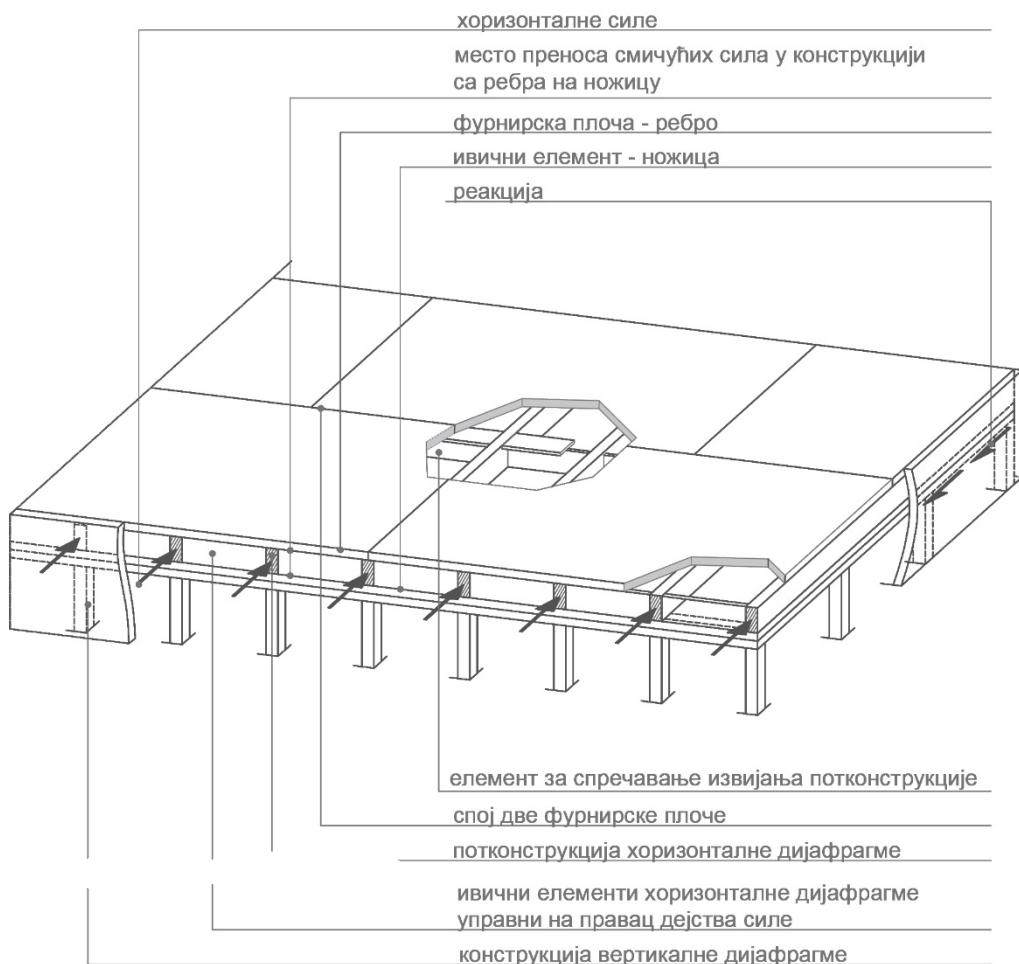
великим смичућим напрезањима, потенцијално може јавити проблем избочавања фурнирске плоче по ивици која не садржи елементе потконструкције. На слици 24. приказан је претходно објашњен начин разлагања сила у дијафрагми статичког система просте греде.

Критични напони смицања у дијафрагми, као и код просте греде, јављају се у зони ослоња. Као што је претходно наведено смичуће силе у дијафрагми прихвата облога, односно фурнирска плоча, тиме је при конструисању дијафрагме дебљина панела фурнирске плоче и њен квалитет условљен напрезањима под дејством силе смицања. Смицање у дијафрагми јавља се уједначено кроз њен цео попречни пресек, тј. кроз целу дебљину панела, као и кроз целокупну површину панела, а реакције ослонаца симетрично се предају осталим елементима у конструкцији. Изузетак је када се у дијафрагми формирају отвори. У тим случајевима напони у дијафрагми се прераспоређују, а око ивица отвора морају се формирати ојачања постављањем потконструкције, која ће редистрибуирати смичуће напоне на остале елементе. Приликом обликовања и конструисања дијафрагме потребно је тежити ка томе да силе у дијафрагми делују симетрично, како не би дошло до ротације дијафрагме под дејством ексцентрицитета. Таква дијафрагма не би била у стању да подржи смицање.¹³⁰

¹³⁰ Diekmann, E.F., „Diaphragm and shearwalls.“ у *Wood engineering and construction handbook*, уредник Keith F. Farherty и Thomas G. Williamson, поглавље 8., (New York: McGRAW-HILL, INC, 1999);



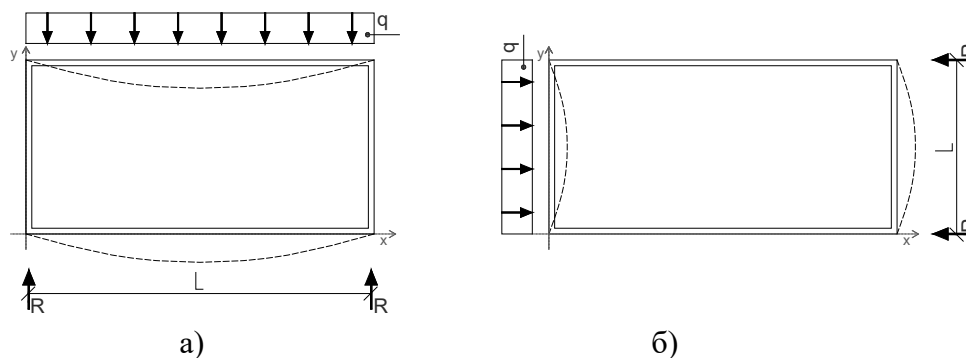
а)



б)

Слика 22. Аналогија преношења оптерећења I-носача примењена на дијафрагме у дрвеним конструкцијама: а) челични I-носач, б) хоризонтална дијафрагма¹³¹

¹³¹ Ауторска илустрација по узору на Diekmann, E.F., „Diaphragm and shearwalls.“ погл. 8 у *Wood engineering and construction handbook*, уредник Keith F. Farherty и Thomas G. Williamson, (New York: McGRAW-HILL, INC, 1999).



Слика 23. Оптерећење дијафрагме хоризонталним силама: а) по y правцу, б) по x правцу¹³²

Уколико говоримо о дијафрагмама као саставним елементима архитектонских структура оне никада немају само улогу дијафрагме. Дијафрагме постављене у зони међусpratне или кровне конструкције, као елемент конструкције морају бити димензионисане да прихвате и гравитациона оптерећења којима је она изложена. Гравитационо оптерећење у тако позиционираним дијафрагмама делује управно на раван плоче, што у плочи узрокује савијање услед кога се јавља смицање у равни плоче. Отпорност дијафрагме на савијање, односно смицање условљена је и размаком елемената потконструкције у дијафрагми, којима се предаје оптерећење. С обзиром да фурнирска плоча због своје мале дебљине, а тиме и мале статичке висине није способна да прихвати велика савијања, елементи потконструкције дијафрагме морају се димензионисати тако да прихвате савијања под дејством гравитационог оптерећења. Из свега наведеног закључује се да фурнирске плоче које се примењују у конструкцији дијафрагме морају имати добру отпорност на смицање управно на раван и у равни плоче, те да се из тог разлога за ове намене препоручује примена конструкцијске фурнирске плоче.

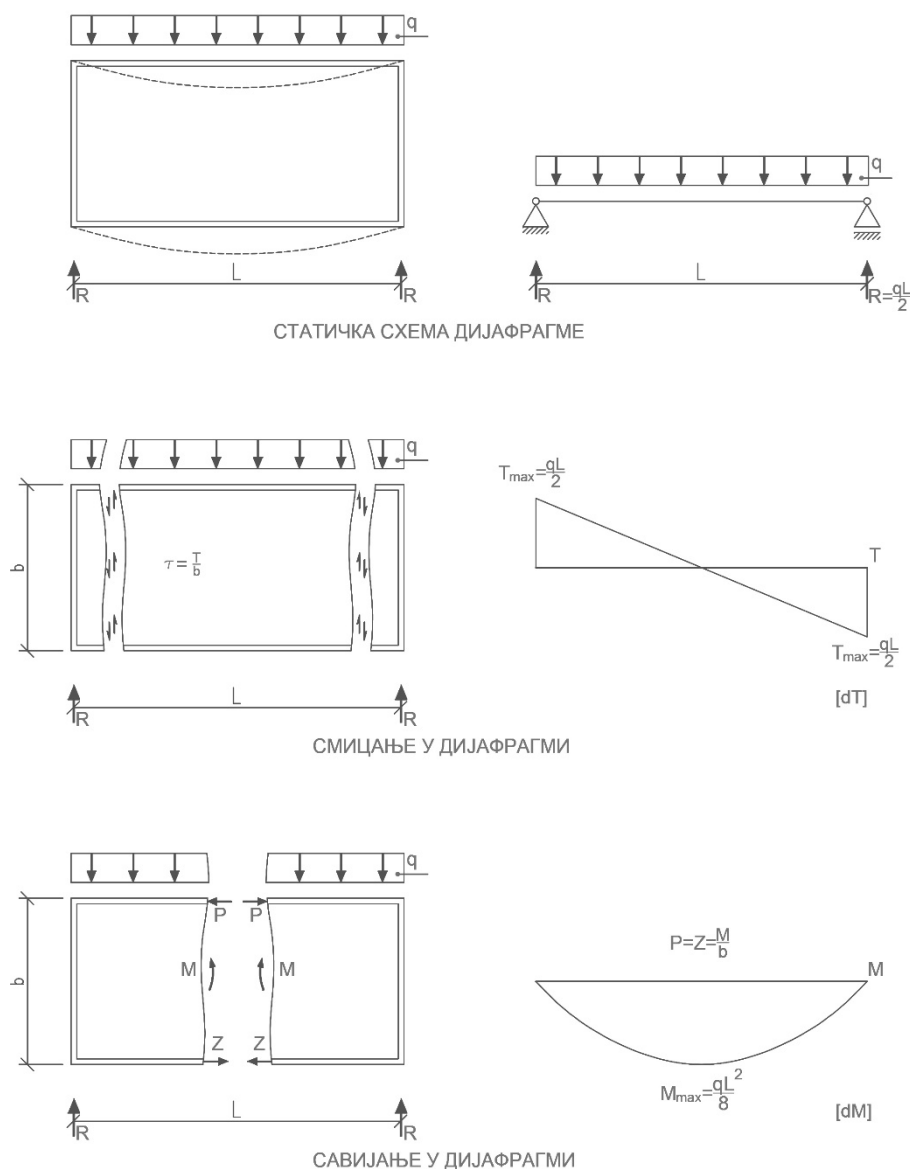
Смичућа напрезања из плоче преносе се спојним средствима, најчешће ексерима, на елементе потконструкције. Када дијафрагме прихватају велика напрезања, посебна пажња се мора посветити обликовању везе између плоче и потконструкције дијафрагме, како се не би нарушила стабилност читавог система. Најчешћи ломови у дрвеним дијафрагмама дешавају се управо због лоше конструисаних веза, где се под дејством силе смицања јавља течење везе – цепање елемената потконструкције или плоче, као и раздвајање плоче од ослонаца чупањем ексера или пробијањем главе ексера кроз целокупни попречни пресек фурнирске плоче.¹³³ Осим дебљином плоче, стабилност дијафрагме условљена је и конструкцијом везе између плоче и потконструкције која омогућава пренос смичућих напрезања.

Елементи потконструкције, а посебно ивични елементи дијафрагме постављени управно на правац дејства силе такође су веома важни чиниоци целокупног система дијафрагме. На ове елементе преносе се силе смицања са фурнирске плоче и прихватају се напрезања под дејством савијања дијафрагме. Према претходно приказаној аналогiji са простом гредом (сл.24), дијафрагма има притиснуте и затегнуте елементе потконструкције. Код дрвета допуштени напони притиска су нешто већи од допуштених напона затезања. Ипак, приликом прорачуна веза бруто (површина пресека у целости) попречни пресек елемената оптерећених на затезање умањује се за површину везних средстава, те се димензионисање елемената врши на основу тако добијене нето површине пресека приликом дејства силе

¹³² Ауторска илустрација по узору на Donald E. Breyer, Kenneth J. Fridley, и Kelly E. Cobeen, „Horizontal Diaphragms.“ у *Design of Wood Structures ASD*, поглавље 9, (New York: McGraw-Hill, 1998).

¹³³ Donald E. Breyer, Kenneth J. Fridley, и Kelly E. Cobeen, „Horizontal Diaphragms.“ у *Design of Wood Structures ASD*, поглавље 9.3, (New York: McGraw-Hill, 1998).

затезања, док се приликом дејства силе притиска врши на основу бруто површине попречног пресека. Односно, приликом дејства силе затезања допуштени напони у дрвету се умањују због ослабљења пресека уградњом спојних средстава. На основу дефинисаног, елементи оптерећени на притисак не би требало да буду критични елементи дијафрагме. Према томе, димензионисање елемената потконструкције врши се на основу максималне затезуће силе у штаповима потконструкције, те се према томе усвајају димензије свих осталих елемената. Сваки елемент у потконструкцији дијафрагме мора бити димензионисан тако да може да прихвати како силе притиска, тако и силе затезања, због могуће промене правца или смера дејства хоризонталне силе. Код притиснутих елемената потконструкције мора се извршити провера виткости. При оптерећењу дијафрагме оптерећењем управним на њену површину (гравитациона оптерећења код хоризонталних дијафрагми или хоризонтална оптерећења код вертикалних дијафрагми) елементи потконструкције прихватају моменте савијања, те се они морају димензионисати на основу максималних момената савијања који се јављају у панелу.



Слика 24. Прерасподела сила смицања и савијања у дрвеној дијафрагми¹³⁴

¹³⁴ преузето из Donald E. Breyer, Kenneth J. Fridley, и Kelly E. Cobeen, „Horizontal Diaphragms.“ у *Design of Wood Structures ASD*, поглавље 9.2 Diaphragm Flexibility, (New York: McGraw-Hill, 1998).

Према претходно изложеном закључује се да су деформације и стабилност дијафрагме условљени стабилношћу сваког чиниоца дијафрагме посебно – фурнирске плоче, елемената потконструкције и везе између елемената. Стабилност читавог система условљена је обликовањем веза између хоризонталних или кровних и вертикалних дијафрагми, као и везе између вертикалне дијафрагме и ослонаца. На конструктивна својства фурнирске плоче, а самим тим и на стабилност дијафрагме утичу квалитет плоче која се примењује у конструкцији дијафрагме и њене физичке и механичке особине, пре свега – дебљина панела и његова отпорност на смицање у равни плоче и управно на раван плоче, што директно зависи од квалитета фурнира, његове дебљине и оријентације спољних листова фурнирске плоче, а што је детаљно разјашњено у поглављу 2.3.1.4 *Конструктивне карактеристике фурнирских плоча*¹³⁵. Стабилност потконструкције директно зависи од правилног одређивања оптерећења у потконструкцији и њеног димензионисања, као и од начина конструисања и извођења веза између елемената.

Укупна деформација дијафрагме резултат је деформација насталих под дејством напрезања дијафрагме услед савијања и смицања, попуштања спојног средства (течење ексера у вези) између плоче и потконструкције, или елемената потконструкције међусобно, као и попуштања везе између потконструкције и ослонаца.¹³⁶

На основу крутости, а у зависности од деформације, дијафрагме под оптерећењем деле се на:

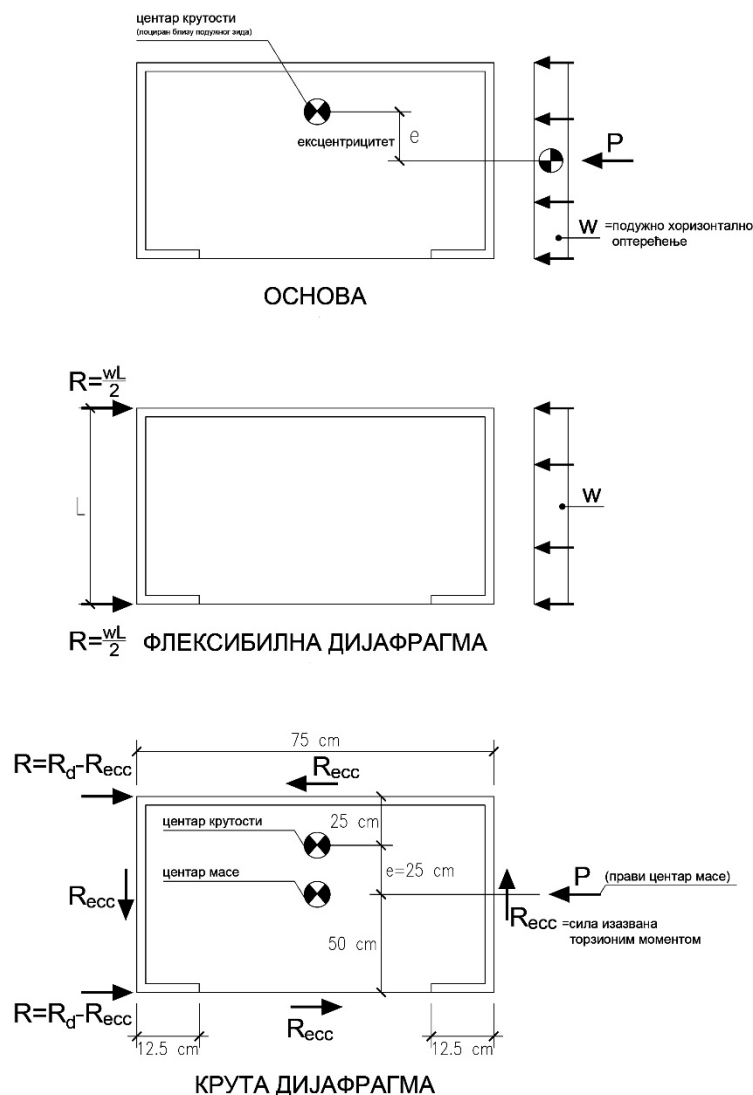
1. круте дијафрагме – под оптерећењем од латералних сила имају изузетно мале деформације, могу прихватити хоризонталне силе и торзионе моменте и
2. флексибилне дијафрагме – са нешто већим деформацијама под хоризонталним оптерећењем и могу прихватити само хоризонталне силе.

Круте и флексибилне дијафрагме приказане су на слици 25. Круте дијафрагме најчешће су у виду армирано-бетонских површинских елемената, док се дрвене дијафрагме могу понашати и као круте и као флексибилне, у зависности од интензитета силе и деформације. Дрвене флексибилне дијафрагме формиране су са потконструкцијом која је носећа само у једном правцу, док се код крутих дијафрагми потконструкција формира тако да прихвати оптерећење у два правца, односно целокупна потконструкција постаје носећи елемент (сл.25). Ипак, данас у пракси све дијафрагме формиране од плоча на бази дрвета дефинишу се најчешће као флексибилне дијафрагме.¹³⁷

¹³⁵ погледати поглавље 2.3.1.4 *Конструктивне карактеристике фурнирских плоча*, стр.24.

¹³⁶ Donald E. Breyer, Kenneth J. Fridley, и Kelly E. Cobeen, „Shearwalls.“ у *Design of Wood Structures ASD*, поглавље 10.14, (New York: McGraw-Hill, 1998).

¹³⁷ Donald E. Breyer, Kenneth J. Fridley, и Kelly E. Cobeen, „Horizontal Diaphragms.“ у *Design of Wood Structures ASD*, поглавље 9.11, (New York: McGraw-Hill, 1998).



Слика 25. Дистрибуција хоризонталних сила у флексибилној и у крутој дијафрагми¹³⁸

3.2.3 Гредни елементи

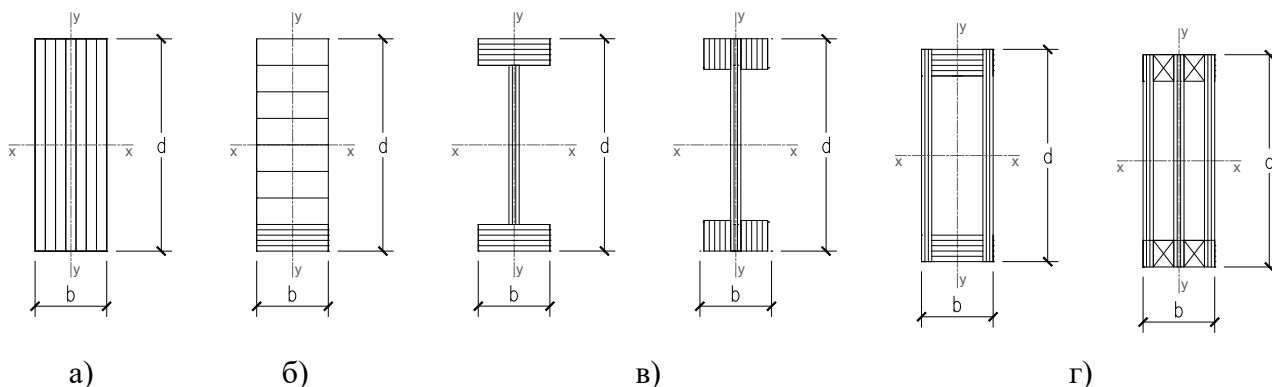
Плоче на бази фурнира врло често своју примену налазе као линијски елементи конструкција у виду префабрикованих гредних елемената сложених попречних пресека. Овакви елементи производе се искључиво у фабричким условима, како би се контролисао њихов квалитет и квалитет везе остварене између елемената. Њихова примена у конструкцијама је широко распрострањена, захваљујући малој сопственој тежини а великој чврстоћи и димензионалној стабилности елемената. Ови елементи могу бити гредни елементи међуспратних или кровних конструкција.

У производњи префабрикованих гредних елемената најчешће се примењују елементи од монолитног дрвета, фурнирске плоче, OSB плоче и ламелирана фурнирска грађа – LVL. Примена композитних производа на бази дрвета за формирање префабрикованих гредних елемената оправдана је са економског и еколошког аспекта због самог начина производње, као и са конструктивног аспекта због својих побољшаних механичких карактеристика у односу на елементе од пуног дрвета, чиме се могу контролисати и механичке карактеристике самог

¹³⁸ преузето из Donald E. Breyer, Kenneth J. Fridley, и Kelly E. Cobeen, „Horizontal Diaphragms.“ у *Design of Wood Structures ASD*, поглавље 9.11 Diaphragm Flexibility, (New York: McGraw-Hill, 1998).

гредног елемента. Осим наведеног, ове елементе карактерише и изузетно мала сопствена тежина елемента, чиме они проналазе примену у конструкцијама код којих се захтева мала сопствена тежина конструкције или у објектима код којих је мала сопствена тежина елемената условљена монтажом и логистичким захтевима. Претходно објашњена предност композитних производа и могућност контролисања њихових механичких карактеристика (поглавље 2.1 *Композитни производи на бази дрвета, дефинисање и класификација*)¹³⁹ огледа се у начинима њихове производње чиме се у самом поступку производње могу умањити недостаци који се уочавају у монолитној грађи, односно долази до распоређивања грешака у дрвету кроз целокупни композитни елемент, што резултира смањењем варијабилности у механичким карактеристикама материјала. Из тог разлога настају производи попут: гредних носача од ламелиране фурнирске грађе, I-гредних носача или носача сандучастог попречног пресека.

Ламелирану фурнирску грађу насталу међусобним лепљењем слојева фурнира паралелно оријентисаних (поглавље 2.3.2 *Ламелирана фурнирска грађа (LVL)*)¹⁴⁰, намењену за конструкцијску примену, карактеришу висок модул еластичности у правцу паралелном влакнима, као и знатно боље механичке карактеристике у односу на исто монолитно дрво од кога су добијени фурнири за формирање LVL-а. Посебно овај производ карактеришу добре вредности чврстоће на савијање, притисак и затезање паралелно влакнима. Из наведених разлога, ламелирана фурнирска грађа примењује се за производњу гредних носача у целисти, као и делова носача, нарочито у зони затезања носача од лепљеног ламелираног дрвета као и носача сложеног попречног пресека - сандучастих и I-носача (сл. 26).¹⁴¹



Слика 26. Префабриковани гредни елементи сложеног попречног пресека:

а) LVL гредни носач, б) LVL у затегнутој зони ЛЛД носача, в) типови I-носача, г) типови сандучастих носача¹⁴²

Носачи сложеног попречног пресека најчешће се формирају као сандучасти или I-носачи, чији су попречни пресеци приказани на слици 26. Код ових носача елементи се могу поделити на ребро и ножицу. Као што је то претходно објашњено у поглављу 3.2.2 *Елементи за укрућење - хоризонталне и вертикалне дијафрагме*¹⁴³, за ребро се најчешће примењују фурнирске или OSB плоче, док се ножица формира од монолитног дрвета или ламелиране фурнирске грађе за конструкцијску примену. Код гредних носача изложених напрезањима под дејством савијања, ножица носача изложена је аксијалним напрезањима притиска или

¹³⁹ погледати поглавље 2.1 *Композитни производи на бази дрвета, дефинисање и класификација*, стр. 9.

¹⁴⁰ погледати поглавље 2.3.2 *Ламелирана фурнирска грађа (LVL)*, стр. 37.

¹⁴¹ Donald E. Breyer, Kenneth J. Fridley, и Kelly E. Cobeen, „Fabricated wood components.“ у *Design of Wood Structures ASD*, поглавље 6.19, (New York: McGraw-Hill, 1998).

¹⁴² Ауторска илустрација на основу илустрација из Donald E. Breyer, Kenneth J. Fridley, и Kelly E. Cobeen, „Fabricated wood components.“ у *Design of Wood Structures ASD*, поглавље 6.19, (New York: McGraw-Hill, 1998) и Thomas E. McLain, „Structural Wood Panels.“ у *Wood engineering and construction handbook*, уредник Keith F. Farherty и Thomas G. Williamson, поглавље 7.5.2 (New York: McGRAW-HILL, INC, 1999).

¹⁴³ погледати поглавље 3.2.2 *Елементи за укрућење - хоризонталне и вертикалне дијафрагме*, стр. 69.

затежања. Ово представља повољну конфигурацију носача и добар положај за елементе ламелиране фурнирске грађе, првенствено зато што се постављањем ових елемената ван неутралне осе носача постиже повећање момента инерције носача, а потом и што је позиција ових елемената на оном делу носача који је изложен највећим напрезањима на савијање.¹⁴⁴ Добра савојна својства ламелиране фурнирске грађе у правцу паралелном влакнима доприносе добрим савојним својствима целокупног композитног носача, а њена примена на овим позицијама доприноси оптималном коришћењу ресурса и примени одређених материјала на за то погодним местима у конструкцији. Начин производње ламелиране фурнирске грађе и њена могућност производње у великим дужинама, без ограничења, још једна је погодност за примену, јер не представља ограничавајући фактор за дужину композитних носача. Димензионисање ових носача у конструкцији, као и код дијафрагми, врши се на основу највеће затежуће силе која се јавља у елементу. За ножице оптерећење аксијалним напрезањем силе притиска мора се извршити контрола извијања носача.

С обзиром да је ребро овако формираних композитних носача највише изложено смичућим напрезањима, материјал који се примењује на овим позицијама требало би да има добру чврстоћу на смицање, како би могао да прихвати оптерећење и преда их другим елементима конструкције. Управо на овом месту најчешће се примењују фурнирске или OSB плоче, као што је то случај и код дијафрагми (поглавље 3.2.2 *Елементи за укрућење - хоризонталне и вертикалне дијафрагме*¹⁴⁵). Плоче на бази фурнира морају бити конструкцијске, јер оне имају велику отпорност на смицање управно на раван плоче, а које настаје као последица савијања у равни плоче. Приликом конструкције ових елемената, елементи ребра (фурнирска плоча) димензионишу се на основу највећих смичућих напрезања која се јављају у носачу. Оријентација фурнирске плоче је таква да већи број слојева фурнира ефективно учествује у преносу смичућих напрезања, што условљава да оријентација спољашњих листова фурнира буде подужно постављена, односно паралелна оси гредног елемента.¹⁴⁶ Недостатак ових елемената је бочно извијање ребра, тј. фурнирске плоче, а посебно на великим дужинама елемената. Из тог разлога код гредних елемената великог распона морају се у оквиру носача увести елементи за укрућење, који ће спречити извијање плоче, односно ребра.

У овим конструкцијама посебно је значајно обликовање везе између чинилаца композитних носача. Веза између ребра и ножице код I-гредних и сандучастих носача остварена је применом адхезива, који се апликују на елементе пресовањем, како би се формирала крута веза између елемената.¹⁴⁷ Понекад, веза се може остварити и механичким спојним средствима – ексерима, неретко и комбинацијом механичких спојних средстава и адхезива.¹⁴⁸ Поменути елементи се најчешће примењују за оне распоне који нису погодни за елементе од монолитног дрвета, а то су распони преко 5 m, а најчешће између 10 и 15 m.¹⁴⁹

¹⁴⁴ Donald E. Breyer, Kenneth J. Fridley, и Kelly E. Cobeen, „Fabricated wood components.“ у *Design of Wood Structures ASD*, поглавље 6.19, (New York: McGraw-Hill, 1998).

¹⁴⁵ погледати поглавље 3.2.2 *Елементи за укрућење - хоризонталне и вертикалне дијафрагме*, стр. 54.

¹⁴⁶ APA, The Engineered Wood Association, *Design and Fabrication of All-Plywood Beams*. (Tachoma, Washington: APA - The Engineered Wood Association, 1995).

¹⁴⁷ Donald E. Breyer, Kenneth J. Fridley, и Kelly E. Cobeen, „Fabricated wood components.“ у *Design of Wood Structures ASD*, поглавље 6.19, (New York: McGraw-Hill, 1998).

¹⁴⁸ Abdy Kermani, „Design of Ply-webbed Beams.“ у *Structural Timber Design*, поглавље 7, (Oxford: Blackwell Science, 1999), 123-137.

¹⁴⁹ исто, 124.

3.2.4 Просторне структуре

Просторним структурама сматрају се архитектонске просторне форме сачињене од конструктивних елемената који их образују и уједно могу да прихвате и пренесу оптерећење које на њу делује, без потребе за додатним елементима конструкције. Површинске просторне структуре представљају форме образоване применом површинских елемената, које дефинишу неки простор, раздвајајући га од остатка простора који га окружује.

Према Енгелу (H.Engel) просторне структуре формиране од површинских елемената називају се и површински активне структуре (енгл. *surface active structures*), а њима припадају структуре формиране од плоча – набори и љуске. Да би се нека структура сматрала површински активном структуром мора остварити континуитет конструктивних елемената у два правца, као и испунити предуслов да има добру отпорност на притисак, затезање и смицање. Елементи који формирају овакве структуре морају се налазити у мебранском стању напона, тј. бити изложени напрезањима која су паралелна са самом површином.¹⁵⁰ Салвадори и Хелер (M.Salvadori, R.Heller) просторне структуре (енгл. *form-resistant structures*) дефинишу као структуре чија је чврстоћа формирана обликовањем материјала у складу са оптерећењем којем су изложене.¹⁵¹ Према наведеним изворима просторне структуре дефинисане су искључиво путем форме, односно апострофира се да овакве структуре своју статичку стабилност остварују правилним обликовањем форме. Ипак, да би се реализовале овакве структуре, осим обликовања форме у складу са оптерећењем којем је структура изложена, неопходно је извршити добар одабир материјала од кога ће структура бити формирана.

Просторне форме код којих структура представља главни елемент који образује простор у оквиру овог рада дефинише се као егзоскелет (*погледати поглавље 3.1 Архитектура егзоскелета, дефиниција и појам*¹⁵²). Егзоскелет који у себе интегрише више функција – архитектонску форму и обликовање, конструкцију, функцију фасаде и др. често архитектама пружа могућност експериментисања у форми, дизајну, конструкцијама, примени новог материјала и сл. Овакве структуре најчешће представљају полигоне инжењерима за испитивања у домену архитектонске форме, геометрије, одрживости, конструктивних, термичких и акустичких својстава материјала. Егзоскелетне структуре данас су најчешће објекти павиљонског карактера, формиране у оквиру светских (*World Expo*) или других изложби, а у циљу истраживања и испитивања у домену техничко-технолошких наука.

Постоји веома мали број објеката од плоча на бази дрвета, пројектованих као егзоскелетне структуре. Најчешће су то објекти, као што је претходно речено, реализовани у функцији истраживања, павиљонског типа, привременог карактера. Реализоване просторне структуре могу се обликовно класификовати у три типологије. Типологија је дефинисана на основу обликовања, анализом реализованих примера, док ће конструктивно понашање структура бити разјашњено у даљем раду.

Типолошка класификација реализованих просторних егзоскелетних структура:

1. просторне структуре у облику набора,
2. просторне структуре у облику полигоналних љуски,
3. реципрочне структуре.

Стабилност и носивност просторних структура директно је условљена њиховим обликовањем и геометријом. Обликовање просторних структура и позиција елемената у

¹⁵⁰ Heino Engel, *Structure Systems* (Germany: Hatje Cantz Publishers, 1997), pg. 212-213.

¹⁵¹ Salvadori M. and Heller R. *Structure in Architecture* (Prentice Hall, Inc. New Jersey, USA, 1963) цитирано код Albertus Sidharta Muljadinata и A.M. Subakti Darmawan, „Redefining folded plate structure as a form-resistant structure.“ у *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences* 11 (7) (2016): 4782-4792.

¹⁵² погледати поглавље 3.1 Архитектура егзоскелета, дефиниција и појам, стр. 4949.

оквиру њих мора пратити ток сила које се јављају у структури, како би се постигла рационализација при обликовању конструктивних елемената и утрошку материјала потребног за њихово формирање.

Дизајн и обликовање свих просторних структура заснива се на међусобној усклађености геометрије, конструктивних карактеристика материјала и везе између елемената. Приликом њиховог пројектовања и реализације неретко савремени материјали пружају могућност експериментисања у дизајну геометрије и формирању слободних форми просторних структура. Применом савремених материјала могу се превазићи одређена ограничења у дизајну настала ограничењима геометрије просторних структура са конструктивног аспекта. Управо из тог разлога плоче на бази дрвета могу имати велики потенцијал при пројектовању просторних конструкција овог типа.

3.2.4.1 Тип 1 – Просторне структуре у облику набора

Наборасте конструкције представљају структуре са просторним носећим дејством. Елементи конструкције позиционирани су у таквом међуодносу да у простору формирају структуру наборастог облика (сл.27).

Наборасте конструкције могу бити великих распона, а у њиховим елементима (плочама) не долази до појаве момената савијања, тј. набори су структуре чији се елементи налазе у мембранском стању напона. Мембранско стање напона јавља се у елементима код којих нема појаве трансверзалних сила и момената савијања, или је њихова вредност занемарљива, а као доминантна напрезања јављају се напрезања узрокована аксијалним силама. У површинским елементима набора (плочама) долази до појаве три унутрашње силе – нормалних сила у x и y осе, као и смичуће силе по осе x и y , односно смицања у равни плоче.¹⁵³

Набораста конструкција може бити формирана од плоча или од штапова, односно од елемената који ће у свом међуодносу формирати конструкцију наборастог облика.¹⁵⁴ Наборасте конструкције захтевају круте везе између елемената – набора, што је у конструкцијама од армираног бетона ливеног на лицу места веома лако реализовати.¹⁵⁵

Прве наборасте конструкције пројектоване су почетком XX века, а реализоване су у армираном бетону. Ове конструкције омогућиле су оптимално решење за формирање конструкција великог распона, рационалним утрошком материјала. Током '50-их и '60-их година XX века наборасте конструкције доживљавају експанзију и бележе своју ширу примену посебно на тлу Европе и Америке.¹⁵⁶ Поред конструкција у армираном бетону, наборасте конструкције реализују се применом и других материјала: дрво, челик, стакло, полимери армирани стакленим влакнима (енгл. *glass-fibre reinforced plastic*). Конструкције израђене у потпуности као наборасте конструкције од дрвених плоча развијане су током 1970-их¹⁵⁷, међутим, овај концепт формирања наборастих конструкција се даље није примењивао, све до

¹⁵³ M. Stavric, Wiltsche, A. & Bogensperger, T., „Generative design for folded timber structures”, *Emerging Experience in Past, Present and Future of Digital Architecture, Proceedings of the 20th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA*, (Hong Kong: The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), 2015).

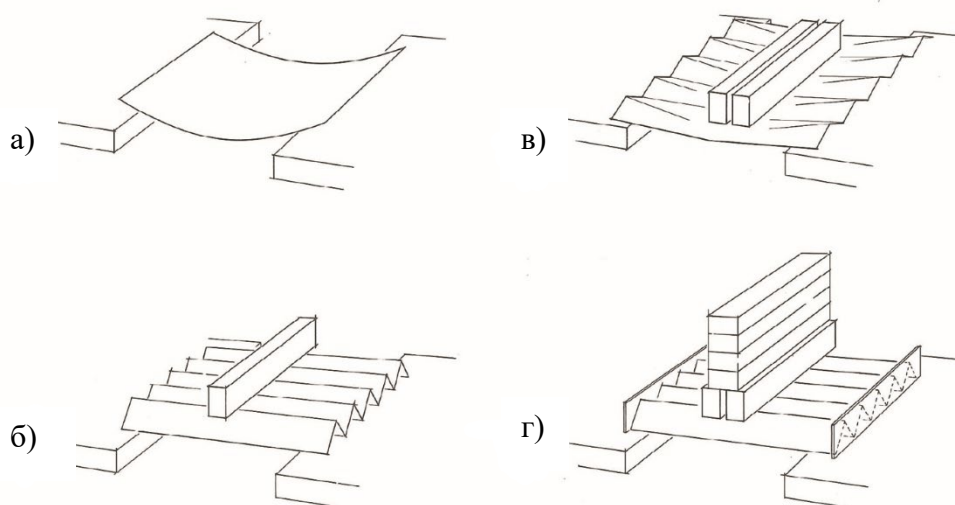
¹⁵⁴ Ненад Шекуларац, *Дрвени решеткасти носачи: пројектовање, прорачун и извођење кровних конструкција*, (Београд: Универзитет, Архитектонски факултет, 2017), 162.

¹⁵⁵ Christopher Werner Matthias Robeller, „Integral Mechanical Attachment for Timber Folded Plate Structures“ (Doctoral Dissertation. Lausanne, Suisse: ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, 2015).

¹⁵⁶ A.Szabo, „Design and fabrication of thin folded members with digital concrete processes“ (PhD thesis, Zurich: ETH Zurich, 2020).

¹⁵⁷ Yves Weinand, „Folded plates made from timber panels“ у *Advanced Timber Structures*, уредник Yves Weinand, (Basel: Birkhäuser Verlag GmbH, 2017), 14-31.

почетка 2000-их, када се поново врше истраживања наборастих конструкција формираних од плоча на бази дрвета.



Слика 27. Папирни модел наборасте конструкције: а) савијање листа папира без отпора, б) пресавијен лист постаје носећи елемент, в) преоптерећени набори доживљавају деформацију, г) дијафрагме на бочним странама учвршћују набор и повећавају његову носивост¹⁵⁸

Као инспирација за формирање наборастих конструкција везује се оригами техника пресавијања папира и формирања различитих форми заснованих на једноставним принципима.¹⁵⁹ Зигел (K.Siegel) принципе понашања наборастих конструкција објашњава путем листа папира пресавијеног у набор (сл.27).¹⁶⁰ Лист папира може да премости велики распон, али под сопственом тежином доживљава велику деформацију (сл.27.а). Пресавијањем листа папира у виду набора формира се конструкција која може да прихвати како сопствено, тако и додатно оптерећење, при чему се свака коса површина понаша као гредни елемент ослоњен на ослонце лево и десно, док је у грбинама и увалама повезана са суседним површинама (сл.27.б). Додавањем оптерећења долази до отварања набора и појаве деформација (сл.27.в). Како би се спречило отварање набора, појава деформације и омогућило прихватање већег оптерећења, уводе се попречне дијафрагме или чеоне шајбне на крајевима набора, чија је улога да укруте конструкцију (сл.27.г).

Принцип понашања набора Зигел дефинише путем армирано-бетонских танких плоча које образују континуални низ у попречном правцу, међусобно се додирујући у грбинама и увалама (сл.28.а). Ослонци се формирају по бочним ивицама набора – грбинама и увалама, образујући дијафрагму, чиме се уједно укрућују набори. Повећање носивости набора остварује се повећањем његове статичке висине, односно повећањем угла који набор заклапа са хоризонталном равни. На слици 28.б приказани су моменти савијања који се јављају у плочама набора под дејством континуалног оптерећења. Плочу набора формираног на овај начин Зигел упоређује са гредним носачем, посматрајући плочу као греду оптерећењу по грбинама (сл.28.в). Оптерећење се разлаже на компоненте, које се даље кроз плочу преносе до ослонаца.¹⁶¹

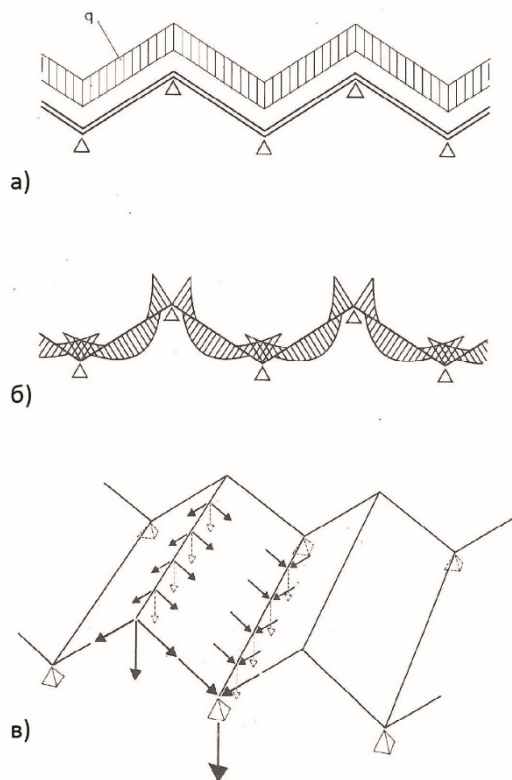
¹⁵⁸ преузето из Curt Siegel, *Strukturformen der modernen architektur* (Munchen: Verlag Georg D.W.Callwey Munchen, 1960), 197.

¹⁵⁹ H.U. Buri, „*Origami - Folded Plate Structures*“ (PhD Thesis. Lausanne: ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, 2010), 23-27.

¹⁶⁰ Curt Siegel, *Strukturformen der modernen architektur* (Munchen: Verlag Georg D.W.Callwey Munchen, 1960), 197.

¹⁶¹ Curt Siegel, *Strukturformen der modernen architektur* (Munchen: Verlag Georg D.W.Callwey Munchen, 1960), 197-198.

Површински елементи у просторним структурама у зависности од њиховог положаја и оптерећења којима су изложени могу се понашати двојачко, односно могу бити изложени трансверзалном оптерећењу које делује управно на површину плоче (*slab mechanism*) или оптерећењу које делује у равни плоче (*plate mechanism*).¹⁶²



Слика 28. Понашање наборасте конструкције: а) у попречном правцу наборасте конструкције равни образују наборасту површину формирану од плоча, које су напрегнуте попут плоче изложене савијању, б) моменти савијања континуалне плоче, в) у подужном смеру површине између грбина и увала делују као ослонци образовани контактом две плоче¹⁶³

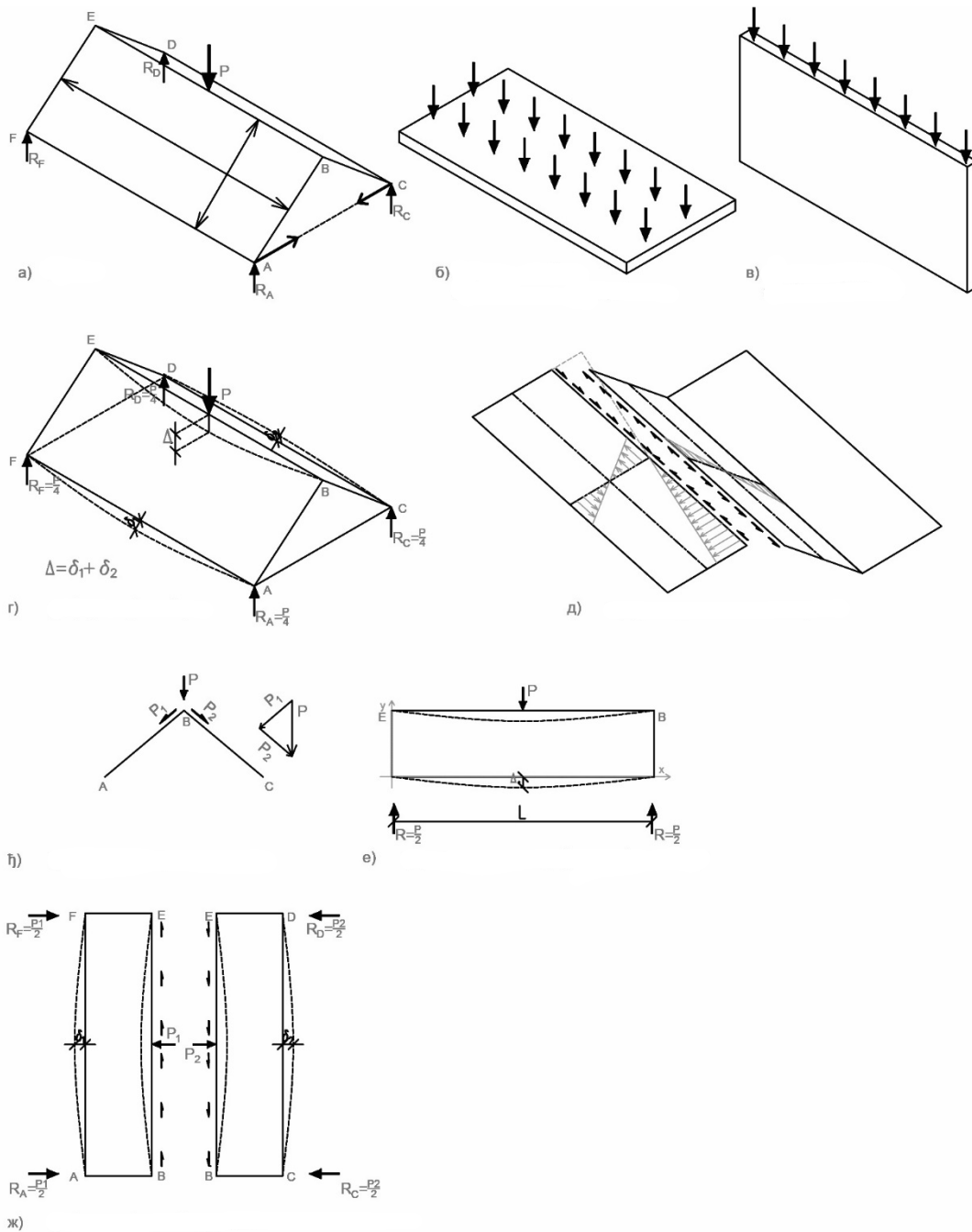
Наборасте конструкције прихватају спољашње оптерећење комбинацијом два поменута начина оптерећења елемената конструкције. Трансверзално оптерећење (енгл. *slab mechanism*) узрокује појаву момената савијања и момената торзије у плочи, док се други случај оптерећења површинских елемената аксијалним силама (енгл. *plate mechanism*) изједначава са понашањем љуске (сл.29). Понашање целокупне структуре као љуске подразумева да елементи конструкције, у овом случају плоче, прихватају компонентално оптерећење које је паралелно површини панела, путем сила у равни плоче, односно да су елементи оптерећени аксијалним силама (сл.29в). Овакав принцип понашања плоче може се изједначити са понашањем плоче у дијафрагми, који је детаљно објашњен у поглављу 3.2.2 *Елементи за укрућење - хоризонталне и вертикалне дијафрагме*¹⁶⁴. Плоча је изложена нормалним напрезањима, прихвата силе које делују у њеној равни и дистрибуира их даље на елементе конструкције. У овом систему плоча се може поистоветити са ребром челичних I-носача, док су грбина и увала, место спајања две плоче, заправо ножице носача, односно потконструкција у систему дијафрагме. Најважније напонско стање коме је изложена плоча у конструкцији набора је смицање (сл.24), с тога набори морају бити израђени од материјала који има добру отпорност на смицање. Поред смицања, у плочи се јавља напрезање узроковано савијањем у

¹⁶² Heino Engel, *Structure Systems* (Germany: Hatje Cantz Publishers, 1997), pg. 212.

¹⁶³ преузето из Curt Siegel, *Strukturformen der modernen architektur* (Munchen: Verlag Georg D.W.Callwey Munchen, 1960), 198.

¹⁶⁴ погледати поглавље 3.2.2 *Елементи за укрућење - хоризонталне и вертикалне дијафрагме*, стр.54.

равни плоче. Ипак, оно није доминантно изражено због велике статичке висине плоче и велике крутости елемента у равни у којој делује сила. Напрезања која прихвата фурнирска плоча путем смицања преносе се на ивичне елементе, а потом се даље дистрибуирају до ослонаца (сл.29д). Највећи напони смицања јављају се код ослонаца, док су најмањи у средини плоче.



Слика 29. Набораста конструкција: понашање и дистрибуција напона: а) набор, б) плоча оптерећена трансверзалним оптерећењем, в) плоча оптерећена аксијалним силама, г) деформација набора, д) прераспореда напона смицања, е) прераспореда сила у набору, е) укупна вертикална деформација у набору, ж) деформација у набору расчлањена по плочама¹⁶⁵

Понашање структуре у виду елемената оптерећеног на савијање, односно оптерећеног трансверзалним силама приказано је на слици 29.б. Компонентално трансверзално оптерећење делује управно на раван плоче, чиме долази до локалног савијања плочастих елемената, а

¹⁶⁵ Ауторска илустрација по узору на Ruben A. Gomez, *Design of Folded Plates*, PDHonline Course S275, (Fairfax: PDH Center, 2013).

оптерећење се преноси до ивица плоче – грбина и увала, односно до места са којима је она спојена са суседним плочама. Када силе у равни нису у равнотежи са резултујућом силом, оптерећење се даље преноси на суседне плоче путем смицања у равни плоче, а дуж њихових ивица. Интензитет силе смицања у том случају зависи од углова између плоча, крутости плоча, детаља везе и природе оптерећења. Понашање саме плоче изложене моментима савијања зависи од истих фактора, а највише од ротационе крутости и детаља веза између елемената.¹⁶⁶

Крутост елемента на дејство трансверзалног оптерећења које делује управно на површину је веома мала, због малих дебљина плоче, те се отпорност на савијање плоче може занемарити, у односу на крутост елемента на дејство оптерећења које делује у равни плоче (нормалне и смичуће силе).

Поред прости наборасте конструкције на чијем је примеру приказан општи принцип преношења оптерећења постоје и други типови конструкције. Према Шекуларцу подела наборстих конструкција може се дефинисати на основу геометрије облика, правца ослањања и облика основе над којом је конструкција изведена, што је даље приказано.¹⁶⁷

На основу геометријског облика, наборасте конструкције делимо на (сл.30):

- наборасте конструкције у равни:
 - просте,
 - линијске сложене,
 - радијалне,
 - комбиноване;

- рамовске наборасте конструкције:
 - континуалне,
 - двозглобне,
 - трозглобне,
 - цилиндричне,
 - комбиноване;

- просторне наборасте конструкције:
 - пирамидалне,
 - поиедарске,
 - комбиноване.

Према правцу ослањања наборасте конструкције делимо на:

- линијске наборасте конструкције,
- радијалне наборасте конструкције.

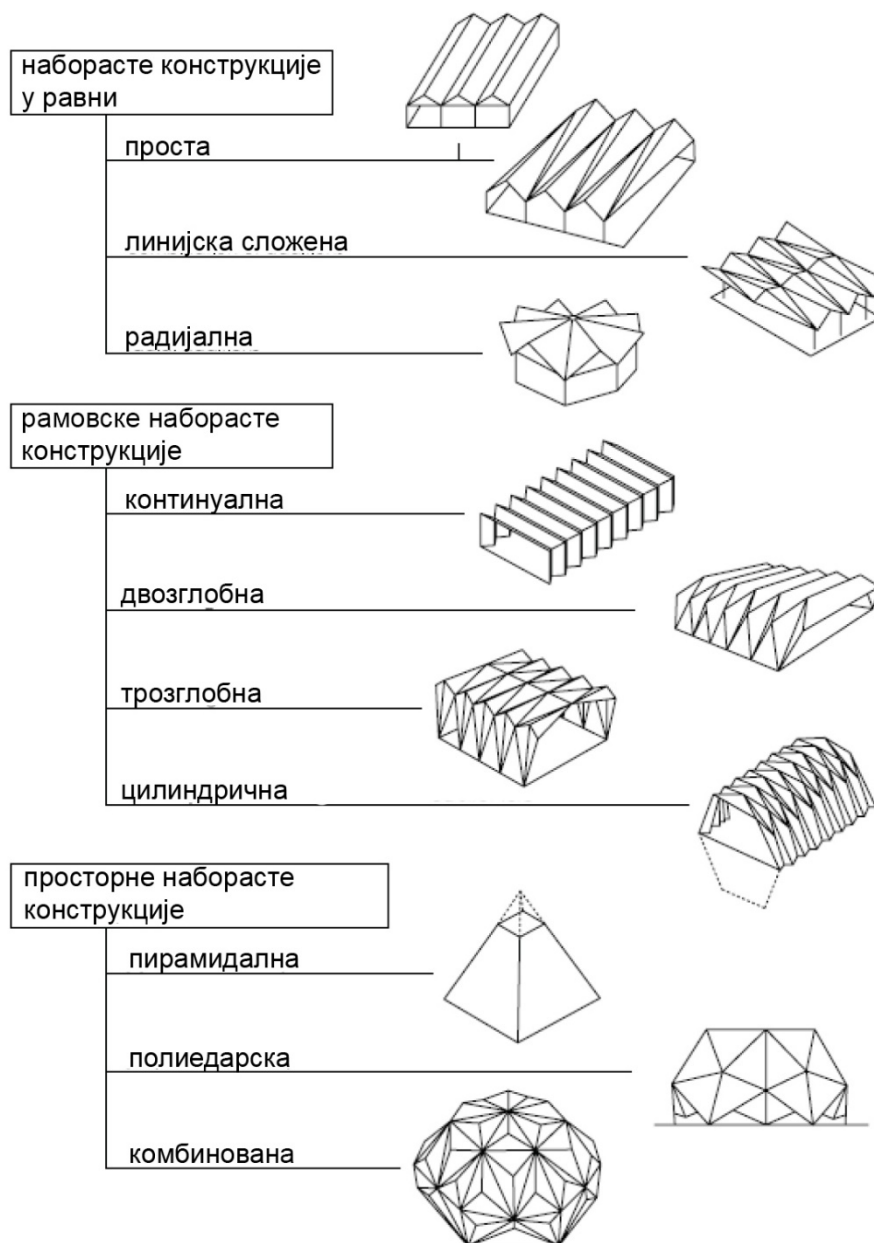
Према облику основе над којом је формирана, конструкција може бити:

- конструкције над правоугаоном основом:
 - наборасте конструкција у равни,
 - рамовске наборасте конструкције,
 - цилиндричне наборасте конструкције;

¹⁶⁶ Andrea Stitic и Yves Weinand, „Timber Folded Plate Structures – Topological and Structural Considerations“, *International Journal of Space Structures* 30 (2), (2015): 169-177

¹⁶⁷ Ненад Шекуларцац, *Дрвени решеткасти носачи: пројектовање, прорачун и извођење кровних конструкција*, (Београд: Универзитет, Архитектонски факултет, 2017), 167.

- конструкције над кружном-полигоналном основном:
 - наборасте конструкција у равни,
 - рамовске наборасте конструкције,
 - куполасте наборасте конструкције;
- конструкције над сложенем основном;
- конструкције над основном неправилног облика.




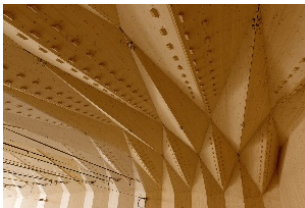


Слика 30. Подела наборастих конструкција на основу геометријског облика¹⁶⁸

¹⁶⁸ преузето из Nenad Šekularac, Ivanović Šekularac, Jelena, и Jasna Čikić Tovarović, „Folded structures in modern architecture“, *Facta universitatis - series: Architecture and Civil Engineering* 10 (2012): 3.

Набори формирани од плочастих материјала на бази дрвета своју поновну примену налазе након 2000-их година, употребом вишеслојних LVL или CLT панела. До данас је реализовано свега неколико конструкција и више десетина истраживачких модела формираних за лабораторијска испитивања (Табела 10.). Сви реализовани набори припадају групи линијских рамовских наборастих конструкција над правоугаоном или трапезастом основом. Набори мањих распона релизовани су применом једнослојне конструкције од плоча на бази дрвета, док је набор већег распона за објекат *Timber Pavilion of the Théâtre Vidy Lausanne* реализован као двослојна сендвич конструкција од формирана од CLT панела.

Табела 10. Наборасте конструкције реализоване применом плоча на бази дрвета¹⁶⁹

Година изградње	Локација	Објекат	Пројектанти	Материјал	Распон набора	Фотографија
2009	Осака, Јапан	Бамбусова шума и Коринтска колиба (eng.) <i>Bamboo Forest and Corinth Hut</i>	Ryuichi Ashizawa Architects	Дрвени панели	9 m	
2010	Помпаплес, Швајцарска	Капела у Саинт-Лоупу (eng.) <i>Chapel of St.-Loup</i>	Antoine Robert-Grandpierre, Yves Weinand, Hani Buri	Зидови: CLT 40 mm, Кров: CLT 60 mm	9.5 m	
2014	IBOIS/EPFL лабораторија	Истраживачки модел наборасте конструкције (eng.) <i>Interlocking Folded Plate prototype</i>	Christopher Robeller, Yves Weinand	LVL панели Kerto-Q 21 mm	3 m	
2017	Лозана, Швајцарска	Дрвени павиљон за театар Види у Лозани (eng.) <i>Timber Pavilion of the Théâtre Vidy Lausanne</i>	Atelier Cube, Yves Weinand Architectes sàrl	CLT панели, двослојна сендвич конструкција 45+25+45 mm	16-20 m	

Одређени аутори наводе да је употреба плоча на бази дрвета за формирање наборастих конструкција у архитектури веома ограничена пре свега због проблема и изазова формирања везе по ивицама плоче, односно веза које би омогућиле преношење оптерећења са плоче на

¹⁶⁹ Ауторска табела на основу истраживања. Фотографије и подаци преузети из:

Karen Cilento, *Bamboo Forest and Corinth Hut/RAA* (ArchDaily, 2009): <https://www.archdaily.com/44225/bamboo-forest-and-corinth-hut-raa> (доступно 11.10.2020.)

Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, *Chapel of St.-Loup* (EPFL, 2008): <https://www.epfl.ch/labs/ibois/projects/completed-projects/chapelle-saint-loup/> (доступно 11.10.2020.)

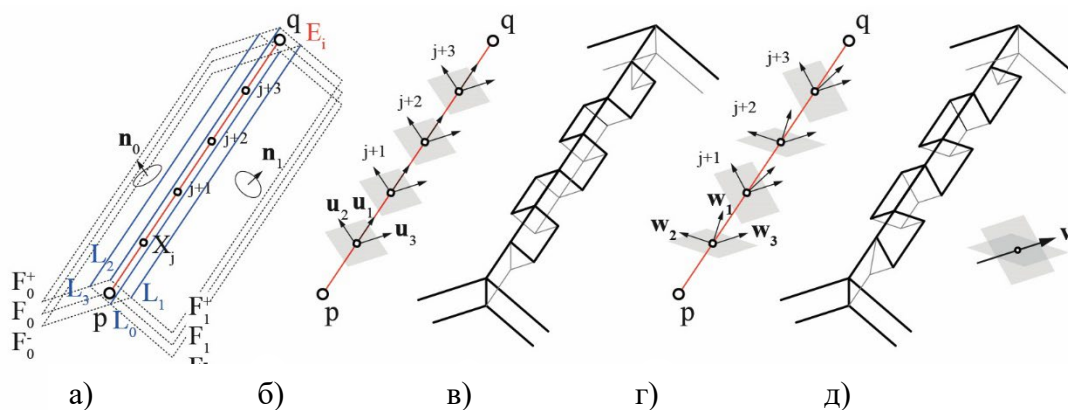
C. Robeller, Weinand, Y., „Interlocking Folded Plate – Integral Mechanical Attachment for Structural Wood Panels.“ *International Journal of Space Structures* 30 (2), (2015): 111-122.

Christopher Robeller, Julien Gambero, и Yves Weinand. „Théâtre Vidy Lausanne – A Double-Layered Timber Folded Plate Structure“, *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* 58 (4), (2017): 295-314.

плочу.¹⁷⁰ Сходно томе, целокупна претходна истраживања о примени плоча на бази дрвета за формирање наборастих конструкција примарно су фокусирана на формирање везе између плоча у структури набора, док се проблем материјала, његове стабилности и носивости не разматра.

Наборасте структуре формиране од плоча на бази дрвета првенствено су испитиване као структуре по чијим су бочним ивицама формиран непокретни линијски ослоњци, док се међусобно између плоча набора веза остварује као линијска зглобна веза, која омогућава ротацију. Везе се у овим случајевима најчешће остварују механичким спојним средствима – вијцима, а минимална дебљина плоче на бази дрвета скоро никада није условљена носивошћу плоче, већ дебљином плоче неопходном за остваривање везе. Ипак, овакве везе нису биле довољно отпорне да прихвате резултујуће моменте попречног савијања који се јављају у зони везе, па је пажња истраживача била усмерена на формирање одговарајуће везе за обликовање наборастих конструкција од плоча на бази дрвета.¹⁷¹

Инспирација за обликовање веза које би омогућиле и пренос момената савијања потиче од традиционалних начина обликовања веза, применом геометрије везе као основног елемента. Новоформирана веза (*integral mechanical attachment*) која је најчешће у употреби за овај вид конструкција директно је инспирисана зинк везом или везом у виду ластиног репа¹⁷², примењеном у традиционалним дрвеним конструкцијама. Поменуте везе формиране су без посредства механичких везних елемената, као и без додатка адхезива.



Слика 31. Обликовање везе између површинских елемената у наборастим конструкцијама – геометрија везе: а) основни параметри, б) пресечне равни нормалне на праву \vec{pq} , в) 3DOF веза, г) пресечне равни нормалне на $\vec{w_j}$, д) 1DOF веза (зинк веза)¹⁷³

На слици 31.в приказана веза самом својом геометријом прихвата силе смицања у равни плоче – силе паралелне ивици плоче, као и силе притиска у равни, које се прихватају и преносе на друге елементе путем контакта належућих површина. Ипак, за примену у наборастим конструкцијама, неопходно је везу обликовати тако да прихвати и моменте савијања, као и напрезања која настају под дејством оптерећења ван равни плоче, а која се не могу прихватити смицањем у равни и притиском. Обликовањем везе као зинк везе, трапезастог облика, наизменично постављене кроз две равни под углом (сл.31.д), смањује се степен слободe

¹⁷⁰ Andrea Stitic и Yves Weinand, „Timber Folded Plate Structures – Topological and Structural Considerations“, *International Journal of Space Structures* 30 (2), (2015): 169-177.

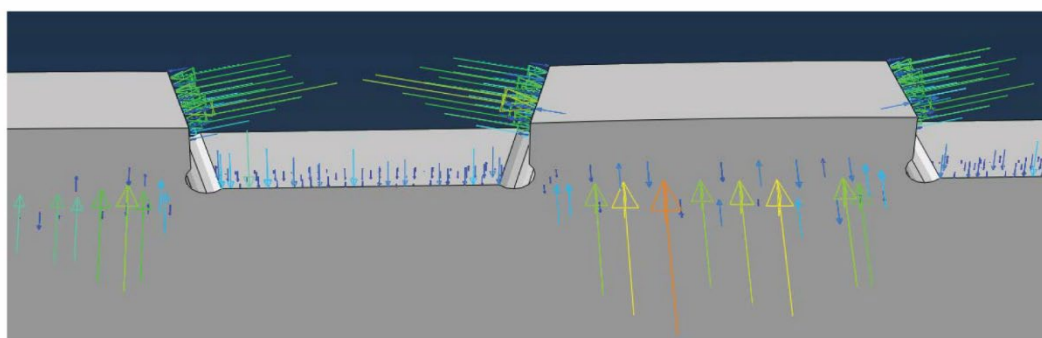
¹⁷¹ Andrea Stitic и Yves Weinand, „Timber Folded Plate Structures – Topological and Structural Considerations“, *International Journal of Space Structures* 30 (2), (2015): 169-177.

¹⁷² Милан И. Потребих, *Дрвне конструкције 1 – општи принципи конструисања*, (Београд: „Макарије“ – Издавачко – графичко и трговинско предузеће, 1994), 97-101.

¹⁷³ Преузето из С. Robeller, Y. Weinand, „Interlocking Folded Plate – Integral Mechanical Attachment for Structural Wood Panels“, *International Journal of Space Structures* 30 (2), (2015): 113.

ротације везе и омогућава се њена ротација у само једном правцу. На овај начин омогућава се стабилност везе и њена могућност да у одређеној мери прихвати моменте савијања, као и трансверзалне силе које делују ван равни плоче.

Моменти савијања се даље на суседне елементе преносе путем нормалних и смичућих сила (сл.32).¹⁷⁴ Најчешћа попуштања везе дешавају се приликом прекорачења напона смицања. Оптерећењем елемената набора на савијање долази до прекорачења смицања у вези, при чему првобитно долази до појаве пукотина у спољашњим слојевима плоче, а потом повећањем момената савијања и кроз средишње слојеве плоче.¹⁷⁵ Плоче на бази дрвета које се примењују за обликовање и конструисање наборстих конструкција морају имати велику отпорност на смицање, како због пријема и прерасподеле напрезања кроз саму плочу, тако и због преношења напрезања на суседне елементе конструкције. Највеће смицање у овим конструкцијама јавља се у зони ослонаца, односно при ивицама, на месту контакта две плоче. У даљим истраживањима пружа се могућност за испитивање плоча на бази дрвета ојачаних на смицање кроз целокупни попречни пресек плоче или парцијално по ивицама плоче, у зонама ослонаца.



Слика 32. Симулациони приказ прихватања и разлагања момента савијања у вези¹⁷⁶

Осим обликовања везе, за стабилност и носивост конструкције набора веома је важна геометрија структуре, а посебно њена статичка висина. Испитивањем стабилности конструкције, њене крутости и носивости у зависности од геометрије основног модула и примењеног материјала бавили су се Ститик и Вејнанд (A.Stitic, Y. Weinand)¹⁷⁷. Испитивање су спровели на моделима набора формираним од плоча чији су основни модули облика ромба, троугла или трапеца (сл.33). Модел је имао дефинисан распон (S) и висину структуре (h), а варијабилни угао између панела (φ) као и ширину набора (w). У одређеним структурама дошло је до мањих одступања од распона и статичке висине форме, како би се структура правилно обликовала и сви елементи правилно завршили на ослоначкој линији. Симулациони модели формиран су применом LVL плоча дебљине 21 mm, а ослоначке везе формиране су као линијски, зглобни непокретни ослонци, док су везе између плоча обликоване као круте везе. Најмању деформацију структуре под сопственим оптерећењем остварује конструкција формирана од троуглова, као основних модула, док се највећа деформација уочава на структури формираној од ромбоидних елемената. Силе смицања код структуре на бази ромба јављају се у свим ивицама плоче, док се силе смицања код структура код којих су основни

¹⁷⁴ C. Robeller, Y. Weinand, „Interlocking Folded Plate – Integral Mechanical Attachment for Structural Wood Panels“, *International Journal of Space Structures* 30 (2), (2015): 111-122.

¹⁷⁵ Christopher Robeller, Julien Gambero and Yves Weinand, „Théâtre Vidy Lausanne – A Double-Layered Timber Folded Plate Structure“, *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* 58 (4), (2017): 295-314.

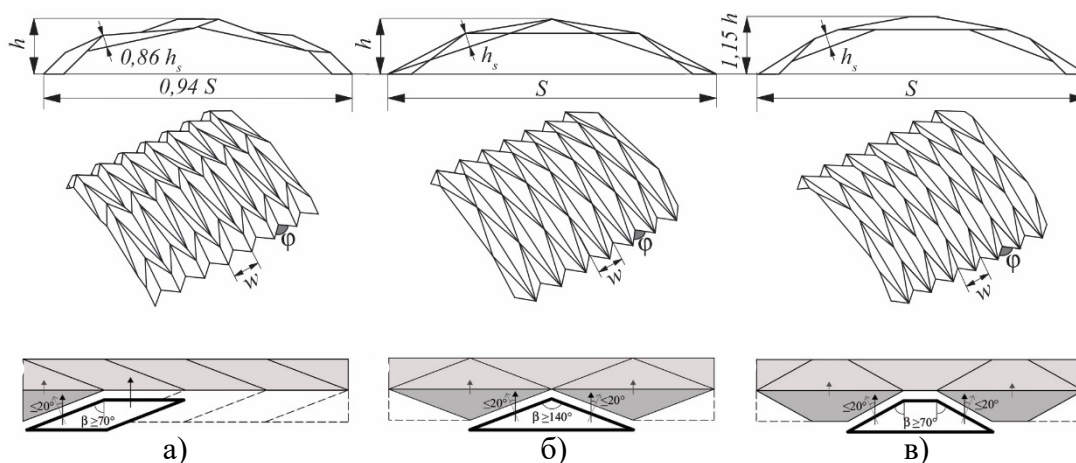
¹⁷⁶ преузето из C. Robeller, Y. Weinand, „Interlocking Folded Plate – Integral Mechanical Attachment for Structural Wood Panels“, *International Journal of Space Structures* 30 (2), (2015): 114.

¹⁷⁷ Andrea Stitic и Yves Weinand, „Timber Folded Plate Structures – Topological and Structural Considerations“, *International Journal of Space Structures* 30 (2), (2015): 169-177.

модули троуглови или трапези, јављају само у ивицама које нису паралелне са главном осом конструкције. Најмање силе смицања јављају се у структурама формираним од трапезоидних елемената.¹⁷⁸

На основу свих спроведених анализа у оквиру наведеног истраживања, утврђено је да је најбоље понашање структуре у оним случајевима када се највећи део оптерећења преноси путем сила које делују у равни плоче, што се постиже обликовањем саме конструкције. Као напогоднији облик дефинише се онај који је у целом попречном пресеку најближи облику глатке закривљене љуске, а што је заправо структура обликована од модула троуглова, као основних елемената. При коначном избору геометрије за израду прототипске просторне структуре, аутори су се одлучили за избор геометрије чији је основни модул елемент облика трапеза, пре свега због смањења броја плоча које се састају у једном чвору, што олакшава начин формирања везе и целокупне структуре.

Кроз истраживање исте структуре тестирано је два модела применом два материјала на бази дрвета - LVL и CLT плоча. Уочено је да хомогенији и механички чвршћи љуштени фурнири од којих су формиране LVL плоче имају посебне предности у односу на CLT плоче, чему посебно доприноси знатно мања дебљина панела, а самим тим и смањена сопствена тежина просторних структура. Недостатак CLT плоча односи се на њихову већу дебљину, која представља проблем при формирању веза, обликованих као претходно описане зинк везе.



Слика 33. Геометрија набора формирана применом основних модула заснованих на елементима облика: а) ромба, б) троугла, в) трапеза¹⁷⁹

Једина структура великог распона реализована применом плоча на бази дрвета је објекат театра Види у Лозани, реализована као двослојни набор, формиран од CLT панела. CLT панели су при пут на овом објекту примењени у структурама које се реализују применом механичких веза. Предност ове конструкције је што сам модул набора има знатно већу статичку висину, а самим тим и већи момент инерције. Ово је постигнуто формирањем основног модула као двослојни елемент конструкције CLT 45 mm + ваздушни слој 25 mm + CLT 45 mm.¹⁸⁰ Такође, ваздушни слој може се искористити за формирање термоизолационог слоја у међупростору, што пружа предност у начину обликовања конструкције, додајући јој улогу термоизолационог омотача објекта.

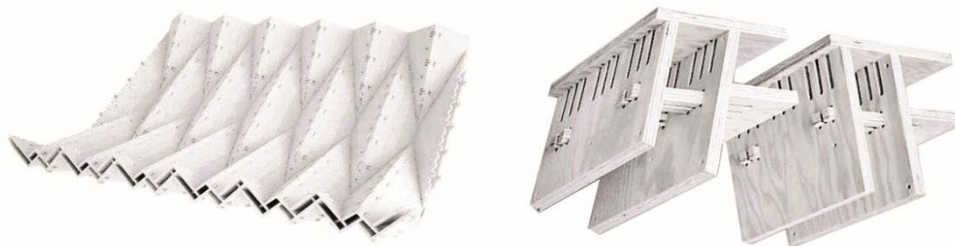
Друга предност у овом начину обликовања огледа се у постизању знатно веће крутости набора на местима грбина и увала, у односу на једнослојне наборе. Повећање крутости

¹⁷⁸ Исто, 169-177.

¹⁷⁹ преузето из Andrea Stitic и Yves Weinand, „Timber Folded Plate Structures – Topological and Structural Considerations“, *International Journal of Space Structures* 30 (2), (2015): 169-177.

¹⁸⁰ Christopher Robeller, Julien Gambero, Yves Weinand, „Théâtre Vidy Lausanne – A Double-Layered Timber Folded Plate Structure“, *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* 58 (4), (2017): 295-314.

резултирало је самим начином обликовања везе (сл.34). Везе су остварене тако да два слоја набора пролазе један кроз други, образујући чешаљ, формирајући круте углове између елемената на местима грбина и увала.¹⁸¹ На овај начин се повећава крутост на ивицама панела, избегавањем постављања додатног гредног елемента. Формирањем крутих веза смањује се савијање и извијање панела у структури.



Слика 34. Двослојни набор са детаљем везе¹⁸²

Анализом реализованих структура може се уочити да је само једна структура формирана од LVL плоча, при чему је постигнут веома мали распон структуре. Као основни проблем може се дефинисати то што су наборасте конструкције структуре са просторним носећим дејством у којима би плоча као површински елемент требала да има носивост у два правца, предајући своје оптерећење свим суседним елементима. С обзиром да су LVL плоче формиране од листова фурнира паралелно оријентисаних (2.3.2.2 *Конструкција ламелиране фурнирске грађе*)¹⁸³, њихове механичке карактеристике доминантне су у правцу паралелном влакнима, чиме је и њихов модул еластичности E_{\parallel} знатно већи од E_{\perp} . Наведени материјал нема тако добре способности за формирање структура са просторним носећим дејством, те би у овом случају за реализовану структура било оптималније применити материјал са приближно истим или сличним конструктивним карактеристикама у оба правца, односно фурнирске плоче.

Начин прихватања и преношења оптерећења у конструкцији условљен је већим бројем фактора: обликовањем читаве структуре (формом), детаљима везе између елемената и чврстоћом везе, начином формирања ослоначких веза и начином оптерећења конструкције. Стабилност конструкције поред свега претходно наведеног условљена је и примењеним материјалом, као и његовим понашањем у конструкцији везе. Да би се реализовала набораста конструкција од плоча на бази дрвета, поред избора геометрије и детаља веза, посебну пажњу треба усмерити на примену материјала који има добра механичка својства приликом изложености утицајима у равни плоче, отпорност на притисак и затезање као и отпорност на смицање.

3.2.4.2 Тип 2 – Просторне структуре у облику полигоналних љуски

Љуске представљају просторне танкозидне закривљене структуре са тродимензионалним носећим дејством, најчешће великих распона, површински оптерећене, које се налазе у мембранском стању напона. Према Несторовићу, код њиховог обликовања тежи се да се избегну напони савијања и смицања и да се оствари равномерно распрострањавање

¹⁸¹ Yves Weinand, „Folded plates made from timber panels“ у *Advanced Timber Structures*, уредник Yves Weinand (Basel: Birkhäuser Verlag GmbH, 2017.), 14-31.




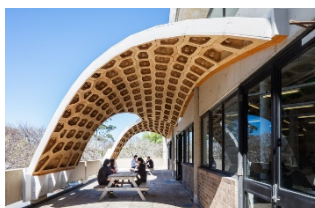
¹⁸² преузето из Yves Weinand, „Folded plates made from timber panels“ у *Advanced Timber Structures*, уредник Yves Weinand (Basel: Birkhäuser Verlag GmbH, 2017.), 14-31.

¹⁸³ погледати поглавље 2.3.2.2 *Конструкција ламелиране фурнирске грађе*, стр.53.

напрезања, што би допринело да се постигне приближно мембранско стање напона у љусци.¹⁸⁴ Љуске су, као и набори, своју експанзију доживеле у XX веку, а најчешће су реализоване у армираном бетону.

Полигоналне љуске представљају конструкције чије обликовање прати форму љуске, закривљеног облика са једноструко или двоструко, позитивним и/или негативним Гаусовим кривинама. Љуска је састављена из површинских равних сегмената међусобно везаних у систем који чини једну просторну структуру. Овакав тип љуски пружа велике могућности за геометријско експериментисање и дизајн слободних форми, а данас се све чешће реализује од материјала на бази дрвета. Материјали на бази дрвета представљају потенцијал за даљи развој, обликовање и конструисање просторних структура. Структуре формиране од плоча на бази фурнира најчешће су биле тема експерименталног испитивања истраживачког тима Универзитета у Штутгарту, а реализовани објекти у оквиру истраживања приказани су у Табели 11.

Табела 11. Структуре полигоналних љуски реализоване применом плоча на бази дрвета¹⁸⁵

Година изградње	Локација	Објекат	Пројектанти	Материјал	Распон љуске	Фотографија
2011	Штутгарт, Немачка	Истраживачки павиљон (енгл.) <i>ICD ITKE Research Pavilion 2011</i>	University of Stuttgart - ICD/ITKE	фурнирске плоче – бреза (6.5 mm) – двослојна љуска	9 m	
2014	Швебиш Гминд, Немачка	Изложбена хала у оквиру изложбе о хортикултури (енгл.) <i>Landesgartenschau Exhibition Hall</i>	University of Stuttgart - ICD/ITKE/IGS	фурнирске плоче – буква (50 mm)	10 m	
2019	Хајлброн, Немачка	Буга дрвени павиљон (енгл.) <i>Buga wood pavilion</i>	University of Stuttgart - ICD/ITKE	фурнирске плоче – двослојна љуска	30 m	
2019	Сиднеј, Аустралија	„HexBox“ надстрешница (енгл.) <i>HexBox Canopy</i>	University of Sydney - „Code to Production“ and DTC group	LVL плоче	4.5 m	

¹⁸⁴ Миодраг Несторовић, *КОНСТРУКТИВНИ СИСТЕМИ - Принципи конструисања и обликовања*, (Београд: Архитектонски факултет Универзитета у Београду, 2000.), стр. 99.

¹⁸⁵ Ауторска табела на основу истраживања. Фотографије и подаци преузети из:

ICD/ITKE University of Stuttgart, *ICD | ITKE Research Pavilion 2011* / ICD/ITKE University of Stuttgart (ArchDaily): <https://www.archdaily.com/200685/icditke-research-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart> (доступно 11.10.2020.)

ICD/ITKE/IGS University of Stuttgart, *Landesgartenschau Exhibition Hall* / ICD/ITKE/IGS University of Stuttgart (ArchDaily): <https://www.archdaily.com/520897/landesgartenschau-exhibition-hall-icd-itke-iigs-university-of-stuttgart> (доступно 11.10.2020.)

ICD/ITKE University of Stuttgart, *BUGA Wood Pavilion* / ICD/ITKE University of Stuttgart (ArchDaily): <https://www.archdaily.com/916758/buga-wood-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart> (доступно 11.10.2020.)

CodeToProduction, DTC, *HexBox Canopy* / DTC + CodeToProduction (ArchDaily):

<https://www.archdaily.com/942876/hexbox-canopy-dtc-plus-codetoproduction> (доступно 11.10.2020.)

Поред наведених, постоји још неколико просторних структура у геометрији полигоналне љуске, изведених од материјала на бази дрвета, а првенствено CLT-а, који неће бити предмет овог истраживања.

У егзоскелетним конструкцијама горепоменутих објеката, формираних као полигоналне љуске, уочавају се заједнички конструктивни принципи засновани на принципима *травалентних полиедарских сегмената*.¹⁸⁶ Овај конструктивни принцип заснован је на принципима биомимикрије, односно обликовања опне морских јежева (подкласа *Clypeasteroidea*)¹⁸⁷, и подразумева тополошко правило обликовања и формирања полигоналне љуске спајањем увек три површинска елемента у једну тачку. Структура је формирана тако да се увек три плоче састају у једној тачки, међусобно се стабилизујући и формирајући просторно стабилан систем. Формирање система сутицањем само две плоче у једној тачки није могуће, а осим тога овакав систем не би био просторно стабилан, имао би могућност слободне ротације око једне осе, све док се не уведе трећа плоча која би их међусобно укрутила. Дакле, померање једне плоче увек ће бити спречено помоћу друге две плоче. Захваљујући овом принципу свака структура код које се три плоче састају у једној тачки биће стабилна, док се сваким одступањем од овог распореда ствара деформабилна структура.

Травалентни полиедарски сегменти полигоналних (планарних) љуски су кинематички стабилни и не захтевају формирање крутих веза између елемената, већ су везе формиране као зглобне везе, које немају могућност прихватања момената ротације. Захваљујући оваквој конструкцији плоче се међусобно стабилизују отпором унутрашњих сила, односно сила у равни плоче. Свака плоча у конструкцији мора радити по принципу дијафрагме, односно прихватати силе које делују у њеној равни, односно плоче се не смеју конструисати тако да прихватају торзију или моменте да би се на тај начин постигла стабилност структуре. Везе између плоча формиране су као линијске зглобне везе, путем којих је омогућено преношење искључиво аксијалних и смичућих сила, али не и момената савијања. Овако обликоване љуске биће кинематички нестабилне само у случају када две плоче заклапају угао приближан 180° .¹⁸⁸ Да би се повећала крутост и стабилност љуски између плочастих елемената који заклапају угао од око 180° , неопходно је формирати круте везе између елемената.

Зглобне везе код оваквих конструкција формиране су у виду везе на ластин реп који се популарно назива зинком¹⁸⁹. Овакве везе прихватају силе смицања у равни плоче, док се аксијалне силе и смичуће силе које делују ван равни плоче прихватају путем пара укрштених вијака. Сила смицања која делује у равни (F_y) преноси се путем контакта належаће површине и преноси као сила смицања у равни (сл.35).¹⁹⁰ Код овакве везе мора се испитати носивост везе

¹⁸⁶ O. Krieg, T. Schwinn, A. Menges, J., Knippers Li, Schmitt J., and Schwieger, V. A., "Biomimetic Lightweight Timber Plate Shells: Computational Integration of Robotic Fabrication, Architectural Geometry and Structural Design." у *Advances in Architectural Geometry 2014*, едитори: P. Block, J. Knippers, N. Mitra and Wang W., (Cham: Springer, 2015), 109-125;

La Magna, R., Waimer, F. & Knippers, J., "Nature-inspired generation scheme for shell structures.", *International Association of Shell and Spatial Structures Symposium: From Spatial Structures to Space Structures (IASS: Seoul, South Korea, 2012)*;

Simon Bechert, Abel Groenewolt, Oliver David Krieg, Achim Menges, and Jan Knippers, "Structural Performance of Construction Systems for Segmented Timber Shell Structures" *Proceedings of the IASS Symposium 2018: Creativity in Structural Design*, (Boston: 2018).

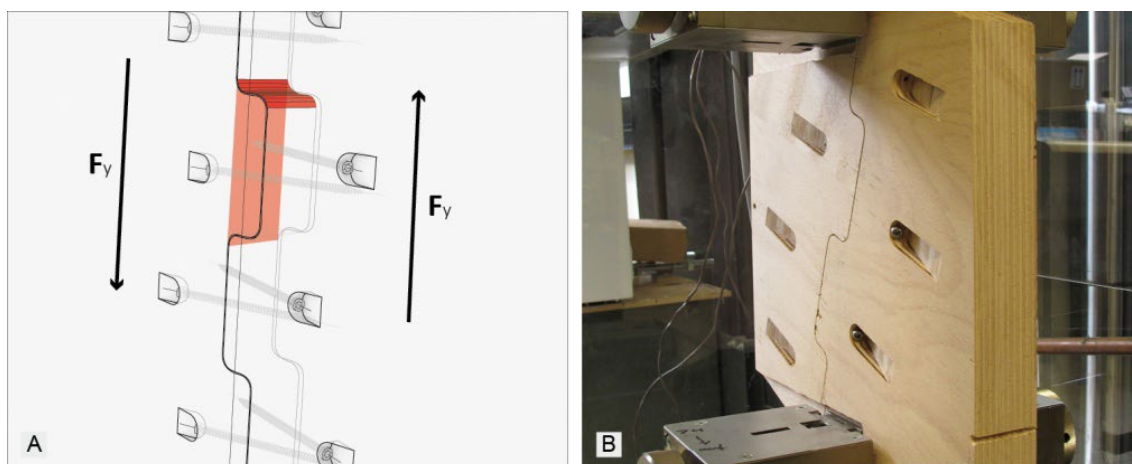
¹⁸⁷ O. Krieg, T. Schwinn, A. Menges, J., Knippers Li, Schmitt J., and Schwieger, V. A., "Biomimetic Lightweight Timber Plate Shells: Computational Integration of Robotic Fabrication, Architectural Geometry and Structural Design." у *Advances in Architectural Geometry 2014*, едитори: P. Block, J. Knippers, N. Mitra and Wang W., (Cham: Springer, 2015), 109-125.

¹⁸⁸ исто, 109-125.

¹⁸⁹ Милан И. Потребих, Дрвне конструкције 1 – општи принципи конструисања, (Београд: „Макарије“ – Издавачко – графичко и трговинско предузеће, 1994), 97-101.

¹⁹⁰ Када се сила пренесе путем везе, оне у другој плочи мења смер (акција, реакција).

на смицање и притисак по омотачу рупе.¹⁹¹ У формирању везе између елемената чврстоћа материјала је веома важна, како због саме геометрије везе, тако и због примене вијака у вези.



Слика 35. Обликовање везе у конструкцијама полигоналних љуски: а) сила смицања која делује у равни F_y путем контактне површине преноси се на други елемент, б) физичко испитивање носивости везе на притисак и носивости на смицање у равни¹⁹²

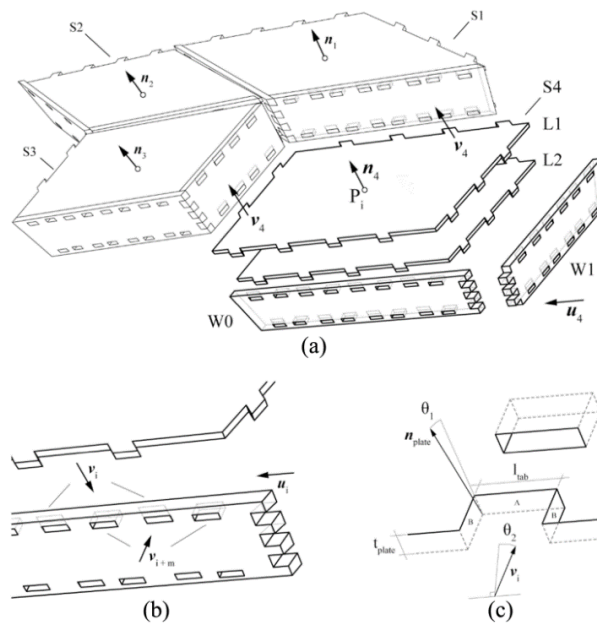
Конструкција и понашање појединачних сегмената – плоче у структурама полигоналних љуски обликованих на наведени начин може се упоредити са понашањем дијафрагме или плоче у конструкцији набора, код којих се као доминантно оптерећење јављају аксијалне силе у равни плоче. Данас се примењују два начина обликовања и конструисања сегмената полигоналне љуске. Први начин подразумева формирање љуске од сегмената (ћелија) састављених из више делова формирајући сегмент сандучастог или П попречног пресека. Други начин представља формирање љуске од сегмената масивног пресека, где је један елемент пуна плоча на бази фурнира. Оба наведена начина биће приказана у даљем раду.

Полигоналне љуске најчешће су састављене од сегмената (ћелија) – који се састоји од плоче (површинског раванског слоја) и потконструкције позициониране по ивицама плоче (сл. 36). Најчешће су сегменти хексагоналног облика, што такође припада групи тровалентних полиедарских мрежа, код које се у једној тачки полигоналне плоче сустичу друге две плоче (сл.37). Хексагонална матрица има могућност прилагођавања и обликовања код делова љуске са позитивним или негативним Гаусовим кривинама.¹⁹³

¹⁹¹ O. Krieg, T. Schwinn, A. Menges, J., Knippers Li, Schmitt J., and Schwieger, V. A., : Computational Integration of Robotic Fabrication, Architectural Geometry and Structural Design." у *Advances in Architectural Geometry 2014*, едитори: P. Block, J. Knippers, N. Mitra and Wang W., (Cham: Springer, 2015), 109-125;

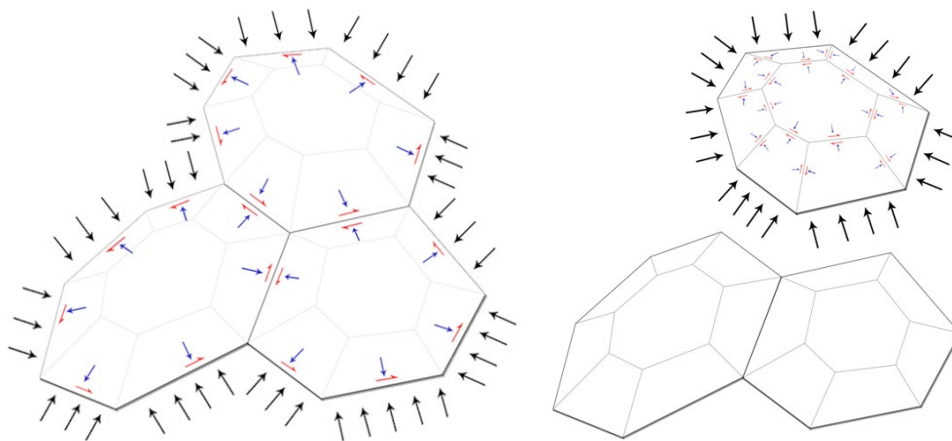
¹⁹² преузето из O. Krieg, T. Schwinn, A. Menges, J., Knippers Li, Schmitt J., и Schwieger, V. A., „Biomimetic Lightweight Timber Plate Shells: Computational Integration of Robotic Fabrication, Architectural Geometry and Structural Design“, *Advances in Architectural Geometry 2014*, уредник P. Block, J. Knippers, N. Mitra и Wang W., (Cham: Springer, 2015.), 117.

¹⁹³ Jian-Min Li, Jan Knippers, "Pattern and Form - Their Influence on Segmental Plate Shells", *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2015, Amsterdam: Future Visions*, (Amsterdam: 2015).



Слика 36. Конструктивни систем једног сегмента љуске састављеног из више делова, образујући сегмент сандучастог попречног пресека¹⁹⁴

Плоча у конструкцији прихвата оптерећење које делује ван равни плоче, силе се даље преносе путем сила у равни плоче, а путем смицања се преносе на потконструкцију или на суседну плочу уколико је љуска формирана од плоча у једном слоју, без потконструкције. Иако није уобичајено да се у геометрији љуске јављају моменти савијања у елементима, овако обликоване љуске то омогућавају, тиме да је плоча у стању да прихвати савијања ван равни, али се она не преносе везама на суседне елементе. Плоча прихвата спољашње силе целом својом површином, али се њихова дистрибуција дешава уз ивице плоче, не само путем аксијалних сила већ и смичућим силама у равни плоче. Дистрибуција сила може се дешавати у било ком смеру, што зависи од геометрије љуске и начина обликовања веза између елемената (сл.37).



Слика 37. Хијерархија ћелија и дистрибуција оптерећења између елемената у трвалентном-полиедарском систему¹⁹⁵

¹⁹⁴ преузето из Robeller, Christopher, Mina Konaković, Mira Dedijer, Mark Pauly, и Yves Weinand. „Double-layered timber plate shell“, *International Journal of Space Structures* 32 (3-4), (2017): 160–175.

¹⁹⁵ преузето из La Magna, Riccardo, Frédéric Waimer, и Jan Knippers. „Nature-inspired generation scheme for shell structures.“ *Proceedings of the International Symposium of the IASS-APCS Symposium 2012: From Spatial Structures to Space Structures*. (Seoul: IASS, 2012.).

Управо због обликовања самог сегмента љуске и остваривањем веза са свих страна са суседним елементима, дистрибуција сила одвија се у више праваца и смерова, зато је најпогодније за овакве конструкције применити материјале који имају слична механичка својства у свим правцима, а најчешће као материјал примењивана је фурнирска плоча. Због своје мале сопствене тежине и добрих механичких карактеристика у два правца, фурнирска плоча је погодна за формирање егзоскелетних структура по принципу полигоналних љуски. У оваквим структурама плоче могу радити двојачко – у мембранском стању напона, прихватајући само аксијалне силе, али и као плоче, прихватајући гравитациона оптерећења путем момената савијања у плочи. Из тог разлога, приликом димензионисања вишеслојних плоча у овако обликованим структурама, а што је случај са свим плочама на бази фурнира, морају се проверити напони у спољашњим слојевима плоче, који могу бити прекорачени под дејством момената савијања и напони у средишњим слојевима узроковани дејством сила смицања.¹⁹⁶

Претходно је поменуто да се сами сегменти могу образовати као сложени или као пуни пресеци. Мала статичка висина (дебљина) фурнирске плоче условљава мале распоне конструкције љуски, немогућност формирања везе и појаву бочног извијања плоче при дејству аксијалних сила притиска, па су због постизања веће статичке висине, а самим тим и већих распона сегменти љуске формирану у виду сложене ћелијасте структуре или као масиван пресек веће статичке висине. Једна ћелија може бити састављена од површинских елемената – плоче на бази фурнира и потконструкције – ивичних елемената који такође могу бити од истог материјала, а често и другог слоја плоче, формирајући двослојну љуску, као што је то случај на *ICD | ITKE Research Pavilion 2011* и *Buga Wood Pavilion*. Код оваквих структура везе између сегмената формирају се у нивоу потконструкције, или посредством потконструкције уколико је елемент потконструкције заједнички за две плоче. Вишеслојне фурнирске плоче, велике дебљине примењене су за конструисање *Landesgartenschau Exhibition Hall* Систем прихватања и преношења оптерећења не разликује се у ова два случаја.

Павиљони код којих су сегменти формирану само од плоча на бази фурнира, без потконструкције, захтевају велику дебљину плоче, тј. статичка висина елемента постиже се повећањем дебљине плоче, која је много већа од уобичајене, те је код *Landesgartenschau Exhibition Hall*.¹⁹⁷ фурнирска плоча формирана као 21-слојна плоча (сл. 35.б). Велика дебљина плоче у овом случају неопходна је због самог формирања веза између елемената, јер се у плочама са потконструкцијом везе између елемената формирају у нивоу потконструкције, док се у овом случају везе формирају директно између две плоче. Такође, велика дебљина плоче условљена је и бочним извијањем плоче у равни на великим распонима једног елемента, при оптерећењу плоче аксијалним силама.

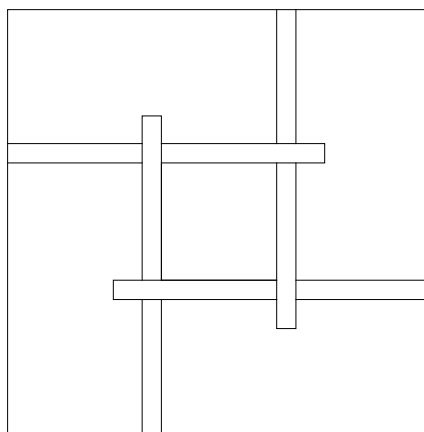
Упоредном анализом конструкције полигоналне љуске формиране од плоча пуног пресека – CLT плоча и сегмената ћелијске структуре – LVL плоче и потконструкције¹⁹⁸, доказано је да се формирањем љуске од ћелија на бази плоче и потконструкције постиже већи распон структуре и много мањи утрошак материјала у односу на пуне плоче велике статичке висине, али је недостатак тежа производња елемената и монтажа објекта, с обзиром да се формирају елементи са много више веза, кроз више нивоа, него што то имају љуске од пуног пресека, формиране од CLT плоча.

¹⁹⁶ Jian-Min Li and Jan Knippers, "Segmental Timber Plate Shell for the Landesgartenschau Exhibition Hall in Schwäbisch Gmünd—the Application of Finger Joints in Plate Structures.", у *International Journal of Space Structures* 30 (2), (2015): 123-140.

¹⁹⁷ Jian-Min Li, Jan Knippers, „Segmental Timber Plate Shell for the Landesgartenschau Exhibition Hall in Schwäbisch Gmünd—the Application of Finger Joints in Plate Structures“, *International Journal of Space Structures* 30 (2), (2015): 123-140.

¹⁹⁸ Simon Bechert, Abel Groenewolt, Oliver David Krieg, Achim Menges, and Jan Knippers, "Structural Performance of Construction Systems for Segmented Timber Shell Structures", *Proceedings of the IASS Symposium 2018: Creativity in Structural Design*, (Boston: 2018).

Реципрочне конструкције представљају тродимензионалне структуре формиране од минимално три или више штапастих елемената, међусобно постављених у таквом односу да формирају затворени конструктивни систем.¹⁹⁹ Принцип реципроцитета у архитектонским структурама подразумева примену носећих конструктивних елемената за формирање просторне конфигурације, у којој се елементи међусобно подржавају, ослањајући се једни на друге, формирајући тако затворену просторну структуру.²⁰⁰ Принцип реципроцитета графички је приказан на слици 38.



Слика 38. Принцип реципроцитета

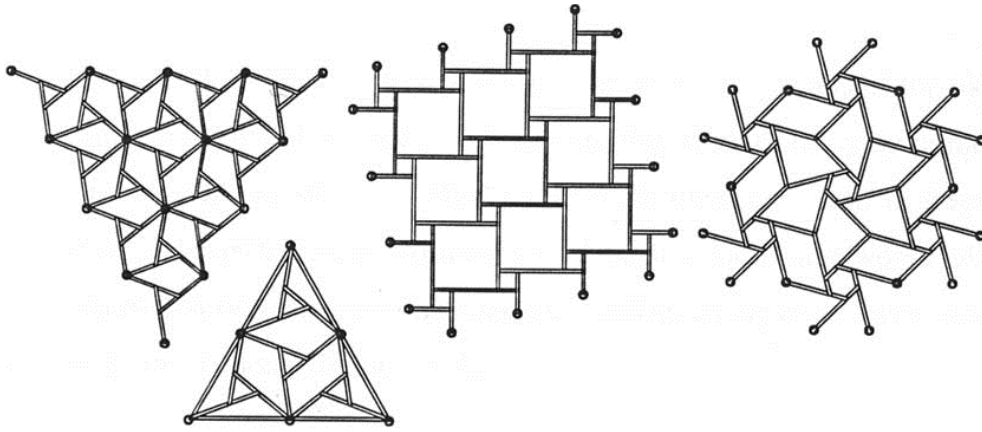
Концепт реципрочних конструкција трагове бележи у праисторији, где се обликовање шатора северноамеричких индијанаца везује управо за праоблике реципрочних конструкција. Касније, реципрочне конструкције примену налазе у обликовању кровова облика “мандала”, у источноазијским земљама, док се у Европи њихова примена веже за XII век и Вилара Онекура (Villard de Honnecourt) који је покушао да реши проблем међуспратних таваница у равни применом кратких штапастих елемената. Различити облици реципрочних конструкција развијају се касније током ренесансног периода, где почетком XVI века на идеји моста Леондардо да Винчи (Leonardo da Vinci) решава конструкцију применом реципрочних конструкција, а Себастијано Серлио (Sebastiano Serlio) решава међуспратну конструкцију применом реципроцитета. Појам реципрочне конструкције, који се данас примењује, у архитектонску праксу у XX веку уводи Грејм Браун (Graham Brown), енглески дизајнер.²⁰¹

Реципрочне конструкције најчешће су формиране од великог броја штапастих елемената мале дужине, постављених у међусобној диспозицији тако да сваки елемент једновремено буде како ослонац, тако и елемент који се ослања на суседни (сл.38). Конструкције се могу формирати од истих или различитих елемената, у зависности од обликовања конструкције и њене просторне конфигурације. Реципрочне структуре најчешће примену имају у кровним конструкцијама, а погодне су за формирање просторних структура слободних форми (сл.39).

¹⁹⁹ Olga Popovic, „Reciprocal frame structures“, (PhD thesis. University of Nottingham, 1996).

²⁰⁰ A. Pugnale, D.Parigi, P.H.Kirkegaard, M. Sassone, “The principle of structural reci-procity: history, properties and design issues”, *Proceedings of the IABSE-IASS Symposium 2011: “Taller, Longer, Lighter”* (London, 2011), цитирано код Olivier Baverel, Alberto Pugnale, „Reciprocal systems based on planar elements“, *Proceedings of the ICSA 2013 “Structures and Architecture”*, (Guimaraes, Portugal, 2013).

²⁰¹ Olga Popovic Larsen, *Reciprocal Frame Architecture*, (Oxford: Elsevier Ltd, 2008), 5-18.

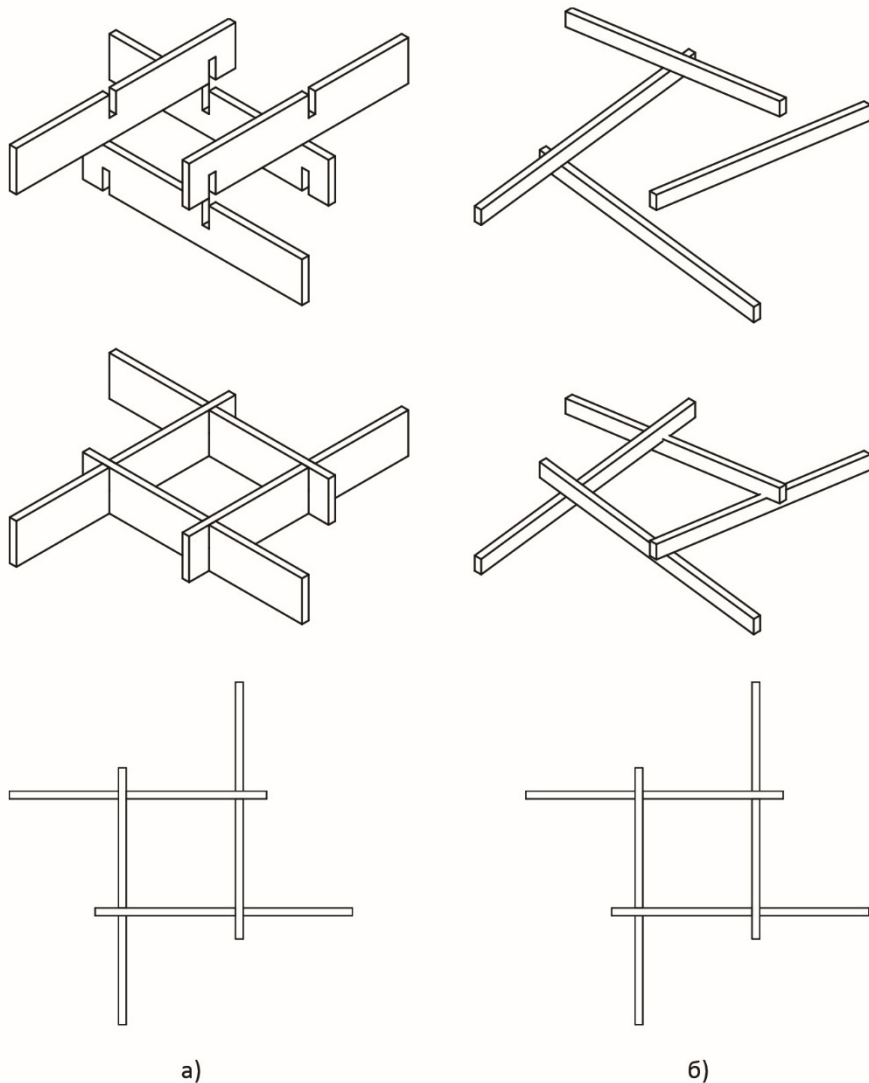


Слика 39. Примери реципрочних структура над различитим облицима основе²⁰²

Предност реципрочних конструкција огледа се у могућности формирања објеката великих распона применом елемената мале дужине, употребом истих или различитих елемената конструкције, као и типских веза између елемената. Реципрочни системи сматрају се ефикасним конструктивним системима јер се за њихово формирање могу користити елементи који се не могу користити у класичним конструктивним системима, а посебно грађа малих дужина која често није употребљива у другој конструктивној примени. Осим тога, предност реципрочних конструкција је и обликовање веза између елемената, где се везе могу формирати применом механичких спојних средстава или непосредно без њихове примене, путем усека и тесарских веза.

У зависности од обликовања конструкције и начина формирања веза између елемената, елементи реципрочне конструкције изложени су савијању у равни и смицању, када су сви елементи конструкције формирану у хоризонталној равни, а везе остварене засецањем елемената (сл.40.а). Уколико су елементи конструкције постављени у нагибу, а везе остварене без формирања засека, елементи конструкције изложени су косом савијању, смицању као и нормалним силама притиска и затезања (сл.40.б). Највећи смичући напони, као и код просте греде, јављају се управо на местима ослонаца, односно на местима контакта са суседним елементима, док се максимални напони савијања јављају у средишњем пољу, између два ослонаца. Управо на местима највећих смичућих напрезања за елементе код којих је веза формирана засецањем елемената, јавља се ослабљење попречног пресека, те се пажња мора обратити на правилно обликовање веза.

²⁰² преузето из Olga Popovic Larsen, *Reciprocal Frame Architecture*, (Oxford: Elsevier Ltd, 2008), 23.



Слика 40. Поље реципрочне конструкције: а) елементи у равни, б) елементи у нагибу

Реципрочне конструкције формирале су се већином од штапастих елемената, као што је претходно описано и приказано на слици 40. Развојем параметарског моделовања и применом софтвера у пројектовању и разради конструкција долази до помака у пројектовању реципрочних конструкција. Применом површинских елемената све чешће долази до пројектовања реципрочних структура, те се данас може извршити подела реципрочних конструкција у зависности од примењених елемената на:

1. реципрочне структуре формиране од линијских (штапастих) елемената,
2. реципрочне структуре формиране од површинских (планарних) елемената.

Реципрочне конструкције формиране применом површинских елемената према Баврелу и Пугналу (Olivier Baverel, Alberto Pugnale) у зависности од морфологије структуре и положаја елемената могу се класификовати као три типа структуре формиране од површинских елемената:²⁰³

²⁰³ Olivier Baverel, Alberto Pugnale, „Reciprocal systems based on planar elements“, *Proceedings of the ICSA 2013 “Structures and Architecture”*, (Guimaraes, Portugal, 2013).
Olivier Baverel, Alberto Pugnale, „Reciprocal Systems Based on Planar Elements: Morphology and Design Explorations“, *Nexus Network Journal* 16(2014): 179-189.

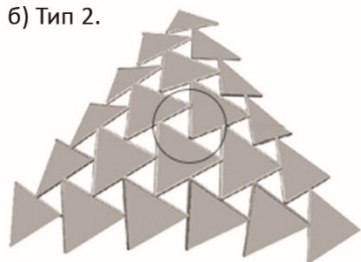
- Тип 1. – површински елементи примењени у виду танких линијских елемената (сл.41.а),
- Тип 2. – површински елементи примењени у виду групе линијских елемената (сл.41.б),
- Тип 3. – површински елементи примењени на различите начине комбиновањем претходна два система (сл.41.в).

Осим наведеног, исти аутори дефинишу још два типа реципрочних конструкција формираних применом површинских елемената у зависности од начина формирања везе између елемената²⁰⁴ – конструкције формиране путем веза које могу пренети моменте савијања и конструкције формиране помоћу веза које преносе оптерећење притиском и затезањем. Наведени типови конструкција неће бити дефинисани у оквиру наведене поделе као ни анализирани у овом истраживању.

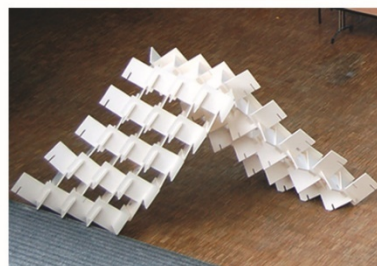
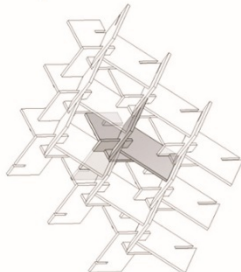
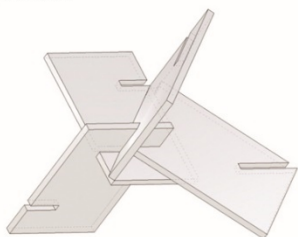
а) Тип 1.



б) Тип 2.



в) Тип 3.



Слика 41. Три типа реципрочних конструкција формираних од површинских елемената: а) од танких линијских елемената, б) у виду групе линијских елемената, в) комбиновањем групе линијских елемената²⁰⁵

Први тип подразумева да су реципрочне структуре формиране од површинских елемената, оријентисаних у положају линијског елемента, односно тако да су изложени оптерећењу које делује у равни плоче. На овај начин површински елементи преузимају улогу линијских елемената, елементи су у том случају мале ширине са могућношћу велике статичке висине. Као доминантна оптерећења у овим структурама јављају се савијање у равни плоче, смицање управно на равни плоче, а у зависности од обликовања структуре може доћи и до притиска и затезања у равни плоче. Као репрезентативни пример ове конструкције сматра се павиљон Сепентине Галерије 2005., аутора Алвара Сизе (Alvaro Siza) и Едуарда Соуто де

²⁰⁴ Olivier Baverel, Alberto Pugnale, „Reciprocal Systems Based on Planar Elements: Morphology and Design Explorations“, *Nexus Network Journal* 16(2014): 179-189.

²⁰⁵ преузето из Olivier Baverel, Alberto Pugnale, „Reciprocal Systems Based on Planar Elements: Morphology and Design Explorations“, *Nexus Network Journal* 16(2014): 179-189.

Моура (Eduardo Souto de Moura), у сарадњи са Цецил Балмондом и АРУП групацијом (Cecil Balmond – Arup), приказаних у Табели 12.





Други тип – површински елементи примењени у виду групе линијских елемената Баврел и Пугнал дефинишу као реципрочне структуре формиране од површинских елемената код којих ивице површина образују линерану реципрочну групу, чијим се понављањем ствара реципрочна структура. Минималан број елемената који учествује у стварању реципрочног модула су три површине, односно три линеарне ивице.²⁰⁶ Код овог типа конструкција површински елементи од којих су формиране конструкције могу бити изложени различитим напрезањима, у зависности од њиховог положаја у систему. Плоче постављене у хоризонталној диспозицији изложене су првенствено савијању управно на раван плоче, а последично и смицању у равни плоче. Плоче постављене у нагибу изложене су косом савијању, смицању, а могу бити изложене и аксијалним силама притиска и затезања. Апсолутно вертикално постављене плоче у оваквим структурама најчешће се налазе по њиховом ободу, чиме су оптерећене савијању у равни плоче и смицању управно на раван.

Трећи тип – подразумева комбинацију претходне две структуре. Површински елементи постављени су у таквој диспозицији да њихове ивице граде реципрочни модул, али њихова оријентација може бити различита у структури, и самим тим елементи у оквиру структуре нису оптерећени на исти начин. Напрезања којима су изложени површински елементи у овом случају зависе од диспозиције елемената у структури, а може бити било које од претходно описаних напрезања.

У Табели 12. приказани су неки од реализованих објеката применом реципрочних конструкција. Сви реализовани објекти су привременог карактера - објекти павиљонског типа, реализовани у циљу истраживања и испитивања конструктивних могућности наведених структура. У конструктивном систему реципрочних конструкција применом плоча на бази дрвета највећи распон постигнут је реализацијом објекта *Serpentine Gallery Pavilion 2005*, где је просторна структура носећа у два правца, распона 15 m и 25 m, а на којој су и бочни зидови формираны применом система реципроцитета. Код свих разматраних структура плоче на бази дрвета могу бити изложене различитим напрезањима, у зависности од њихове диспозиције у целокупном систему, те се сходно томе приликом пројектовања оваквих структура пажљиво мора вршити одабир материјала у зависности од његових механичких својстава.

²⁰⁶ Исто, 179-188.

Табела 12. Реципрочне конструкције реализоване применом плоча на бази дрвета – примери објеката²⁰⁷

Година изградње	Локација	Објекат	Пројектанти	Материјал	Распон и тип структуре	Фотографија
2005	Лондон, УК	Галерија Серпентине 2005 (енгл.) <i>Serpentine Gallery Pavilion 2005</i>	Álvaro Siza, Eduardo Souto de Moura, Cecil Balmond and Arup	LVL плоче	25x15 m Тип 1	
2008-2009	Лозана, Швајцарска	Модуларна реципрочна структура (енгл.) <i>Modular Timber Structure</i>	Bastien Thorel - Design Studio Weinand at IBOIS-EPFL	CLT панели, 21 mm	Тип 3	
2012	Мелбурн, Аустралија	Универзитет у Мелбурну – Павиљон, студентски пројекат (енгл.) <i>University of Melbourne – Student's pavilion</i>	Студенти Универзитета у Мелбурну и Јуџин Чи (Eugene Cheah)		Тип 1	
2014	Колеџ у Нингбоу, Кина	Универзитет у Нотингему, Нингбо Кампус - Павиљон, студентски пројекат (енгл.) <i>University of Nottingham Ningbo Campus – Students pavilions</i>	Студенти Универзитета у Нотингему Нингбо - Nathan Melenbrink, Samo Pedersen and Shibu Raman	Фурнирске плоче	Тип 1	

3.3 Потенцијали примене плоча на бази фурнира у архитектури

У претходном делу рада приказани су различити начини примене плоча на бази фурнира у архитектури, који подразумевају конвенционалну и неконвенционалну примену наведеног материјала. Посебна пажња у оквиру рада усмерена је на њихову конструктивну примену, као примарни носећи елемент у архитектонским егзоскелетним структурама. Најраспрострањенија примена фурнирских плоча огледа се у формирању дијафрагми објеката реализованих у дрвеним конструкцијама, као и за формирање структура са просторним носећим дејством, пре свега у конструктивном систему љуске. LVL плоче своју примену налазе такође у структурама са просторним носећим дејством, где посматрајући њихове

²⁰⁷ Ауторска табела на основу истраживања. Фотографије и подаци преузети из:

Kate Jerde, *London's Serpentine Gallery Pavilions, 2005: Alvaro Siza and Eduardo Souto de Moura* (Architectural Digest, 2011): <https://www.architecturaldigest.com/gallery/serpentine-gallery-pavilion-retrospective-slideshow> (доступно 15.10.2020.)

Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, *Modular Timber Structure* (EPFL, 2008-2009): <https://www.epfl.ch/labs/ibois/projects/completed-projects/modular-timber-structure/> (доступно 15.10.2020.)

Parametric House, *Plywood Pavilion*: <https://parametrichouse.com/plywood-pavilion/> (доступно 11.11.2022.)

механичке карактеристике, најрационалнија примена је за формирање реципрочних структура код којих су површински елементи примењени у виду танких линијских елемената (*Реципрочне структуре – Тип 1*).

Кроз претходне анализе примене плоча на бази фурнира за формирање архитектонских структура више пута је истакнута њихова мала сопствена тежина, као основна предност. Посебно је важно нагласити да је поред мале сопствене тежине веома важан и однос механичких карактеристика, тако да су плоче на бази фурнира материјал мале сопствене тежине, добрих механичких карактеристика, бољих од монолитног дрвета, те зато налазе своју примену као елементи структуре. Ипак, осим у виду елемената за укрућење – дијафрагме, у чијим конструкцијама не могу бити једини носећи елемент већ се морају формирати заједно са елементима потконструкције, као и у виду гредних елемената – код којих се фурнирска плоча примењује као ножица носача сложеног попречног пресека или елемент сандучастих носача, остале примене плоча на бази фурнира су експерименталног типа и сви до сада реализовани објекти формирану су као објекти привременог карактера и у циљу научних истраживања.

Плоче на бази фурнира у зависности од начина примене и положаја у конструкцији могу бити изложене различитим врстама оптерећења – која се пре свега разликују по свом правцу и положају, чиме су елементи изложени различитим напонским стањима, која су најчешће сложена. У конструкцијама дијафрагми примењују се фурнирске плоче, које због своје мале статичке висине не могу да прихвате савијања управно на равну плочу, те се дијафрагме пројектују као сложени попречни пресеци фурнирских плоча и потконструкције. У овим конструкцијама фурнирске плоче имају улогу прихватања сила смицања управно на равну плочу када је конструкција изложена хоризонталном оптерећењу, или смицања у равни плоче које се јавља као последица савијања под дејством гравитационог оптерећења. Примена плоче на бази фурнира као самосталног гредног елемента такође није погодна због мале дебљине плоче, као и великих бочних деформација у виду избочавања елемента која би се догађала у плочи, те се најчешће фурнирске плоче у гредним елементима примењују као елементи испуне – ножице носача сложеног попречног пресека или бочне стране сандучастих носача. Код гредних композитних носача формираних на неки од наведених начина, ребро гредног носача највише је изложено смичућим напрезањима (смицању управно на равну плочу). Ребро путем смичућих сила своје оптерећење предаје појасним елементима, тј. другим елементима конструкције.

Потенцијал примене плоча на бази фурнира огледала се заправо у формирању егзоскелетних конструкција код којих су сви конструктивни елементи формирану применом овог материјала. Као такве сматрају се конструкције набора, полигоналних љуски и структуре формиране у конструктивном систему реципрочних конструкција. Понашање плоче у оваквим системима може бити на неколико начина. Пре свега, основно понашање елемената је у виду плоче као површинског елемента, потом плоче као гредног елемента и на крају комбиновано понашање или понашање у виду гредног елемента изложеног косом савијању. Уколико посматрамо наборасте конструкције, доминантно напрезање које се јавља у површинским елементима је напрезање под дејством нормалних сила које делују у равни плоче – x и y оси, као и смичућа сила у равни – xy оси. С обзиром да највеће утицаје код елемената набора прихватају грбине и увале, оно се даље разлаже на силе у равни плоче и путем смицања уз ивице преноси на суседне елементе. Највећа смичућа напрезања јављају се код ослонаца, уз ивице плоче, док су најмања у средини плоче. Због своје мале статичке висине плоче на бази фурнира у конструкција набора не могу да прихвате савијање управно на равну плочу, док савијање у равни плоче није доминантно због велике статичке висине плоче у том правцу. На основу наведеног, да би плоча на бази фурнира могла да се примењује у конструкцији набора, потребно је да има изузетну отпорност на притисак и затезање у равни плоче, као и смицање управно на равну и смицање у равни плоче.

Структуре формиране у виду полигоналних љуски, попут набора изложене су првенствено аксијалним силама у равни плоче – силама притиска и затезања, док своје статичке утицаје са елемента на суседни елемент преносе путем смичућих сила у равни плоче. Ипак, тестиране полигоналне љуске нису увек формиране тако да се сви њихови елементи налазе у мебранском стању напона, већ су многи делови љуске изложени и савијању управном на раван плоче. С обзиром да су све примењене плоче веома мале статичке висине и мале отпорности на савијање управно на раван, кроз истраживања се приступило формирању двослојне љуске образовањем елемената сандучастог попречног пресека, како би се повећала статичка висина елемента и омогућило прихватање момената савијања. Будући да су љуске просторне носеће структуре, елементи прихватају и преносе утицаје у свим правцима. Фурнирска плоча представља оптимални материјал за реализацију оваквих конструкција.

Кроз претходну анализу примене реципрочних конструкција приказано је да елементи у структурама могу имати различит положај, те да се тако могу понашати као линијски елементи, површински елементи или комбиновано – елементи изложени косом савијању. У зависности од њиховог положаја изложени су различитим напрезањима и напонским стањима. Реципрочне конструкције код којих су плоче на бази фурнира у улози линијских елемената могу бити изложене савијању у равни плоче и смицању, када су везе формиране засецањем елемената и сви елементи постављени у истој равни. Уколико су везе формиране засецањем, а елементи постављени у нагибу, тада су елементи изложени косом савијању, смицању као последици савијања и аксијалним силама које могу бити притискајуће или затезуће, у зависности од положаја елемента у структури. У случају када је структура формирана у виду групе површинских елемената код којих ивице површина образују линерану реципрочну групу, поред претходно наведених случајева оптерећења, јављају се и плоче постављене у хоризонталној диспозицији, код којих се као доминантно оптерећење јављају савијања управна на раван плоче, а последично и смицање у равни плоче.

Да би се проширили потенцијали примене плоча на бази фурнира у архитектури, првенствено за формирање егзоскелетних структура, пре свега морају се препознати ограничења која имају материјали примењени на до сада реализованим објектима. Као највеће ограничење које се може уочити је немогућност плоча да прихвати моменте савијања који настају оптерећењем плоче управно на раван, при чему се морају формирати елементи потконструкције код структура које су оптерећење моментима, како би их они преузели, или се приступа формирању елемената сандучастог пресека, веће статичке висине. Такође, значајно је да су у свим конструкцијама плоче на бази фурнира изложене смицању у равни плоче и смицању управном на раван плоче, те и да се силе са елемента на елемент у одређеним структурама као што су љуске и набори, преносе управо смицањем у равни плоче по ивицама плоче, што нас наводи на то да овај материјал за своју ширу примену мора имати добру отпорност на смицање у равни и смицање управно на раван. С обзиром да су плоче у многим структурама изложене аксијалним силама притиска или затезања, њихове отпорности на притисак и затезање морају бити изузетно добре, а посебно у оба правца, како би се проширила могућност примене плоча у структурама са просторним носећим дејством. Још један од ограничења, која се јавља између осталог као последица конструктивних карактеристика примењеног материјала, су мали распони до сада реализованих објеката. Нешто већи распони постигнути су формирањем двослојних набора или љуски, применом елемената сандучастог попречног пресека са потконструкцијом или применом једнослојних плоча са потконструкцијом.

У циљу проширења потенцијала примене плоча на бази фурнира у свету се приступило истраживању унапређења њихових конструктивних карактеристика. Један од видова унапређења је формирање композитног материјала применом плоча на бази фурнира и полимера армираног влакнима, при чему долази посебно до унапређења механичких својстава плоча на бази фурнира. Полимери армирани влакнима својим изузетним механичким

карактеристикама, а посебно добрим модулима еластичности материјала могу допринети унапређењу конструктивних карактеристика плоча на бази фурнира, при чему ће се формирати композитни материјал оптималних механичких својстава. Контролом механичких својстава фурнира и механичких својстава примењених влакана у композитном материјалу могу се унапред пројектовати плоче одређених механичких својстава које ће задовољити потребе које материјал треба да испуни за реализацију одређене структуре. Посебно значајно је то што се на овај начин може формирати композитни материјал на бази фурнира, унапређених конструктивних карактеристика у односу на постојеће материјале, при чему материјал и даље остаје изузетно мале сопствене тежине. На овај начин унапређује се однос између механичких карактеристика материјала и његове сопствене тежине, што представља један од највећих потенцијала плоча на бази дрвета.

Друга предност је примена фурнира дрвета слабијих механичких карактеристика, односно примене технички слабијег дрвета, а посебно локалних врста попут тополе, које се иначе не примењује као конструктивна дрвна грађа. Комбинацијом наведених фурнира са полимерима армираним влакнима може да се добије производ уједначеног квалитета и бољих физичких и механичких карактеристика од првобитног дрвета од кога је фурнир настао, чиме долази до боље искоришћености дрвних сировина. Ово може бити од посебне користи за дрвну индустрију и процес производње производа на бази дрвета јер утиче на у економску исплативости и рационалније коришћење дрвних резерви, што представља економски и еколошки допринос.

4. Плоче на бази фурнира унапређених конструктивних карактеристика

Композитни производи на бази фурнира и полимера армираним влакнима

4.1 Полимери ојачани влакнима, дефиниција и појам

Композити представљају материјале који комбинују два или више материјала, а чија је предност то што се на тај начин може формирати материјал одређених физичких и механичких карактеристика. Полимери ојачани влакнима (FRP) представљају композитни материјал сачињен од полимерне основе – матрице која доприноси дуктилности, жилавости, преноси оптерећење на влакна и држи влакна у одређеном положају, и влакана која носе оптерећење поверено том композитном материјалу. Полимери ојачани влакнима су лагани и некорозивни материјали, високе чврстоће и специфичне крутости, а у зависности од потреба које треба да задовоље и обезбеде одређену носивост и крутост, могу бити сачињени од различитих типова полимера и влакана.

4.1.1 Саставни делови FRP композита

4.1.1.1 Полимерна матрица

Полимери су хемијска једињења сачињена од низа мономера повезаних у дуге, понављајуће ланце, у којима се атоми држе заједно ковалентним везама. Полимери могу бити органска или неорганска једињења.²⁰⁸ Када је реч о полимерној смоли у индустрији композита, она представља неорганско једињење, део FRP материјала који повезује влакна заједно, одржавајући њихову оријентацију и штитећи их од спољних утицаја. Полимери су вискоеластични материјали, садрже еластичну компоненту која када су изложени напрезањима материјалима дају крутост и вискозну компоненту која је заслужна за њихову еластичност. У односу на влакна која су саставни део FRP композита, полимерне матрице карактеришу мале чврстоће и ниски модули еластичности, док влакна поседују високе чврстоће и велике модуле еластичности, чиме се напрезањем матрице оптерећење распоређује на влакна чинећи тако јединствен композит високе чврстоће и високог модула еластичности.

Полимерне матрице могу бити термопластичне и термореактивне, а њихова основна разлика је начин формирања полимерних ланаца, што утиче на постојаност и промену својстава матрице на високим температурама. Термореактивни полимери формирани су тако да њихови молекулски ланци формирају јаке континуалне тродимензионалне везе, те се они након процеса поликондензације, не могу растворити или отопити. Термопластичне матрице нису умрежене, њихови ланци су повезани slabим водоничним везама, што утиче на то да се очврснути полимер процесом загревања може омекшати и вратити у неки други облик.²⁰⁹ Управо из наведених разлога најчешћи тип матрица у FRP-у у грађевинској индустрији су полимери са термореактивним матрицама (епоксидна, полиестарска и винилестарска матрица) које не омекшавају при повишењу температуре за разлику од термопластичних матрица.²¹⁰

²⁰⁸ Bank, Lawrence C., *Composites for construction : structural design with FRP materials* (New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006), 45.

²⁰⁹ Исто, 46.

²¹⁰ Тања Каламан, Дубравка Бјеговић и Владимир Сигмунд, "Трајност полимера армираних влакнима у бетонским конструкцијама", *Грађевинар* 62 (2010) (7): 614.

Термореактивни полимери се користе на температурама до 180°C и нису отпорни на пожар, осим уколико се не заштите на неки од начина попут заштите челика. Термопластични полимери могу бити изложени температурама до 450°C. Механичке карактеристике термореактивних матрица приказане су у табели 13.

Табела 13. Механичке карактеристике матрице на бази термореактивних полимера²¹¹

Материјал	Запреминска маса (g/cm ³)	Модул еластичности (GPa)	Чврстоћа на затезање (MPa)	Чврстоћа на притисак (MPa)	Издужење при лому (%)
Епоксид	1.1-1.4	2.0-6.0	35-130	100-200	1.0-1.85
Полиестар	1.1-1.5	1.2-4.5	40-90	90-250	2.0-5.0
Винилестар	1.15	3.0-4.0	65-90	127	1.0-5.0

Епоксид

Епоксиди – епокси матрице су најзаступљеније матрице за FRP производе који имају структурну примену. Епокси матрице се користе за накнадна ојачања конструкције тракама ламинама или тканинама на бази влакана, управо због својих добрих физичких и механичких особина и лаког апликовања на конструктивне елементе. Епоксиде карактеришу високе механичке особине, добра отпорност на влагу, корозију и одлична адхезивна својства. Апликација епоксида може се вршити на собним температурама, али и на температурама до 180°C, у зависности од типа епоксида. Епоксидне смоле подлежу знатно мањем скупљању у односу на полиестре или винилестре, али су због тога поприлично крти након очвршћавања²¹². Тржишна цена епоксидне матрице је и до четири пута већа у односу на матрице на бази полиестара.

Полиестар

Полимери – полимерне матрице на бази полиестера примену имају за производњу пултродованих FRP профила, као и за производњу FRP арматуре у неким случајевима. Полиестри имају изузетну отпорност на корозију и на велики број хемијских агенаса. Њихова предност је ниска цена у односу на друге матрице, као и добар баланс између механичких и физичких особина. У зависности од катализатора који се примењује њихово очвршћавање може бити како на повишеним, тако и на собним температурама. Полиестарски полимери се могу примењивати и за ојачање конструктивних елемената приликом санације, али су они мање вискозни од епоксидних смола и имају велика скупљања при очвршћавању.

Винилестар

Винилестарске смоле представљају хибридне смоле настале комбинацијом епоксида и полиестара. Ове смоле теже ка механичким и физичким особинама епоксидних смола, али имају и добра својства полиестарских смола, а посебно у домену производње и обраде.²¹³ Због својих карактеристика винилестри постају све доминантнији на тржишту, а најчешће се користе за производњу пултродованих FRP профила или арматуре. Осим тога, могу се користити и за апликацију FRP-а приликом санације конструктивних елемената. Винилестери имају добар однос механичких карактеристика и цене.

²¹¹ Ivan M. Glišović, „Теоријска и експериментална анализа носача од лепљеног ламелiranог дрвета ојачаних карбонским тракама“, докторска дисертација (Београд: Универзитет у Београду Грађевински факултет, 2013.), 29.

²¹² Bank, Lawrence C., *Composites for construction : structural design with FRP materials* (New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006), 48.

²¹³ Исто, 49.

Фенолне смоле су најзаступљеније термореактивне смоле, али су тек недавно почеле да се примењују за конструктивне елементе, односно у FRP производима. Њихов недостатак је процес апликације и очвршћавање поступком поликондензације. Феноли се примењују као адхезиви у дрвеним конструкцијама, најчешће за производњу фурнирских плоча. Одликује их изузетна ватроотпорност. Њихова примена у FRP производима је најчешће за ојачање дрвених конструкција.

Полиуретан

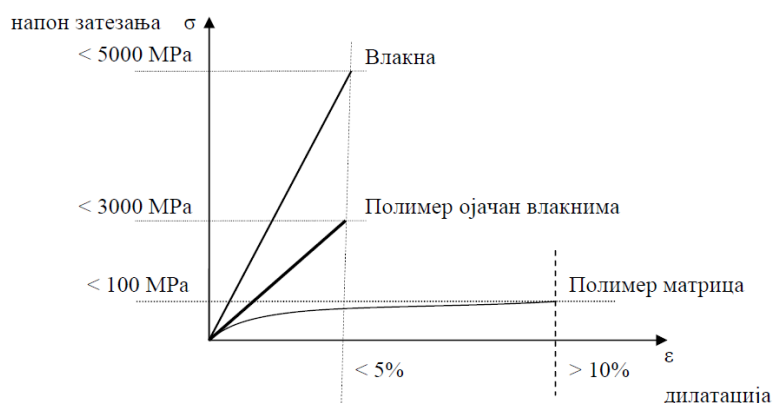
Полиуретанске смоле се такође могу применити као матрице у FRP композитима, а одликује их велика жилавост и доста нижа цена у односу на епокси смоле. Полиуретанске смоле у комбинацији са стакленим влакнима формирају композитне производе са великом одпорношћу на попречно затезање и високу ударну чврстоћу.

4.1.1.2 Влакна

Карактеристике композитног материјала зависе од особина полимера и особина влакана која улазе у састав материјала. Влакна која учествују у грађењу полимера армираног влакнима (FRP) према пореклу могу бити:

- природна: дрво, лан, конопља и др.
- вештачка: стаклена, карбонска, арамидна, базалтна, борна и др.

У грађевинској индустрији за структурну примену користе се вештачка влакна и то најчешће стаклена, карбонска и арамидна влакна. Влакна могу бити кратка (10-50 mm) и дуга, континуална влакна. Примена кратких влакана је најчешће за ојачање цементних материјала и производњу композита на бази цемента, као и за производњу чамаца на бази стакло-пластичних композита. У конструкционе сврхе за формирање FRP композитних производа користе се дуга, континуална влакна. У зависности од типа, влакна имају различите механичке карактеристике које су приказане у поређењу са челиком у Табели 14. Влакна имају велики капацитет носивости, а одликује их линеарно понашање до лома. Механичке карактеристике влакана су знатно боље од механичких карактеристика полимерне матрице, али се она не могу применити одвојено од матрице. На слици 42. приказан је дијаграм напон-дилатација за влакна, полимерну матрицу и композитни производ полимер ојачан влакнима. Добијени дијаграм композитног производа представља средњу вредност дијаграма полимерне матрице и влакана.



Слика 42. Дијаграм напон-дилатација за чиниоце композитног производа²¹⁴

Постоје различити облици FRP-а на тржишту. Према облику у коме се могу наћи делимо их на:

- FRP арматуре,
- монолитни FRP профили,
- траке ламине,
- тканине.

FRP траке ламине састоје се од великог броја финих танких влакана, малих пречника, повезаних епоксидном матрицом, где се као пунилац примењује ситно млевено камено брашно, које не утиче на механичка својства композита. Влакна у тракама су оријентисана у једном правцу – монооксијално. Траке тканине су платна која су нешто тања од FRP трака, а влакна могу бити оријентисана у једном правцу (монооксијално) или вишесмерно, биоксијално или дијагонално оријентисана у више праваца. Траке-ламине прихватају оптерећења у подужном правцу, тј. у правцу свог пружања, те на тај начин имају оптималну чврстоћу и крутост која зависи од уграђене количине влакана, док траке-тканине прихватају оптерећење у више праваца, у зависности од правца пружања влакана.

Табела 14. Механичке карактеристике влакана у поређењу са челиком²¹⁵

Материјал	Запреминска маса (g/cm ³)	Модул еластичности (GPa)	Чврстоћа на затезање (MPa)	Издужење при лому (%)
Е-стаклена влакна	2.5-2.6	70-80	2000-3500	3.5-4.5
НМ карбонска влакна (висок модул еластичности)	1.85-1.9	390-760	2400-3400	0.5-0.8
НС карбонска влакна (висока чврстоћа)	1.75	240-280	4100-5100	1.6-1.73
Арамидна влакна	1.44-1.47	62-180	3600-3800	1.4-5.2
Челик	7.8	200-210	360-600	20-30

Стаклена влакна

FRP производи настали на бази стаклених влакана означавају се као GFRP (енгл. *Glass Fiber Reinforced Polymers*). Стаклена влакна су најчешће примењена влакна за формиране производа на бази FRP-а у грађевинској индустрији због доброг односа цене и механичких карактеристика које поседују. Користе се за производњу арматурних шипки и монолитних профила на бази FRP-а, али и за производњу трака ламина и тканина. Производе се топљењем сировина песка, каолина, кречњака и колеманита до течног стања, а потом њеним изливањем кроз танак млаз и хлађењем. Влакна добијена на овај начин интегришу се у снопове.²¹⁶ У зависности од пропорције сваке од основних компоненти постоји неколико врста стаклених влакана (Е, А, С и S – стаклена влакна)²¹⁷. Пречник једног стакленог влакна, односно филамента креће се од 3 до 24 μm . За производњу полимера на бази влакана најчешће се

²¹⁴ преузето из Миодраг Грбић, „Формирање конструктивних елемената архитектонских објеката употребом полимера ојачаних рециклираним влакнима“, *Докторска дисертација*. (Београд: Универзитет у Београду, Архитектонски факултет, 2016), 16.

²¹⁵ Ivan M. Glišović, „Теоријска и експериментална анализа носача од лепљеног ламелiranог дрвета ојачаних карбонским тракама“, докторска дисертација (Београд: Универзитет у Београду Грађевински факултет, 2013.), 26.

²¹⁶ Ivan M. Glišović, „Теоријска и експериментална анализа носача од лепљеног ламелiranог дрвета ојачаних карбонским тракама“, докторска дисертација (Београд: Универзитет у Београду Грађевински факултет, 2013), 26.

²¹⁷ Bank, Lawrence C., *Composites for construction: structural design with FRP materials* (New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006), 42.

користе Е-стаклена влакна, због своје високо-електричне отпорности, и то у дебљинама од 17 μm .

Карактеристике стаклених влакана су њихова велика чврстоћа, мала специфична маса као и ниска топлотна проводљивост. Недостаци стакла су мањи модули еластичности у односу на друга влакна, мала отпорност на влагу, посебно у присуству соли и повишене алкалности. Она морају бити доста добро заштићена у матрици како би се очувао композитни производ. Стаклена влакна су такође подложна течењу, а посебно пуцању и губе снагу под дејством сталних напрезања.

Карбонска влакна

Полимери армирани карбонским влакнима у грађевинској индустрији примењују се најчешће у виду трака ламина или тканина за санацију конструктивних елемената и побољшање њихових механичких особина. Карбонска влакна производе се на високим температурама процесима оксидације, карбонизације и графитизације сирових материјала који могу бити од: природног целулозног вискозног текстилног влакна, синтетичког полиакрилонитрилног (PAN) текстилног влакна или смоле (катран угља).²¹⁸ У зависности од механичких особина које су потребне композитном производу, влакна се производе у неколико класа према модулима еластичности: стандардни модул (SM), средњи модул (IM), високи (HS), и ултра високи (UHM) модул еластичности. Пречник једног карбонског влакна, тј. филамента креће се од 5 до 10 μm .

Карбонска влакна због своје дводимензионалне атомске структуре показују анизотропно понашање, са веома добрим механичким карактеристикама у правцу влакана и знатно нижим управно на правац влакана. Карактеристике карбонских влакана су изузетно високи модули еластичности у правцу влакана, висока крутост, високе вредности затезне чврстоће, као и добар однос између чврстоће и тежине влакана. Поред тога ова влакна имају велику хемијску отпорност, толеранцију на високе температуре и отпорност на утицаје спољне средине. Недостатак карбонских влакана је њихова велика густина и мала дуктилност, односно крти лом влакна. Због негативног коефицијента топлотног ширења карбонска влакна су димензионално стабилна. Карбонска влакна су термички и електро проводници. Највећи недостатак је њихова велика цена. FRP производи настали на бази карбонских влакана означавају се као CFRP (енгл. *Carbon Fiber Reinforced Polymers*).

Арамидна влакна

Арамидна влакна у односу на стаклена и карбонска су мање заступљена у грађевинској индустрији. Њихова примена је најчешће у виду трака ламина или тканина за ојачање стубова и других конструктивних елемената. Такође, могу имати улогу потке у тканинама на бази других влакана, чиме додатно доприносе механичким карактеристикама композитног производа. Арамидна влакна представљају синтетичка влакна добијена од ароматичних полиамидних молекулских ланаца. Производе се на високим температурама при великим брзинама екструзије полимера. Пречник једног карбонског влакна, тј. филамента креће се од 12 до 15 μm . Најпознатији представник арамидних влакана је кевлар.

Модул еластичности и чврстоћа на затезање ових влакана је између карбонских и стаклених влакана. Ова влакна поседују изузетно високу издржљивост и жилавост. Арамидна влакна такође имају негативни коефицијент топлотног ширења, те су димензионално стабилна. Мане арамидних влакана су мала чврстоћа на смицање, непостојаност на повишеним

²¹⁸ исто, 43.

температурама, као и осетљивост на влажност и УВ зрачење. FRP производи настали на бази араמידних влакана означавају се као AFRP (енгл. *Aramid Fiber Reinforced Polymers*).

4.2 Композитни производи на бази фурнира и полимера армираним влакнима - приказ претходних истраживања

Дрвене конструкције се у пракси често комбинују са другим материјалима како би се побољшале њихове механичке карактеристике и повећала носивост конструктивних елемената. Најчешће, ово је последица санације дрвених конструктивних елемената, где се применом другог материјала формира конструкција са спрегнутим носећим дејством. У ранијој пракси ојачања дрвених конструкција већински су се базирала на примени металних ојачања, док су у последњој деценији знатно заступљенија ојачања полимерима армираним влакнима. Пионирима идеје ојачања дрвене грађе композитним полимерним материјалима сматрају се Вандард (Wangaard) (1964) и Библис (Biblis) (1965), који су прва ојачања дрвета полимерним материјалима испитивали употребом полимера армираног стакленим влакнима. У испитивањима су ојачавали дрвену грађу различите врсте дрвета једносмерно постављеним стакленим влакнима по спољној страници грађе, а импрегнација је вршена епокси смолом. Осим епокси смоле Тиксон (Theakston) (1965) је испитивао и адхезиве на воденој бази и одбацио их због њихових лоших перформанси.²¹⁹ У међувремену објављене су многе студије на ову тему, а данас се за санацију дрвених конструкција најчешће примењује FRP у виду трака ламина, а аплицирају се применом епокси смоле као адхезива.

Композитни производи на бази дрвета, а међу којима и производи на бази фурнира нису били тема санације, односно накнадног ојачања конструктивних елемената у току експлоатације објекта. Ипак, тема унапређења конструктивних карактеристика ових производа у току производње, а посебно фурнирских плоча применом полимера армираног влакнима, први пут се појављује током '70-их година XX века, када АРА (American Plywood Association), спроводи прва испитивања ојачања фурнирске плоче полимерима армираним стакленим влакнима²²⁰. При испитивању су тестирана једносмерно оријентисана влакна, тканине формиране плетењем влакана у два правца и влакна оријентисана без реда у комбинацији са винилестарском и полиестарском смолом. Испитивања савојне чврстоће, крутости и ударне чврстоће показала су да се фурнирске плоче ојачане на неки од поменутих начина могу користити у транспортној индустрији. Интензивнија истраживања у овој области поново се јављају почетком 2000-их година, када Библис (Biblis) и Карино (Carino) испитују савојна својства трослојне и петослојне фурнирске плоче ојачане тканином од стаклених влакана, применом фенола као адхезива.²²¹

На почетку примене ојачања конструктивних елемената на бази дрвета полимерима армираним влакнима у употреби су првенствено били полимери на бази стаклених влакана (E-glass). Развојем технологија долази и до испитивања других материјала који могу бити употребљени у овом композиту, као што су графит и кевлар, а потом и араמידна и карбонска влакна. Дуго су стаклена влакна била најзаступљенија влакна у FRP композиту, првенствено када се користе за ојачање постојећих конструктивних елемената, а то је управо из разлога што су она од свих претходно поменутих била економски најприступачнија.

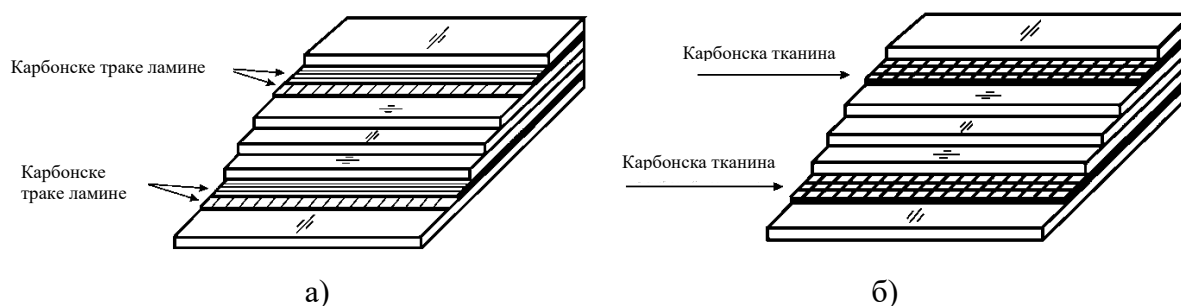
Све већа тржишна доступност композитних материјала и њихова нижа цена подстакли су испитивање ојачања плоча на бази фурнира и формирање новог производа побољшаних

²¹⁹ William M. Bulleit, „Reinforcement of wood materials: A review“, *Wood and Fiber Science*, 3 (1984.): 393.

²²⁰ Исто, 394.

²²¹ Evangelios J. Biblis, и Honorio F. Carino, „Flexural properties of Southern Pine plywood overlaid with fiberglass-reinforced plastic“, *Forest Product Journal* 50 (4), (2000): 34-36.

конструктивних карактеристика. Механичка својства ојачаних плоча зависе од више чинилаца, а четири основне су фурнир, адхезив, синтетичка влакна и услови производње композитног производа. Синтетичка влакна утичу на конструктивне карактеристике производа на следеће начине: тип примењених влакана, количина и положај влакана у плочи, правац оријентације влакана и положај влакана у сљубницама плоче. Ојачање композитима на бази FRP-а може се вршити влакнима оријентисаним у једном правцу – тракама ламинама (сл.43а), тканинама (мрежама) са влакнима постављеним у један, два или више правца (сл.43б), или слободно оријентисаним влакнима. Постављање ојачања може се вршити по спољним слојевима плоче, у унутрашњим сљубницама између фурнира или њиховом комбинацијом, у зависности од потреба механичких карактеристика крајњег композитног производа.



Слика 43. Конструкција композитне фурнирске плоче:

а) ојачане тракама ламинама постављеним у два слоја, б) ојачане тканинама у два правца²²²

Сва досадашња испитивања ојачања плоча на бази фурнира се могу поделити у две групе - прва група су она која се базирају на истраживању адхезива који се могу користити како у ламелираној дрвеној грађи, тако и у ламелираној конструктивној грађи ојачаној материјалима на бази полимера армираног влакнима, а друга група су испитивања начина ојачања плоча на бази фурнира и механичких својстава ојачаних композитних елемената. Испитивање начина ојачања плоча на бази дрвета применом FRP-а усмерено је на ојачања фурнирских плоча и/или LVL плоча применом стаклених влакана и применом карбонских влакана. Примена осталих врста синтетичких влакана није заступљена у толикој мери, те неће бити предмет анализе у оквиру овог рада. Важно је истаћи да се у досадашњим испитивањима анализирају начини формирања композитног производа и неке његове механичке карактеристике, али да се не истражује даља примену тог композита као конструктивног елемента. Осим тога, такав производ није могуће пронаћи на тржишту као готов производ који би могао наћи примену у грађевинској индустрији.

У наставку рада биће приказана досадашња истраживања која су значајна за успостављање оквира даљег рада на формирању композитног производа на бази фурнира и FRP-а и испитивању његових механичких својстава, која су од посебног значаја за анализу материјала као примарног конструктивног елемента у архитектури егзоскелета. Преглед досадашњих истраживања биће подељен у две целине, на основу FRP материјала који се примењивао у испитивању.

²²² Илустрације преузете из:

- а) Brezović, Mladen, Vladimir Jambrečević, и Stjepan Pervan. "Bending properties of carbon fiber reinforced plywood." *Wood Research* 48(4),(2003):19,
 б) Brezović, Mladen, Jaroslav Kljak, Stjepan Pervan, и Alan Antonović. „Utjecaj kuta orijentacije sintetičkih vlakana na savojna svojstva kompozitne furnirske ploče.“ *Drvna industrija* 61(4),(2010): 240.

4.2.1 Плоче на бази фурнира + CFRP

4.2.1.1 Испитивање утицаја количине влакана

Испитивање утицаја количине карбонских влакана при ојачању фурнирске плоче FRP производима на бази карбонских влакана (CFRP-ом), што на њене механичке особине, а пре свега на савојна својства плоче, у свом истраживању приказали су Брезовић и др.²²³ Испитивањем су анализирана савојна својства управно на раван плоче и смичућа својства петослојне плоче ојачане полимером армираним карбонским влакнима. Тестиране су три врсте плоча – прве су ојачане количином од 3000 влакана у снопу (CFRP-3К), други узорак количином од 12000 влакана у снопу (CFRP-12К), док је трећи узорак контролна, неојачана плоча. Једносмерно плетена влакна су постављена у првој и четвртој слојници плоче у два слоја, управно један на други (сл. 42.а), непоштујући правило симетричности плоче када је реч о оријентацији FRP-а.

Ојачане фурнирске плоче показале су повећање чврстоће на савијање 30 - 40% у односу на контролну плочу, ипак разлика између чврстоће на савијање узорка CFRP-3К и CFRP-12К је врло мала (6%) спрам степена повећања количине влакана. Односно, може се закључити да побољшање савојне чврстоће није пропорционално повећању количине влакана у матрици. Осим што је узорак CFRP-12К имао већу чврстоћу на савијање, његов модул еластичности је знатно израженији у односу на друга два узорка. Модули еластичности на ојачаним плочама увећани су од 80 - 140% у односу на контролну плочу, а знатно увећање у узорку CFRP-12К последица је већег броја влакана и њиховим бољим еластичним особинама од еластичних особина дрвета. Приликом оптерећења на смицање, лом се јавио у слоју фурнира, најмање смичуће напоне издржао је узорак CFRP-12К, док су контролна плоча и узорак CFRP-3К поднели за око 5% већи напон на смицање.

У додатним испитивањима посматрана је дистрибуција напона и дилатација кроз сваки слој фурнира изложеног на савијање и доказано да код неојачане плоче највеће напрезање преузимају спољни листови фурнира, а да су деформације линеарно расподељене кроз слојеве. Код ојачаних плоча напони су најизраженији у првом и последњем слоју полимера, а у слоју фурнира су знатно смањени. Деформације кроз фурнир су линеарно расподељене, а деформације кроз FRP су мање у односу на деформације кроз фурнир. Све ово је такође последица бољих еластичних својстава полимерног композита. Такође, осим овог може се закључити да већа количина влакана у матрици утиче на смањење напона и деформација у ново-формираном композиту што позитивно утиче на савојна својства плоче под оптерећењем.

Како се као последица превеликог напрезања јавља деламинација у доњој зони плоче између фурнира и карбонских влакана, односно у четвртој слојници, додатно је испитано да ли је она последица прекорачених напона савијања или напона смицања. Резултати испитивања показали су да је на контролној плочи напон на смицање у месту деламинације мањи него што је дозвољен смичући напон у плочи испитан експериментом. Ипак, резултати у ојачаним плочама показују да је на том месту дошло до знатног прекорачења дозвољених смичућих напона доказаних експериментом, те да се појава деламинације фурнирске плоче услед оптерећења савијањем, јавља управо под дејством напона смицања.

²²³ Mladen Brezović, Vladimir Jambrekić, Pervan Stjepan, „Bending properties of carbon fiber reinforced plywood“, *Wood Research* 48(4) (2003): 13-24.

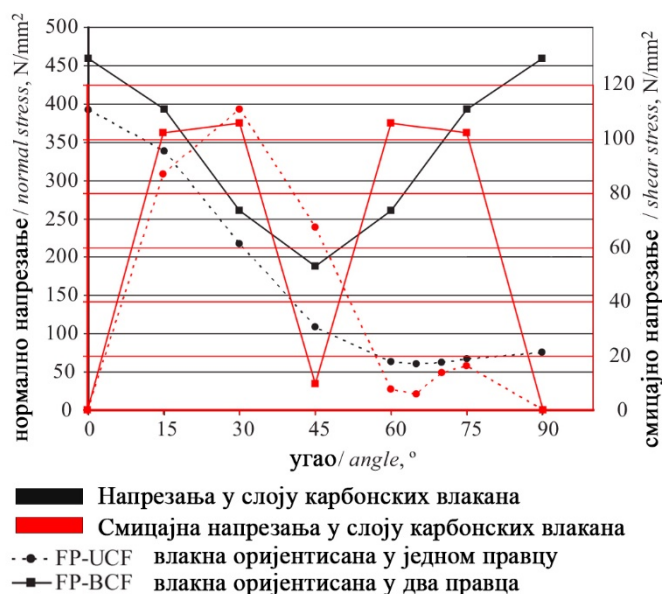
4.2.1.2 Испитивање утицаја количине и угла оријентације влакана

Утицај угла оријентације карбонских влакана и количину влакана на савојна својства фурнирске плоче анализирали су Брезовић и др.²²⁴ Узорци за експеримент формиран су од петослојне тополове фурнирске плоче, ојачане карбонским влакнима постављеним у другу и трећу слубницу. Формирана су три типа узорака: тип1 – узорак ојачан тканинама - двосмерно плетеним карбонским влакнима с 12000 влакана у снопу (FP-BCF23), тип2 – узорак ојачан једносмерно оријентисаним влакнима с 3000 влакана у снопу и с испуном од стаклених влакана (FP-UCF23). Како би се одредио угао при коме влакна најпогодније делују на својства фурнира, влакна су ротирана за по 15°. Испитивањима на плочама ојачаним влакнима оријентисаним у два правца утврђено је да су приликом савијања управно на раван плоче највећа нормална напрезања у карбонским влакнима при углу од 0° и 90°. То је и најповољније за фурнир, јер су тада напрезања у фурниру најмања. Најнеповољније за целокупни склоп је када фурнир преузима највећа напрезања, а то се дешава када су карбонска влакна постављена под углом од 45° у односу на фурнир. При ојачању фурнира једносмерно плетеним влакнима, највећа напрезања у влакнима, односно најбоља савојна својства плоче уочена су када су влакна оријентисана паралелно са влакнима спољних листова фурнира, а најмања напрезања у влакнима, што је најнеповољнији случај за плочу, дешавају се када су влакна постављена под 65° у односу на влакна спољних листова фурнира. Додатном побољшању савојне чврстоће допринела су стаклена влакна која представљају испуну.

Приликом испитивања смичућих својстава плоче, закључено је да је најпогоднији угао влакана за оба случаја 30° у односу на влакна спољних листова фурнира. Када говоримо само о једносмерно оријентисаним карбонским влакнима најнеповољнији угао за смицање је оријентација влакана под 90° у односу на фурнир, јер при том углу карбон не прима оптерећење него све преузима испуна од стаклених влакана, а највећа су напрезања у самом фурниру. На дијаграму угиба примећујемо да се највећи угиб плоче ојачане влакнима плетеним у два смера јавља се при углу од 45° и износи 6.6 mm, док се највећи угиб код једносмерно плетених влакана јавља од 60-90° и износи 7.2 mm. Свакако је уочљиво да је при свим угловима оријентације угиб плоче код двосмерно плетених влакана (6.0-6.6 mm) мањи од угиба код једносмерно плетених влакана (6.8-7.2 mm), што је последица броја влакана у снопу. Може се закључити да већа количина влакана у плочи смањује њене деформације и напрезања.

Како би се постигао најоптималнији утицај побољшања механичких својстава морамо наћи баланс при коме ће ојачање позитивно деловати и на савојна и на смичућа својства плоче. Преклапањем претходно изнетих резултата истраживања (сл.44) можемо претпоставити да се ово постиже и код плоча ојачаних двосмерно и једносмерно плетеним влакнима, постављањем ојачања под углом од 15° у односу на дрвна влакана у спољним листовима фурнира. При том углу напрезања у фурниру су најмања, а највећа напрезања преузима FRP. Најнеповољнији положај оријентације код једносмерно плетених влакана је при углу од 60°, односно 45° код двосмерно плетених влакана.

²²⁴ Mladen Brezović, Jaroslav Kljak, Stjepan Pervan, и Alan Antonović, „Утицај кута оријентације синтетичких влакана на савојна својства композиционе фурнирске плоче“, *Дрвна индустрија* 61(4),(2010): 239-243.



Слика 44. Упоредни приказ дијаграма нормалних и смичућих напрезања у слоју карбонских влакана

4.2.1.3 Испитивање утицаја угла оријентације и дужине влакана

Осим Брезовића и др., утицај дужине влакана и угла оријентације влакана на еластична својства композитне плоче испитивали су Ху и др. (Ху и др.).²²⁵ Анализирана су кратка (3 mm), средња (6 mm) и дуга (14 mm) карбонска влакна у епокси матрици, оријентисана паралелно, управно или слободно у односу на правац влакана спољашњих фурнира. Истраживање утицаја дужине влакана спроведено је на трослојним фурнирским плочама са влакнима постављеним у једном правцу, у обе сљубнице. Резултати истраживања утицаја дужине влакана показују да најбољи модул еластичности има плоча ојачана влакнима дужине 6 mm, док најслабије (8% мање) резултате показује плоча ојачана дугим влакнима (14 mm). Разлог је у лакшем раслојавању влакна од ламинарног дела, односно епокси смоле. Анализом утицаја угла оријентације влакна на модул еластичности уочено је да се највеће побољшање код једносмерно оријентисаних влакана, која су у правцу спољашњих листова фурнира.

У овом истраживању извршено је поређење савојне чврстоће при савијању управно на раван плоче, модула еластичности и модула смицања код трослојних и петослојних плоча ојачаних слободно оријентисаним влакнима средње дужине. Резултати показују да су модули еластичности петослојних плоча мањи од модула еластичности трослојних плоча, самим тим чврстоћа на савијање је већа код трослојних ојачаних плоча. Овим истраживањем је такође истакнуто да слободно оријентисана влакна позитивно утичу на повећање модула смицања, који је већи код петослојних ојачаних плоча.

4.2.1.4 Испитивање утицаја ојачања карбонским тканинама са влакнима оријентисаним у два правца и њиховог положаја у конструкцији плоче

Утицај тканина са влакнима оријентисаним у два правца на механичка својства фурнирске плоче испитивали су Брезовић и др.²²⁶ чиме су покушали да утврде како распоред влакана у слојевима делује на побољшање механичких својстава плоче. За лабораторијско испитивање коришћена су три типа узорака – први тип представљала је петослојна контролна

²²⁵ Heng Xu, Tetsuya Nakao, Chiaki Tanaka, Masahiro Yoshinobu, Hiroyuki Katayama, „Effects of fiber length and orientation on elasticity of fiber-reinforced plywood“, *J. Wood Sci.* 44 (1998): 343-347.

²²⁶ Mladen Brezović, Vladimir Jambreković, Jaroslav Kljak, „Utjecaj karbonskih vlakana na neka relativna svojstva furnirskih ploča“, *Drvna industrija* 53 (1), (2002): 23-31.

плоча без синтетичких влакана. Други и трећи тип петослојне плоче ојачан је двосмерно плетеним карбонским влакнима под углом од 90°, који су постављени у прву и четврту сљубницу код плоче типа 1 (CFRP14) и у другу и трећу сљубницу, односно ближе неутралној оси плоче код плоче типа 2 (CFRP23).

Резултати испитивања показују да се ојачањем плоче карбонским влакнима у два слоја знатно повећала чврстоћа на савијање управно на раван плоче, чврстоћа на затезање као и модул еластичности плоче. Постављањем влакана у два слоја постигла се уједначенија чврстоћа на савијање у правцу паралелном влакнима и управном на правац влакана спољашњих листова фурнира. Повећање у правцу паралелном влакнима износи око 40%, док је у правцу управном на правац влакана спољашњих листова израженије је и увећано за око 50% од чврстоће контролног узорка. Нешто веће вредности чврстоће на савијање показале су се у случају када је полимерни слој постављен ближе спољним ивицама пресека, односно у 1. и 4. сљубници. Сличне резултате показује и испитивање модула еластичности где је такође израженије његово повећање код узорка CFRP14, које износи око 2.5 пута више у односу на контролни узорак у оба правца, док је у узорку CFRP23 нешто израженије повећање модула еластичности у правцу управном на правац влакана спољашњих листова фурнира. Ови резултати показују да положај синтетичких влакана у конструкцији плоче утиче на њене механичке особине, односно да се већи модули еластичности и чврстоће на савијање постижу када је полимерни слој ближе спољашњости плоче.

Значајно повећање чврстоће на затезање у правцу управном на правац спољашњих листова фурнира постигнуто је у узорку CFRP23 где се бележи 2.8 пута већа вредност од вредности у контролном узорку. Повећање чврстоће на затезање изражено је у свим узорцима, али се за разлику од чврстоће на савијање и модула еластичности, нешто бољи резултати у попречном правцу постижу постављањем влакана ближе неутралној оси. Испитивањем чврстоће на смицање закључено је да се ојачањем фурнирске плоче не утиче на побољшање овог својства, чак је његова вредност у контролном узорку и узорку CFRP23 једнака, док је у узорку где је ојачање постављено даље од неутралне осе она смањена. Такође је закључено да се приликом ових анализа ломови епрувета дешавају у слоју фурнира где долази до пуцања.

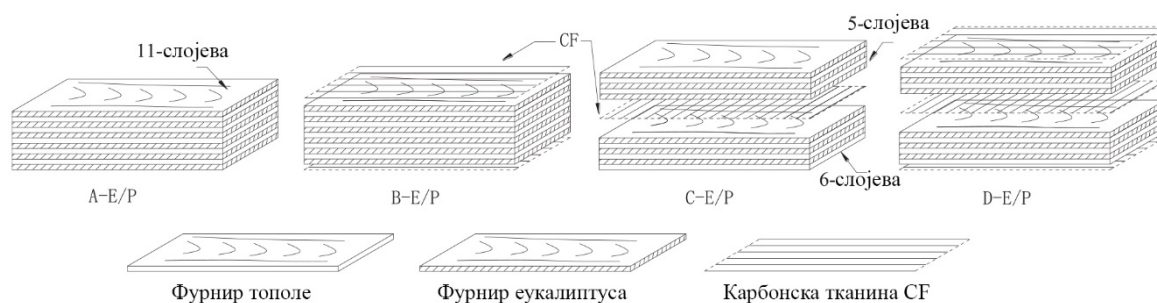
Ипак, додатним разматрањем оптерећења и прерасподеле напона и деформација приликом савијања плоче када оптерећење делује управно на раван плоче, утврђено је да су смичућа напрезања међу слојевима фурнира 2.7 МПа, што је за око 40% више у односу на дозвољене напоне смицања добијене овим испитивањем, те се претпоставља да ће приликом оптерећења конструкције највеће нарушавање њене стабилности бити узроковано прекорачењем смичућих напона међу слојевима. Самим тим доћи се до повећања напрезања у слоју фурнира што ће за последицу имати пуцање фурнира и нестабилност читаве конструкције.

4.2.1.5 Испитивање утицаја ојачања карбонским тканинама са влакнима оријентисаним у једном правцу и њиховог положаја у конструкцији плоче

Лиу и група аутора²²⁷ (Лиу и др.) су истраживали савојна својства фурнирских плоча тополе и еукалиптуса ојачаних карбонским тканинама. Експериментално испитивање вршено је на једнаестослојним фурнирским плочама формираних од фурнира тополе (Р/Р), фурнира еукалиптуса (Е/Е) или њиховом међусобном комбинацијом (Е/Р и Р/Е). Све плоче ојачане су тканином са једносмерно оријентисаним карбонским влакнима. Комбинацијом ојачања формирана су три типа плоча (сл.45): плоче ојачане по спољашњим лицима фурнира где су карбонска влакна постављена у правцу влакана спољашњих листова фурнира (В-тип), плоче

²²⁷ Yuansong Liu, Mingjie Guan, Xianwen Chen, Yuan Zhang, и Mingming Yhou, „Flexural properties evaluation of carbon-fiber fabric reinforced poplar/eucalyptus composite plywood formwork“, *Composite structures* 224(2019): 111073.

ојачане у средишњем слоју - где је оријентација влакана управно на правац спољашњих листова фурнира (С-тип) и комбинација претходна два наведена типа – ојачање постављено по спољашњим странама плоче као и у средини плоче (D-тип). Као адхезив између листова фурнира примењен је фенол-формалдехид (PF), док је за импрегнацију CFRP-а за фурнир употребљен епокси. Топлим пресовањем на температури од 140°C, притиску од 1.2 МПа и времену од 1.9 min/mm, формиран су узорци за испитивање модула еластичности и модула лома, димензија епрувете 410x50 mm и узорци димензија 300x20 mm за испитивање жилавости материјала.



Слика 45. Типови плоча ојачаних тканинама у једном правцу²²⁸

Код свих ојачаних узорка у односу на контролне, неојачане узорке утврђено је да постављање ојачања по спољашњем лицу фурнирске плоче утиче на повећање жилавости композитне плоче у лонгитудиналном правцу (P/P 54.3%), док трансверзални правац са таквим ојачањем остаје непромењен. Код плоча ојачаних само у средишњем слоју долази до мањег побољшања жилавости у лонгитудиналном правцу (P/P 31%) и значајног побољшања у трансверзалном правцу плоче (P/P 109.6%). До највећег повећања жилавости композитне плоче долази постављањем узорка према D-типу, по спољашњим листовима и у средини плоче. На тај начин жилавост у лонгитудиналном правцу увећана је 102%, док је у трансверзалном правцу увећана 176%. Знатно повећање жилавости материјала приликом постављања карбонске тканине у средњем слоју резултат је тога што се једновремено оптерећење које је нането на спољашње листове распршује кроз све слојеве композитне плоче путем смичућих сила које бивају заустављене у средишњем карбонском слоју, где се распршују у карбонску тканину која их прихвата, а која је много веће жилавости и еластичности у односу на фурнир.

Испитивање модула еластичности узорка оптерећених на савијање показало је да већи утицај на повећање модула еластичности имају слојеви постављени по спољашњим странама плоче, односно даље од неутралне осе, на местима где су напони савијања највећи. Највећи модул еластичности паралелно влакнима (E_{\parallel}) код плоча B-типа уочен је код плоче формиране од еукалиптуса и тополе и износи $E_{\parallel(E/P)} = 14710 \text{ MPa}$, али је највеће побољшање модула еластичности (за 150%) у односу на контролни узорак постигнуто код плоча формираних од фурнира тополе ($E_{\parallel(P/P)} = 11890 \text{ MPa}$). Повећање модула еластичности управно на правац влакана спољашњих фурнира (E_{\perp}) и влакана је у овом случају занемарљив. Постављањем ојачања само у средишњем слоју, утицај на E_{\parallel} је занемарљив, док је E_{\perp} већи од 4.5% (P/E) – 20% (E/E) у односу на контролни узорак. Највеће вредности модула еластичности како у једном $E_{\parallel(E/P)} = 15550 \text{ MPa}$, тако и у другом правцу $E_{\perp(E/P)} = 6110 \text{ MPa}$, а уједно и

²²⁸ преузето из Liu, Yuansong, Mingjie Guan, Xianwen Chen, Yuan Zhang, и Mingming Yhou. „Flexural properties evaluation of carbon-fiber fabric reinforced poplar/eucalyptus composite plywood formwork.“ *Composite structures* 224(2019): 111073.

највећи проценат ојачања ($E_{\parallel(E/E)} - 187\%$ и $E_{\perp(P/P)} - 49.5\%$) уочава се у плочама D-типа, ојачаним са влакнима постављеним у два правца. Слични резултати добијени су и за савојну чврстоћу, где је највеће побољшање у правцу паралелном влакнима код узорка D-E/E – 190.9%, а управно на влакна код узорка D-P/P – 75.5%. Може се уочити да су бољи резултати модула еластичности и носивости на савијање, посебно у правцу управном на правац влакана спољашњих листова фурнира, добијени код дрвета лошијег квалитета, односно тополе. Разлог лежи у чињеници да карбонска влакна, са својом изузетном чврстоћом на затезање доприносе повећању носивости, а посебно је уочљиво код тополе где је највећа разлика између вредности чврстоће на затезање дрвета и карбонских влакана. Такође, ниже класе дрвета карактерише велика разлика између вредности чврстоће на притисак и чврстоће на затезање, која се може умањити затегнутим FRP ојачањем.

Уобичајени облици лома за све контролне узорке фурнирских плоча, без ојачања исти су и за лонгитудинални и за трансверзални правац плоче, а то су ломови који настају кроз супстрат (фурнир) у затегнутој зони плоче, као и интерламинарна деламинација настала као последица смицања. Код плоча В-типа, ојачаних по спољашњим листовима фурнира у лонгитудиналном правцу долази до деламинације у слоју адхезива, настале као последица смицања, а која је позиционирана у затегнутој зони пресека ближе спољашњим листовима фурнира. Код овог типа плоча у трансверзалном правцу долази до лома по супстрату у затегнутој зони пресека. Плоче С-типа у оба правца лом доживљавају као последицу затезања и деламинацију под дејством силе смицања, али се не може са прецизношћу утврдити место лома, које се распростире од неутралне осе ка затегнутој зони пресека кроз више слојева. Лом композитне структуре код плоча D-типа у трансверзалном правцу дешава се у затегнутој зони пресека по супстрату, док је у лонгитудиналном правцу уочљива интерламинарна деламинација у централној зони, ближе неутралној осе, односно код средишњег ојачања. На основу облика лома може се закључити да код свих ојачаних узорака до лома долази када материјал дође до максималне затезне чврстоће приликом оптерећења на савијање, а да се лом дешава као лом по супстрату, настао прекорачењем затезне чврстоће материјала, или као деламинација слојева у међуфазном слоју између слојева фурнира, као последица прекорачења смичућих напрезања. Неретко долази и до комбинације претходна два модела лома.

Луи и остали аутори овог истраживања²²⁹ су на основу теоријске и експерименталне анализе понашања ојачаних композитних плоча при изложености савијању закључили да на повећање модула еластичности и модула лома у лонгитудиналном правцу знатно утиче позиционирање ојачања по спољашњим површинама композитног производа, док ојачање у средишњем слоју доприноси порасту вредности модула еластичности и модула лома у трансверзалном правцу плоче. Теоријском анализом утврђено је да је модел лома код плоча В-типа ојачаних по спољашњим слојевима деламинација наступа при смицању у интерфазном слоју, што је директна последица механичких карактеристика CFRP-а која утиче на карактеристике композитног производа. Модели лома код контролних узорака и узорака ојачаних у средишњем слоју су ломови по супстрату (фурниру) у затегнутој зони пресека.

²²⁹ Yuansong Liu, Mingjie Guan, Xianwen Chen, Yuan Zhang, и Mingming Yhou, „Flexural properties evaluation of carbon-fiber fabric reinforced poplar/eucalyptus composite plywood formwork“, *Composite structures* 224(2019): 111073.

4.2.2 Плоче на бази фурнира + GFRP

4.2.2.1 Испитивање савојних својстава трослојне и петослојне ојачане фурнирске плоче

Међу првима, разлику између трослојне и петослојне ојачане фурнирске плоче истраживали су Библис и Царино²³⁰. Савојну чврстоћу и модул еластичности испитивали су на трослојним и петослојним плочама од боровог фурнира, ојачаним са спољних страна двосмерно плетеном стакленом мрежом у два слоја, импрегнисаном полиестарском смолом. За слепљивање су употребили фенолни адхезив.

Резултати испитивања модула еластичности показују да је код трослојних плоча у правцу паралелном влакнима увећан за 26.9%, а у правцу управном влакнима спољног фурнира за 717% у односу на контролни узорак. Код петослојних плоча та увећања су мање изражена – за 21.6% у правцу паралелном влакнима и за 93.9% у управном правцу. Ипак, генерално гледано већи модули еластичности постигнути су код трослојних фурнирских плоча, и они су у односу на петослојне плоче већи за око 30% у правцу паралелном влакнима, као и за око 7% у правцу управном на влакна.

Повећање савојне чврстоће такође је у већем проценту забележено код трослојне фурнирске плоче, а њено увећање у односу на контролни узорак у правцу паралелно влакнима износи 56.8%, у правцу управном влакнима 310%, док је код петослојних плоча та вредност 34.1% и 244%. Такође, као код модула еластичности, чврстоћа на савијање је и овде већа код трослојне фурнирске плоче и то за 40% у правцу паралелном влакнима и 10% у правцу управном на влакна.

Израженије повећање савојне чврстоће и модула еластичности код трослојних плоча резултат је једнаке количине употребљених влакана за ојачање како петослојних тако и трослојних плоча, и тога што у укупној новоформираној композитној структури код трослојних плоча има већи удео синтетичких влакана која утичу на ојачање него што је то у петослојној плочи.

4.2.2.2 Испитивање утицаја количине влакана и изложеност различитим температурним условима

Испитивање утицаја количине влакана на извијање фурнирске плоче ојачане GFRP при изложености напонима притиска и њихово понашање при изложености различитим температурним условима испитивали су Чои (Choi, S.W) и група аутора²³¹. Седмослојна фурнирска плоча, формирана од дрвета запреминске масе 550 kg/m^3 , ојачавана је са оба спољашња лица једносмерно оријентисаним стакленим влакнима у епокси матрици. Истраживање је обухватило четири ојачана узорка, где су траке ојачане влакнима постављене у 1, 2, 3 и 4 слоја са сваке стране, односно у дебљинама од 0.054 mm, 0.108 mm, 0.162 mm и 0.216 mm, као и контролни узорак фурнирске плоче без ојачања. Димензије узорака износиле су 300x80x9 mm. За лепљење фурнира и GFRP-а, као и самих фурнира и дрвета употребљен је модификовани епоксидни адхезив добијем мешавином новолак-епоксидне смоле (EPN - phenolic novolac ероху) и бисфенол-А-епоксидне смоле (BPA - bisphenol-A ероху). Узорци су пресовани на 125 °C, при притиску од 100 kg/cm² у трајању од 2h.

²³⁰ Evangelios J., Biblis, Honorio F. Carino, „Flexural properties of Southern Pine plywood overlaid with fiberglass-reinforced plastic“, *Forest Product Journal* 50 (4); (2000): 34-36.

²³¹ Choi, S.W., J.W. Rho, D.E. Lee, и W.I. Lee., „Analysis of buckling load of fiber-reinforced plywood plates“, *18 th International Conference on composite materials*, Jeju Island, Korea, 2011.

Choi, Sung Woong, Meixian Li, Woo Il Lee, и Han Sang Kim, „Analysis of buckling load of glass fiber/epoxy-reinforced plywood and its temperature dependence“, *Journal of Composite Materials* 48 (18), (2014): 2191–2206.

Спроведена су теоријска и експериментална испитивања, која су показала да су критичне силе извијања добијене експерименталним испитивањем веће у односу на очекивано критично оптерећење добијено теоријским прорачуном. Истраживање је показало да повећањем броја слојева полимера армираног влакнима долази до повећања критичног напона извијања, односно до повећања критичне силе. Критична сила извијања је код плоча ојачаних влакнима у дебелинама 0.054 mm, 0.108 mm, 0.162 mm и 0.216 mm увећана за 8.89%, 20.56%, 31.33% и 40.45% у односу на контролни узорак. Такође, повећање модула еластичности композитног производа бележи се повећањем броја слојева. Ови резултати директна су последица повећања броја влакана, али и количине везива и епокси матрице у композиту, који имају боља еластична својства у односу на основи материјал тог композита – фурнир.

Испитивањем понашања узорака при ниским температурама забележено је да се при смањењу температуре повећава модул еластичности композитног материјала, те је самим тим при температури од -160°C критична сила већа за око 20% од критичне силе истог узорка на собној температури. Ипак, степен увећања критичног напона извијања приликом изложености мањим температурама највећи је код неојачаних фурнирских плоча, што је последица тога да при изложености ниским температурама долази до већег побољшања механичких карактеристика фурнирских плоча, а пре свега модула еластичности.

Приликом испитивања композитних плоча ојачаних у дебелинама од 0.054 mm и 0.108 mm при свим температурама до оштећења је долазило истовремено кроз слој фурнира и слој CFRP-а, а исти лом се догађао и у неојачаној плочи. Код плоча ојачаних композитом у три и четири слоја, у дебелинама 0.162 mm и 0.216 mm до температуре од -50°C лом композитног производа дешава се у слоју фурнира (дрвета), док на температурама од -50°C до -160°C долази до интерламинарног смицања у средишњем слоју плоче.

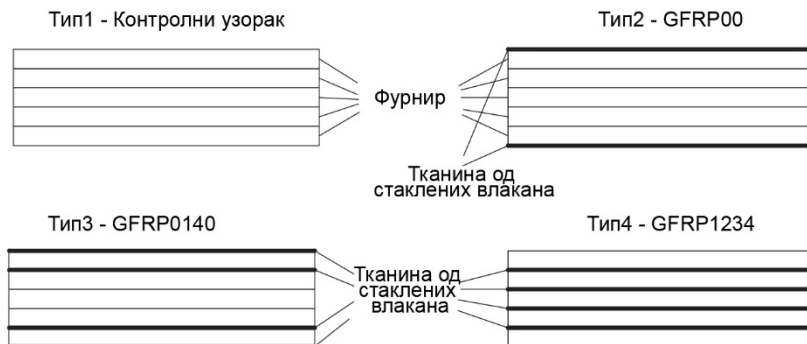
4.2.2.3 Испитивање утицаја ојачања стакленим тканинама са влакнима оријентисаним у два правца и њиховог положаја у конструкцији фурнирске плоче

Бал (Bal) и др.²³² испитивали су утицај различитих начина ојачања фурнирске плоче помоћу двосмерно плетених стаклених влакана. Њихово истраживање показује утицаје на механичке и физичке карактеристике петослојне плоче од фурнира тополе, у зависности од различитог положаја ојачања у композитној плочи. За адхезив примењен је фенол-формалдехид (PF) За слепљивање је коришћен фенол-формалдехидни (PF) адхезив у количини од око 220 g/m^2 машински наношен на слојеве фурнира, а за оне слубнице код којих постоји ојачање у виду тканине додатних 220 g/m^2 је наношено машински на тканину од стаклених влакана. Фурнири су оријентисани управно један на други, формирајући фурнирску плочу топлим пресовањем. Експериментом су испитана четири типа узорака (сл.45): тип1 – контролни узорак без ојачања, тип2 – узорак ојачан са спољних страна (GFRP00), тип3 – узорак код кога је ојачање постављено са спољних страна и у прву и четврту слубницу (GFRP0140), тип4 – узорак код кога је ојачање постављено у све четири слубнице (GFRP 1234).

При испитивању густине плоче, садржаја влажности, дебелинског бубрења и апсорпције воде, сви ојачани узорци су се показали боље, односно имали су мање вредности од неојачаног контролног узорка. Узорци GFRP0140 и GFRP1234 показују нешто већу густину и мањи садржај влаге у односу на узорак GFRP00, што је последица веће количине слојева стаклених влакана, односно дупло веће количине адхезива (фенол-формалдехида) који је

²³² Bekir Cihad Bal, İbrahim Bektaş, Fatih Mengeloğlu, Kadir Karakuş, и Н. Ökkeş Demir, „Some technological properties of poplar plywood panels reinforced with glass fiber fabric“, *Construction and Building Materials 101* (Part 1), (2015): 952-957.

пенетрирао у слојеве и попунио све евентуалне празнине у дрвету. Дебљинско бубређе је тестирано након 24h, 72h, 672h, и резултати показују да су брже бубриле плоче које као завршни слој имају фурнир, иако су резултати после 672h уједначени за све четири плоче. Ипак уочава се да најмање бубређе има плоча у којој се у свакој сљубници налази ојачање GFRP1234. Сличне резултате показује и тест апсорбције воде, где је најмања апсорбција воде у плочи GFRP1234, односно плочи где је везиво пенетрирало у сваки слој фурнира.



Слика 46. Схематски приказ попречног пресека тестираних типова плоча²³³

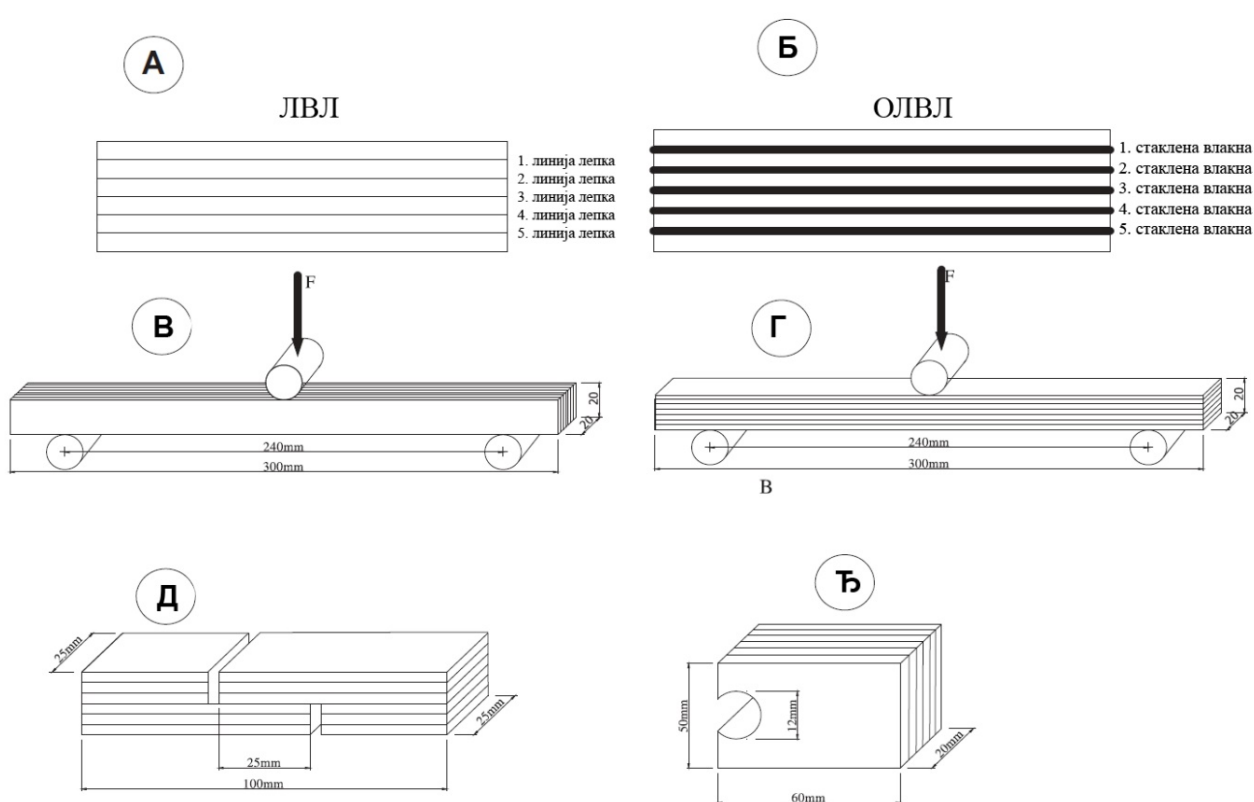
У оквиру рада тестирани су модул еластичности при савијању и модул лома за сва четири типа плоче, у правцу паралелном и управном на правац влакана спољашњих листова фурнира. Сви ојачани узорци у оба правца бележе повећање модула еластичности и модула лома у односу на контролни узорак. Највеће вредности модула еластичности и модула лома за оба правца има узорак тип3 (GFRP0140). Његово модул еластичности у правцу паралелном влакнима је за 13.5% већи у односу на контролни узорак, а модула лома за 4.4%. Знатно доминантнији је проценат ојачања управно на правац влакана фурнира, који за модул еластичности већи за 118%, а модул лома за 50%. Модул еластичности управно на правац влакана је значајно бољи као последица двосмерно плетене тканине. У односу на подужни правац, попречни има мањи број листова фурнира са оријентацијом влакана у правцу напрезања, чиме већински напрезања преузимају стаклена влакна, чији су модули еластичности значајно изнад модула еластичности дрвета. На тај начин долази до бољег унапређења механичких карактеристика плоче за попречни правац. Оно што је за Бала и друге ауторе овог истраживања неочекиван резултат је смањење специфичног модула еластичности и специфичног модула лома у односу на контролни узорак, за подужни правац влакана.

Додатним испитивањима подвргнут је контролни узорак и плоча типа3 GFRP0140 и у дијаграму напон-дилатација показана је већа дуктилност ојачаног узорка него контролног. Такође, узорци плоча са ојачањем управним на правац влакана фурнира показали су флексибилније понашање него узорци са ојачањем паралелним у односу на правац влакана фурнира. Сви ломови и деформације дешавали су се у доњој, затегнутој зони. Испитивањем чврстоће на смицање подвргнути су контролни узорак и узорак тип4 - GFRP1234, где је чврстоћа на смицање ојачаног узорка слабија 25% у односу на контролни узорак. Приликом сваког испитивања проблем је настао у интерфазном слоју између слоја фурнира и мреже армиране стакленим влакнима. Такви резултати логична су последица ојачаног узорка у коме су формиране четири смичуће равни. Аутори рада предлажу употребу епоксидног адхезива како би се ојачала чврстоћа на смицање, али напомињу да је самим тим економски скупље направити узорак.

²³³ преузето из Bekir Cihad Bal, İbrahim Bektaş, Fatih Mengeloğlu, Kadir Karakuş, и Н. Ökkeş Demir, „Some technological properties of poplar plywood panels reinforced with glass fiber fabric“, *Construction and Building Materials 101* (Part 1), (2015): 954.

4.2.2.4 Испитивање утицаја ојачања стакленим тканинама са влакнима оријентисаним у два правца на својна својства LVL плоче

Механичке карактеристике LVL плоче фурнира тополе ојачане двосмерно плетеним стакленим влакнима испитивао је Бал²³⁴. У оквиру истраживања анализирани су модул еластичности и модул лома управно на раван и у равни плоче, специфични модул еластичности и специфични модул лома, чврстоћа на смицање и чврстоћа на затезање код теста цепањем ојачаних шестослојних LVL плоча, као и неојачаног контролног узорка. Контролни узорак формиран је без ојачања, док је композитна плоча ојачана уметањем стаклених влакана у сваку слубницу, односно ојачањем путем пет слојева влакана. Коришћен је фенол-формалдехидни (PF) адхезив у количини од око 200 g/m² ручно наносен на слојеве фурнира, и око 400 g/m² наносених машински на тканину од стаклених влакана. Плоче су формиране топлим пресовањем. На слици 47 приказане су плоче и узорци формиран за експериментално испитивање наведених механичких карактеристика.



Слика 46. Узорци за испитивање савијања и смицања: А: Попречни пресек LVL плоче; Б: попречни пресек ојачане LVL плоче; В: узорак за савијање у равни плоче; Г: узорак за савијање управно на раван плоче; Д: узорак за смицање у равни плоче; Ђ: узорак за чврстоћу на затезање код теста цепањем²³⁵

При испитивању савијања управно на раван плоче, ојачани узорак показује тек нешто веће резултате модула еластичности (за 3.8%) и модула лома (за 6.5%) у односу на контролни, неојачани узорак плоче. Аутори наводе да је тај резултат последица и значајно веће густине плоче због количине употребљеног адхезива за формирање ојачане плоче, а да само ојачање није знатно допринело повећању модула еластичности и модула лома у овом случају. За

²³⁴ преузето из Bekir Cihad Bal, "Flexural properties, bonding performance and splitting strength of LVL reinforced with woven glass fiber", *Construction and Building Materials* 51(2014): 9-14.

²³⁵ Bekir Cihad Bal, "Flexural properties, bonding performance and splitting strength of LVL reinforced with woven glass fiber", *Construction and Building Materials* 51(2014): 11.

савијање у равни плоче модул еластичности ојачаног узорка увећан је за 40%, а модул лома за 14% у односу на модуле еластичности и лома контролног узорка. Иако је ово за ауторе неочекиван резултат, објашњење лежи у томе да је приликом савијања управно на раван плоче последњи спољни фурнир у затегнутој зони доживео највећа напрезања и да је на том месту дошло до лома. Код савијања у равни плоче напрезања се разлажу кроз неколико слојева фурнира и стаклених влакана, односно највеће напрезање није само у једном слоју, што показује много боље резултате, те овако формиран елемент има перспективу да се користи као линијски – гредни носач.

Аутори су испитали и смицање у равни плоче, односно смичућу чврстоћу при затезању, за узорке куване у води, а потом климатизоване у клима комори и узорке климатизоване у собним условима. Ојачани узорци кувани у води показују 30% мању чврстоћу на смицање у односу на неојачане узорке, док ојачани узорци климатизоване у собним условима показују за око 20% ниже чврстоће на смицање у односу на неојачане узорке. Модели лома за ојачане и неојачане узорке се разликују. Код ојачаних узорака најчешћи лом је по ојачању, односу у слоју тканине ојачане влакнима, док је код неојачаних узорак лом по дрвету (фурниру).

4.2.2.5 Испитивање ударне чврстоће LVL плоча ојачаних стакленим тканинама са влакнима оријентисаним у два правца

У наставку истраживања Бал²³⁶ је на истим узорцима испитивао ударну чврстоћу при динамичком оптерећењу за савијање у равни и управно на раван плоче, смичућу чврстоћу и неке физичке особине попут тангенцијалног, радијалног и запреминског бубрења, густине и упијања воде. Резултати показују да је ударна чврстоћа већа код узорака тестираних на савијање управно на раван плоче, како код ојачаних, тако и код неојачаних плоча. Ојачане плоче имају повећање ударне чврстоће код савијања управно на раван плоче за 154%, а код савијања у равни плоче за 113% у односу на контролне узорке. Модели лома код неојачаних, контролних узорака су апсолутно преламање узорка кроз све слојеве плоче, док се код ојачаних узорака лом догађа по супстрату, али не и по свим слојевима стаклене тканине, која у одређеним слојевима остаје непрекинута. Аутор наводи да је LVL ојачан стакленим (OLVL) влакнима јачи под динамичким него под статичким оптерећењем. Влакна уметнута у слубнице се понашају као материјал који дистрибуира напрезање и доприноси дуктилности целокупне плоче. Улога тканине од стаклених влакана у композитном производу на бази фурнира аналогна је арматури у армирано-бетонским гредама.

Процент повећања чврстоће на смицање код ојачаног узорка у односу на контролни износи 213%, односно 10.51 МПа за OLVL и 3.35 МПа за контролни LVL. Приликом експерименталног тестирања, као и код испитивања ударне чврстоће, модели лома се разликују тако што се код контролних узорака епрувета у потпуности физички раздвојила на два дела, док је код ојачаног узорка дошло до лома, али је тканина од стаклених влакана имала улогу везивног материјала, који није у потпуности покидан и није дошло до потпуног физичког раздвајања епрувете. Поменуто посебно може бити значајно за конструктивне елементе на местима веза, а код којих долази до великих смичућих напрезања.

Испитане физичке карактеристике показале су да су неке особине попут тангенцијалног и запреминског бубрења и апсорпције воде погодније код ојачаних узорака у односу на контролне, што може бити и последица примењеног адхезива и његове пенетрације у структуру тополовог фурнира, али и примене тканине од стаклених влакана распоређене у сваку слубницу. Густина OLVL-а је већа у односу на контролни LVL, што је и очекиван

²³⁶ Bekir Cihad Bal, "Some physical and mechanical properties of reinforced laminated veneer lumber", *Construction and Building Materials* 68 (2014): 120-126.

результат због велике густине примењене тканине. Ипак, радијално бубрење је нешто веће код ојачаног узорка у односу на контролни узорак. Свеукупно посматрајући, боље физичке особине, као и димензионална стабилност последица су како примењених влакана, тако и веће количине примењеног адхезива у конструкцији плоче, као и његове пенетрације у структуру дрвета.

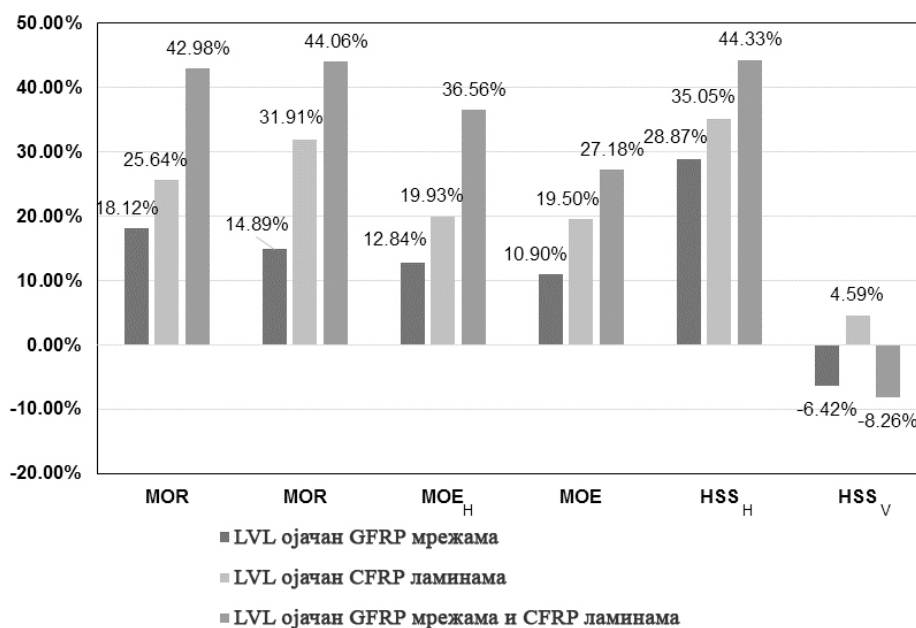
4.2.3 Плоче на бази фурнира и полимера армираног карбонским и стакленим влакнима (CFRP/GFRP)

4.2.3.1 Испитивање савојних својстава деветослојне LVL плоче ојачане карбонским влакнима, стакленим влакнима или њиховом комбинацијом

Ванг (Wang) и група аутора²³⁷ испитивали су механичке карактеристике ојачаног LVL-а дрвета тополе, формираног системом вишестепеног топлог пресовања. За ојачање LVL-а примењена су карбонска влакна у виду трака ламина и стаклена влакна у виду тканине са влакнима монооксијално оријентисаним, као адхезив употребљен је фенол-формалдехид (PF). У оквиру истраживања испитивани су следећи узорци: LVL+GFRP, LVL+CFRP, LVL+GFRP+CFRP – узорак са ојачањима постављеним ближе неутралној оси композитног производа, LVL+GFRP+CFRP – узорак са ојачањима постављен ближе спољашњим листовима фурнира композитног производа, као и контролни узорак. Испитивање је рађено на деветослојним LVL плочама, а цео композитни производ произведен је системом вишестепеног топлог пресовања. Композитни производ је формиран из три целине, кроз следећи процес пресовања: трослојне LVL плоче са или без ојачања формиране су путем хладног пред-пресовања композитног полу-производа и тако формиране плоче су пресоване у топлим пресама, а у трећој финалној фази пресовања у топлим пресама спојене су три претходно формиране LVL плоче, како би се формирао цео композитни производ. Оваквим процесом формирања композитног производа шест линија лепка прошло је процес двоструког топлог пресовања. Аутори наводе да на овај начин лепак боље пенетрира у слојеве фурнира, формирају се линије лепљења веће чврстоће, као и да се тако повећава густина фурнира.

У оквиру истраживања вршено је испитивање модула еластичности, модула лома и чврстоће на смицање за оптерећења која делују у равни и управно на раван спољашњих листова фурнира композитног производа. Код свих испитаних узорака показало се да највеће побољшање механичких карактеристика имају производи који су формиран комбиначијом LVL+GFRP+CFRP, потом LVL+CFRP и на крају LVL+GFRP, што је резултат чврстоће на затезање и модула еластичности пре свега карбонских, а потом и стаклених влакана којима је ојачан композитни производ, а које су веће од вредности чврстоћа на затезање и модула еластичности дрвета. Унапређење механичких карактеристика изражено у процентима видљиво је на следећем дијаграму (сл.48):

²³⁷ Jie Wang, Xiaolei Guo, Wei Zhong, Huiyun Wang, и Pingxiang Cao, „Evaluation of Mechanical Properties of Reinforced Poplar Laminated Veneer Lumber“, *BioResources* 10 (4), (2015): 7455-7465.



Слика 48. Побољшање механичких карактеристика ојачаних плоча у односу на контролне узорке²³⁸

Приликом изложености оптерећењима која делују у равни плоче (хоризонтална оптерећења у графикау (сл.48) – MOE_H , HSS_H) модул лома, модул еластичности и чврстоћа на смицање побољшани су за 18.12%, 12.84% и 28.87% код плоча ојачаних GFRP-ом, односно за 25.64%, 19.93% и 35.05% за плоче ојачане CFRP-ом. За оптерећења која делују управно на раван плоче (вертикална оптерећења у графикау (сл.48)) модул лома и модул еластичности побољшани су за 14.89% и 10.90% код плоча ојачаних GFRP-ом, односно за 31.91% и 19.50% за плоче ојачане CFRP-ом. Чврстоћа на смицање приликом изложености наведеном оптерећењу плоча ојачаних GFRP-ом или комбинацијом CFRP+GFRP мања је од чврстоће на смицање контролног узорка, што је последица ниске површинске активности стаклених влакана, а резултира смањеном чврстоћом везе у композитном производу.

Аутори су испитивали и утицај положаја ојачања у композитном производу на побољшање његових механичких карактеристика и закључили да се постављањем ојачања ближе спољашњим листовима фурнира композитног производа постижу значајно боље механичке карактеристике у односу на механичке карактеристике производа са ојачањима постављеним ближе неутралној оси. Ово је директно резултат дистрибуције напона кроз слојеве композитног производа, односно приликом савијања највећи напони се јављају у спољашњим слојевима фурнира.

4.3 Упоредна анализа претходних истраживања

У свим претходно приказаним истраживањима, на различите начине и различитим поступцима вршено је ојачање плоча на бази фурнира путем полимера армираног влакнима, а све у циљу побољшања конструктивних карактеристика плоча, односно побољшања њених механичких и физичких својстава. На ефекат ојачања плоча, као што је поменуто у претходном делу рада, утичу многи фактори, а неки од њих су количина влакана, положај и оријентација влакана и сл. Спроведена истраживања²³⁹ која су тестирала ефекат ојачања када су исте

²³⁸ преузето из Jie Wang, Xiaolei Guo, Wei Zhong, Huiyun Wang, и Pingxiang Cao, „Evaluation of Mechanical Properties of Reinforced Poplar Laminated Veneer Lumber“, *BioResources* 10 (4), (2015): 7461.

²³⁹ Mladen Brezović, Vladimir Jambreković, Jaroslav Kljak, „Utjecaj karbonskih vlakana na neka relativna svojstva furnirskih ploča“, *Drvna industrija* 53 (1), (2002): 23-31;

количине влакана постављене у различитим сљубницама у плочи, доказала су да највећи ефекат на ојачање плоче имају синтетичка влакна када су позиционирана ближе спољним ивицама плоче, односно нешто мањи утицај уколико су постављена ближе неутралној оси. Приликом оптерећења фурнирске плоче, највећа напрезања преузимају спољни слојеви плоче. Уколико се плоча ојача синтетичким влакнима по њеној површини или у првој и последњој сљубници највећа напрезања преузеће управо синтетичка влакна и смањити напрезање у фурнирима. Ипак, то напрезање у влакнима биће много израженије него напрезање у унутрашњим слојевима фурнира и при великом оптерећењу таквих плоча долази до смицања у слоју FRP-дрво. Да би се такве деформације избегле, плоче треба формирати тако да напрезање у слоју влакана има што мање ефекте на напрезање у слоју фурнира. То је могуће уколико се ојачања поставе ближе неутралној оси, чиме ће напрезања кроз слојеве фурнира бити линеарно распоређена, а напрезања у FRP слоју биће мања него када је он постављен на спољним странама плоче. Такође, смањење напрезања у фурниру може се остварити и таквом оријентацијом влакана да FRP преузме највећа напрезања. На основу претходних анализа закључено је да је за побољшање чврстоће на савијање најбоље поставити мреже под углом од 30° у односу на правац влакана у завршном слоју фурнира, или како би се постигло уједначено побољшање смичућих и савојних чврстоћа, поставити их под углом од 15°.

Како би се постигла што већа отпорност материјала према деформацијама у свим истраживањима тежило се на повећању модула еластичности новоформираног узорка. На основу резултата приказаних у Прилогу 1 – *Табела резултата претходних истраживања утицаја ојачања на механичка својства плоча на бази фурнира*, уочава се да су највеће вредности модула еластичности, у свим испитаним плочама постигнуте у трослојним ојачаним плочама, где је модул еластичности код њих већи од 1.3 до 2 пута од модула еластичности петослојних плоча формираних под истим условима. Највећу вредност модула еластичности од свих испитаних узорака плоча на бази фурнира показало је истраживање које су спровели Ху и други аутори²⁴⁰, а највећу вредност показао је узорак CFRP12, $E=2.15 \times 10^4$ МР (трослојна плоча/топола/CFRP једносмерна влакна/адхезив PF) док је исти узорак ојачан мрежама, односно влакнима постављеним у два правца показао нешто мањи модул еластичности $E=1.64 \times 10^4$ МР. Иста вредност модула еластичности добија се и код трослојних плоча ојачаних GFRP мрежама, где је ојачање постављено у нултом слоју, односно по спољним површинама плоче у истраживању које су спровели Библис и Царино²⁴¹. Овакви резултати последица су тога што карбонска влакна имају већи модул еластичности од стаклених влакана, а и једна и друга имају много већи модул еластичности у односу на дрво, који је код карбона већи и до 20 пута, док је код стаклених влакана већи од 3 до 5 пута. Самим тим, иако су карбонска влакна постављена у унутрашњим слојевима, показала су већу или једнаку вредност у односу на стаклена влакна која су постављена по спољним ивицама. Поред наведених, веома високе модуле еластичности ($E=1.46 \times 10^4 - 1.55 \times 10^4$ МПа) постижу и Лиу и група аутора²⁴², формирајући једанаестослојне фурнирске плоче од еукалиптуса или комбинацијом еукалиптуса и тополе, а постављајући једносмерно ткана карбонска платна као ојачања на спољне стране плоче и у средишњу сљубницу плоче.

Bekir Cihad Bal, İbrahim Bektaş, Fatih Mengeloğlu, Kadir Karakuş, и Н. Ökkeş Demir, „Some technological properties of poplar plywood panels reinforced with glass fiber fabric“, *Construction and Building Materials 101* (Part 1), (2015): 952-957;

Jie Wang, Xiaolei Guo, Wei Zhong, Huiyun Wang, и Pingxiang Cao, „Evaluation of Mechanical Properties of Reinforced Poplar Laminated Veneer Lumber“, *BioResources 10* (4), (2015): 7455-7465.

²⁴⁰ Heng Xu, Tetsuya Nakao, Chiaki Tanaka, Masahiro Yoshinobu, Hiroyuki Katayama, „Effects of fiber length and orientation on elasticity of fiber-reinforced plywood“, *J. Wood Sci.* 44 (1998): 343-347.

²⁴¹ Evangelios J., Biblis, Honorio F. Carino, „Flexural properties of Southern Pine plywood overlaid with fiberglass-reinforced plastic“, *Forest Product Journal 50* (4); (2000): 34-36.

²⁴² Yuansong Liu, Mingjie Guan, Xianwen Chen, Yuan Zhang, и Mingming Yhou, „Flexural properties evaluation of carbon-fiber fabric reinforced poplar/eucalyptus composite plywood formwork“, *Composite structures 224*(2019): 111073.

Боље вредности модула еластичности карбонских влакана и њихов утицај на конструкцију плоче огледају се и у резултатима који показују да је много израженији проценат ојачања у односу на контролни узорак код плоча ојачаних карбонским влакнима, у односу на плоче ојачане стакленим влакнима. Ојачане CFRP плоче показују увећање модула еластичности у правцу паралелном влакнима и до 2.6 пута у односу на контролни узорак, док се то ојачање код GFRP плоча креће око 1.3-1.7 пута. Такође, врло је важно напоменути да се ојачањима формираним влакнима оријентисаним у два правца – мрежама, постижу значајна увећања модула еластичности у правцу управном на правац завршног фурнира плоче, те да су та увећања израженија него увећања у правцу паралелном влакнима. У истраживању Библис и Царино²⁴³ код узорка GFRP00 (Зслојна плоча/јужни бор/GFRP мрежа/адхезив EFR) модул еластичности у правцу управном на правац влакана повећан је 8 пута у односу на контролни узорак. При ојачањима мрежама, влакна од којих је формирана мрежа не морају имати једнак модул еластичности у оба правца, стога је потребно пажњу усмерити на оријентацију мреже, односно влакна са већим модулима еластичности поставити у правцу где желимо да добијемо израженије повећање модула еластичности.

Да на побољшање модула еластичности, а самим тим и повећање отпорности на савијање као и побољшање савојних особина плоче утиче повећање количине синтетичних влакана употребљених за ојачање, доказано је у спроведеним истраживањима²⁴⁴. Највише вредности критичне силе савијања у свим испитаним узорцима постигнуте су у узорцима где је употребљен епоксидни адхезив EPN и BPA²⁴⁵. Ојачањем GFRP мрежама постигнута је уједначена критична сила савијања за оба правца фурнирске плоче. Високе вредности чврстоће на савијање добијене су и код трослојних фурнирских плоча ојачаних GFRP мрежама по спољним листовима плоче у истраживању спроведеном од стране Библис и Царино²⁴⁶, где те вредности износе 130.86 МПа у правцу паралелном влакнима што је 1.5 пут веће у односу на контролни узорак, и 69.91 МПа у правцу управном на влакна, односно 4 пута веће вредности у односу на контролни узорак. Изузетно високе вредности чврстоће на савијање постигнуте су и у истраживању спроведеном од стране Ванга и групе аутора²⁴⁷, ојачањем деветослојне тополове LVL плоче карбонским и/или стакленим влакнима једносмерно позиционираним. Највећа вредност чврстоће на савијање у правцу влакана износи 129.40 МПа, а у правцу управном на влакна 115.10 МПа, што је за оба правца увећано за око 1.4 пута у односу на контролни узорак, а ове вредности постигнуте су код плоче ојачане карбонским и стакленим влакнима постављеним у сваку сљубницу. Нешто ниже вредности од ових, али такође знатно увећане у односу на контролни узорак бележе се у истраживањима Брезовић и др., као и Ху и др.²⁴⁸, али као разлог томе може се претпоставити употреба влакана у 4 пута мањој густини

²⁴³ Evangelios J., Biblis, Honorio F. Carino, „Flexural properties of Southern Pine plywood overlaid with fiberglass-reinforced plastic“, *Forest Product Journal* 50 (4); (2000): 34-36.

²⁴⁴ Mladen Brezović, Vladimir Jambreković, Pervan Stjepan, „Bending properties of carbon fiber reinforced plywood“, *Wood Research* 48(4) (2003): 13-24;

Mladen Brezović, Jaroslav Kljak, Stjepan Pervan, и Alan Antonović, „Utjecaj kuta orijentacije sintetičkih vlakana na savojna svojstva kompozitne furnirske ploče“, *Drvna industrija* 61(4),(2010): 239-243;

Choi, S.W., J.W. Rho, D.E. Lee, и W.I. Lee., „Analysis of buckling load of fiber-reinforced plywood plates“, *18 th International Conference on composite materials*, Jeju Island, Korea, 2011.

²⁴⁵ Choi, Sung Woong, Meixian Li, Woo Il Lee, и Han Sang Kim, „Analysis of buckling load of glass fiber/epoxy-reinforced plywood and its temperature dependence“, *Journal of Composite Materials* 48 (18), (2014): 2191–2206.

²⁴⁶ Evangelios J., Biblis, Honorio F. Carino, „Flexural properties of Southern Pine plywood overlaid with fiberglass-reinforced plastic“, *Forest Product Journal* 50 (4); (2000): 34-36.

²⁴⁷ Jie Wang, Xiaolei Guo, Wei Zhong, Huiyun Wang, и Pingxiang Cao, „Evaluation of Mechanical Properties of Reinforced Poplar Laminated Veneer Lumber“, *BioResources* 10 (4), (2015): 7455-7465.

²⁴⁸ Mladen Brezović, Vladimir Jambreković, Pervan Stjepan, „Bending properties of carbon fiber reinforced plywood“, *Wood Research* 48(4) (2003): 13-24;

Mladen Brezović, Vladimir Jambreković, Jaroslav Kljak, „Utjecaj karbonskih vlakana na neka relativna svojstva furnirskih ploča“, *Drvna industrija* 53 (1), (2002): 23-31;

слоја у односу на прво поменуто истраживање. Такође, мање вредности чврстоће на савијање код петослојних плоча у односу на трослојне плоче последица су већег броја смичућих равни у петослојним плочама, те се самим тим повећава могућност смицања под дејством силе. Као што је приказано овде, а и напоменуто у претходном делу рада, истраживања²⁴⁹ потврђују да се највеће деформације догађају због превеликог смицања међу слојевима као и у слоју дрвета. Како би се формирала композитна фурнирска плоча која може да покаже добру отпорност на оптерећења, потребно је посебну пажњу усмерити на проблем смицања у слоју FRP-дрво, а нарочито у слоју дрво-дрво, те ће се у даљем раду пажња усмерити на разматрање и анализу тог проблема.

Смицање у попречном пресеку композитне плоче при свим испитивањима смицања у равни плоче најдоминантније је у слоју дрвета, а потом у слоју између FRP-а и дрвета, првенствено у затегнутој зони пресека. Као последица смицања долази до деламинације чиме се смањује носивост ојачане плоче на бази фурнира. У приказаним истраживањима није уочено значајније побољшање напона на смицање код плоча ојачаних влакнима у два правца - мрежама, чак у одређеним истраживањима која су спровели Брезовић и др.²⁵⁰ на петослојним фурнирским плочама долази до смањења дозвољених напона смицања у односу на контролну плочу, а то је последица великог броја смичућих равни. Значајније повећање напона на смицање бележи LVL плоча ојачана једносмерно оријентисаним стакленим влакнима²⁵¹, односно тракама ламинама, где су траке уметнуте у сваку слубницу у плочи и напони смицања код таквог узорка износе 10.51 МПа, односно повећани су 3 пута у односу на контролну плочу. Побољшање напона смицања постигнуто је и у испитивању које су спровели Ванг и др.²⁵² ојачањем LVL плоче карбонским и/или стакленим влакнима једносмерно позиционираним, али су увећања максимално 1.6 пута у односу на контролну плочу.

Да би се повећала способност материјала да се супротстави смичућим деформацијама мора се повећати модул смицања, односно потребно је радити на ојачању веза између слојева плоче. Повећање чврстоће на смицање управно на раван плоче око 1.7 пута у односу на контролни узорак бележи се у истраживању где је узорак ојачан слободно оријентисаним карбонским влакнима²⁵³, такође, у резултатима наведеног истраживања може се приметити да су веће смичуће чврстоће постигнуте код петослојног узорка. Ипак, како слободно-оријентисана влакна у ојачању имају друге потешкоће и такве тканине нису заступљене на тржишту у мери у којој су тканине са влакнима оријентисаним у два правца, морају се пронаћи нове методе које ће омогућити то ојачање.

Како би се правилно формирао узорак који може да покаже добра механичка својства, односно добре отпорности на савијање и смицање, неопходно је постићи баланс у ојачању

Heng Xu, Tetsuya Nakao, Chiaki Tanaka, Masahiro Yoshinobu, Hiroyuki Katayama, „Effects of fiber length and orientation on elasticity of fiber-reinforced plywood“, *J. Wood Sci.* 44 (1998): 343-347.

²⁴⁹ Mladen Brezović, Vladimir Jambreković, Pervan Stjepan, „Bending properties of carbon fiber reinforced plywood“, *Wood Research* 48(4) (2003): 13-24;

Mladen Brezović, Vladimir Jambreković, Jaroslav Kljak, „Utjecaj karbonskih vlakana na neka relativna svojstva furnirskih ploča“, *Drvna industrija* 53 (1), (2002): 23-31;

Choi, S.W., J.W. Rho, D.E. Lee, и W.I. Lee., „Analysis of buckling load of fiber-reinforced plywood plates“, *18 th International Conference on composite materials*, Jeju Island, Korea, 2011.

²⁵⁰ Mladen Brezović, Vladimir Jambreković, Pervan Stjepan, „Bending properties of carbon fiber reinforced plywood“, *Wood Research* 48(4) (2003): 13-24;

Mladen Brezović, Vladimir Jambreković, Jaroslav Kljak, „Utjecaj karbonskih vlakana na neka relativna svojstva furnirskih ploča“, *Drvna industrija* 53 (1), (2002): 23-31;

²⁵¹ Bekir Cihad Bal, "Flexural properties, bonding performance and splitting strength of LVL reinforced with woven glass fiber", *Construction and Building Materials* 51(2014): 9-14.

²⁵² Jie Wang, Xiaolei Guo, Wei Zhong, Huiyun Wang, и Pingxiang Cao, „Evaluation of Mechanical Properties of Reinforced Poplar Laminated Veneer Lumber“, *BioResources* 10 (4), (2015): 7455-7465.

²⁵³ Heng Xu, Tetsuya Nakao, Chiaki Tanaka, Masahiro Yoshinobu, Hiroyuki Katayama, „Effects of fiber length and orientation on elasticity of fiber-reinforced plywood“, *J. Wood Sci.* 44 (1998): 343-347.

узорака, односно није потребно тежити највећем повећању једног од својстава већ постићи уједначено повећање свих конструктивних својстава плоче. Како би се постигле боље везе између слојева и већа отпорност при смичућим напрезањима, у даљем раду предлаже се испитивање узорака који ће бити формиран тако да се FRP ојачања поставе ближе неутралној оси плоче и то у правцу управном на правац спољних листова, чиме ће се смањити напрезања у фурниру, а да се примени епоксидни адхезив, чиме ће се смањити могућност раслојавања у слоју FRP-фурнир. Иако се претпоставља да ће ови резултати дати нешто слабије ефекте на повећање савојне чврстоће у односу на резултате који би се добили померањем ојачања даље од неутралне осе, они могу утицати на повећање чврстоће на смицање чиме ће се спречити раслојавање плоче у затегнутој зони пресека узроковано смицањем. Како би се оптимално утицало на ојачања савијања у равни плоче и смицања управно на раван плоче, предлаже се и формирање узорака код којих ће се ојачање у правцу спољних листова фурнира поставити даље од тежишта плоче, односно ближе спољним листовима, чиме ће се утицати на побољшање савојних својстава плоче, а ојачање управно на спољашње листове ближе неутралној оси плоче, како би се утицало на смањење смичућих напрезања. Поред наведеног, предлаже се и формирање ојачања помоћу FRP тканине оријентисане у два правца и испитивање степена побољшања савојних и смичућих напрезања у композитном производу.

4.4 Адхезиви за носеће дрвене конструкције

4.4.1 Дефиниција, појам, настанак и развој

„Адхезив представља неметалну супстанцу способну да слепи два иста или различита материјала, дајући јаку везу. Средство за лепљење чврстих супстрата у прошлости, све до 50-их година прошлог века, звало се лепак. У другој половини XX век, са појавом синтетских полимера који су, осим за израду пластичних маса, служили и за лепљење, ушао је у употребу израз адхезив.“²⁵⁴

Адхеција представља методу спајања односно повезивања материјала (супстрата) путем адхезива (лепка), формирајући целину у виду слепљеног – адхезијског споја, чиме настаје композитни производ. Адхеција омогућава преношење оптерећења између супстрата путем адхезивног споја. Супстрати или адхеренти су материјали који се међусобно слепљују помоћу адхезива.

Мек Бејн и Хопкинс (Mc Vain, Hopkins) 1925. године дефинисали су својства која течност мора да испуни да би била адхезив: „Свака течност која кваси одређену чврсту површину и која је способна да након квашења пређе у чврсто стање неким од процеса хлађења, испаравања, оксидације, полимеризације или поликондензације се може сматрати адхезивом, ако током очвршћавања не задржава у себи настале напоне.“²⁵⁵

„Адхезиви за дрво су полимерни материјали који имају могућност да физички, хемијски или на оба начина интерреагују са површином дрвета на такав начин да се омогући пренос напона између адхерената, а да при томе не дође до пукотине у слоју лепка или раздвајања адхезива од слоја дрвета.“²⁵⁶

²⁵⁴ Термини и дефиниције из области адхезива прописани су стандардом SRPS EN 923:2017 Адхезиви – Термини и дефиниције, а цитирано код Ивана, Гавриловић-Грмуша, *Познавање материјала. Део 1, Адхезиви у дрвној индустрији* (Београд: Универзитет, Шумарски факултет, 2019), стр.11.

²⁵⁵ I. Skeist, *Handbook of adhesives* (New York, Toronto, London: Van Nostrand Reinhold Co., 1977) цитирано код Ивана, Гавриловић-Грмуша, *Познавање материјала. Део 1, Адхезиви у дрвној индустрији* (Београд: Универзитет, Шумарски факултет, 2019), стр.31.

²⁵⁶ A. H. Conner, „Wood: adhesives.“, у *Encyclopedia of materials: science and technology*, (Amsterdam; New York: Elsevier Science, Ltd., 2001), 9583-9599.

„Адхезивна чврстоћа представља механичку особину која је дефинисана као сила која је потребна да раздвоји два међусобно спојена супстрата. Механичка чврстоћа зависи од примарних и секундарних хемијских веза полимерних ланаца у адхезиву, дрвету и слоју између адхезива и дрвета (у интерфазном или међуфазном слоју).“²⁵⁷

Адхезивни материјали примењивали су се у свакодневном животу праисторијског човека за производњу оружја и оруђа. Први материјали који су имали улогу адхезива су пчелињи восак, смола, гума, шелак, катран и сл. Прва адхезивна средства, претеча данашњим адхезивима, датирају из времена првих цивилизација, а то су адхезиви на природној бази. Египћани су примењивали природне адхезиве животињског порекла за лепљење декоративних фурнира на намештај као и за производњу папируса. До Другог светског рата и развоја синтетичких адхезива, доминатни су били адхезиви на природној бази. Адхезиви на природној бази заступљени у дрвној индустрији добијани су из скроба, соје, животињског отпада, као нуспроизводи у индустрији прераде меса и кожарској индустрији као и из индустријске прераде млечних производа. Најзаступљенију примену су имали адхезиви на бази протеина добијани из соје, крви и казена.²⁵⁸ Прва фабрика за производњу адхезива основана је у Холандији 1690. године. Производња казеинског лепка почела је у Немачкој и Швајцарској почетком XIX века, а први Амерички патент казеинског лепка издат је 1876. године. Скробни адхезиви употребљавани су за лепљење поштанских маркица од 1840. године, док је први Амерички патент за декстрински адхезив издат је 1867. године.²⁵⁹

Пре појаве адхезива на бази синтетичких смола произведен је полусинтетички адхезив целулозни естар и целулозни нитрат, познатији као нитроцелулоза. Крајем XIX века неоргански лепкови на бази натријум силиката имали су веома кратку комерцијалну примену. Први адхезиви на бази синтетичких смола (фенол формалдехидне смоле) произведени су почетком XX века. 1907. године Baekeland и Thurlow производе прву терморективну фенол формладехидну смолу, познатију као бакелит. 1930-их година долази до развоја поли(винил-хлорида) (PVC) и фенолних смола који се примењују данас као адхезиви. Адхезиви на бази фенола примењују се за формирање фурнирских плоча од 1931. године.²⁶⁰ Након Другог светског рата примена адхезива постаје много већа и распрострањенија, што је резултат развоја синтетичких адхезива, велике издржљивости, који постају економски доступнији.

4.4.2 Врсте и класификације

Постоји више класификација адхезива заснованих на различитим полазиштима. Адхезиви се могу класификовати према пореклу, саставу, агрегатном стању, температури на којој делују, начинима апликације, намени и сл. За потребе овог рада извршиће се класификација адхезива према пореклу и према функционалним својствима.

Основна подела адхезива на основу порекла је на природне и синтетичке адхезиве. Синтетички адхезиви састоје се од олигомера или полимера који су добијени хемијским поступком из одређених сировина. Синтетички адхезиви могу бити термопластични и терморективни. Термопластични су они адхезиви који омекшавају и топе се на високим температурама, а при хлађењу очвршћавају и задржавају свој облик; топљење се може поновити неограничен број пута. Терморективни адхезиви очвршћавају углавном на високој температури (неки могу и на собној), током очвршћавања стварају унакрсне везе (умрежену

²⁵⁷ Charles R., Frihart, „Wood adhesion and adhesives“ у *Handbook of wood chemistry and wood composites*, ed. Rowell, Roger M. (Boca: CRC Press, 2005), chap. 9.

²⁵⁸ A. H. Conner, „Wood: adhesives.“, у *Encyclopedia of materials: science and technology*, (Amsterdam; New York: Elsevier Science, Ltd., 2001), 9583-9599.

²⁵⁹ Fred A. Keimel, „Historical Development of Adhesives and Adhesive Bonding.“ у *Handbook of Adhesive Technology*, уредник A. Pizzi и K.L. Mittal. (New York: Marcel Dekker, Inc., 2003).

²⁶⁰ исто.

структуру) између полимерних ланаца, те након тога више се не могу ни топити ни растварати. Природни адхезиви су најчешће растворени у води, те се током испаравања слободне течности врши њихова апликација.²⁶¹ У дрвној индустрији за формирање композитних производа на бази дрвета данас се најчешће примењују синтетички термореактивни адхезиви и то пре свега адхезиви на бази формалдехида - аминокластичне и фенолне смоле и изоцијанати, док се епокси примењује у мањој мери. Улога термопластичних полимера је важна за композитне производе дрвета и пластике (енгл. *wood plastic composite* – WPC), где су они пластична „матрица“ у коју су утопљене дрвне честице, као армирајућа компонента композита. Термопластични адхезиви се греју до тачке омекшавања, након чега се топе, повећањем температуре смањује се молекулска тежина полимера и они постају лакши за наношење на адхерент, али се тиме продужава време њиховог везивања и очвршћавања.²⁶² У Табели 15 приказана је подела синтетичких адхезива.

Табела 15. Подела синтетичких адхезива²⁶³

Тип	Фамилија	Типски представници
Термореактивни адхезиви	Амино-адхезиви	Уреа-формалдехидни (UF) Меламин-формалдехидни (MF) Меламин-уреа-формалдехидни (MUF),
	Фенолни адхезиви	Фенол-формалдехидни (PF) Резорцинол-формалдехидни (RF) Фенол-резорцинол-формалдехидни (PRF)
	Полиизоцијанати и полиуретански адхезиви	Метилен дифенил диизоцијанатни (MDI) Емулзиони полимеризовани изоцијанат (EPI)
	Епоксидни адхезиви	Бисфенол-А епоксидна смола
	Еластомерни адхезиви	Стирен-бутадиен каучук (SBR)
Термопластични адхезиви	Поливинили адхезиви	Поли(винил-ацетатни) (PVAc) Поли(винил-алкохолни) (PVA)
	Термотопиви адхезиви	Етилен-винил-ацетатни (EVA)

Према Фрихату (Frihart) у зависности од функционалних својстава и начина примене адхезиви се могу поделити у три употребне класе:²⁶⁴

1. структурни (конструкциони),
2. полу-структурни,
3. неструктурни адхезиви.

Структурни (конструкциони) адхезиви који се примењују за формирање елемената структуре и имају способност да издрже велика напрезања без деформација, полу-структурни

²⁶¹ исто.

²⁶² Charles R., Frihart, „Wood adhesion and adhesives“ у *Handbook of wood chemistry and wood composites*, ed. Rowell, Roger M. (Boca: CRC Press, 2005), chap. 9.

²⁶³ Преузета и модификована табела из А. Н. Conner, „Wood: adhesives.“, у *Encyclopedia of materials: science and technology*, (Amsterdam; New York: Elsevier Science, Ltd., 2001), 9583-9599.

²⁶⁴ Ова подела се налази код Charles R., Frihart, „Wood adhesion and adhesives“ у *Handbook of wood chemistry and wood composites*, ed. Rowell, Roger M. (Boca: CRC Press, 2005), chap. 9., али је објашњење преузето из предавања „Adhezija i adhezijски proizvodi“ – Prof.dr.sc. Vera Kovačević

адхезиви и неструктурни адхезиви који не могу да издрже велика напрезања, деградирају током времена и најчешће се користе за адхезију лаких материјала. За структурну и полуструктурну употребу није пожељно примењивати термопластичне адхезиве (поливинил-ацетате) због њихове карактеристике да омекшавају под временом и оптерећењем, те се тиме смањује њихова носивост. У табели 16 приказана је категоризација адхезива за дрвене конструкције класификована према начину и месту примене.

Табела 16. Класификација адхезива за дрвене конструкције према начину и месту примене²⁶⁵

Употребна класа	Место примене	Адхезив
Структурни	Производи изложени спољашњим утицајима средине (дугорочна изложеност потапању и сушењу)	PF RF PRF MF ЕPI/Изоцијанати
	Производи изложени спољашњим утицајима средине (краткорочна изложеност потапању и сушењу)	MUF Изоцијанати
	Производи који се примењују у унутрашњим срединама (краткорочна изложеност високој влажности)	UF
Полу-структурни	Производи изложени спољашњим утицајима средине (краткорочна изложеност потапању и сушењу)	Умрежени PVAc Полиуретани
Неструктурни	Производи који се примењују у унутрашњим срединама – ентеријеру (краткорочна изложеност високој влажности)	PVAc Еластомери Hot-melts Природни адхезиви (животињски, скробни, соја)

4.4.2.1 Адхезиви на бази формалдехида

Термореактивни адхезиви су широко примењени у дрвној индустрији због низа својих позитивних карактеристика. Они чине око 95% светске потрошње адхезива у дрвној индустрији. Један од најчешћих адхезива за производе на бази дрвета представљају производи из групе адхезива настали реакцијама поликондензације формалдехида и других агенаса – меламина и урее (аминопласти), фенола и резорцинола (фенопласти), или комбинацијом више поменутих. „Смоле које се налазе на тржишту представљају реактивне интермедијере, код којих је реакција поликондензације заустављена на таквом степену да су још увек растворљиве и отопиве. Углавном се испоручују у течном стању и састоје се од линеарних и разгранатих олигомера и полимера у облику водених раствора, емулзија или дисперзија. У таквом стању их крајњи прерађивач купује и приликом обликовања производа, током желирања и очвршћавања, оне се трансформишу у тродимензионалну, умрежену структуру, која је надаље неотопива и нерастворљива.“²⁶⁶

²⁶⁵ А. Н. Conner, „Wood: adhesives.“, у *Encyclopedia of materials: science and technology*, (Amsterdam; New York: Elsevier Science, Ltd., 2001), 9583-9599.

²⁶⁶ Ивана, Гавриловић-Грмуша, *Познавање материјала. Део 1, Адхезиви у дрвној индустрији* (Београд: Универзитет, Шумарски факултет, 2019), стр.114.

Аминопластичне смоле или аминопласти представљају кондензационе производе амина и алдехида.²⁶⁷ Ови адхезиви су најчешће употребљена група адхезива у дрвној индустрији, а посебно аминок-једињења уреа и меламин,²⁶⁸ пре свега због доброг односа цене и карактеристика адхезива. Формалдехид је алдехид у овим реакцијама, али се све више тежи да се замени неким другим, еколошким једињењем. Првенствено се ови адхезиви користе у индустрији намештаја, односно за производњу плоча иверица, влакнатица средње и велике густине, иверица од оријентисаног иверја (OSB), фурнирских и столарских плоча и грађе од унакрсно ламинираног дрвета (CLT).

Уреа-формалдехид (UF)

Уреа-формалдехид (UF) представља најчешће примењени адхезив за производњу фурнирских плоча које се користе у ентеријеру, пре свега због своје ниске цене и добрих карактеристика. Предности уреа-формалдехида као адхезива су: висока реактивност у врелој преси (погодан је за кратко време пресовања 4-5 s/mm дебљине плоче на бази дрвета), брза апликација, брзо достиже чврстоћу, добра растворљивост у води, безбојна линија лепљења, добра чврстоћа у сувим условима, адхезив није горив.²⁶⁹ Његови недостаци су слаба отпорност на влагу и емисија формалдехида из готове плоче, који настају као последица реверзибилног процеса настајања метиленских веза.²⁷⁰ Недостаци UF адхезива могу се у одређеној мери превазићи додатком меламинa и стварањем меламин-уреа-формалдехидне (MUF) смоле.

Његова апликација врши се наношењем адхезива у течном стању – у воденом раствору или дисперзији, или се распршују кроз спреј у виду ситних честица. Осим у виду водене емулзије, може се наћи и у виду сувог праха, као и у виду двокомпонентних и једнокомпонентних система. Двокомпонентни систем подразумева адхезивну емулзију или прах као компоненту А, а катализатор као компоненту Б, док је код једнокомпонентних система адхезив већ спрашен.²⁷¹ У процесу очвршћавања адхезив формира тродимензионалну мрежасту структуру и није га могуће поново топити, али је у највећем броју случајева могуће поновно растварање у воденом раствору. Управо ово представља његов највећи недостатак. Због способности да се адхезив поново раствори, избегава се његова примена у влажним условима средине као и у средина изложеној води. Предност апликације уреа-формалдехидног адхезива у дрвној индустрији огледа се у високој реактивности и њиховој апликацији у течном стању, кроз водени раствор, што олакшава процес производње.²⁷²

Веома важну улогу у синтези UF адхезива има молски однос уреа и формалдехида који улазе у реакцију поликондензације (енгл. Molar Ratios F/U). У циљу смањења емисије формалдехида током експлоатације производа, молски однос формалдехида према уреи (F/U) константно је смањиван током дужег низа година. Разлог због чега се у UF смоли налази одређена количина уреа која није реаговала јесте њено додавање у каснијим фазама синтезе UF смоле зарад снижавања молског односа формалдехида према уреи, у циљу задовољавања

²⁶⁷ исто, 115.

²⁶⁸ Dunky, Manfred. „Adhesives in the Wood Industry“ у *Handbook of Adhesive Technology*. Ур. А. Pizzi / K.L. Mittal. (New York: Marcel Dekker, Inc., 2003), chap. 47.

²⁶⁹ Charles R., Frihart, „Wood adhesion and adhesives“ у *Handbook of wood chemistry and wood composites*, ed. Rowell, Roger M. (Boca: CRC Press, 2005), chap. 9;

Ивана, Гавриловић-Грмуша, *Познавање материјала. Део 1, Адхезиви у дрвној индустрији* (Београд: Универзитет, Шумарски факултет, 2019), стр.115.

²⁷⁰ Ивана, Гавриловић-Грмуша, *Познавање материјала. Део 1, Адхезиви у дрвној индустрији* (Београд: Универзитет, Шумарски факултет, 2019), стр.126.

²⁷¹ исто, 126.

²⁷² Charles R., Frihart, „Wood adhesion and adhesives“ у *Handbook of wood chemistry and wood composites*, ed. Rowell, Roger M. (Boca: CRC Press, 2005), chap. 9; .

прописа који се тичу дозвољене емисије слободног формалдехида.²⁷³ Молски однос F/U утиче на: степен емисије формалдехида током производње и експлоатације, механичке и физичке особине готовог производа – утезање и бубрење, као и осетљивост на влажне услове средине, степен очвршћавања адхезива у процесу производње и сл. Моларни однос као и количина моларне масе у адхезиву има утицај и на друге факторе при формирању производа, а међу којима су утицај на вискозитет адхезива, пенетрацију у слоју дрвета, дистрибуцију адхезива по слоју на који се наноси, растворљивости адхезива у води и сл.²⁷⁴

Меламин формалдехид (MF) и меламин-уреа формалдехид (MUF)

Адхезиви на бази меламина имају изузетно високу водоотпорност те се употребљавају за: формирање фурнирских плоча чија је примена у екстеријеру, израду декоративних ламината којима се облажу плоче и елементи од дрвета и модификовање UF адхезива ради побољшања њихове водоотпорности. Осим високе водоотпорности предности овог адхезива су: његова већа отпорност на топлоту, могућност очвршћавања и на нижим температурама; стварање отпорне површине; могућност очвршћавања применом топлоте и без киселог катализатора, што није могуће код UF адхезива.²⁷⁵

Највећи недостатак ових адхезива је превелика цена, која је условљена ценом меламина. Из овог адхезива произашао је и адхезив меламин-уреа-формалдехид (MUF), који такође има добру водоотпорност, али је његова цена доста нижа, због смањења утrophка меламина и додатка урее. Квалитет поменутог адхезива и његова својства, а посебно степен хидроскопности зависе од количине и моларног односа меламина и урее. Додатком урее ствара се MUF адхезив даје задовољавајућу водоотпорност за екстеријерне услове по знатно нижој цени од чистог MF адхезива.

4.4.2.1.2 Фенолне смоле

Фенол-формалдехид (PF)

„Фенол-формалдехидни (PF) адхезив има широку примену у композитима на бази дрвета због своје одличне издржљивости, а која је последица добре адхезије за дрво, високе чврстоће полимера и одличне стабилности адхезива.“²⁷⁶ Ови адхезиви имају потпуну отпорност на хидролизу и као такви користе се у производима који захтевају отпорност на воду и влажне услове средине.²⁷⁷

Њихова најчешћа употреба је за производњу водоотпорних плоча иверица и влакнатица (OSB и MDF), али и фурнирских плоча које су изложене спољној средини. Предности PF адхезива осим отпорности на воду су: и у ниска емисији формалдехида током експлоатације производа, може да очвршћава и само помоћу топлоте, PF емулзија је стабилнија од UF емулзије (време складиштења јој је 3-6 месеци, док је UF емулзији 20-30 дана). Недостаци овог адхезива су: нешто веће време пресовања које је потребно за очвршћавање производа у процесу производње, у односу на време које је потребно UF и MUF адхезиву; релативно висока температура очвршћавања (160°C), што повећава енергетски утrophак и смањује продуктивност; скупљи су око два пута у односу на UF адхезив али имају и мањи естетски квалитет због тамних линија у слоју лепка, које су након очвршћавања адхезива видљиве по

²⁷³ Ивана, Гавриловић-Грмуша, *Познавање материјала. Део 1, Адхезиви у дрвној индустрији* (Београд: Универзитет, Шумарски факултет, 2019), стр.124.

²⁷⁴ Исто, 126.

²⁷⁵ Исто, 126.

²⁷⁶ Charles R., Frihart, „Wood adhesion and adhesives“ у *Handbook of wood chemistry and wood composites*, ed. Rowell, Roger M. (Boca: CRC Press, 2005), chap. 9

²⁷⁷ Dunky, Manfred. „Adhesives in the Wood Industry“ у *Handbook of Adhesive Technology*. Ур. А. Pizzi / K.L. Mittal. (New York: Marcel Dekker, Inc., 2003), chap. 47.

спољним ивицама плоче, као и могућност промене боје завршних листова фурнира. Промена боје спољашњих листова фурнира настаје као последица топлог пресовања при аплицирању адхезива, али и топлог складиштења плоча током очвршћавања у постпроизводном циклусу.²⁷⁸

Променом катализатора и моларног односа фенола и формалдехида који улазе у реакцију, може се створити читав низ PF адхезива са различитих карактеристика.²⁷⁹ „Мешањем UF и PF адхезива у односу 80:20% добијају се адхезиви знатно бољих својстава него што их имају чисти UF адхезиви, а повољније цене од чистих PF адхезива.“²⁸⁰ Кокондензацијом фенола, урее и формалдехида настаје фенол-уреа-формалдехидни (PUF) адхезив. На тај начин формирамо адхезив који има нижу емисију формалдехида, нижи вискозитет, краће време потребно за очвршћавање и економски приступачнији адхезив.²⁸¹

Дунки (Dunky) сматра да се додатком урее разређује фенол-формалдехидна матрица, и тиме утиче на смањење квалитета адхезива, односно што је већи удео урее у адхезиву, то се више смањује квалитет композитног производа. Такође он наводи да је неопходно наћи адекватни однос моларних маса урее и фенола у адхезиву.²⁸²

Резорцинол-формалдехидни (RF) и фенол-резорцинол-формалдехидни (PRF) адхезиви

Резорцинол-формалдехидни (RF) адхезив један је од најквалитетнијих адхезива који се примењује у дрвној индустрији. Овим адхезивом формирају се врло чврсте лепљене везе, које одржавају своју постојаност и у најтежим условима изложености. Предност формалдехидног адхезива је пре свега чврста веза, добрих карактеристика, осим тога, применом овог адхезива добија се влаго- и водоотпорна веза, отпорна на гљивице, инсекте и друге микроорганизме који се могу наћи у дрвету. Ови адхезиви за разлику од UF адхезива немају проблем са емисијом формалдехида. Ипак, њихов недостатак је висока цена резорцинола, али и естетски недостатак у виду тамне линије лепљења која утиче на естетику крајњег производа.

Примена RF адхезива је за формирање грађевинских конструктивних производа велике носивости, пре свега лепљених гредних носача великог распона (LLD, CLT, LVL), различитих облика и великих димензија попречног пресека. Његову примену налазимо и у формирању фурнирских плоча намењених за све климатске услове, а код којих се захтева велика чврстоћа и постојаност лепљене везе.²⁸³

Додатком резорцинола у фенол-формалдехидни адхезив утиче се на убрзање везивања адхезива, односно смањује се време које је потребно за апликацију адхезива и формирање композитног производа. Фенол-резорцинол-формалдехидне и резорцинол-формалдехидне смоле употребљавају се у ситуацијама када је неопходно брзо везивање адхезива на собној температури, или за формирање производа великих дебљина слојева, код којих је онемогућено равномерно преношење топлоте кроз слојеве да би се покренуо поступак адхезије (нпр. лепљено ламелирано дрво).²⁸⁴

²⁷⁸ Исто.

²⁷⁹ А. Н. Conner, „Wood: adhesives.“, у *Encyclopedia of materials: science and technology*, (Amsterdam; New York: Elsevier Science, Ltd., 2001), 9583-9599.

²⁸⁰ Ивана, Гавриловић-Грмуша, *Познавање материјала. Део 1, Адхезиви у дрвној индустрији* (Београд: Универзитет, Шумарски факултет, 2019), стр.149.

²⁸¹ Исто, 150.

²⁸² Dunky, Manfred. „Adhesives in the Wood Industry“ у *Handbook of Adhesive Technology*. Ур. А. Pizzi / K.L. Mittal. (New York: Marcel Dekker, Inc., 2003), chap. 47.

²⁸³ Ивана, Гавриловић-Грмуша, *Познавање материјала. Део 1, Адхезиви у дрвној индустрији* (Београд: Универзитет, Шумарски факултет, 2019), стр.141.

²⁸⁴ Charles R., Frihart, „Wood adhesion and adhesives“ у *Handbook of wood chemistry and wood composites*, ed. Rowell, Roger M. (Boca: CRC Press, 2005), chap. 9 и

Употреба PRF адхезива огледа се и у производњи прајмера (HMR - hydroxymethylated resorcinol), чијом употребом се смањује проценат деламинације у композитном производу.²⁸⁵

4.4.2.2 Изоцијанатни адхезиви

Изоцијанатни адхезиви представљају групу адхезива која има примену у индустрији композитних производа на бази дрвета, а посебно у производњи слојевитих плоча и ламелираних производа.²⁸⁶ Највише се примењују за лепљење производа који су намењени за излагање спољним условима средине, управо због њиховог доброг својства влаге и водоотпорности. Ова група адхезива реагује са групама која у себи садрже активне водоникове атоме, као што су аминоксидне и хидроксилне групе.²⁸⁷

Најзаступљенији изоцијанатни адхезиви за адхезију слојевитих плоча су: поли(дифенилметан-4,4'-диизоцијанат) (PMDI) (Polymeric Diphenylmethane Diisocyanate), полиуретани и емулзиони полиизоцијанати (EPI).²⁸⁸

Карактеристика PMDI адхезива је веома брза пенетрација у дрво и формирање веома чврстих веза, што је последица његове мале молекулске масе.²⁸⁹ Истраживања су показала у односу на UF адхезиве могу пенетрирати чак пет до десет пута дубље у структуру дрвета, а да при томе не дође до његовог оштећења. Они не пенетрирају само у макроскопске шупљине (ћелијске лумене), већ продиру и у полимерну структуру дрвета (ћелијске зидове), чиме се остварају боље и јаче везе између дрвета и адхезива, и чиме се побољшавају механичка својства производа.²⁹⁰ Додатком посебних адитива у адхезив може се убрзати процес производње, односно утицати на убрзавање процеса очвршћавања адхезива или смањити потребна температура пресовања. Као предност PMDI у односу на друге адхезиве, а посебно на UF истиче се боља реактивност адхезива, већа чврстоћа лепљене везе, количински мања потрошња адхезива, добра стабилност при складиштењу, отпорност композитног производа на влажне услове средине, као и адхезија без формалдехида. Ипак, ови адхезиви имају велике недостатке у односу на друге адхезиве, пре свега у односу на UF адхезив, а пре свега то је неопходна употреба емулгатора или специјалних система за лепљење, изузетни захтеви за контролисану производњу како би се смањили утицаји токсичних испарења на раднике у индустрији, проблем велике адхезије на све материјале, због чега се лепе и за металне плоче пресе, али и његова виша цена у односу на друге адхезиве.²⁹¹ Дунки наводи и да се сам PMDI не може употребљавати за производњу фурнирских плоча, већ да се препоручује додаток екстендера или мешавина са другим адхезивима.

Осим PMDI у примени је и емулзиони полимеризовани изоцијанат (*EPI - Emulsion Polymer Isocyanates*) који представља двокомпонентни адхезив. Предност овог адхезива огледа се у способности брзог, али и хладног очвршћавања, високој флексибилности адхезива, светлој боји лепљене везе што нема негативан утицај на естетске перформансе производа, одличној

А. Н. Conner, „Wood: adhesives.“, у *Encyclopedia of materials: science and technology*, (Amsterdam; New York: Elsevier Science, Ltd., 2001), 9583-9599.

²⁸⁵ Charles R., Frihart, „Wood adhesion and adhesives“ у *Handbook of wood chemistry and wood composites*, ed. Rowell, Roger M. (Boca: CRC Press, 2005), chap. 9.

²⁸⁶ А. Н. Conner, „Wood: adhesives.“, у *Encyclopedia of materials: science and technology*, (Amsterdam; New York: Elsevier Science, Ltd., 2001), 9583-9599.

²⁸⁷ исто, 9583-9599.

²⁸⁸ Ивана, Гавриловић-Грмуша, *Познавање материјала. Део 1, Адхезиви у дрвној индустрији* (Београд: Универзитет, Шумарски факултет, 2019), стр.142.

²⁸⁹ исто, 142.

²⁹⁰ Dunky, Manfred. „Adhesives in the Wood Industry“ у *Handbook of Adhesive Technology*. Ур. А. Pizzi / K.L. Mittal. (New York: Marcel Dekker, Inc., 2003), chap. 47.

²⁹¹ Исто.

водоотпорности везе али и отпорности на топлоту.²⁹² Ипак, као и PMDI, овај адхезив карактерише његова висока цена, чиме се смањује његова примена у пракси.

ЕРІ адхезиви се ујупотребљава за израду плоча, остваривање веза између пластичне и дрвене површине, као и других материјала са дрветом (лепљење дрвета и метала), или формирање I-носача од OSB плоча, израду носећих конструкција и сл.²⁹³

4.4.2.3 Епоксидни адхезиви

Адхезиви на бази епоксидне смоле имају способност везивања не само дрвета, већ и других материјала попут пластике, керамике, метала, бетона и других површина. Карактерише их изузетна отпорност на факторе спољне средине и добра способност приањања за површину. Предност ових адхезива је могућност њихове апликације и на собним температурама. Њихова сновна карактеристика јесте то што им је садржај суве супстанце 100%, односно, не садрже раствараче који би испаравали током очвршћавања, због чега се веома мало утежу.

Епоксидни адхезиви су обично двокомпонентни адхезиви, код који је „А“ компонента епоксидна смола, а „Б“ компонента катализатор са пуниоцем. Проблем код ових адхезива је токсичност, пошто су обе компоненте веома реактивне хемикалије. Пуниоци који се додају имају вишеструку улогу. Уколико је адхерент порозан материјал, као што је дрво, пуниоци се додају да би спречили брзу пенетрацију адхезива у дрво и настанак „гладне“ линије лепљења. Такође се њиховим додавањем може снизити цена адхезива, што је значајно када се има у виду да су ови адхезиви веома скупи. Додатак пуниоца повећава и отпорност на топлоту.

Епоксидни представља структурни лепак, ипак, користи се више за попуњавање рупа, пукотина жљебова и оштећених структура, него за формирање композитних плоча на бази дрвета због његове цене и ограничене трајности. Везе у дрвету формиране помоћу епоксидне смоле су врло јаке и издржљиве, али се и поред тога оне не сматрају трајним везама у свим условима. Проблеми могу да се јаве у влажним условима, а већина стандарда ограничава оптерећења која се могу пренети везама формираним епоксидним адхезивом. Велики број тестова показује да у дрвеним композитима код којих је епоксид примењен као адхезив, проблем настаје у међуфазном слоју. Овај проблем се може смањити применом прајмера пре наношења адхезива.²⁹⁴

И поред њихове велике цене, данас су истраживања све више усмерена на развој епоксидног адхезива и његову модификацију, како би се створио еколошки прихватљивији лепак. У циљу тога истраживања су усмерена на испитивање чврстоће везе епоксидних лепкова добијених модификацијом и њихову примену за конструктивне елементе на бази дрвета, а пре свега фурнирске и LVL плоче, CLT носаче и сл.

4.4.2.4 Термотопиви адхезиви

Термотопиви адхезиви (енгл. *Hot Melts*) су чврсти адхезиви које се топе на повишеним температурама, а потом растопљени наносе на супстрат. Хлађењем долази до очвршћавања адхезива, чиме се успостављају везе између слојева. Ови адхезиви могу више пута топити након очвршћавања, односно могу бити део реверзибилног процеса. Њихова предност огледа се у томе што не садрже органске раствараче. Ови адхезиви се лако аплицирају, а након

²⁹² Ивана, Гавриловић-Грмуша, *Познавање материјала. Део 1, Адхезиви у дрвној индустрији* (Београд: Универзитет, Шумарски факултет, 2019), стр.146.

²⁹³ Charles R., Frihart, „Wood adhesion and adhesives“ у *Handbook of wood chemistry and wood composites*, ed. Rowell, Roger M. (Boca: CRC Press, 2005), chap. 9.

²⁹⁴ Charles R., Frihart, „Wood adhesion and adhesives“ у *Handbook of wood chemistry and wood composites*, ed. Rowell, Roger M. (Boca: CRC Press, 2005), chap. 9.

хлађења стварају се висококвалитетне и чврсте везе, чак и са материјалима који се тешко везују – полиетиленима и полипропиленима. Њихова предност огледа се и у способности веома доброг пријањања на различите подлоге, без употребе прајмера. Недостатак је тај што термопластични адхезиви имају ниску отпорност на топлоту, нису постојани на повишеним температура, те при излагању топлоти губе чврстоћу и може доћи до њихове деградације. Осим тога, при великим оптерећењима може доћи до тзв. „хладног течења“ (пузања, развлачења) адхезива, што може бити додатно погоршано ако је веза изложена температурама.²⁹⁵

Кључна компонента у термотопивим адхезивима је основни полимер и од њега зависи и температура наношења ових адхезива. Полимер адхезиву даје чврстоћу, кохезију и механичке особине. Кополимеризацијом етилена и винил-ацетата настаје EVA кополимерни топиви адхезив, који је најзаступљенији у индустрији (80%). Адхезиви коју у себи имају винил-ацетатне групе имају могућност да обезбеде добру адхезију са било којим материјалом. Повећањем садржаја винил-ацетата долази до повећања адхезивних способности, отпорности на влагу и флексибилности материјала, али и повећања цене адхезива и потребног времена за апликацију адхезива у процесу производње. Недостатак винил-ацетатне групе је ниска отпорност на високе температуре, чиме се ограничава употреба производа у којима је употребљен EVA адхезив.²⁹⁶

Кополимерни адхезив на бази етилен-акрилне киселине (Ethylene–acrylic acid ester copolymers - ЕАА) имају бољу отпорност на високе температуре, и изузетну флексибилност при ниским температурама. Полиамиди имају велику способност кохезије и отпорни су на топлоту, као и на растворе на уљаној и воденој бази. Њихову предност представља и изузетна отпорност и јачина везе, али је главни недостатак висока цена и подложност карбонизацији на високим температурама.²⁹⁷

Термотопиви адхезиви се највише користе за лепљење фолија, декоративних трака и фурнира на уже стране плоча (кантовање), монтажна лепљења и за спајање племенитих листова фурнира (проточно машинско спајање).²⁹⁸

Ови адхезиви греју се до тачке омекшавања, након чега постају течни, повећањем температуре смањује се молекулска маса полимера и они постају лакши за наношење на супстрат, али се тиме продужава време њиховог везивања и очвршћавања. Вискозитет ових адхезива спречава њихову превелику апсорбцију у структуру дрвета, али не можемо рећи да она уопште не постоји.²⁹⁹

Недостатак већине термотопивих адхезива је токсичност мономера изоцијанида који учествује у реакцији. Због наведеног, складиштење и апликација ових адхезива мора бити у строго контролисаним условима.

4.4.3 Избор адхезива и апликација

Композитни производи на бази дрвета који се данас могу наћи на тржишту најчешће су формирани од дрвета као супстрата и адхезива. Квалитет ових производа условљен је двема поменути компонентама и низом променљивих које оне са собом носе, а које су у директној

²⁹⁵ Dunky, Manfred. „Adhesives in the Wood Industry“ у *Handbook of Adhesive Technology*. Ур. А. Pizzi / K.L. Mittal. (New York: Marcel Dekker, Inc., 2003), chap. 47.

²⁹⁶ Исто.

²⁹⁷ Исто.

²⁹⁸ Ивана, Гавриловић-Грмуша, *Познавање материјала. Део 1, Адхезиви у дрвној индустрији* (Београд: Универзитет, Шумарски факултет, 2019), стр.109.

²⁹⁹ Charles R., Frihart, „Wood adhesion and adhesives“ у *Handbook of wood chemistry and wood composites*, ed. Rowell, Roger M. (Boca: CRC Press, 2005), chap. 9.

вези са процесом лепљења композитног производа. Све то утиче на квалитет и механичке особине финалног композитног производа. Фрихарт табеларно представља преглед ових променљивих (Табела 17) који се односи: посебно на сваку компоненту која улази у производни процес, на сам процес производње, на третман производа након производње и његову даљу употребу.

Табела 17. Варијабле које утичу на процес лепљења и квалитет финалног композитног производа³⁰⁰

Фактори својстава адхезива	Фактори својстава дрвета	Фактори примене адхезива	Фактори услова експлоатације
Тип	Врста	Количина адхезива	Чврстоћа
Вискозитет	Густоћа	Дистрибуција адхезива	Модул смицања
Расподела молекулске масе	Садржај влажности	Релативна влажност	Отпорност на утезање и бубрење
Молски однос реактана	Раван сечења: радијално, тангенцијално, трансверзално, комбиновано	Температура пресовања	Течење
Брзина очвршћавања	Срце или бељика	Отворено време наношења	Процент грешака у дрвету
Процент суве супстанце	Младо или зрело дрво	Затворено време наношења	Тип отказа
Катализатор	Рано или касно дрво	Притисак пресовања	Суво или мокро
Мешавина компоненти	Реакцијско дрво	Пенетрација адхезива	Модули еластичности
Лепљивост	Угао влакана	Гас	Температура
Пунилац	Порозност	Време пресовања	Отпорност на хидролизу
Систем растворљивости	Рапавост површине	Предтретмани	Отпорност на топлоту
Старост	Оштећења приликом сушења	Постретмани	Биолошка отпорност: фунге, бактерије, инсекти, гљивице
рН	Оштећење током машинске обраде	Одржавање температуре	Завршница
Пуфровање	Упрљаност, контаминираност		Отпорност на UV зрачење
	Екстрактивне супстанце		
	рН		
	Пуфровање		
	Хемијска површина		

³⁰⁰ Frihart, Charles R., „Wood adhesion and adhesives“ у *Handbook of wood chemistry and wood composites*, ed. Rowell, Roger M. (Boca: CRC Press, 2005), chap. 9.

Већина аутора приликом разматрања адхезива говори само о две компоненте које улазе у финални производ – дрво и адхезив. Процеси производње, поступци адхезије и услови у којима се она одвија, као и проблеми који могу настати, откази и ломови разматрани су код Фрихарта, Дункија, Конера (Conner), Милера (Miller) и др.³⁰¹ Најчешћа оштећења композитног производа формираног применом адхезива, а која као резултат имају губитак носивости су преломи или раслојавања између слојева, а према ASTM стандарду могу бити међуфазни, кохезивни или супстратни ломови.³⁰² Кохезивни ломови (енгл. *cohesive failure*) – су преломи који настају у слоју лепка, преломи који настају у слоју супстрата су они који настају у самом слоју дрвета (енгл. *substrate failure*), док је лом у међуфазном слоју (енгл. *interphase failure*) у слоју на коме се лепак држи, слој контактне површине адхезива и дрвета.³⁰³ До ових ломова долази приликом прекорачења напона у неком од слојева у вези.

Додавањем још једне компоненте, као што су полимери армирани влакнима, добијамо нови композитни материјал на бази дрвета, при чему се јавља још један сет променљивих које утичу на производњу и употребу финалног производа. У оквиру претходног поглавља разматрани су композитни производи на бази дрвета, полимерни материјали ојачани влакнима (FRP) и адхезиви. Мали број аутора разматра наведену тему, а један од њих је Фрихарт, који ово разматра кроз процес квашења супстрата и пенетрације адхезива. Он наводи да одређени материјали, а првенствено материјали на бази пластике имају низак површински напон што доводи до проблема квашења супстрата, односно проблема разливања и апсорпције адхезива. На одређеним супстратима не долази до њиховог квашења, односно натапања лепком, већ се он завршава у виду капљица на површини супстрата. Већина адхезива који се користе за производе на бази дрвета су на воденој бази, високог површинског напона, и немају добро приањање на FRP. Како би се остварило боље приањање адхезива на супстрат, приступа се додавању сурфактаната (тензида) – површински активних материја, који теже да сниже површински напон воде у односу на граничну површину са супстратом (FRP-ом). Осим тога, приликом примене многих материјала на бази пластике, приступа се њиховим површинским третманима у виду оксидације пламеном или коронском пражњењу, како би се повећао поларитет и површинска енергија, а у циљу остваривања боље везе са адхезивом. Осим поменутог, приликом везивања FRP-а важну улогу има и вискозитет адхезива, где је уочено боље пријањање адхезива у течном агрегатном стању.³⁰⁴ У наредном поглављу биће приказана анализа претходних истраживања композитних производа на бази дрвета ојачаних полимерима армираним влакнима са аспекта адхезива.

³⁰¹ Charles R., Frihart, „Wood adhesion and adhesives“ у *Handbook of wood chemistry and wood composites*, ed. Rowell, Roger M. (Boca: CRC Press, 2005), chap. 9.; Dunky, Manfred. „Adhesives in the Wood Industry“ у *Handbook of Adhesive Technology*. Ур. А. Pizzi / K.L. Mittal. (New York: Marcel Dekker, Inc., 2003), chap. 47.; А. Н. Conner, „Wood: adhesives.“, у *Encyclopedia of materials: science and technology*, (Amsterdam; New York: Elsevier Science, Ltd., 2001), 9583-9599; Robert, Miller S., „Adhesives for Building Construction.“ Погл. 41 у *Handbook of Adhesives*, уредник Irving Skeist, (New York: Chapman & Hall, 1990).

³⁰² ASTM International, *D 907-00, Standard Terminology of Adhesives*, (ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000a) цитиран код Charles R., Frihart, „Wood adhesion and adhesives“ у *Handbook of wood chemistry and wood composites*, ed. Rowell, Roger M. (Boca: CRC Press, 2005), chap. 9.

³⁰³ Исто.

³⁰⁴ Charles R., Frihart, „Wood adhesion and adhesives“ у *Handbook of wood chemistry and wood composites*, ed. Rowell, Roger M. (Boca: CRC Press, 2005), chap. 9.

4.4.4 Испитивање примене различитих врста адhezива у композитима на бази дрвета и FRP-а

Правилан одабих адhezива примаран је у формирању композитних материјала како би се формирала веза између слојева различитих материјала, и врло често ово може бити проблем који ће довести до деформација у композиту. Фактори који ће утицати на јачину везе у композитном производу на бази дрвета и FRP-а су тип дрвета, тип синтетичких влакана, садржај воде у дрвету, обрада површине на коју се наноси адhezив, перформансе употребљених лепкова, употреба прајмера, величина и смер примењене силе као и изложеност елемента утицајима у окружењу. Неке стандардне врсте адhezива које се примењују као матрица у FRP композитима приказане су у поглављу 4.1.1.1 Полимерна матрица. У оквиру даљег рада биће приказана теоријска испитивања различитих врста адhezива и њихове примене са синтетичким влакнима на бази стакла, карбона или кевлара.

Роленс (Rowlands) и др.³⁰⁵ су испитивали чврстоћу на смицање композитног материјала направљеног од дрвета и полимера армираног влакнима, и при испитивању су користили десет различитих адhezива и седам различитих врста влакана на бази стакла, кевлара или графита. Истраживање је показало најбоље резултате чврстоће на смицање код узорака у којима су употребљена стаклена влакна, а као адhezив епоксидни, а потом резорцинол-формалдехидни (RF) који је показао добро понашање са стакленим влакнима и фенол-резорцинол формалдехидни (PRF).

Лопез-Енидо (Lopez-Anido) и др.³⁰⁶ анализирали су формирање дрвених панела ојачаних полимером армираним стакленим влакнима са две врсте адhezива – фенол-резорцинол формалдехидним (PRF) и винил-естарском смолом са и без хидроксиметилованог резорцинола (hydroxymethylated resorcinol – HMR). Истраживања су показала да је чврстоћа на смицање боља у сувим условима него у срединама које су изложене води и влази. Такође, ово истраживање показало је да је и винил-естарска смола са HMR-ом способна да створи јаке и издржљиве везе између дрвета и FRP-а. Употреба RF (resorcinol-formaldehyde) или HMR агенса као прајмера на слоју дрвета приликом спајања епоксида FRP-а и дрвета, доводи до ојачања везе између ова два слоја. Анализе спроведене у студији Давалос (Davalos) и др.³⁰⁷ показују да се посебно додатком HMR -а ојачала веза и смањио постотак деламинације између ова два слоја. Такође, HMR се добро показао и у цикличним променама атмосферских услова (суво/мокро). Гарднер (Gardner) и др. наводе да се према њиховом истраживању једино RF показао добро у сувим и влажним срединама, као у цикличним променама услова, а да су сви остали тестирани адhezиви показали добро понашање само у сувим условима.

Испитивањем трајности и чврстоће на смицање слојевите дрвене плоче ојачане полимером армираним стакленим влакнима у фенолној матрици по спољним станицама плоче бавили су се Давалос и др.³⁰⁸ На основу експерименталне анализе утврђен је проценат деламинације³⁰⁹ плоча формираних помоћу модификованог фенол-резорцинол-формалдехидног адhezива (PRF - phenolmodified resorcinol formaldehyde) и резорцинол

³⁰⁵ R.E. Rowlands, R.P. Van Deweghe, T.L. Laufenberg, и G.P. Krueger, „Fiber-reinforced wood composites“, *Wood and fiber Science* 18 (1)(1986): 39-57.

³⁰⁶ Lopez-Andio, R., Gardner, D. J. and Hensley, J. L. 2000. Adhesive Bonding of Eastern Hemlock Glulam Panels with E-Glass/Vinyl Ester Reinforcement, *Forest Products Journal*, 50(11/12): 43–47. citirano kod Lyons, Jed S. и Mallik R. Ahmed. 2005. Factors Affecting the Bond Between Polymer Composites and Wood, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* (24): 407.

³⁰⁷ Julio F. Davalos, и Pizhong Qiao, „Fracture Mechanics Methods for Interface Bond Evaluations of Fiber-Reinforced Plastic/Wood Hybrid Composites“, у *Handbook of Adhesive Technology: Second Edition, Revised and Expanded*, уредник А. Pizzi и К. L. Mittal, (Basel: Marcel Dekker, Inc., 2003).

³⁰⁸ Julio F. Davalos, Pizhong Qiao, и Brent S. Trimble, „Fiber-Reinforced Composite and Wood Bonded Interfaces: Part I. Durability and Shear Strength“, *Journal of Composites, Technology and Research* 22 (4), (2000): 224-231.

³⁰⁹ Деламинација се изражава као однос деламинаране дужине у односу на дужину целог тестираног узорка (%).

формалдехида (RF) и показано да мање деламинације има плоча у којој је употребљен RF као адхезив. Ипак, тестирани су и узорци у којима је на један слој дрвета, тј. онај слој који на који се наноси FRP, нанет прајмер HMR. Код свих тестираних узорака са HMR -ом није било деламинације у слоју дрво- FRP, али је деламинација у првом следећем слоју дрво-дрво 6.5%. Код узорака без HMR -а 2.44% је деламинација у слоју дрво- FRP, док је 1.46% деламинација у слоју дрво-дрво. Тестирани узорци без FRP -а и HMR -а у проценту од 4% показују деламинацију у слоју дрво-дрво. На основу овога можемо да закључимо да се додавањем прајмера HMR ојачава веза у слоју дрво- FRP, чиме се смањује деламинација у том слоју, али се тиме повећава раслојавање у следећем слоју дрво-дрво, због великих напона смицања између слојева.

Исто тестирање спроведено је и са епоксидном смолом као матрицом и адхезивом и прајмерима RF и HMR, и резултати су показали да је после три циклична излагања променама услова средине (суво/мокро) код узорка третираног прајмером RF деламинација у слоју FRP-дрво 76.89% (већа од дозвољене која износи 8% за црвени јавор) и 2.93% у слоју дрво-дрво, док узорци третирани прајмером HMR у слоју FRP-дрво немају деламинације, а у слоју дрво-дрво она износи 4.99%. Овим се може закључити да је у погледу деламинације најпогодније за композитну фурнирску плочу користити синтетичка влакна у епоксидној матрици, епоксидни адхезив и прајмер HMR у слоју између дрвета и FRP-а како би се избегла оштећења плоче. Сви ови узорци тестирани су и на смицање, где је најбољу чврстоћу на смицање и сув и мокар показао узорак ојачан влакнима у епокси матрици, адхезив епокси и прајмер HMR. На основу свега наведеног може се закључити да епоксид као матрица и адхезив показује најбоље резултате како у испитивању деламинације, тако и при испитивању чврстоће на смицање, а то је резултат његове изузетне адхезије и добрих карактеристика при остваривању везе између два различита материјала.

Испитивања утицаја три различите врсте дрвета – буква, топола и еукалиптус и различитих врста адхезива - уреа-формалдехидног (UF), меламина-уреа формалдехидног (MUF), и фенол формалдехида (PF) адхезива на механичка својства LVL плоче³¹⁰, доказано је да се применом ова три адхезива постижу врло мале разлике у савојним чврстоћама и модулима еластичности. Ипак, значајније повећање модула еластичности и савојне чврстоће показано је код букве ојачане формалдехидним адхезивом, која је уједно показала и најбоља савојна својства од свих испитаних узорака. Најслабије модуле еластичности у свим испитивањима показала је топола.

Како је један од честих проблема током испитивања и употребе композита на бази полимера армираног влакнима и дрвета управо раслојавање између ова два слоја, у истраживању Лајнс (Lyons) и др.³¹¹ испитани су узорци који до тога доводе и анализирана су два различита адхезива која се могу наћи на тржишту и њихове карактеристике. Разматрањем два различита епоксидна адхезива: тип1 – двокомпонентног Tyfo® S Saturant Epoxy и тип2 – Tyfo® WP Wet - Prime Epoxy и њиховим различитим наносом – на мокро и суво подлогу, резултати тестирања плоче показују да је први тип епоксида бољи при сувим срединама, а да се за влажене мора користити у комбинацији са HMR прајмером, док се епоксид тип 2 добро понаша у сувим срединама. Такође, овај тест показао је да је епоксидни адхезив боље наносити на влажне него на суве површине. Резултати свих наведених испитивања приказани су у Прилогу 1 – *Табела резултата претходних истраживања утицаја ојачања на механичка својства плоча на бази фурнира.*³¹²

³¹⁰ Bekir Cihad Bal, İbrahim Bektaş, „The effects of wood species, load direction, and adhesives on bending properties of laminated veneer lumber“, *BioResources* 7 (3), (2012): 3104-3112.

³¹¹ Jed S. Lyons, и Mallik R. Ahmed, Factors Affecting the Bond Between Polymer Composites and Wood, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* (24), (2005): 407.

³¹² погледати Прилог 1 – *Табела резултата претходних истраживања утицаја ојачања на механичка својства плоча на бази фурнира*, стр. 262.

ЦЕЛИНА ДРУГА

Испитивање и употреба ојачаних плоча на бази фурнира у архитектури

5. Експериментална анализа конструктивних карактеристика ојачаних плоча на бази фурнира

LVL плоче ојачане полимерима армираним карбонским влакнима

5.1 Програм експерименталих истраживања

У свету је спроведен веома мали број истраживања на тему формирања композитног материјала на бази фурнира и FRP-а. Већина истраживања је приказана у претходном поглављу. У нашој земљи нема истраживања на ову тему, а ни једно од претходних истраживања не наставља даље испитивање примене ојачаних плоча као конструктивног елемента.

Посебна пажња у оквиру овог испитивања усмерена је на начине формирања композитног производа ојачаног влакнима у односу на захтеве које сам производ треба да испуни. Механичка својства која су од суштинске важности за употребу ојачаних фурнирских плоча у архитектури егзоскелета разјашњена су у поглављу 3.3 *Потенцијали примене плоча на бази фурнира у архитектури*. Положај и оријентација влакана у конструкцији плоче дефинисана је на основу закључака изведених из анализе претходних теоријских истраживања, а приказано у поглављу 4.3 *Упоредна анализа претходних истраживања*. Испитивање материјала и његових механичких карактеристика је од изузетног значаја ради даље анализе могућности његове примене у архитектури, али и његовог даљег унапређења.

Истраживачки приступ у оквиру овог рада базиран је на експерименталним лабораторијским истраживањима. У склопу експерименталног истраживања формиран су узорци плоча на бази фурнира ојачаних карбонским влакнима и испитане њихове механичке карактеристике. Дефинисане су три међусобно повезане групе истраживања:

- II.1 Експериментално лабораторијско испитивање својстава адхезива и одабир адхезива који су примењени за формирање ојачаних LVL плоча;
- II.2 Дефинисање начина формирања узорака и формирање узорака ојачаних LVL плоча;
- III.3 Експериментално утврђивање механичких својстава новоформираног материјала - анализа чврстоће на смицање у слоју лепка, савојне чврстоће у равни и управно на раван плоче, анализа чврстоће на смицање управно на раван плоче, затезање у равни плоче и притисак у равни плоче.

На основу експерименталних испитивања механичких карактеристика новоформираног материјала извршени су прикази и евалуација добијених резултата и њихова нумеричка анализа. Извршено је утврђивање степена побољшања носивости и крутости ојачаних плоча на бази фурнира у односу на неојачане и дат је преглед резултата испитивања (табеле и графикони).

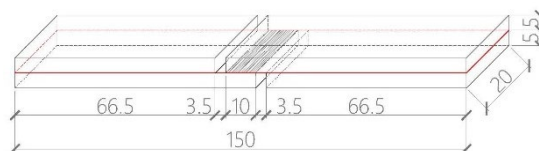
5.2 Испитивање физичких и механичких својстава адхезива

На основу претходне анализе полимерних матрица које се примењују за формирање полимера ојачаног влакнима (поглавље 4.1.1.1 Полимерна матрица)³¹³, на основу анализе адхезива чија је примена у носећим дрвеним конструкцијама (поглавље 4.4 Адхезиви за дрвене

³¹³ погледати поглавље 4.1.1.1 Полимерна матрица, стр. 91.

носеће конструкције)³¹⁴, као и на основу доступности адхезива на тржишту, одабрана је врста адхезива чија су својства експериментално испитана.

Смицајна чврстоћа у слоју лепка испитана је према стандарду SRPS EN 205:2017 - Адхезиви – Адхезиви за дрво који се не примењују за конструкције – Одређивање смицајне чврстоће затезањем преклопних спојева³¹⁵. За испитивање су коришћене букове дашчице димензија 150 × 20 × 5 mm, међусобно слеplене обострано нанетим адхезивом. Епрувета за испитивање чврстоће на смицање приказана је на слици 49.



Слика 49. Епрувета за испитивање чврстоће на смицање у слоју лепка

Као први адхезив одабран је епоксидни адхезив због својих добрих физичких и механичких особина, а првенствено због своје лаке апликације и доброг пријањања на све врсте површина. Познато је да епоксид са дрветом формира јаке и отпорне везе. Осим тога епоксидне матрице у спреси са карбонским влакнима дају боље резултате у односу на све друге матрице које се могу користити за формирање FRP-а. Предност епоксидног адхезива је и добра постојаност при изложености различитим утицајима спољне средине, што је веома важно за даљу експлоатацију материјала као конструктивног елемента у екстеријерним условима.

Испитана су три епоксидна адхезива:

1. EPOFIX, произвођач: „Епоксан“, Чачак, Србија;
2. Епоксидна смола LG700, произвођач: „GRM systems“, Олмиц, Чешка;
3. MareWarp 31, произвођач: „Mareci“, Милано, Италија.

Основна својства испитаних адхезива приказана су у Табели 18. Произвођачка спецификација адхезива дата је у прилогу 2 и 3³¹⁶. Сваки адхезив испитан је на по 5 епрувета. Нанос адхезива био је у количини од 200 g/m² по слубници и то обострано, односно на сваку дашчицу нанесено је по 100 g/m². Услови пресовања и кондиционирања су били константни за све узорке. Узорци су пресовани 30 минута на температури од 120°C и константном притиску од 30 бара (3 МПа). Након пресовања узорци су кондиционирани (сл. 49) 7 дана у ексикаторима изнад засићеног раствора амонијум-нитрата (NH₄NO₃), а потом је испитивана њихова чврстоћа на смицање у слоју лепка. Експериментално испитивање обављено је у лабораторијама Универзитета у Београду, Шумарског факултета, под надзором проф. др Иване Гавриловић-Грмуша.

³¹⁴ погледати поглавље 4.4 Адхезиви за дрвене носеће конструкције, стр. 114.

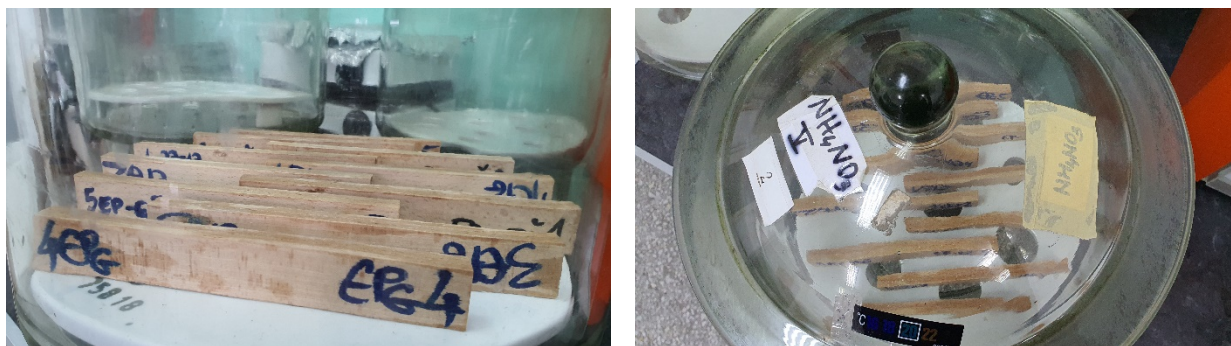
³¹⁵ Институт за стандардизацију Србије, SRPS EN 205:2017 - Адхезиви – Адхезиви за дрво који се не примењују за конструкције – Одређивање смицајне чврстоће затезањем преклопних спојева (Београд: 2017).

³¹⁶ Од произвођача „Епоксан“, Чачак, Србија за адхезив EPOFIX није добијена произвођачка спецификација.

Табела 18. Основна својства испитаних епоксидних адхезива³¹⁷

Техничка својства / Врста адхезива		LG700	МареWrap 31
Смола (компонента А)			
Густина	g/cm ³	1.18-1.23	1.05
Вискозитет по Брукфилду	mPa·s (25°C)	600-900	17000
Умреживач (компонента Б)			
Густина	g/cm ³	0.96	1.12
Вискозитет по Брукфилду	mPa·s (25°C)	50-60	110
Масени однос мешања		100:30	4:1

Приликом апликације адхезива на букове дашчице уочено је да су адхезиви ЕРОFIX и LG700 знатно мање вискозитета у односу на адхезив МареWrap31, те је њихова апликација на површину дрвета тежа. Приликом пресовања дошло је до благог цурења адхезива по рубовима, код сваког тестираног адхезива. Након пресовања отклоњен је вишак адхезива са бочних рубова епрувета, а затим су епрувете кондициониране седам дана (сл.50). По завршеном кондиционирању на епруветама су направљени усеци (сл.51) за испитивање чврстоће на смицање, према скици сл.49.



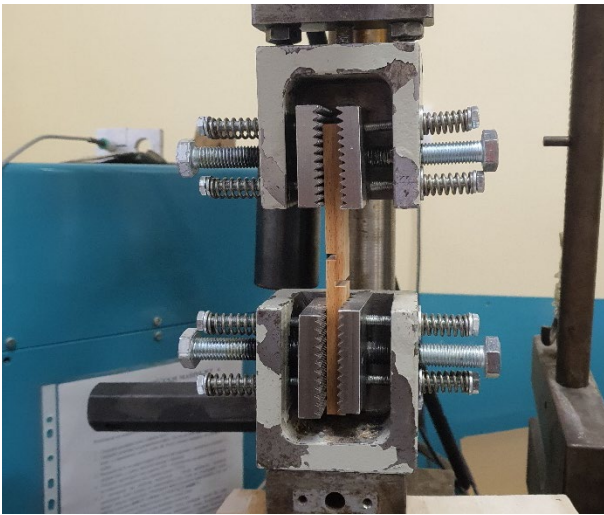
Слика 50. Кондиционирање епрувета у ексикаторима изнад засићеног раствора NH₄NO₃



Слика 51. Процес зарезивања епрувета и формирање смичуће равни

Процес испитивања чврстоће на смицање приказан је на фотографијама сл. 52. Испитивање је спроведено у лабораторијама Шумарског факултета у Београду. За испитивање је коришћена Машина за испитивање механичких својстава дрвета и производа од дрвета „Wood Tester WT-4“, капацитета максималне силе од 40 kN. Пре испитивања узорака свака епрувета је премерена кљунастим мерилом (нонијусом) са прецизношћу 0.1 mm, како би се поуздано утврдила површина смичуће равни. Узорци су постављени у вертикалан положај у чељусти машине, стегнути и оптерећени силом затезања. Испитивање је трајало до лома, при контролисаној брзини померања од 0.25 mm/min. Подаци о оптерећењу добијени су путем програма „Console“. Код свих узорака је дошло до лома по супстрату.

³¹⁷ Табела формирана на основу података из прилога: 2 – произвођачка спецификација адхезива LG700 (стр.265), 3 – произвођачка спецификација адхезива МареWrap 31 (стр.266-261).



Слика 52. Испитивање чврстоће на смицање у слоју лепка

Табела 19. Чврстоћа на смицање у слоју лепка - Епофикс
Адхезив: ЕРОФИКС калибрација: $F_k=170\text{ N}$

Масени однос: 100:50

n	<i>b</i> (mm)	<i>l</i> (mm)	<i>F</i> _{max} (N)	$\Delta F = F - F_k$ (N)	τ (MPa)	Врста лома
1	10.41	20.39	1715	1545	7.279	по супстрату
2	10.36	20.43	1633	1463	6.912	по супстрату
3	10.46	20.47	2114	1944	9.079	по супстрату
4	10.39	20.36	1437	1267	5.989	по супстрату
5	10.41	20.47	1986	1816	8.522	по супстрату
Просечна вредност:					$\tau = 7.556$	

Табела 20. Чврстоћа на смицање у слоју лепка – LG700
Адхезив: LG700 калибрација: $F_k=170\text{ N}$

Масени однос: 100:30

n	<i>b</i> (mm)	<i>l</i> (mm)	<i>F</i> _{max} (N)	$\Delta F = F - F_k$ (N)	τ (MPa)	Врста лома
1	10.33	20.37	1866	1696	8.060	по супстрату
2	10.41	20.33	1710	1540	7.277	по супстрату
3	10.45	20.38	1727	1557	7.311	по супстрату
4	10.25	20.23	1740	1570	7.571	по супстрату
5	10.29	20.36	1826	1656	7.904	по супстрату
Просечна вредност:					$\tau = 7.625$	

Табела 21. Чврстоћа на смицање у слоју лепка – МареWгар 31
Адхезив: МареWгар31 калибрација: $F_k=176\text{ N}$

Масени однос: 4:1

n	<i>b</i> (mm)	<i>l</i> (mm)	<i>F</i> _{max} (N)	$\Delta F = F - F_k$ (N)	τ (MPa)	Врста лома
1	10.44	20.37	1857	1681	7.905	по супстрату
2	10.14	20.52	1490	1314	6.315	по супстрату
3	10.21	20.24	2715	2539	12.286	по супстрату
4	10.5	20.21	2564	2388	11.253	по супстрату
5	10.38	20.26	2833	2657	12.634	по супстрату
Просечна вредност:					$\tau = 10.079$	

Резултати испитивања чврстоће на смицање у слоју лепка за сваки испитани узорак приказани су у Табелама 19-21. Код свих тестираних узорака до лома епрувете дошло је у слоју супстрата (дрвета), типичан облик лома епрувете приказан је на фотографији сл. 53. Смицајна чврстоћа у слоју лепка израчуната је као напон који изазива максимална сила смицања при лому по јединици површине попречног пресека узорка:

$$\tau_{\parallel d} = \frac{\Delta F}{A}$$

где је:

A – површина попречног пресека $A = b \times l$, N/mm^2 (MPa),

ΔF – максимална сила смицања, у N.

Најбољи резултат показао је адхезив MapeWrap31, чија је намена за грађевинску индустрију, за ојачање зиданих конструкција полимерима армираним стакленим влакнима. Намена адхезива LG700 је за импрегнацију трака и тканина на бази влакана, чија је примена првенствено у бродоградњи, али и моделарству, електро и спортској индустрији. EPOFIXS чија је намена за обраду предмета од метала и дрвета показао је најслабије резултате чврстоће на смицање. Сви добијени резултати задовољавају минималне услове чврстоће на смицање у слоју лепка дефинисане стандардом.



Слика 53. Типичан лом дрвених епрувета по супстрату у испитивању смицајне чврстоће у слоју лепка

Осим адхезива на бази епоксида, план истраживања био је да се испита резорцинол-формалдехидни адхезив, полиуретански адхезив за носеће дрвене конструкције и меламин-уреа формалдехидни адхезив. Услед немогућности набавке резорцинол-формалдехидног и полиуретанског адхезива на тржишту, испитан је меламин-уреа формалдехидни адхезив (MUF) са ознаком Адхезивни систем 1247/2526, произвођача „AkzoNobel“. MUF адхезив добијен је из фирме „Пирамида“ Сремска Митровица, која га користи за формирање носача од лепљеног ламелираног дрвета. Произвођачка спецификација адхезива дата је у прилогу 3.

За адхезив MUF поред механичке карактеристике – чврстоће на смицање у слоју лепка, одређене су и следеће физичке карактеристике:

- рН адхезива (SRPS EN 1245),
- густина (SRPS EN 542),
- вискозитет по Форду (SRPS EN 12092),
- садржај суве супстанце (SRPS EN 827),
- време желирања на 100°C (302-6).

Смицајна чврстоћа у слоју адхезива испитана је на MUF адхезиву и на MUF адхезиву са додатком брашна као пуниоца (додатак брашна је био 10% сува супстанца брашна у односу на суву супстанцу адхезива). Испитивање је било идентично као и за адхезиве на бази епоксида. Адхезив са и без пуниоца испитан је на по 5 епрувета. Нанос адхезива био је у количини од 200 g/m² по сљубници, обострано, односно на сваку дашчицу нанесен је адхезив у количини 100 g/m². Услови пресовања и кондиционирања су били константни за све узорке.

Време пресовања је било 30 минута на температури од 120°C и константном притиску од 30 бара (3 МПа). Након пресовања епрувете су кондициониране (сл. 49) 7 дана у ексикаторима изнад засићеног раствора амонијум-нитрата (NH₄NO₃), а затим је испитана њихова чврстоћа на смицање у слоју лепка. Резултати испитивања за оба случаја, са и без употребе пуниоца приказани су у Табелама 22 и 23. Адхезив са применом пшеничног брашна као пуниоца показује за нијансу нижи резултат у односу на адхезив без пуниоца, што је у границама очекиваног.

Табела 22. Чврстоћа на смицање у слоју лепка – MUF1247/2526
Адхезив: MUF1247/2526 калибрација: Fk=172 N

Масени однос: 4:1						
n	b (mm)	l (mm)	Fmax (N)	ΔF =F-Fk (N)	τ (MPa)	Врста лома
1	10.72	20.32	1684	1512	6.941	по супстрату
2	10.94	20.13	2013	1841	8.360	по супстрату
3	10.58	20.27	2419	2247	10.478	по супстрату
4	10.77	20.27	2118	1946	8.914	по супстрату
5	10.71	20.34	1618	1446	6.638	по супстрату
Просечна вредност:					τ =	8.266

Табела 23. Чврстоћа на смицање у слоју лепка – MUF1247/2526+пуниоца
Адхезив: MUF1247/2526 + брашно калибрација: Fk=172 N

Масени однос: 4:1						
n	b (mm)	l (mm)	Fmax (N)	ΔF =F-Fk (N)	τ (MPa)	Врста лома
1	10.7	20.34	1795	1623	7.457	по супстрату
2	10.93	20.32	1521	1349	6.074	по супстрату
3	10.58	20.28	2244	2072	9.657	по супстрату
4	10.69	20.4	1952	1780	8.162	по супстрату
5	10.54	20.39	2255	2083	9.692	по супстрату
Просечна вредност:					τ =	8.209

За MUF адхезив одређен је и садржај суве супстанце према стандарду SRPS EN 827. За одређивање садржаја суве супстанце формиране су посуднице од алуминијумске (Al) фолије, чија је маса измерена на електронској аналитичкој ваги са прецизношћу од $d = 0.1 \text{ mg}$ (сл.54а). У формиране посуде сипан је адхезив и измерена је маса (m_{vl}), а потом је адхезив сушен у сушници на $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ до константне масе, након чега је измерена маса (m_{sl}) (сл.54 б). Садржај суве супстанце израчунат је према формули:

$$m_{ss} = \frac{m_s}{m_v} \times 100(\%)$$

Добијени резултати приказани су у Табели 24. Добијене вредности одговарају просечним вредностима које се крећу од 60-70%.

Табела 24. Одређивање садржаја суве супстанце MUF-а

	m_{al}	m_{vl}	m_{sl}	m_v	m_s	m_{ss}
1	0.3500	2.0727	1.4890	1.7227	1.1390	66.12%
2	0.3590	1.5636	1.2218	1.2046	0.8628	71.63%
3	0.4164	1.5890	1.1863	1.1726	0.7699	65.66%
Просечна:						67.80%

где је :

m_{al} – маса алуминијумске посудике (g),

m_{vl} – маса влажног адхезива са масом алуминијумске посудике (g),

m_{sl} – маса очврслог адхезива са масом алуминијумске посудике (g),

m_v – маса влажног адхезива без масе алуминијумске посудике $m_v = m_{sl} - m_{al}$ (g),

m_s – маса очврслог адхезива без масе алуминијумске посуде $m_s = m_{sl} - m_{al}$ (g),

m_{ss} – маса суве супстанце (g).



а)



б)

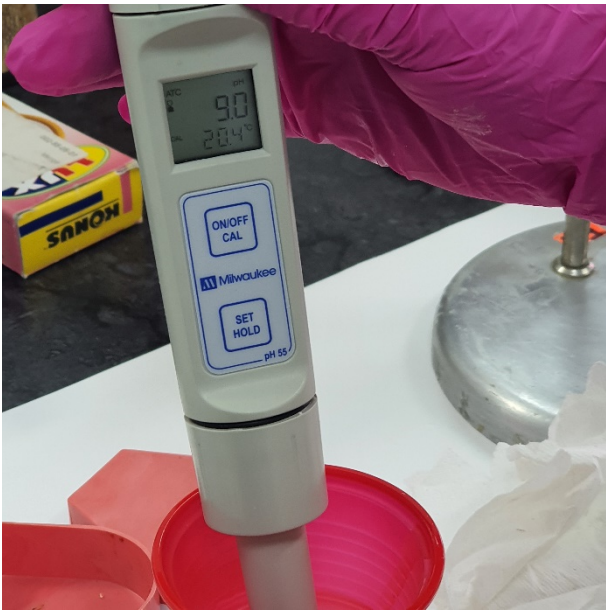


Слика 54. Процес одређивања суве супстанце у MUF адхезиву:
а) мерење масе на електронској аналитичкој ваги, б) сушење адхезива

pH вредност адхезива одређена је на собној температури ручним преносним pH метром марке Milwaukee pH55 (сл.55). Густина је одређена ареометром, који је лагано спуштен у стаклену мензурку са адхезивом, тако да не додирује ни зидове ни дно мензуре (сл. 56). Вискозитет је одређен помоћу Фордовога левка, методом истицања (сл.57). Метода се заснива на мерењу времена (s) за које 100 cm^3 адхезива истекне из Фордовога левка, у непрекидном млазу, на температури од 20°C , кроз отвор капице 6 mm. Време желирања одређено је мерењем времена потребног адхезиву да очврсне на 100°C (сл.58).

Табела 25. Вредности експериментално одређених физичких карактеристика MUF-а

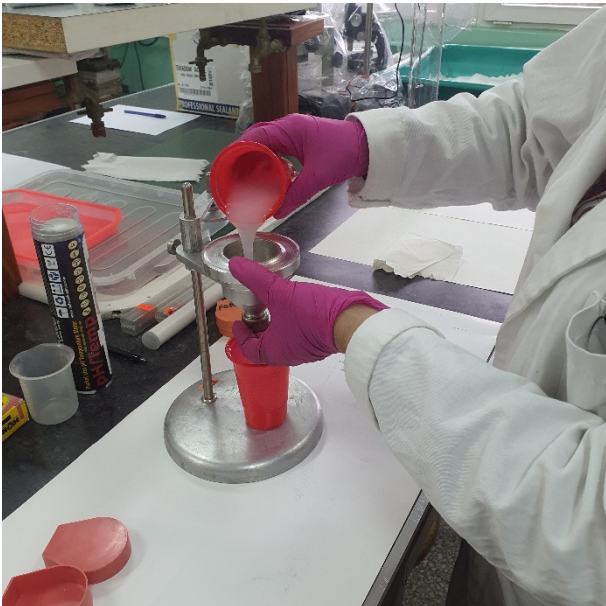
pH вредност		9	
Густина	ρ (20°C)	1280	g/cm^3
Вискозитет по Форду	F_6^{20}	140	s
Садржај суве супстанце		67.80	%
Време желирања		45	sec



Слика 55. Мерење рН адхезива MUF



Слика 56. Мерење густине адхезива MUF



Слика 57. Мерење вискозитета адхезива MUF



Слика 58. Мерење времена желирања адхезива

На основу анализа чврстоће на смицање у слоју адхезива, констатовано је да је адхезив МареWrap31 показао је најбоље резултате, чак 33.3% веће у односу на адхезив ЕРОФИКС и 32.2% веће у односу на адхезив LG700. Због наведених резултата али и због саме угодности рада и вискозитета адхезива, за примену на плочама унапређених конструктивних карактеристика одабран је адхезив МареWrap31. Осим наведеног, плоче ће се испитивати са два различита адхезива, а као други адхезив одабран је MUF1247/2526 без додатка пуниоца. Поредиће се резултати плоча формираних са епоксидним и меламин-уреа формалдехидним адхезивом. Иако меламин-уреа формалдехидни адхезив није тестиран за примену у спрези са карбонским влакнима, у оквиру овог рада извршена је анализа механичких карактеристика плоча формираних на овај начин. Меламин-уреа формалдехидни адхезив одабран је због своје знатно ниже цене у односу на епоксидни адхезив, али и због своје специфичне примене за производњу композитних производа на бази дрвета, а пре свега плоча на бази фурнира.

5.3 Дефинисање начина формирања контролних узорака и ојачаних LVL плоча

Поред малог броја истраживања, а на основу претходно приказаног уочавамо да се већина истраживања бави испитивањем савојних својстава плоче управно на њену раван, односно када конструктивни елемент прихвата оптерећење управно на раван. Такође, не постоје испитивања која анализирају даљу примену композитних производа на бази фурнира и полимера ојачаних влакнима као део конструктивног склопа, као и њихову даљу примену у архитектури и/или исплативост у економском аспекту.

Испитивање материјала је веома важно у циљу разумевања понашања материјала при оптерећењу и изложености различитим утицајима. Физичким и механичким анализама материјала добијају се сви неопходни подаци за његову даљу примену, као и подаци неопходни за статичку анализу конструкција код којих је материјал уграђен.³¹⁸ Као недостатак претходних истраживања уочено је да је мали број оних који анализирају конструктивне карактеристике материјала при изложености оптерећењима која делују у његовој равни. Овим је створен неистражен простор за испитивање механичких својстава материјала за оптерећења која делују у равни плоче, односно првенствено савојних својстава у равни плоче и њима пратећих смичућих напрезања управно на раван, али и затезање и притисак у равни плоче. Ово је веома значајна механичка карактеристика материјала, а посебно што плоче ојачане влакнима не морају у конструкцијама имати само улогу плоче, већ и улогу гредног елемента. Такође, за формирање просторних структура у виду низа гредних носача, али и полигоналних љуски или набора веома је важно да знамо понашање материјала при оптерећењима која делују у његовој равни. Важност овог вида оптерећења приказана је и образложена у поглављу 3.2. *Примена плоча на бази фурнира у архитектури*³¹⁹, а односи се како на просторне структуре тако и на линијске елементе у виду плоча (дијафрагме) или у виду гредних елемената.

Модел формирања узорака дефинисани су на основу теоријске анализе претходних истраживања, а који су јасно приказани у поглављу 4.2 Композитни производи на бази фурнира и полимера армираним влакнима – приказ претходних истраживања. На основу упоредне анализе свих претходних истраживања, али и начина коришћења узорка, дефинисана су три ојачана модела LVL плоча и један контролни узорак. У експерименталној анализи испитиваће се механичке карактеристике седмослојних LVL плоча ојачаних једносмерно плетеном карбонском тканином „MapeWrap C UNI-AX 300/40 ((300 g/m²)“, произвођача „Mapei“. Као што је претходно дефинисано, за израду плоча користиће се два типа адхезива – епоксидни адхезив MapeWrap31, произвођача „Mapei“ и меламин-уреа формалдехидни адхезив, MUF 1247/2526, произвођача „AkzoNobel“. Физичке и механичке карактеристике примењених адхезива приказане су у поглављу 5.2. *Испитивање физичких и механичких својстава адхезива*³²⁰. Све плоче су формиране као седмослојне плоче са шест листова фурнира оријентисаним у подужном правцу, и средишњим листом фурнира управно оријентисаним у односу на правац влакана спољашњих листова фурнира.

³¹⁸ Neda M., Sokolović, Milica Petrović, Ana Kontić, Suzana Koprivica, и Nenad Šekularac, „Inspection and Assessment of Masonry Arch Bridges: Ivanjica Case Study“, *Sustainability*, 13(2021), 13363.

³¹⁹ погледати поглавље 3.2. *Примена плоча на бази фурнира у архитектури*, стр.51.

³²⁰ погледати поглавље 5.2. *Испитивање физичких и механичких својстава адхезива*, стр.129.

5.3.1 Физичка и механичка својства употребљених материјала

5.3.1.1 Физичка и механичка својства FRP тканине

За ојачање у оквиру овог рада коришћене су CFRP композити у облику тканина са монооксијално оријентисаним влакнима, ознаке „MapeWrap C UNI-AX 300/40 ((300 g/m²)“, ширине 40 cm. Влакна у тканини се пружају само у подужном правцу. Произвођач ових тканина је Италијанска фабрика „Mapei“, а тканине су намењене за ојачања и конструктивне санације зиданих и армирано бетонских структура. MapeWrap C UNI-AX представљају једносмерно плетене карбонске тканине намењене за суву примену. Влакна у овим тканинама чине око 99% укупне тежине тканине. Тканине су предвиђене да се постављају у епоксидној матрици.³²¹ У Табели 26. приказана су нека физичка и механичка својства „MapeWrap C UNI-AX 300“ тканине, дата у каталогу произвођача. Испитивање физичких и механичких својстава тканина нису била предмет испитивања у оквиру овог рада.

Табела 26. Физичка и механичка својства MapeWrap C UNI-AX 300³²²

Карбонска влакна	Тип влакана:	Карбонска влакна високе чврстоће	
	Изглед:	Монооксијална тканина	
	Маса (g/m ²):	300	
	Густина (kg/m ³):	1800	
	Еквивалентна дебљина суве тканине (mm):	0.164	
	Површина отпорна на оптерећење по јединици ширине (mm ² /m):	164.3	
	Чврстоћа на затезање (Mpa)	≥ 4900	
	Максимално оптерећење по јединици ширине (kN/m):	> 800	
	Модул еластичности при затезању (N/mm ²):	252000 ± 2%	
	Издужење при лому (%)	≥ 2	
Импрегнирана тканина		Просечна вредност	Пројектантска вредност
	Чврстоћа на затезање (Mpa):	1637	1492
	Модул еластичности при затезању (N/mm ²):	83848	83848
	Издужење при лому (%)	2	1.7
	Номинална дебљина (mm):	0.500	0.500

5.3.1.2 Техничка својства дрвета

За израду ојачаних плоча у оквиру овог рада одабрана је топола, као брзо-растуће дрво, ниске тржишне цене. Дрво тополе се најчешће примењује за израду фурнирских плоча не структурне апликације, првенствено као декоративни елемент ентеријерске облоге. Осим тога топола се значајно примењује у индустрији за израду амбалаже. Последњих деценија ово дрво је све више заступљено као сировина за израду материјала на бази дрвета, а посебно производа

³²¹ Приликом санације армирано-бетонских структура карбонска тканина користи се применом епоксидног адхезива, док се приликом санације зиданих структура апликација врши посредством специјалних малтера.

³²² Табела формирана на основу података из прилога 3 – произвођачка спецификација адхезива MapeWrap 31 (стр.288).

на бази дрвета (фурнирских и OSB плоча, LVL и CLT носача и сл.). Њена предност је мала сопствена тежина и једноставност обраде дрвета.

Две водеће земље које се залажу за примену тополе у грађевинској индустрији и њену структурну примену су Италија и Шпанија. Србија је са својих 32.000 ха пета земља у Европи по површини засада тополе, а испред ње се налазе Француска, Шпанија, Италија и Белгија.³²³ Мања носивост и нешто слабије механичке карактеристике у односу на друге врсте које се примењују за формирање конструктивних елемената, чине тополу у мањој мери заступљеном врстом у грађевинској индустрији. С обзиром да Србија има веома велики потенцијал за производњу сировина на бази тополе, а и због њеног брзог раста, лаке обновљивости ресурса и ниске цене сировине, дрво тополе је у овом истраживању одабрано као сировина за формирање композитног ојачаног производа на бази дрвета.

За формирање LVL плоча које су предмет експерименталног истраживања одабрани су конструктивни тополови фурнири, произведени љуштењем у дебљини од 4 mm, влажности $7\pm 1\%$, произвођача „VisaProm“ доо, Кањижа. Сви фурнири су исечени на димензије 500x500x4 mm. Класификација и одабир фурнира погодних за формирање плоча одређена је визуелном опсервацијом фурнира. Одабрани су фурнири прве класе, без чворова и осталих грешака у дрвету. Од свих фурнира формиране су ојачане и контролне LVL плоче, користећи две врсте адхезива – епокси и MUF.

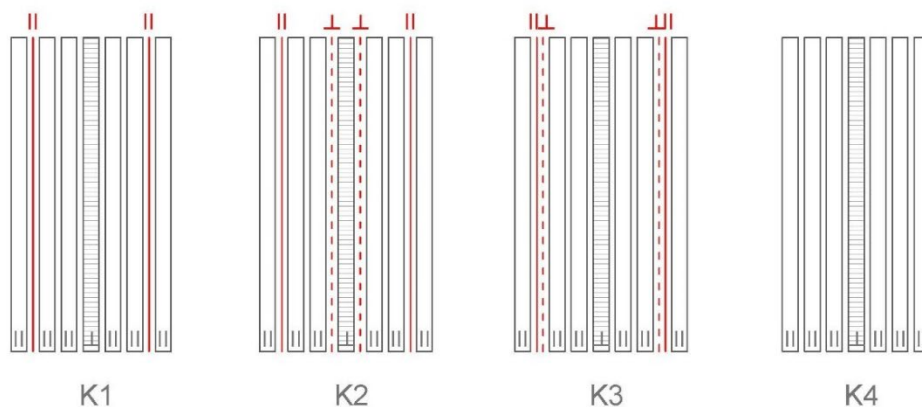
5.3.2 Композитне LVL плоче – испитивање ојачаних и неојачаних плоча

Ојачане и контролне плоче за експериментална испитивања механичких карактеристика формиране су у просторијама Шумарског факултета Универзитета у Београду, на Катедри хемијско-механичке прераде дрвета, у Лабораторији за иверице, влакнатице и дрвно-пластичне масе, током јуна 2022. године. У односу на положај карбонских влакана у композитној структури, формиране су три комбинације ојачаних плоча, као и контролна плоча без додатака синтетичке тканине (сл.59). Контролна плоча формирана је у циљу квантитативне процене степена ојачања плоча побољшаних механичких карактеристика. Све плоче су формиране као седмослојне плоче са шест листова фурнира оријентисаним у подужном правцу, и средишњим листом фурнира управно оријентисаним у односу на правац влакана спољашњих листова фурнира. План испитивања композитних LVL плоча са ознакама плоча приказан је у Табели 27.

Дефинисање комбинације плоча у односу на положај карбонских влакана:

- Комбинација 1 – представља ојачање плоче карбонском тканином постављеном у првој и шестој сљубници (S1 || 6 ||), једносмерно оријентисаној, карбонска влакна постављена подужно, паралелна спољним листовима фурнира;
- Комбинација 2 – представља ојачање плоче карбонском тканином постављеном у првој и шестој сљубници паралелно оријентисаном и трећој и четвртој сљубници управно оријентисаном у односу на правац оријентације спољашњих листова фурнира (S1 || 3+4+6 ||);
- Комбинација 3 – представља карбонску тканину постављену у два слоја управно један на други, формирајући мрежу у два правца. Тканине су постављене у првој и шестој сљубници (S1 || +6+ ||), водећи рачуна о симетрији попречног пресека;
- Комбинација 4 – представља неојачане плоче, односно контролне референтне узорке.

³²³ Joris van Acker, *ProPopulus: The European Poplar Initiative*, PROPOPULUS:2022. Последњи приступ Septembar 15, 2022. https://propopulus.eu/wp-content/uploads/2022/06/ProPopulus_The-European-Poplar-Initiative_poplar-in-a-sustainable-economy.pdf.



Слика 59. Схематски приказ комбинација ојачаних и неојачаних LVL плоча

Планирано је да се на формираним узорцима испитају следећа механичка својстава:

- чврстоћа на смицање у слоју лепка (на суво),
- савојна чврстоћа у равни плоче,
- чврстоћа на смицање управно на раван плоче,
- притисна чврстоћа паралелно влакнима,
- притисна чврстоћа управно на влакна,
- затезна чврстоћа паралелно влакнима.

Како би се изрезале све неопходне епрувете за планирано испитивање механичких својстава, свака плоча произведена је у три примерка, под истим условима. Све плоче формиране су са две врсте адхезива – епоксидним (ЕПОКСИ) и меламин-уреа формалдехидним адхезивом (MUF). Адхезив је наносен једнострано на фурнир, у количини од 250 g/m^2 , тако да се у слубници између два слоја фурнира налази наведена количина адхезива. У истој количини адхезив је наносен и у сваком слоју CFRP-дрво, са обе стране карбонске тканине. Укупно је израђено 24 плоче, од којих 12 плоча применом епоксидног адхезива и 12 плоча применом MUF-а.

Табела 27. План испитивања композитних LVL плоча

КОМБИНАЦИЈА	АДХЕЗИВ		ОПИС
	ЕПОКСИ	MUF	
K1	EK1OP1	MK1OP1	ојачане плоче
	EK1OP2	MK1OP2	
	EK1OP3	MK1OP3	
K2	EK2OP1	MK2OP1	ојачане плоче
	EK2OP2	MK2OP2	
	EK2OP3	MK2OP3	
K3	EK3OP1	MK3OP1	ојачане плоче
	EK3OP2	MK3OP2	
	EK3OP3	MK3OP3	
K4	EK4KP1	MK4KP1	неојачане плоче
	EK4KP2	MK4KP2	
	EK4KP3	MK4KP3	

LVL плоче димензија $50 \times 50 \text{ mm}$ пресоване су у хидрауличној преси при хидрауличном притиску од 15 MPa , односно специфичном притиску $P_s = 1.5 \text{ MPa}$ и температури у средишњем слоју од 110°C . Дефинисање услова пресовања за сваки тип плоче биће накнадно објашњен у даљем тексту. Након пресовања све плоче су кондициониране у собним условима 20 дана, а потом су од њих изрезане епрувете за испитивање механичких својстава. Након изрезивања,

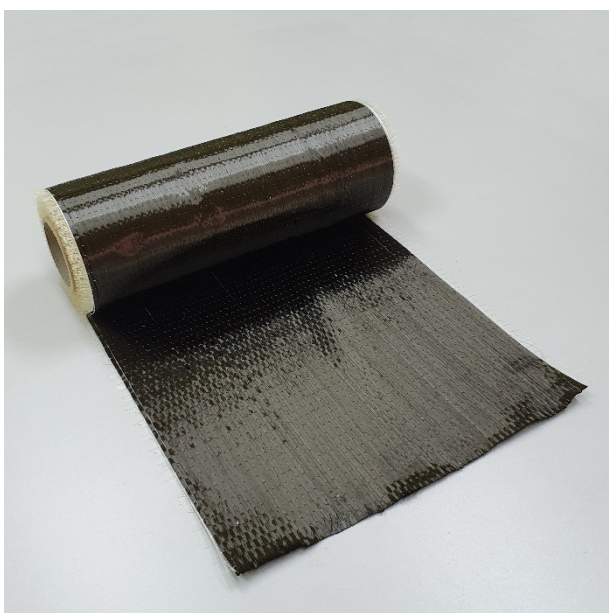
све епрувете су кондициониране у условима стандардне климе ($(20\pm 2)^\circ\text{C}$ и $(65\pm 5)\%$ релативне влажности) (SRPS EN 12765:2016), у ексикаторима и кадицама изнад zasiћеног раствора амонијум-нитрата (NH_4NO_3), у трајању од 30 дана. Након тога, испитана је влажност узорака и одређене су механичке карактеристике плоча.

5.3.2.1 Израда плоча

У лабораторији је израђено укупно 25 плоча, 12 плоча применом епоксидног адхезива и 13 плоча применом меламина-уреа формалдехидног адхезива. Плоча више са меламина-уреа формалдехидним адхезивом израђена је како би се заменио један узорак плоче МК2ОР, због велике валовитости плоче до које је дошло након пресовања, а током хлађења плоче. Израђене су по три истоветне плоче за сваки тип адхезива. Све плоче израђене су под истим лабораторијским условима.

Као што је претходно напоменуто LVL плоче израђене су од дрвета тополе. Фурнирски листови су претходно исечени на димензије $500\times 500\times 4$ mm. Визуелном опсервацијом фурнира извршен је одабир фурнира погодних за формирање плоча. Фурнирски листови са грешкама у дрвету су изопштени. Фурнирски листови су преузети из фабрике фурнира у марту 2022, а потом кондиционирани у собним климатским условима. Плоче су лепљене у јуну 2022.године. Непосредно пре почетка формирања плоча влажност у фурниру била је $7\pm 1\%$. Пре лепљења сваки лист фурнира очишћен је четком и крпом ради уклањања парчића дрвета, иверја и прашине. LVL плоча формирана је као седмослојна плоча са шест листова подужно оријентисаних и једним средишњим, листом попречно оријентисаним, управно на правац спољашњих листова фурнира.

Пре почетка лепљења припремљени су листови карбонске тканине. Карбонска тканина пакована је у ролну ширине 40 cm (сл.60). Из ролне су маказама исечени комади тканине дужине 50 cm, потребни за израду плоча Комбинације 1 (сл.61), као и комад из кога су исецане траке ширине 10 cm, како би се формирала укупна ширина од $40+10=50$ cm. Карбонска тканина складиштена је на адекватан начин, према упутствима произвођача, и пажљиво се њоме руковало како не би дошло до прљања или оштећења.

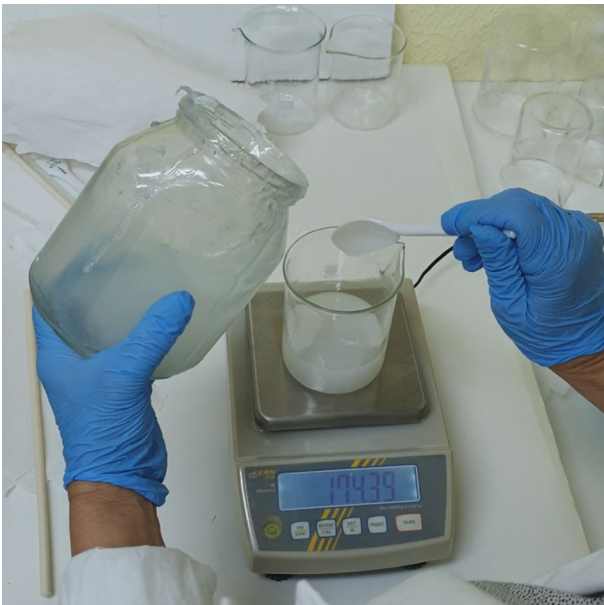


Слика 60. Карбонска тканина у ролни

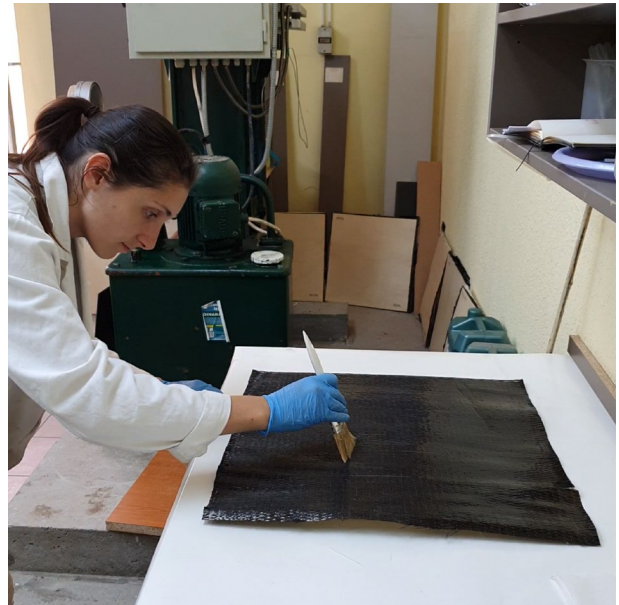


Слика 61. Исечени листови карбонске тканине

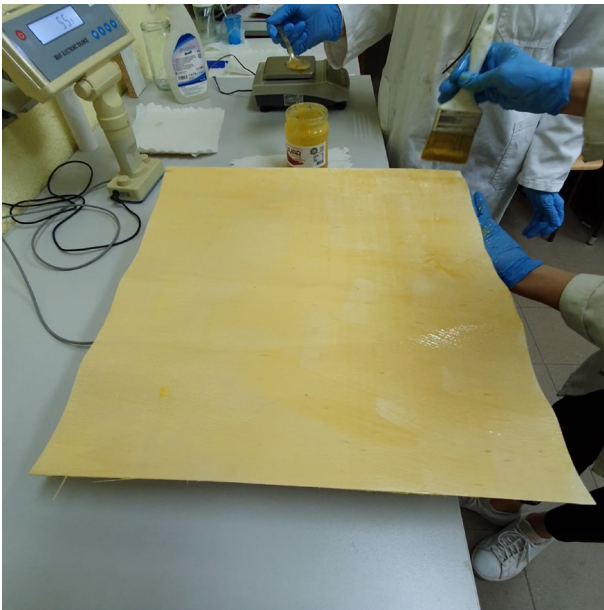
Плоче су лепљене епоксидним или меламин-уреа формалдехидним адхезивом. Како су оба адхезива двокомпонентна, компоненте А и Б су за сваки адхезив измерене посебно, према размери на основу упутства произвођача. Маса компоненти мерена је електронском вагом са тачношћу $d = 0.01 \text{ g}$ (слика 62). Прво је мерена компонента А, а затим је у исту посуду додата и измерена компонента Б, након чега су добро измешане и хомогенизоване обе компоненте. Када су формиране плоче са епоксидним адхезивом, припремана је укупна количина адхезива потребног за формирање једне плоче, додајући на то и растур који се неминовно појављивао пошто је одређена количина адхезива остајала на четки или зидовима чаше. С обзиром да је меламин-уреа формалдехидни адхезив имао краће радно време од епоксидног, количина адхезива неопходног за формирање плоче припремана је у две фазе, како би адхезив у последњим сљубницама био нижег степена поликондензације, а самим тим мањег вискозитета и лакши за наношење на фурнир. Оба адхезива на фурнире и слој карбонске тканине наношена су ручно, четком. Адхезив је наношен једнострано на слој фурнира, а у сљубници у којој се налазила карбонска тканина, адхезив је у једном слоју наношен на сваку страну тканине, а потом је преко њега постављен лист фурнира. Количина адхезива по сљубници је била 250 g/m^2 за оба типа адхезива. Сваки лист фурнира је пре и након наношења адхезива мерен на ваги, како би се на сваки лист нанела једнака количина адхезива. Процес наношења адхезива на тканину и на фурнир приказан је на сликама 63 и 64. Када су сви листови фурнира облепљени, а карбонске тканине уметнуте на одговарајућа места (сл.65), плоча се постављала између металних плоча у преси.



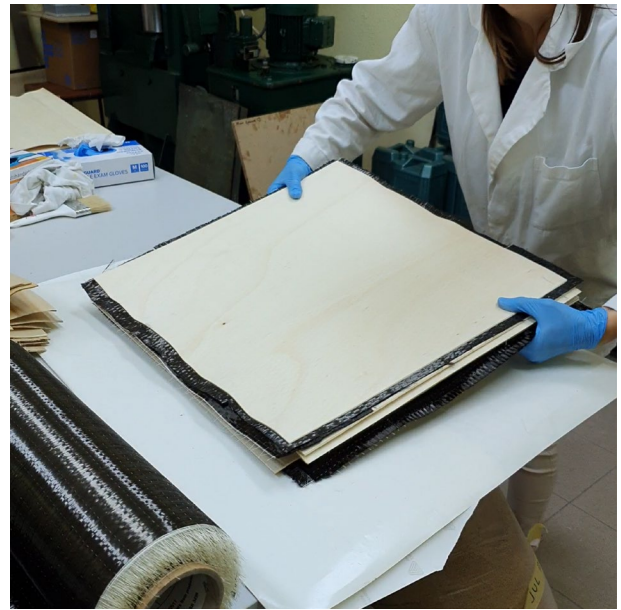
Слика 62. Размеравање компоненте А адхезива



Слика 63. Процес наношења адхезива на тканину



Слика 64. Процес наношења адхезива на фурнир



Слика 65. Облепљена LVL плоча спремна за пресу

За сваку комбинацију плоче при лепљењу прве плоче мерена је температура у средишњем слоју помоћу температурног сензора – термопара. Термопар се поставља у средиште централне сљубнице пре почетка пресовања плоче. Принцип рада термопара заснован је на термоелектричном ефекту. На уређају се читавају подаци о промени напона са температурном променом. Паралелно са тим бележено је и време, како би се направио дијаграм промене температуре по јединици времена. Све плоче пресоване су по 15 min након достизања 100°C у средишњем слоју плоче, при специфичном притиску од 1.5 МПа (сл.66 и сл.67). Услови пресовања за сваку комбинацију посебно биће дефинисани у даљем тексту. Након пресовања, плоча је извађена из пресе, обележена и остављена да се хлади на собној температури (сл.68 и сл.69).



Слика 66. Постављање плоче у пресу



Слика 67. Пресовање плоче



Слика 68. Обележавање плоче

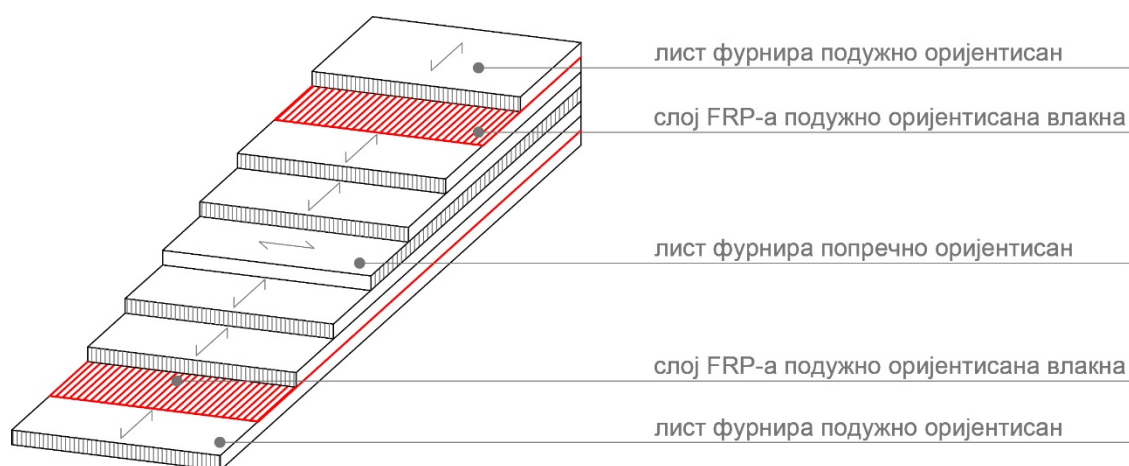


Слика 69. Испресована LVL плоча

Након завршетка пресовања и кондиционарања плоча, а приликом припреме плоча за даљу обраду, уочено је да су плоче лепљене MUF-ом тање од плоча лепљених епоксидним адхезивом. Просечна дебљина плоче лепљене MUF-ом износи 11.5 mm, а епоксидним адхезивом 14.00 mm. Дебљине су одређене мерењем узорака плоча помичним кљунастим мерилом. Плоче лепљене MUF-ом имају веће упресовање од плоча лепљених епоксидним адхезивом, а што је директна последица врсте адхезива. MUF очвршћава процесом поликондензације, током кога се издвајају мали молекули (вода и формалдехид), а садржај суве супстанце му је 67.80%, док епоксидни адхезив очвршћава реакцијом полиадиције, при којој не долази до издвајања нус производа и садржај суве супстанце овог адхезива је скоро 100%. . Последица овога је смањење запремине целокупне плоче лепљене MUF-ом. Уочено је, такође, да су плоче лепљене MUF-ом у процесу хлађења доживеле мању или већу валовитост, што је последица утезања у слоју адхезива. Због наведеног, једна плоча Комбинације 3 је одстрањена пре даље обраде, а за исту је поновљен процес производње.

Плоча Комбинације 1 представља седмослојну плочу ојачану полимерима армираним влакнима позиционираним у прву и шесту слојницу, једносмерно оријентисаним паралелно влакнима спољашњих листова фурнира (S1 || 6 ||). Скица попречног пресека плоче приказана је слици 70.

Плоча у којој је употребљен епоксидни адхезив је у 8. min достигла температуру 101.65°C у средишњем слоју, а потом је пресована још 15 min, што укупно износи 23 min. У Табелама 28. и 29. приказани су услови пресовања праћени променом напона и температуре током времена у средишњем слоју. Плоча у којој је употребљен меламина-уреа формалдехидни адхезив је у 14. min достигла температуру 101.0°C у средишњем слоју, а потом је пресована још 15 min, што укупно износи 29 min. На основу ових резултата евидентно је да је за пресовање плоче формиране помоћу епоксидног адхезива било потребно много мање времена за постизање температуре од 100°C у средишњем слоју. Осим тога приликом пресовања плоче формиране MUF-ом, уочено је да притисак на хидрауличној преси опадао током времена, односно притисак је морао строго да се прати и да се одржава на $P_m = 15 \text{ MPa}$, односно $P_s = 1.5 \text{ MPa}$. Поред наведеног, уочено је осетно испаравање формалдехида из адхезива, а поготово у тренутку отварања пресе након завршетка пресовања. Ово је директна последица процеса поликондензације, током које долази до примарне емисије формалдехида, који у вишку улази у реакцију са уреом, као и пуцања нестабилних етарских мостова и формирања много стабилнијих метиленских веза. Због великог процента воде која чини око 35% масе адхезива, а чија је апсорбција у фурнир или њено губљење спречено уметањем карбонске тканине, кроз коју вода није имала продор до површинских слојева, након отварања пресе долази до наглог ослобађања воде из плоче. Карбонска тканина спречила је продор воде у површинске слојеве фурнира, преко којих би се постепено даље губила, већ је вода током пресовања „заробљена“ и приликом отварања пресе одједном ослобођена. Ово је утицало на витоперење и извијање појединих плоча након процес лепљења. Запажања везана за услове пресовања применом MUF адхезива односе се на све три комбинације ојачане плоче.



Слика 70. Попречни пресек плоче K1

Табела 28. Услови пресовања плоче ЕК1ОР1

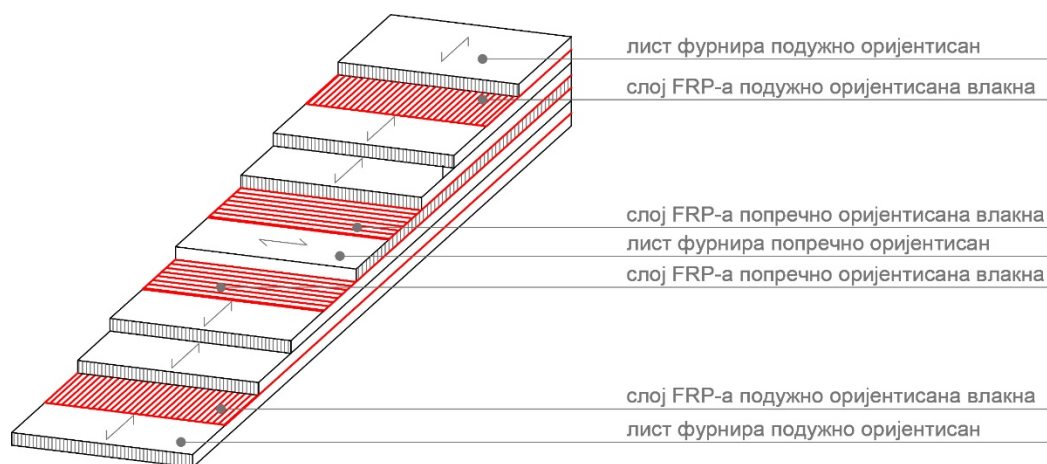
ЕК1ОР1		23 min = 8+15 min	
Адхезив		Епокси	
Масени однос:		4:1	
Нанос лепила:		250 g/m ²	
Услови пресовања			
Горња врела преса:		151°C	
Доња врела преса:		145°C	
Притисак:		15 МПа	
		Средишњи слој:	
Време		Напон	Температура
min	sec	mV	°C
	0	0.1	26.14
	20	0.4	32.65
	40	0.6	36.99
1	0	0.8	41.33
1	20	1	45.67
1	40	1.20	50.01
2	0	1.40	54.35
2	20	1.80	63.03
2	40	2.10	69.54
3	0	2.45	77.13
3	20	2.80	84.73
3	40	3.00	89.07
4	0	3.10	91.24
4	30	3.15	92.32
5	0	3.20	93.41
5	30	3.30	95.58
6	0	3.40	97.75
6	30	3.45	98.83
7	0	3.48	99.48
7	30	3.50	99.92
8	0	3.58	101.65
8	30	3.61	102.30
9	0	3.62	102.52
9	30	3.65	103.17
10	0	3.70	104.26
11	0	3.72	104.69
12	0	3.70	104.26
13	0	3.80	106.43
14	0	3.90	108.60
15	0	3.92	109.03
16	0	3.98	110.33
18	0	4.00	110.77
20	0	4.20	115.10
22	0	4.22	115.54
23	0	4.25	116.19

Табела 29. Услови пресовања плоче МК1ОР1

МК1ОР1		29 min = 14+15 min	
Адхезив		MUF	
Масени однос:		4:1	
Нанос лепила:		250 g/m ²	
Услови пресовања			
Горња врела преса:		151°C	
Доња врела преса:		145°C	
Притисак:		15 МПа	
		Средишњи слој:	
Време		Напон	Температура
min	sec	mV	°C
	0	0.05	25.05
	20	0.1	26.14
	40	0.25	29.39
1	0	0.5	34.82
1	20	0.8	41.33
1	40	1.20	50.01
2	0	1.40	54.35
2	20	1.60	58.69
2	40	1.90	65.20
3	0	2.10	69.54
3	20	2.30	73.88
3	40	2.40	76.05
4	0	2.45	77.13
4	30	2.45	77.13
5	0	2.50	78.22
5	30	2.55	79.30
6	0	2.60	80.39
6	30	2.62	80.82
7	0	2.72	82.99
7	30	2.85	85.81
8	0	2.92	87.33
8	30	3.00	89.07
9	0	3.12	91.67
9	30	3.20	93.41
10	0	3.28	95.14
11	0	3.35	96.66
12	0	3.38	97.31
13	0	3.41	97.96
14	0	3.55	101.00
15	0	3.61	102.30
16	0	3.69	104.04
18	0	3.72	104.69
20	0	3.76	105.56
22	0	3.79	106.21
24	0	3.81	106.64
26	0	3.85	107.51
28	0	3.89	108.38
29	0	3.91	108.81

Плоча Комбинације 2 представља седмослојну плочу ојачану полимерима армираним влакнима позиционираним у четири слојубнице. У првој и шестој слојубници тканина са једносмерно оријентисаним карбонским влакнима постављена је паралелно правцу дрвних влаканаца у спољашњим листовима фурнира, док су карбонска влакна у трећој и четвртој слојубници управно оријентисана у односу на правац оријентације спољашњих листова фурнира (S1 || 3⊥4⊥6 ||). На слици 71 схематски је приказан попречни пресек ове плоче.

Плоча у којој је употребљен епоксидни адхезив је у 5. min достигла температуру 102.52°C у средишњем слоју, а потом је пресована још 15 min, што укупно износи 20 min. У Табелама 30. и 31. приказани су услови пресовања праћени променом напона и температуре током времена у средишњем слоју. Плоча у којој је употребљен меламина-уреа формалдехидни адхезив је у 15. min достигла температуру 101.65°C у средишњем слоју, а потом је пресована још 15 min, што укупно износи 30 min. Уочава се да је плоча лепљена епоксидним адхезивом за краће време постигла температуру у средишњем слоју преко 100°C, што може бити последица дупло веће количине карбонских влакана која се налазе у плочи, а која су позната као добар електрични и топлотни проводник. Код једне плоче слепљене MUF-ом након вађења из пресе, при хлађењу плоче на собној температури, појавила се валовитост плоче. Ова плоча је повучена из даљег испитивања, а формирана је нова (четврта плоча) Комбинације 2.



Слика 71. Попречни пресек плоче К2

Табела 30. Услови пресовања плоче ЕК2ОР1

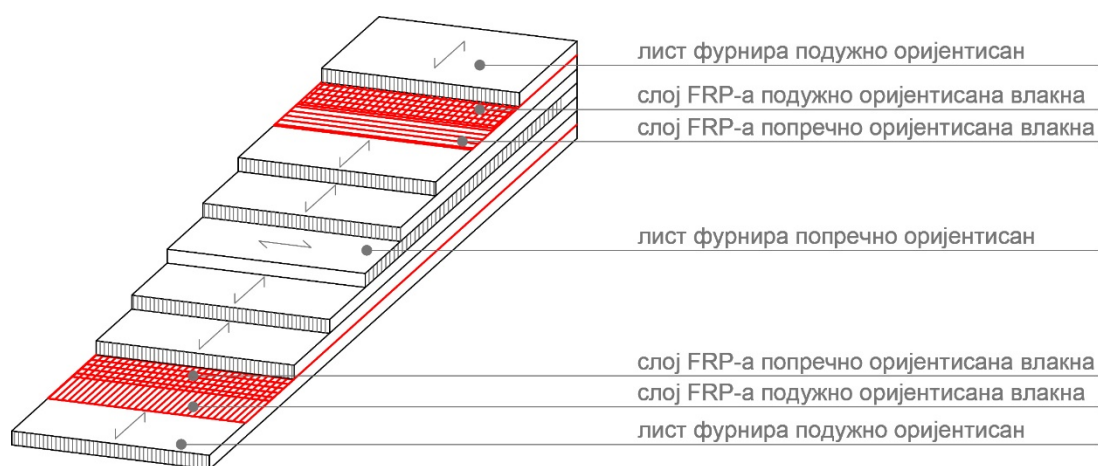
ЕК2ОР1		20 min = 5+15 min	
Адхезив		Епокси	
Масени однос:		4:1	
Нанос лепила:		250 g/m ²	
Услови пресовања			
Горња врела преса:		151°C	
Доња врела преса:		145°C	
Притисак:		15 МПа	
		Средишњи слој:	
Време		Напон	Температура
min	sec	mV	°C
	0	0.4	32.65
	20	0.6	36.99
	40	0.9	43.50
1	0	1	45.67
1	20	1.2	50.01
1	40	1.45	55.43
2	0	1.70	60.86
2	20	1.90	65.20
2	40	2.30	73.88
3	0	2.50	78.22
3	20	2.80	84.73
3	40	3.05	90.15
4	0	3.15	92.32
4	30	3.45	98.83
5	0	3.62	102.52
5	30	3.78	105.99
6	0	3.79	106.21
6	30	3.80	106.43
7	0	3.80	106.43
7	30	3.82	106.86
8	0	3.85	107.51
8	30	3.85	107.51
9	0	3.85	107.51
9	30	3.85	107.51
10	0	3.90	108.60
11	0	3.92	109.03
12	0	3.97	110.11
13	0	4.00	110.77
14	0	4.05	111.85
15	0	4.05	111.85
16	0	4.07	112.28
18	0	4.10	112.93
20	0	4.20	115.10

Табела 31. Услови пресовања плоче МК2ОР1

МК2ОР1		30 min = 15+15 min	
Адхезив		МУФ	
Масени однос:		4:1	
Нанос лепила:		250 g/m ²	
Услови пресовања			
Горња врела преса:		151°C	
Доња врела преса:		145°C	
Притисак:		15 МПа	
		Средишњи слој:	
Време		Напон	Температура
min	sec	mV	°C
	0	0.02	24.40
	20	0.09	25.92
	40	0.1	26.14
1	0	0.5	34.82
1	20	0.8	41.33
1	40	1.10	47.84
2	0	1.30	52.18
2	20	1.60	58.69
2	40	1.80	63.03
3	0	2.00	67.37
3	20	2.20	71.71
3	40	2.30	73.88
4	0	2.40	76.05
4	30	2.40	76.05
5	0	2.45	77.13
5	30	2.50	78.22
6	0	2.50	78.22
6	30	2.60	80.39
7	0	2.70	82.56
7	30	2.80	84.73
8	0	2.90	86.90
8	30	2.95	87.98
9	0	3.02	89.50
9	30	3.10	91.24
10	0	3.18	92.97
11	0	3.22	93.84
12	0	3.30	95.58
13	0	3.39	97.53
14	0	3.50	99.92
15	0	3.58	101.65
16	0	3.58	101.65
18	0	3.70	104.26
20	0	3.80	106.43
22	0	3.60	102.09
24	0	3.66	103.39
26	0	3.78	105.99
28	0	3.82	106.86
30	0	3.85	107.51

Плоча Комбинације 3 представља седмослојну плочу ојачану полимерима армираним влакнима позиционираним у две сљубнице, у укупно четири слоја. У првој и шестој сљубници тканина са једносмерно оријентисаним карбонским влакнима постављена је паралелно правцу дрвних влаканаца у спољашњим листовима фурнира, а потом на њу додат још један слој тканине управно оријентисан у односу на влакна спољашњих листова фурнира, формирајући тако мрежу у два правца ($S1_{||}+6_{\perp}$). Тканине су постављене водећи рачуна о симетрији попречног пресека целе плоче. Схематски приказ попречног пресека плоче приказан је на слици 72.

Плоча која је слепљена са епоксидним адхезивом је у 8. min достигла температуру 101.0°C у средишњем слоју, а потом је пресована још 15 min, што укупно износи 23 min. У Табелама 32. и 33. приказани су услови пресовања пратећењем промена напона и температуре током времена у средишњем слоју. Плоча која је слепљена са меламин-уреа формалдехидним адхезивом је у 15. min достигла температуру 104.26°C у средишњем слоју, а потом је пресована још 15 min, што укупно износи 30 min.



Слика 72. Попречни пресек плоче К3

Табела 32. Услови пресовања плоче ЕКЗОР1

ЕКЗОР1		23 min = 8+15 min	
Адхезив		Епокси	
Масени однос:		4:1	
Нанос лепила:		250 g/m ²	
Услови пресовања			
Горња врела преса:		151°C	
Доња врела преса:		145°C	
Притисак:		15 МПа	
		Средишњи слој:	
Време		Напон	Температура
min	sec	mV	°C
	0	0.2	28.31
	20	0.4	32.65
	40	0.6	36.99
1	0	0.9	43.50
1	20	1.18	49.57
1	40	1.70	60.86
2	0	1.90	65.20
2	20	2.40	76.05
2	40	2.80	84.73
3	0	2.95	87.98
3	20	3.10	91.24
3	40	3.15	92.32
4	0	3.20	93.41
4	30	3.25	94.49
5	0	3.30	95.58
5	30	3.35	96.66
6	0	3.40	97.75
6	30	3.42	98.18
7	0	3.43	98.40
7	30	3.50	99.92
8	0	3.55	101.00
8	30	3.58	101.65
9	0	3.60	102.09
9	30	3.61	102.30
10	0	3.63	102.74
11	0	3.65	103.17
12	0	3.75	105.34
13	0	3.70	104.26
14	0	3.81	106.64
15	0	3.85	107.51
16	0	3.90	108.60
18	0	3.95	109.68
20	0	4.00	110.77
22	0	4.02	111.20
23	0	4.03	111.42

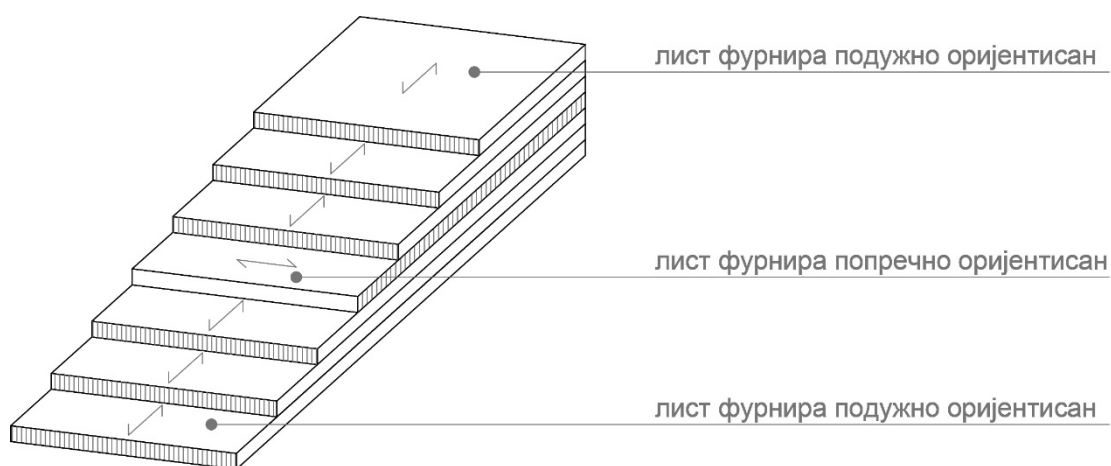
Табела 33. Услови пресовања плоче МКЗОР1

МКЗОР1		30 min = 15+15 min	
Адхезив		MUF	
Масени однос:		4:1	
Нанос лепила:		250 g/m ²	
Услови пресовања			
Горња врела преса:		151°C	
Доња врела преса:		145°C	
Притисак:		15 МПа	
		Средишњи слој:	
Време		Напон	Температура
min	sec	mV	°C
	0	0.05	25.05
	20	0.2	28.31
	40	0.4	32.65
1	0	0.6	36.99
1	20	0.8	41.33
1	40	1.22	50.44
2	0	1.60	58.69
2	20	1.90	65.20
2	40	2.19	71.49
3	0	2.30	73.88
3	20	2.40	76.05
3	40	2.42	76.48
4	0	2.50	78.22
4	30	2.55	79.30
5	0	2.59	80.17
5	30	2.62	80.82
6	0	2.70	82.56
6	30	2.79	84.51
7	0	2.83	85.38
7	30	2.86	86.03
8	0	3.00	89.07
8	30	3.05	90.15
9	0	3.15	92.32
9	30	3.19	93.19
10	0	3.20	93.41
11	0	3.26	94.71
12	0	3.38	97.31
13	0	3.42	98.18
14	0	3.48	99.48
15	0	3.70	104.26
16	0	3.78	105.99
18	0	3.62	102.52
20	0	3.65	103.17
22	0	3.73	104.91
24	0	3.79	106.21
26	0	3.85	107.51
28	0	3.90	108.60
30	0	3.98	110.33

КОМБИНАЦИЈА 4:

Плоча Комбинације 4 представља неојачану седмослојну LVL плочу. Плоча је формирана као референтни узорак у циљу поређења резултата са ојачаним узорцима. Попречни пресек плоче приказан је на слици 73.

Плоча у којој је употребљен епоксидни адхезив је у 10. min достигла температуру 101.43°C у средишњем слоју, а потом је пресована још 15 min, што укупно износи 23 min. У Табелама 34. и 35. приказани су услови пресовања пратећењем промена напона и температуре током времена у средишњем слоју. Плоча у којој је употребљен меламина-уреа формалдехидни адхезив је у 11. min достигла температуру 100.57°C у средишњем слоју, а потом је пресована још 15 min, што укупно износи 31 min. Код обе плоче примећено је нешто дуже време потребно за достизање температуре преко 100°C у средњем слоју. Плочи слепљеној са епоксидним адхезивом је било потребно нешто краће време у односу на плочу слепљену MUF-ом, а што се закључује и на основу претходних табела овог поглавља.



Слика 73. Попречни пресек плоче K4

Табела 34. Услови пресовања плоче ЕК4КР1

ЕК4КР1		25 min = 10+15 min	
Адхезив		Епокси	
Масени однос:		4:1	
Нанос лепила:		250 g/m ²	
Услови пресовања			
Горња врела преса:		151°C	
Доња врела преса:		145°C	
Притисак:		15 МПа	
		Средишњи слој:	
Време		Напон	Температура
min	sec	mV	°C
	0	0.05	25.05
	20	0.2	28.31
	40	0.3	30.48
1	0	0.6	36.99
1	20	0.98	45.23
1	40	1.18	49.57
2	0	1.50	56.52
2	20	2.00	67.37
2	40	2.40	76.05
3	0	2.70	82.56
3	20	2.90	86.90
3	40	2.93	87.55
4	0	3.00	89.07
4	30	3.05	90.15
5	0	3.10	91.24
5	30	3.18	92.97
6	0	3.20	93.41
6	30	3.22	93.84
7	0	3.27	94.92
7	30	3.30	95.58
8	0	3.38	97.31
8	30	3.40	97.75
9	0	3.42	98.18
9	30	3.50	99.92
10	0	3.57	101.43
11	0	3.59	101.87
12	0	3.62	102.52
13	0	3.65	103.17
14	0	3.78	105.99
15	0	3.80	106.43
16	0	3.83	107.08
18	0	3.86	107.73
20	0	3.95	109.68
22	0	4.00	110.77
24	0	4.05	111.85
25	0	4.07	112.28

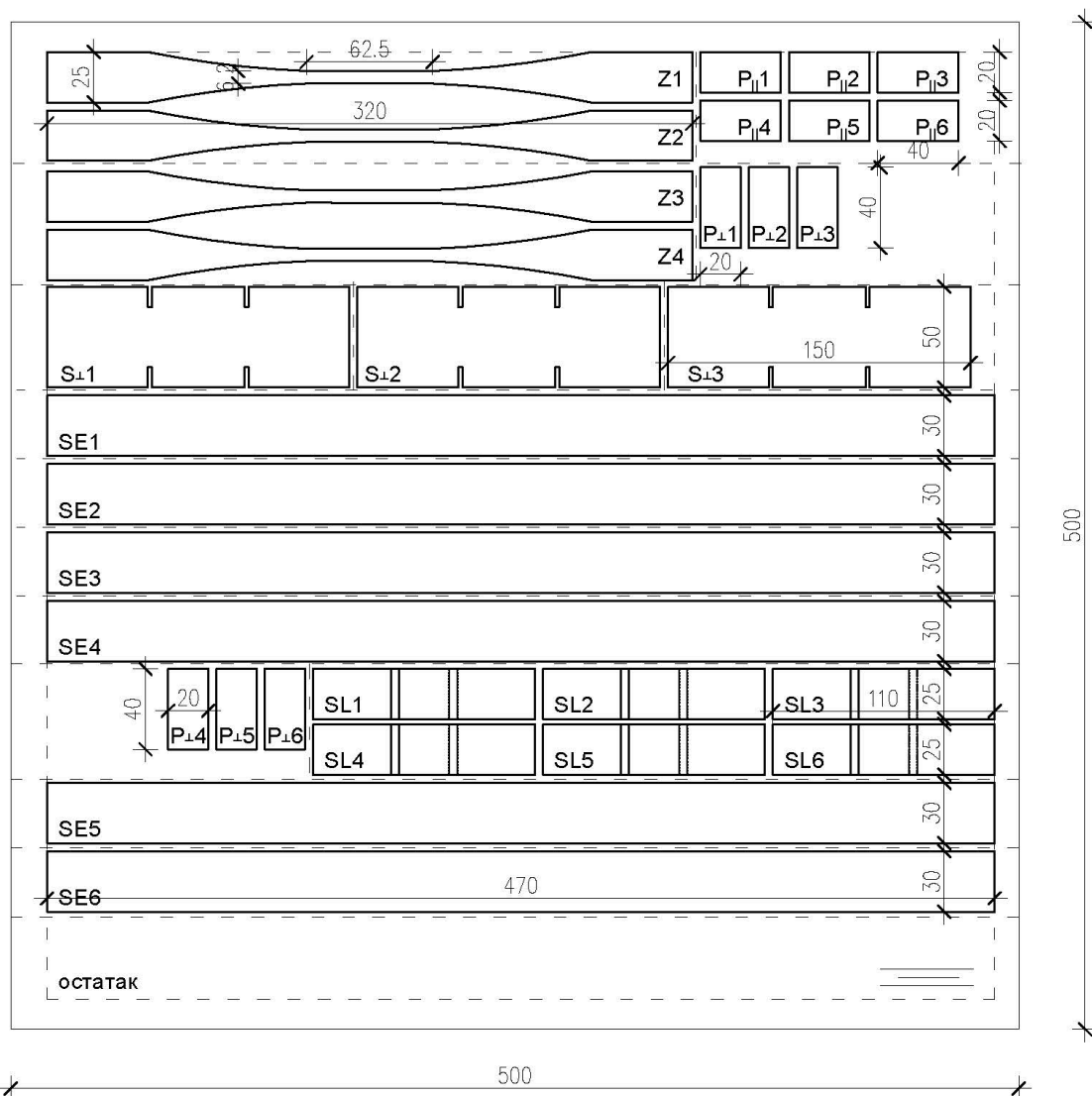
Табела 35. Услови пресовања плоче МК4КР1

МК4КР1		26 min = 11+15 min	
Адхезив		MUF	
Масени однос:		4:1	
Нанос лепила:		250 g/m ²	
Услови пресовања			
Горња врела преса:		151°C	
Доња врела преса:		145°C	
Притисак:		15 МПа	
		Средишњи слој:	
Време		Напон	Температура
min	sec	mV	°C
	0	0.3	30.48
	20	0.64	37.86
	40	0.82	41.76
1	0	1.2	50.01
1	20	1.5	56.52
1	40	1.80	63.03
2	0	2.10	69.54
2	20	2.20	71.71
2	40	2.40	76.05
3	0	2.43	76.70
3	20	2.50	78.22
3	40	2.62	80.82
4	0	2.72	82.99
4	30	2.80	84.73
5	0	2.90	86.90
5	30	3.01	89.28
6	0	3.15	92.32
6	30	3.18	92.97
7	0	3.22	93.84
7	30	3.25	94.49
8	0	3.35	96.66
8	30	3.40	97.75
9	0	3.42	98.18
9	30	3.43	98.40
10	0	3.44	98.61
11	0	3.53	100.57
12	0	3.60	102.09
14	0	3.70	104.26
16	0	3.78	105.99
18	0	3.82	106.86
20	0	3.85	107.51
22	0	3.90	108.60
24	0	3.94	109.46
26	0	3.98	110.33

5.3.2.2 Исецање узорака за експериментално утврђивање механичких карактеристика

Механичке карактеристике фурнирских плоча испитане су на Универзитету у Београду - Шумарском факултету, на Катедри примарне прераде дрвета, у Лабораторији за својства дрвета. На формираним узорцима обављено је испитивање следећих механичких својстава:

- влажност дрвета,
- чврстоћа на смицање у равни плоче (у слоју адхезива),
- чврстоћа на смицање управно на раван плоче,
- савојна чврстоћа у равни плоче и модула еластичности,
- затезна чврстоћа у правцу влакана спољних листова фурнира,
- притисна чврстоћа паралелно и управно на влакна.



Слика 74. Схема исецања епрувета из једне плоче

Узорци су испитани према важећим EN и ASTM стандардима, а што ће бити додатно дефинисано у наредном поглављу. Према одабраним стандардима направљена је и схема исецања епрувета, и планиран је број потребних епрувета да би се обезбедио потребан број понављања за испитивање свих напред наведених механичких својста. Приликом пробног испитивања притисне чврстоће модификована је димензија епрувета како би се она могла испитати на опреми коју поседује лабораторија. Схема исецања епрувета из једног узорка приказана је на слици 74.

Епрувете су изрезане према приказаној схеми на Универзитету у Београду - Шумарском факултету, Катедри за машине и уређаје у преради дрвета, у Центру за машине и алате за обраду дрвета, на универзалној комбинованој машини за обраду дрвета CU410K. Епрувете за испитивање затезне чврстоће изрезане су према шаблону помоћу глодалице. У току резања свака изрезана епрувета је обележена.

У Центру су изрезане 24 плоче. Приликом резања плоча залепљених MUF адхезивом дошло је до раслојавања 5 плоча, са следећим ознакама: МК2ОР1, МК2ОР2, МК2ОР3, МК3ОР2, МК3ОР3, односно плоча ојачаних са четири слоја карбонске тканине. Попречни пресек раслојене плоче приказан је на слици 75. Ове плоче нису биле предмет даљег испитивања. Преостале плоче залепљене меламин-уреа формалдехидним адхезивом су изрезане према схеми. Из плоча залепљених епоксидним адхезивом су изрезане све предвиђене епрувете. На слици 76 приказан је процес исецања епрувета. У Табели 36. дат је приказ изрезаних плоча, а у Табели 37. број потребних епрувета за испитана механичка својства.

Табела 36. Евиденција изрезаних плоча

КОМБИНАЦИЈА	АДХЕЗИВ		ОПИС
	ЕРОХУ	MUF	
К1	EK1OP1	MK1OP1	ојачане плоче
	EK1OP2	MK1OP2	
	EK1OP3	MK1OP3	
К2	EK2OP1	MK2OP1	ојачане плоче
	EK2OP2	MK2OP2	
	EK2OP3	MK2OP3	
К3	EK3OP1	MK3OP1	ојачане плоче
	EK3OP2	MK3OP2	
	EK3OP3	MK3OP3	
К4	EK4KP1	MK4KP1	неојачане плоче
	EK4KP2	MK4KP2	
	EK4KP3	MK4KP3	

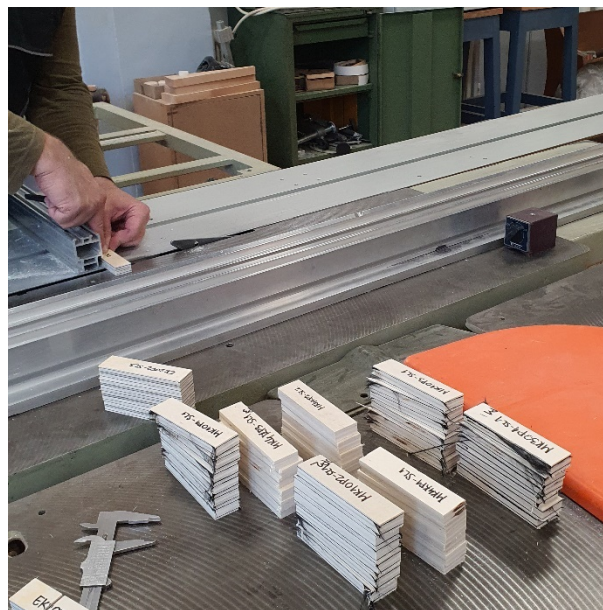
Табела 37. Број потребних епрувета за испитана механичка својства

МЕХАНИЧКО СВОЈСТВО	Број епрувета/ плочи	К1		К2		К3		К4		УКУПАН	
		Број епрувета		Број епрувета		Број епрувета		Број епрувета		број епрувета	
		Е	MUF	Е	MUF	Е	MUF	Е	MUF	Е	MUF
чврстоћа на смицање у равни плоче	6	18	18	18	/	18	6	18	18	72	42
чврстоћа на смицање управно на раван плоче	3	9	9	9	/	9	3	9	9	36	21
савојна чврстоћа у равни плоче и модул еластичности	6	18	18	18	/	18	6	18	18	78	42
затезна чврстоћа у правцу влакана спољних листова фурнира	4	12	12	12	/	12	4	12	12	48	28
притисна чврстоћа паралелно влакнима	6	18	18	18	/	18	6	18	18	78	42
притисна чврстоће управно на влакна	6	18	18	18	/	18	6	18	18	78	42

Након изрезавања све мање епрувете су кондициониране у ексихаторима, а веће у кадицама изнад засићеног раствора амонијумијум-нитрата (NH_4NO_3), у стандардној клими ($(20\pm 2)^\circ\text{C}$ и $(65\pm 5)\%$ релативне влажности) (SRPS EN 12765:2016), 30 дана.



Слика 75. Раслојавање плоче са MUF адхезивом након сечења



Слика 76. Процес исецања епрувета

5.4. Експериментално утврђивање физичких и механичких својстава КОМПОЗИТНОГ ПРОИЗВОДА

Механичке карактеристике формираних плоча испитане су на Универзитету у Београду – Шумарском факултету, на Катедри примарне прераде дрвета, у Лабораторији за својства дрвета, под надзором ван.проф. др Владислава Здравковића, на машини за испитивање механичких својстава дрвета и производа од дрвета „Wood Tester WT-4“, капацитета максималне силе од 40 kN. У оквиру овог рада испитане су следеће физичке и механичке карактеристике дрвета :

- | | |
|--|--|
| ▪ влажност дрвета, | SRPS EN 314-1:2010 |
| ▪ чврстоћа на смицање у равни плоче | SRPS EN 14374:2012 |
| ▪ савојна чврстоће у равни плоче | SRPS EN 408:2014 |
| ▪ чврстоћа на смицање управно на раван плоче | SRPS CEN/TS 14966:2010 |
| ▪ притисна чврстоћа паралелно влакнима | модификован узорак
SRPS EN 14374:2012 |
| | SRPS EN 408:2014 |
| ▪ притисна чврстоћа управно на влакна | модификован узорак
SRPS EN 14374:2012 |
| | SRPS EN 408:2014 |
| ▪ затезна чврстоћа паралелно влакнима | ASTM D 3500 – 90 |

С обзиром да регулатива која уређује област испитивања и примене композитних плоча на бази дрвета и полимера армираним влакнима није дефинисана, сва испитивања у оквиру овог рада су обављена према важећим EN и ASTM International стандардима.

Испитивања су спроведена према следећим стандардима:

1. SRPS EN 314-1:2010 Фурнирске плоче (шперплоче) - Квалитет лепљења - Део 1: Методе испитивања;
2. SRPS EN 14374:2012 Timber structures - Structural laminated veneer lumber - Requirements;
3. SRPS EN 408:2014 Дрвене конструкције – Конструкцијско дрво и лепљено ламелирано дрво – Одређивање физичких и механичких својстава;
4. SRPS CEN/TS 14966:2010 Плоче на бази дрвета – Индикативне методе малог опсега за испитивање одређених механичких својстава помоћу показивача мале скале;
5. ASTM D 3500 – 90 Standard Test Methods for Structural Panels in Tension.

Сва испитивања, осим одређивања притисне чврстоће, обављена су по свему у складу са стандардима EN и ASTM. За одређивање притисне чврстоће епрувете су модификоване и димензионално прилагођене машини за испитивање. Испитиване су мале епрувете, а добијене вредности, посредством корекционих коефицијената, трансформисане су на вредности које одговарају реалним пресецима. Ове вредности су улазни подаци за анализу носивости и примене ојачаних плоча на бази дрвета у архитектури.

5.4.1 Одређивање влажности дрвета

Влажност сваког узорка у време испитивања неопходан је податак због варијације масе и чврстоће променом влаге у дрвету. Мерење влажности у узорку вршено је сушењем при температури $103 \pm 2^\circ\text{C}$, до константне масе. Влажност дрвета се изражава у процентима по тежини воде у односу на тежину сувог дрвета, сушеног на 103°C .

Влажност узорка израчуната је према следећој формули:

$$w = \frac{G_0 - G}{G} \times 100 (\%)$$

- w - апсолутна влажност дрвета изражена у процентима;
- G_0 - маса влажног дрвета;
- G - маса апсолутно сувог дрвета.

Извршена су два мерења влажности епрувета: прво мерење неосредно након изрезивања епрувета из плоча, а друго мерење након кондиционирања епрувета и постизања равнотежне влажности у стандардној клими. Испитивање влажности епрувета након изрезивања из плоча приказани су у Табели 38. и показују је да је просечна влажност епрувета била 4.56%.

Табела 38. Одређивање влажности епрувета пре кондиционирања

	G_0 (g)	G (g)	w (%)
1	15.27	14.56	4.876
2	21.52	20.72	3.861
3	11.78	11.12	5.935
4	23.25	22.35	4.027
5	16.44	15.77	4.249
6	17.73	16.98	4.417
	просечна вредност		4.561

Влажност епрувета након кондиционирања, у тренутку испитивања механичких својстава, мерена је након испитивања савојне чврстоће, те се због резултата који ће бити приказани у даљем тексту није за одређивање влажности узео једнак број епрувета по адхезиву. С обзиром да је гравиметријска метода мерења влажности деструктивна метода, влажност је мерена на 7 епрувета изрезаних из плоча које су слепљене епоксидним адхезивом и 3 епрувете из плоча слепљених MUF-ом. У Табели 39. приказана је просечна влажност епрувета након кондиционирања. Плоче лепљене епоксидним адхезивом показују просечну влажност око 5.525%, док плоче лепљене MUF-ом око 8.339%. Током кондиционирања, у плочама лепљеним MUF-ом влага се повећала за око 83%, док се у плочама лепљеним епоксидним адхезивом влага повећана за свега 21%, иако су епрувете изрезане из плоча кондициониране на идентичан начин. Ово је последица хемијске структуре, начина формирања веза и умрежавања адхезива. Осим тога, контролни узорци плоча слепљених епоксидним адхезивом (ЕК4КР2 и ЕК4КР3) постижу већу и уједначенију влажност у односу на ојачане плоче. То може бити последица продора воде кроз целокупни попречни пресек и површину епрувета кроз спољашње листове фурнира, док она код ојачаних плоча нема могућност продора кроз слојеве фурнира, јер је спречена слојем карбонске тканине.

Табела 39. Одређивање влажности епрувета након кондиционирања

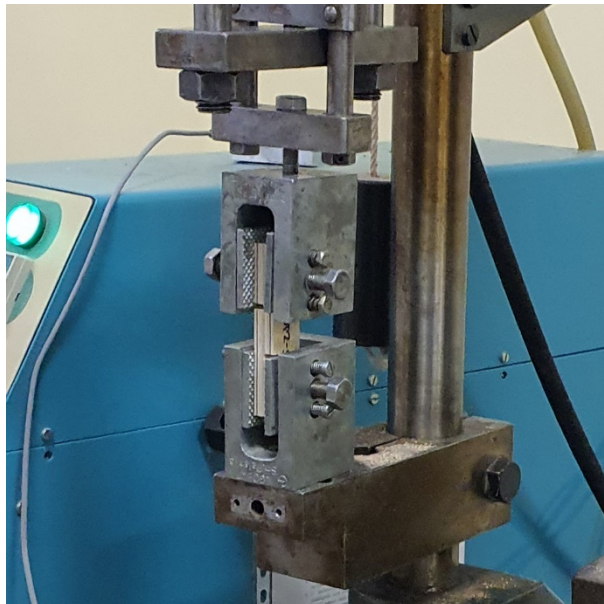
	G_0 (g)	G (g)	w (%)	просечна вредност
1 ЕК1ОР1	24.15	22.82	5.828	епоксу 5.525%
2 ЕК1ОР2	22.07	20.86	5.801	
3 ЕК2ОР1	35.48	33.87	4.753	
4 ЕК3ОР1	31.12	29.55	5.313	
5 ЕК3ОР2	32.00	30.60	4.575	
6 ЕК4КР2	28.44	26.81	6.080	
7 ЕК4КР3	23.54	22.14	6.323	
8 МК1ОР1	23.47	21.69	8.207	MUF 8.339%
9 МК1ОР3	22.40	20.74	8.004	
10 МК4КР3	24.59	22.60	8.805	
			просечна вредност	6.369%

5.4.2 Одређивање смицајне чврстоће у равни плоче

Испитивање смицајне чврстоће у равни плоче, односно у слоју адхезива спроведено је према стандарду SRPS EN 314-1:2010 – Фурнирске плоче (шперплоче) - Квалитет лепљења - Део 1: Методе испитивања. У оквиру стандарда дефинисана је димензија епрувета и начин испитивања смицајне чврстоће у равни плоче. Испитивање се врши дејством силе затезања, а епрувете се постављају у центар стезних папучица, како би се оптерећење са машине пренело до предвиђене смичуће површине без ексцентрицитета. Стандардом се дефинише испитивање смицајне чврстоће за сваки пар слубница и то десет епрувета по плочи. Према наведеном стандарду, на епруветама се урезају жљебови (урези) чиме се формира површина по којој је предвиђено смицање. За потребе рада испитивана је смицајна чврстоћа у равни плоче за средишњи пар слубница, односно у средишњој линији адхезива. Епрувете су испитане на суво, без предтретмана. Укупно је испитано 114 епрувета, од којих 72 епрувете из плоча слепљених епоксидним адхезивом, а 42 из плоча слепљених MUF-ом.

Епрувете су призматичног облика, димензија попречног пресека 110 mm x 25 mm. Дебљина епрувета зависи од дебљине плоче и креће се у опсегу $t=9.63 - 14.76$ mm. Предвиђена смичућа површина дефинисана је стандардом и износи 25 x 25 mm. Пре почетка испитивања

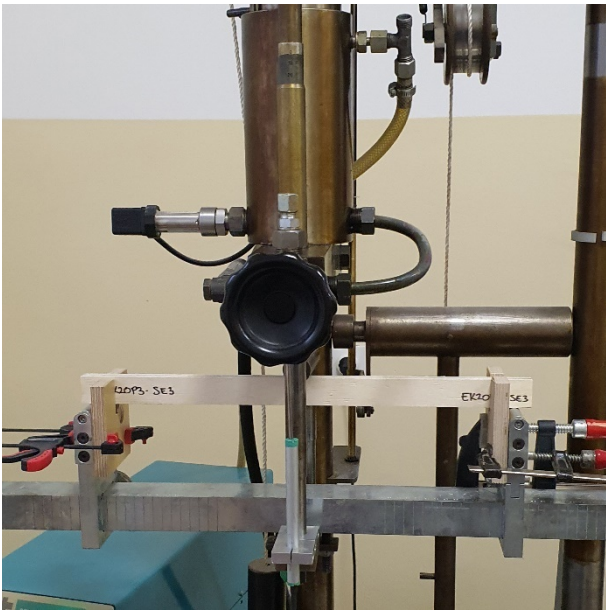
тачне димензије смичуће површине на свакој епрувети измерене су кљунастим мерилом (нонијусом) са прецизношћу 0.01 mm. Епрувете су постављене у вертикалан положај у машини за испитивање, стегнути и оптерећени одговарајућом силом затезања (сл.77). Испитивање је трајало до лома са контролисаном брзином померања. Свака епрувета је доживела лом у предвиђеном временском периоду 30 ± 10 s. Подаци о оптерећењу добијени су помоћу програма „Console“.



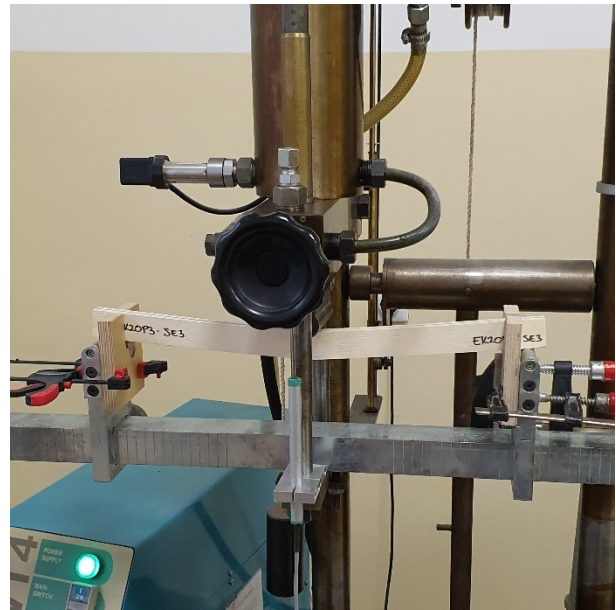
Слика 77. Испитивање смицајне чврстоће у равни плоче

5.4.3 Одређивање савојне чврстоће у равни плоче и модула еластичности при савијању

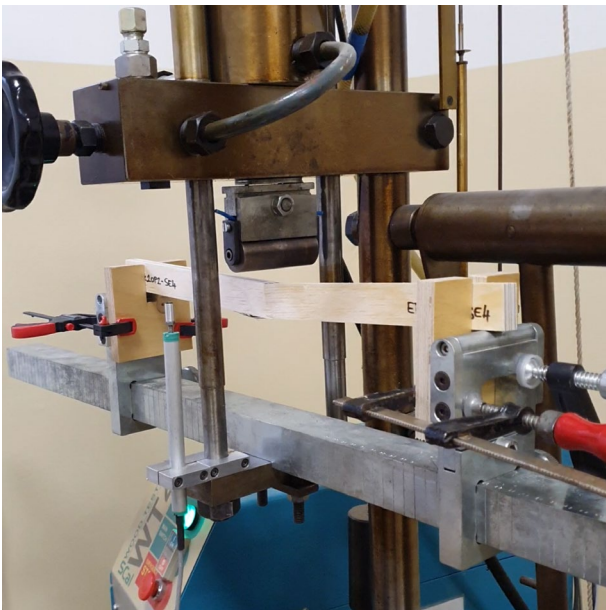
Испитивање савојне чврстоће у равни плоче спроведено је према стандарду за структурну примену LVL-а – SRPS EN 14374:2012 у оквиру кога се дефинишу корекциони коефицијенти за одређивање савојне чврстоће у односу на димензије епрувета, а који за испитивање механичких карактеристика упућује на тестирање носача на савијање у равни плоче према стандарду за одређивање физичких и механичких карактеристика конструкцијског и лепљеног ламелираног дрвета – SRPS EN 408:2014. Према наведеном стандарду епрувете се испитују као просте греде оптерећене са две концентрисане силе у срединама распона. Како лабораторија за испитивање својстава дрвета нема потребну апаратуру за савијање путем две концентрисане силе, испитивање је вршено оптерећењем гредног носача једном концентрисаном силом у средини распона. Укупно је испитано 76 носача призматичног облика, димензија попречног пресека 30mm x ширина пресека ($t=9.63 - 14.76$ mm) и распона између ослоначких тачака 450mm. Пре почетка испитивања димензије епрувета су измерене кљунастим мерилом (нонијусом) са прецизношћу 0.1 mm. Распон између ослоначких тачака дефинисан је стандардом и износи 18 пута висина попречног пресека, са дозвољеним одступањима ± 3 висине пресека $l = 18h \pm 3h$. Угиб је мерен у средини носача помоћу индуктивног угибомера. Модул еластичности мерен је путем сонде за испитивање модула еластичности. Испитивање је трајало до лома контролисаном брзином померања од 2,0 mm/min и на тај начин се максимална сила достигала у интервалу од 300 ± 120 s, како стандард дефинише. Регистровање података о максималној сили, модулу еластичности и максималном угибу бележено је путем аквизиционог система „Console“. Поступак испитивања чврстоће на савијање у равни плоче приказан је на сликама сл.78 – 81.



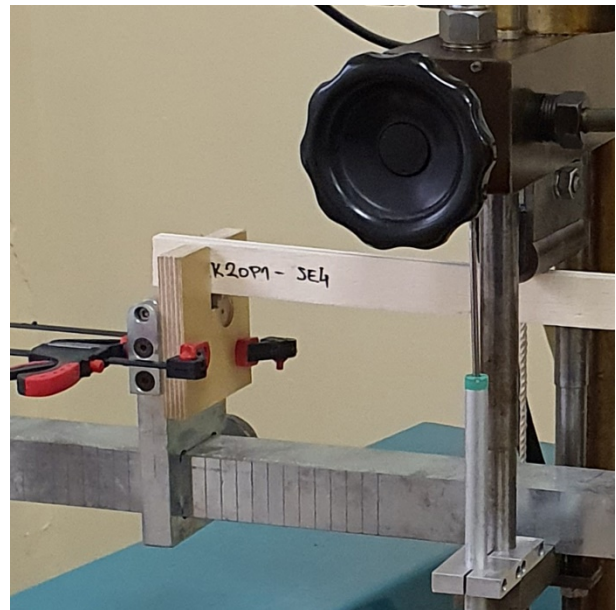
Слика 78. Испитивање савојне чврстоће у равни плоче и модула еластичности



Слика 79. Савијање епрувете током испитивања савојне чврстоће у равни плоче и модула еластичности



Слика 80. Савијање епрувете до лома током испитивања савојне чврстоће у равни плоче и модула еластичности

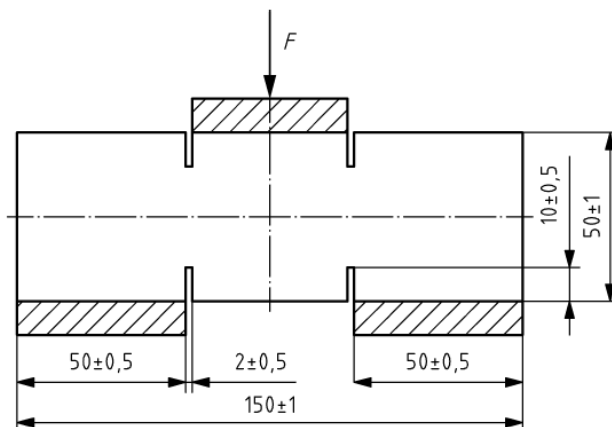


Слика 81. Приказ бочних придржајних тачака направљених од фурнирске плоче

Приликом дејства силе долазило је до бочне ротације епрувета, због њихове мале ширине. Овај проблем је превазиђен тако што је направљено лежиште од фурнирске плоче зарезано тако да у њега улази испитна епрувета својом ширином, и код ослонаца оно представља бочне придржајне тачке, односно не дозвољава бочну ротацију испитне епрувете под дејством силе. Испитна епрувета се у доњој зони не ослања на поменуто лежиште, већ искључиво на ослонце. Лежиште је стегама причвршћено за ослоначке папучице (сл.81).

5.4.4 Одређивање чврстоће на смицање управно на раван плоче

Одређивање чврстоће на смицање управно на раван плоче или *panel shear test* вршено је према стандарду SRPS CEN/TS 14966:2010 Плоче на бази дрвета - Индикативне методе малог опсега за испитивање одређених механичких својстава помоћу показивача мале скале. Према наведеном стандарду епрувете се испитују силом притиска која делује површински у средњој трећини пресека између две смичуће површине. За ово испитивање прављена је додатна опрема дефинисана стандардом. Епрувета је ослоњена у првој и трећој трећини пресека читавом својом површином. На епрувети димензија 150 x 50 mm изрезани су усеци на трећинама распона са доње и горње стране, у дубини од 10 mm, а према слици 82. На тај начин формиране су две смичуће површине по којима треба да дође до лома.

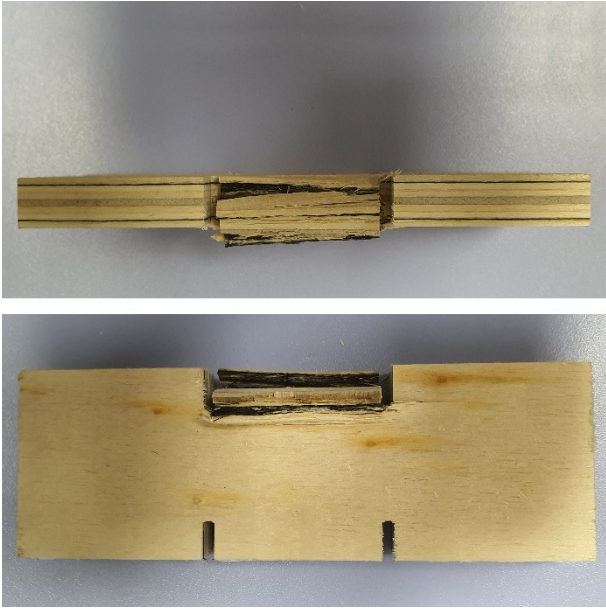


Слика 82. Скица епрувете за одређивање чврстоће на смицање управно на раван плоче

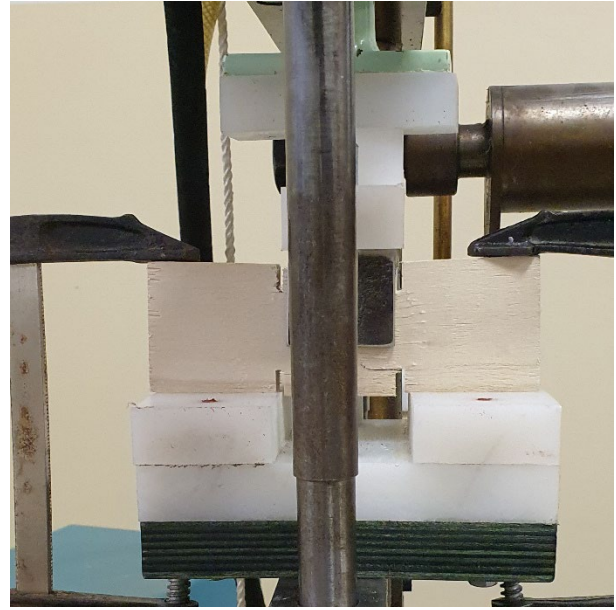
У раду је укупно испитано 40 епрувета, од тога 36 лепљених епоксијем и 4 помоћу MUF-а. Пре почетка испитивања димензије смичућих површина сваке епрувете измерене су кљунастим мерилом (нонијусом) са прецизношћу 0.01 mm. Епрувете су постављене у вертикалан положај у машини за испитивање, стегнути и оптерећени одговарајућом силом притиска (сл.84).

Приликом пробног тестирања епрувета, због прекорачења напона притиска на месту дејства силе, дошло је до лома епрувете на ослабљеном делу пресека, индуковано силом притиска (сл.83). Како би се овај проблем превазишао и лом епрувете настао искључиво као последица смичућих напрезања, алат на притисној површини је додатно модификован, односно формирана је челична притисна површина са бочним странама, како би се на месту где се десио лом приказан на претходној слици, епрувета додатно ојачала бочним утезањем. Такође, стегама је обезбеђена стабилизација епрувете како не би дошло до њене ротације приликом испитивања, а што би утицало на коначне резултате. На овај начин на епруветама је дошло до лома под дејством сила смицања (сл.84). Машина и алати за испитивање приказани су на слици 85.

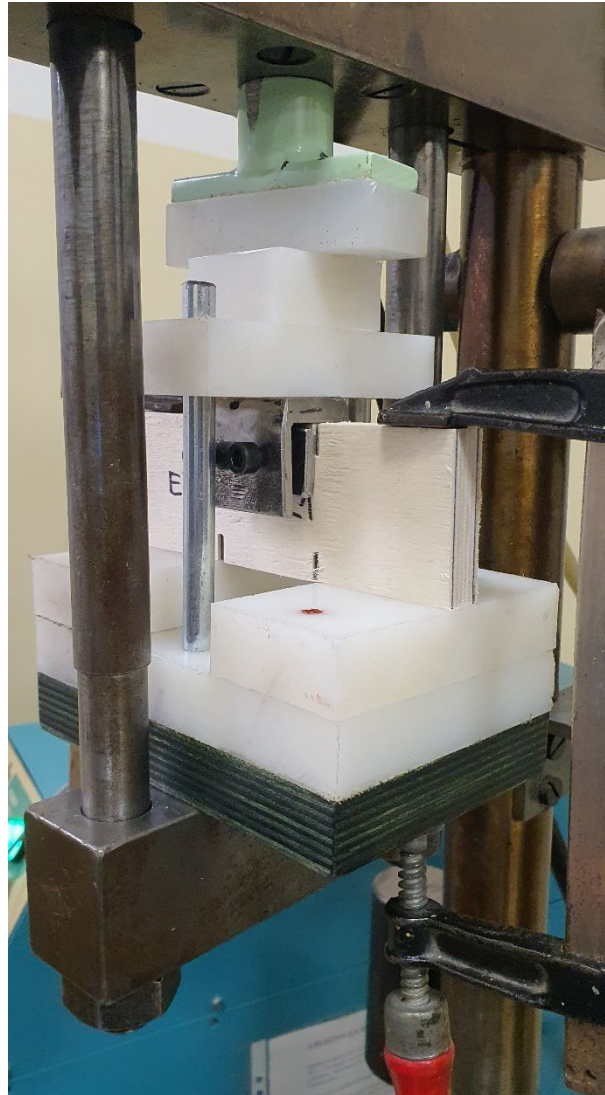
Испитивање је трајало до лома контролисаном брзином померања тако да се максимална сила достигала у интервалу од 60 ± 30 s, како је дефинисано стандардом. Максималне силе су регистроване помоћу аквизиционог система „Console“.



Слика 83. Лом епрувете прекорачењем притисне чврстоће



Слика 84. Лом епрувете смичућим напрезањима



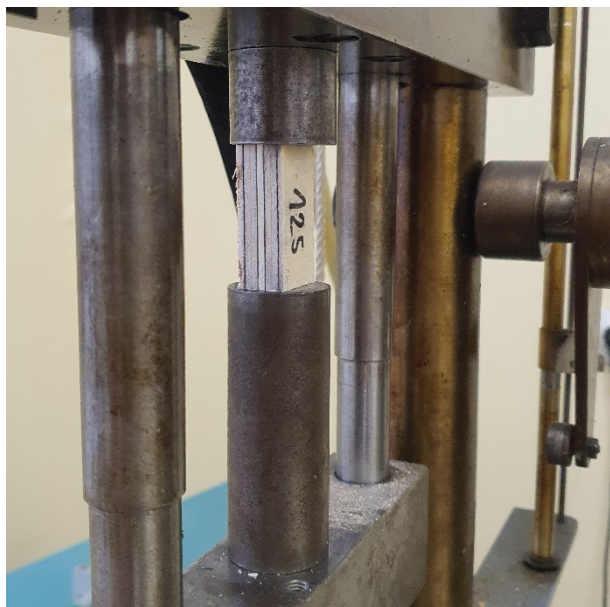
Слика 85. Машина и алати за испитивање чврстоће на смицање управно на раван плоче

5.4.5 Одређивање притисне чврстоће паралелно и управно на влакна спољашњих листова фурнира

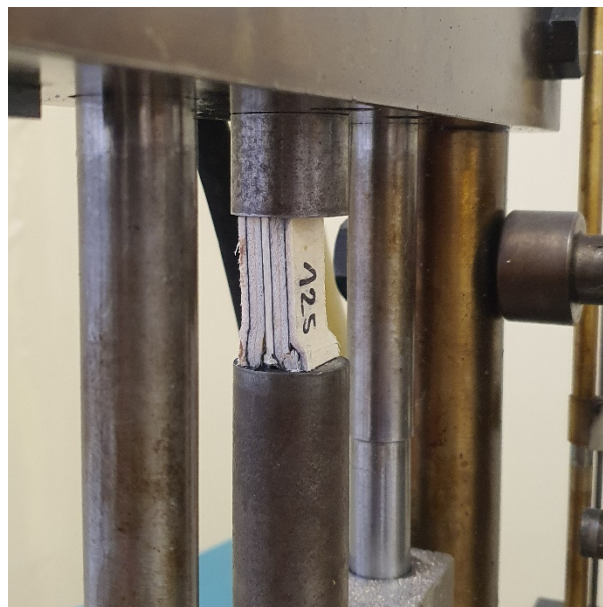
Испитивање притисне чврстоће паралелно у управно на влакна спољашњих листова фурнира LVL плоча дефинисана је стандардом SRPS EN 14374:2012 Timber structures – Structural laminated veneer lumber – Requirements, а који даље усмерава на испитивање према стандарду за Конструкцијско дрво и лепљено ламелирано дрво SRPS EN 408:2014. Стандард дефинише испитивање епрувета дејством концентрисане силе притиска централно, путем цилиндра или другог тела које омогућава дејство искључиво притиска, без савијања. Стандардом SRPS EN 408:2014 дефинишу се димензије епрувета у односу на тип дрвета који се испитује – монолитно дрво и лепљено ламелирано дрво. Димензије попречног пресека епрувета за LVL плоче дефинисане стандардом SRPS EN 14374:2012 износе 45 x 45 mm. С обзиром да је дебљина плоча слепљених епоксидним адхезивом у распону $t=12.98 - 14.80$ mm, није било могуће формирати епрувете ових димензија, те је испитано неколико епрувета различитих димензија попречног пресека и праћено њихово понашање под оптерећењем. Усвојен је попречни пресек димензија 20 mm x дебљина плоче (t), висине 40 mm. Епрувета ових димензија целокупним попречним пресеком стаје у попречни пресек притисног цилиндра испитне машине. Ова димензија епрувета усвојена је за оба испитивања и паралелно и управно на влакна спољашњих листова фурнира. На сликама 86 и 87 приказана је епрувета за испитивање притисне чврстоће управно влакнима при почетку дејства силе и оптерећењу максималном силом притиска.

У раду је испитано 72 епрувете по правцу, односно 18 епрувета по комбинацији ојачања. Пре почетка испитивања на свим епруветама измерене су димензије попречног пресека на који делује сила притиска, кљунастим мерилом са прецизношћу 0.01 mm. Епрувете су постављене централно у вертикалан положај у машини за испитивање и оптерећени су одговарајућом силом притиска (сл.86, 87).

Испитивање је трајало до лома контролисаном брзином померања тако да се максимална сила достигала у интервалу од 300 ± 120 s, како је дефинисано стандардом. Максимална сила је регистрована помоћу аквизиционог система „Console“.



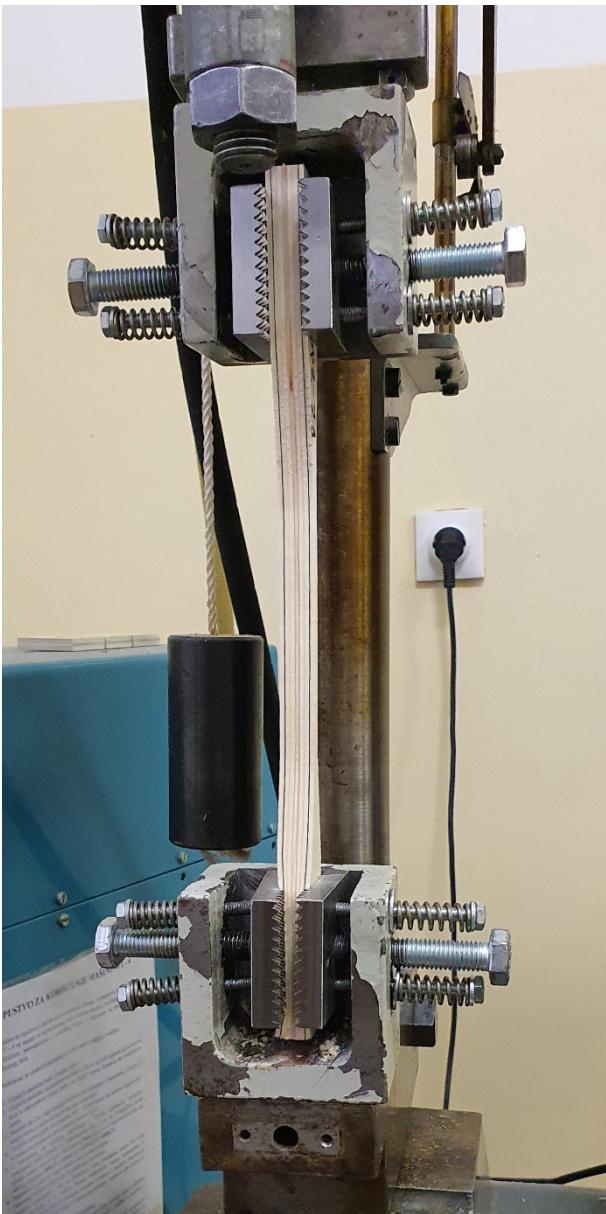
Слика 86. Испитивање притисне чврстоће управно влакнима - почетак оптерећења



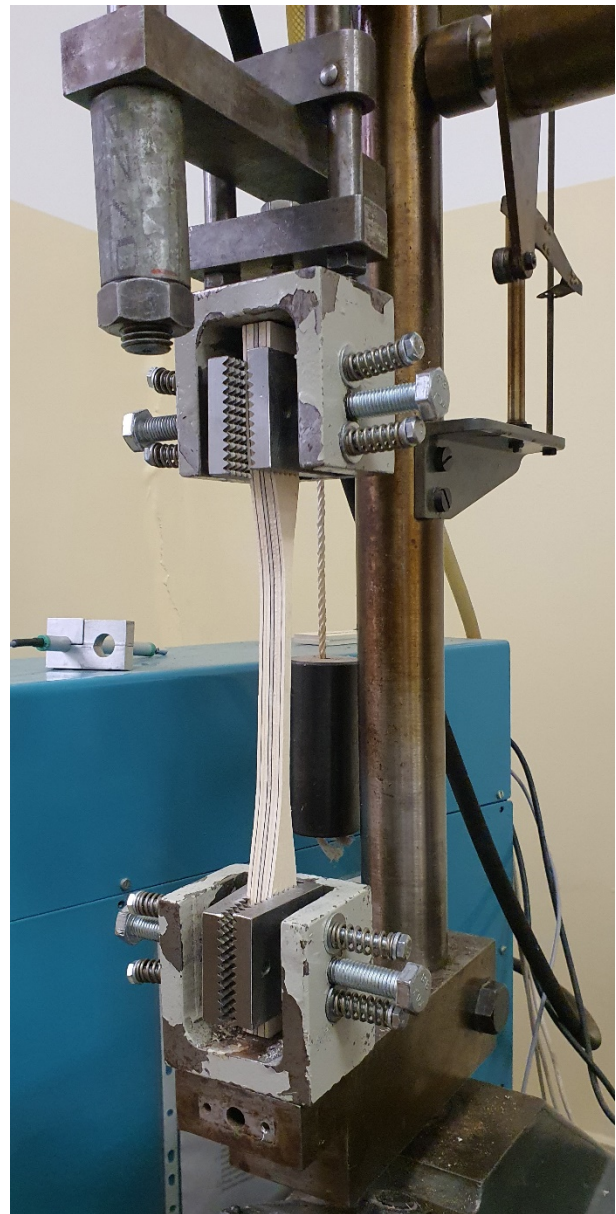
Слика 87. Испитивање притисне чврстоће управно влакнима - максимална сила

5.4.6 Одређивање затезне чврстоће паралелно влакнима спољашњих листова фурнира

Како легислатива у Србији предвиђа само велике димензије епрувета за испитивање затезања, а услед димензионалног ограничења епрувета, испитивање чврстоће на затезање паралелно влакнима обављено је на основу Интернационалног стандарда ASTM D 3500 – 90 *Standard Test Methods for Structural Panels in Tension*. Наведеним стандардом предвиђа се испитивање епрувета мале, средње и велике скале. За испитивање у оквиру овог рада одабране су епрувете мале скале, Тест метода А. Због димензије испитне епрувете, а посебно мале ширине пресека предвиђеног за лом, епрувете су морале бити пажљиво изрезане а прелаз са пуне на смањену ширину пресека морао је бити постепен како би се избегла концентрација напона.



а)



б)

Слика 88. Испитивање затезне чврстоће паралелно влакнима а) фронтални, б) бочни поглед

Стандард предвиђа постављање испитне епрувете у центар стезних папучица, како не би дошло до других утицаја на пресек и испитивање се врши дејством силе затезања. Дужина епрувете дефинисана стандардом износи 40 cm. Због димензионалног ограничења машине и максималне димензије епрувете која се може поставити тако да машини остане простора за слободн ход који износи 32 cm, дужина епрувете је смањена у простору за причвршћивање између папучица и у мањем делу радијуса закривљена. Димензије дела епрувете предвиђене за простор лома нису одступиле од стандардом дефинисаних вредности. На овај начин промена димензија епрувета није утицала на крајњи резултат тестирања.

Епрувете су постављене у вертикалан положај у машини, стегнуте и оптерећене одговарајућом силом затезања (сл.88). При почетном оптерећењу долазило је до проклизавања епрувета у временском интервалу до 30 s, а након тога крива на дијаграмима је пратила линеарно понашање у еластичној зони. Испитивање је трајало до лома са контролисаном брзином померања. На свакој епрувети је дошло до лома у предвиђеном временском периоду од 3-10 min. Подаци о максималној затезној сили добијени су помоћу програма „Console“.

5.5 Приказ и интерпретација резултата експерименталног истраживања

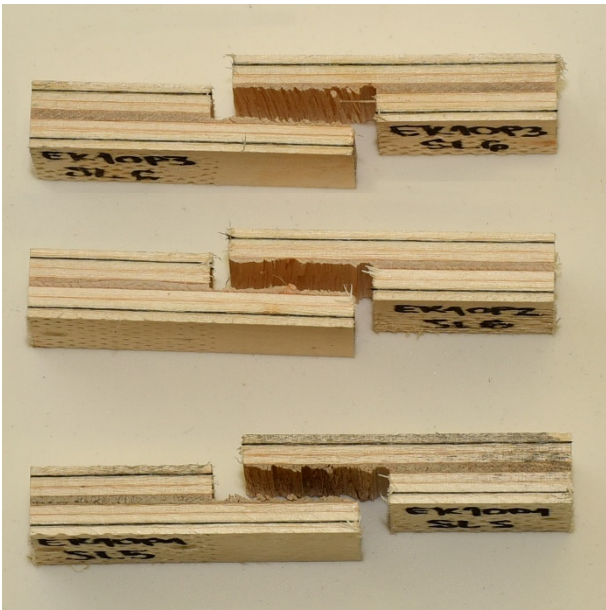
5.5.1 Чврстоћа на смицање у равни плоче

Код плоча слепљених епоксидним адхезивом добијени су одлични резултати при испитивању смицајне чврстоће у равни плоче. Код епрувета изрезаних из плоча Комбинације 1 до лома је дошло углавном на предвиђеном месту, кроз средишњи слој дрвета, попречно оријентисан у односу на спољашње листове фурнира. Код свих епрувета до лома је дошло по супстрату, тј. дрвним влакнима и то од 95-100%. Типски облик лома приказан је на слици 89. Резултати испитивања приказани су у Табели 40.

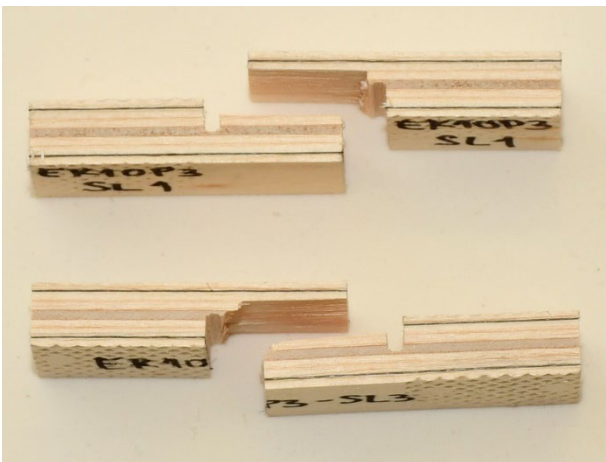
Поред основног, очекиваног лома по средишњем слоју дрвета, јављају се још две врсте лома, лом по дрвету кроз слојеве који нису предвиђени и лом кроз неколико слојева дрвета. С обзиром да се ови ломови јављају иницирани силом затезања, није очекивано да се лом јави у слоју у коме су влакна постављена паралелно правцу дејства силе, већ у средишњем слоју, по површини смицања, код кога су влакна постављена управно на правац дејства силе. Код епрувета K1-13 (EK1OP3-SL1) и K1-15 (EK1OP3-SL3) до лома долази кроз други слој фурнира, што је приказано на слици 90. Код епрувета под редним бројем K1-2 (EK1OP1-SL2) и K1-6 (EK1OP1-SL6) до лома долази по трећем листу фурнира, комплетно кроз дрвна влакна (сл.91). Од свих облика ломова, карактеристичан је облик лома епрувета K1-16 ((EK1OP3-SL4) код којих се лом јавља кроз неколико слојева, односно лом почиње у средњем слоју, а потом се наставља кроз 3. и 2. лист (сл.92). Средња вредност стварне силе при којој је дошло до лома епрувета износи $F = 2532.50 \text{ N}$, са коефицијентом варијације 9.79%. Средња вредност напона смицања за плоче Комбинације 1 (EK1) износи $f_{v,0,flat} = 4.00 \text{ N/mm}^2$, са коефицијентом варијације 9.44%.

Због једноставнијег прегледа дефинисаће се типови лома који настају у епруветама при испитивању чврстоће на смицање у равни плоче:

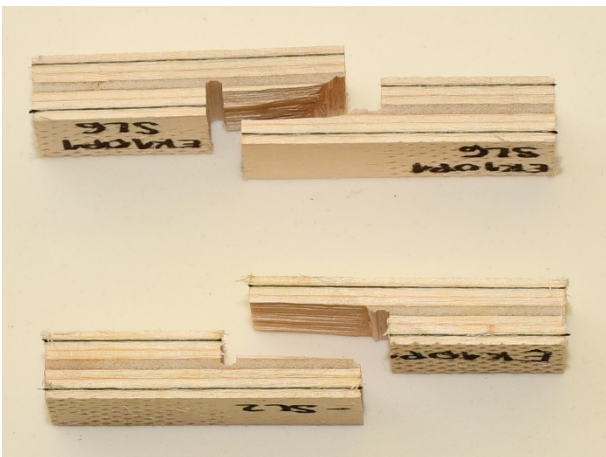
- ТИП 1: лом по средишњем, четвртном листу фурнира – предвиђено место лома,
- ТИП 2: лом по другом листу фурнира,
- ТИП 3: лом по трећем листу фурнира,
- ТИП 4: лом кроз више листова фурнира.



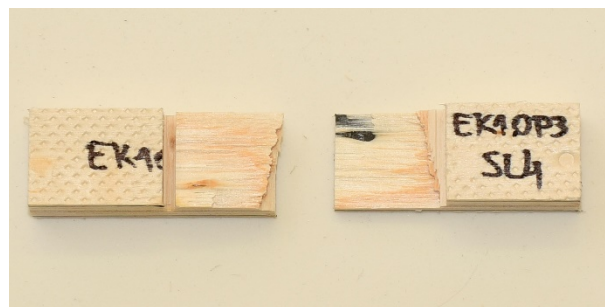
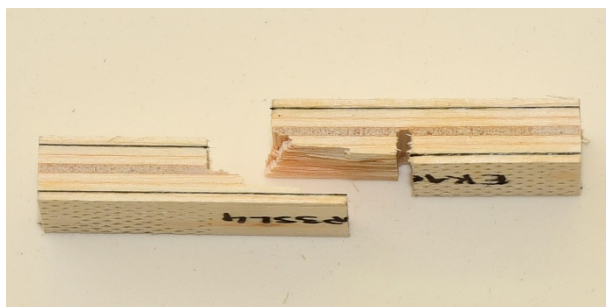
Слика 89. ЕК1 типски облик лома епрувета – ТИП1



Слика 90. ЕК1 лом по другом листу фурнира – ТИП 2



Слика 91. ЕК1 лом по трећем листу фурнира – ТИП3



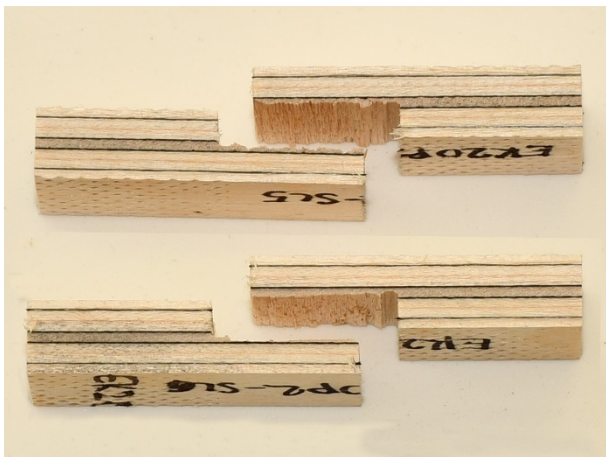
Слика 92. EK1 лом по другом листу фурнира – ТИП 4

Табела 40. Резултати испитивања чврстоће на смицање у равни плоче EK1

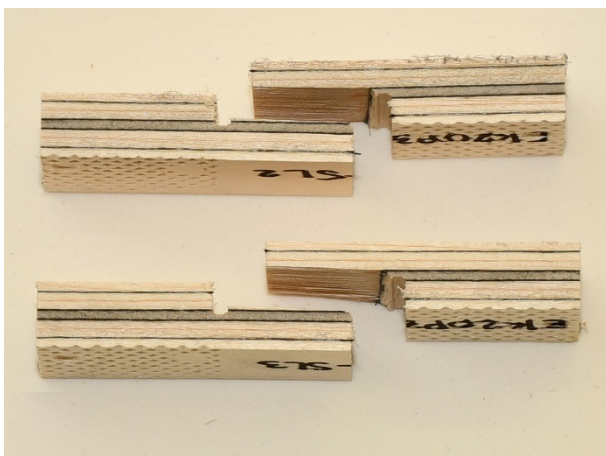
K1	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ		Смичућа површина A mm ²	Макс. сила F' N	Калибр. узорка ΔF N	Стварна сила F=F'-ΔF N	Напон смицања $f_{v,0,flat}$ N/mm ²	Тип лома	
	Ознака	Димензије епрувете дужина a mm							ширина b mm
1	EK1OP1-SL1	25.24	25.25	637.31	2725	104	2621	4.11	ТИП 1
2	EK1OP1-SL2	24.67	25.21	621.93	2102	104	1998	3.21	ТИП 1
3	EK1OP1-SL3	24.38	25.35	618.03	2417	104	2313	3.74	ТИП 3
4	EK1OP1-SL4	24.78	25.26	625.94	2697	104	2593	4.14	ТИП 1
5	EK1OP1-SL5	24.90	25.32	630.47	2483	104	2379	3.77	ТИП 1
6	EK1OP1-SL6	25.07	25.29	634.02	2415	104	2311	3.64	ТИП 3
7	EK1OP2-SL1	25.03	25.63	641.52	2867	104	2763	4.31	ТИП 1
8	EK1OP2-SL2	24.66	26.55	654.72	2702	104	2598	3.97	ТИП 1
9	EK1OP2-SL3	24.76	25.70	636.33	3018	104	2914	4.58	ТИП 1
10	EK1OP2-SL4	24.78	25.32	627.43	2621	104	2517	4.01	ТИП 1
11	EK1OP2-SL5	24.78	25.35	628.17	2741	104	2637	4.20	ТИП 1
12	EK1OP2-SL6	24.87	25.36	630.70	3047	104	2943	4.67	ТИП 1
13	EK1OP3-SL1	24.87	25.40	631.70	2431	104	2327	3.68	ТИП 2
14	EK1OP3-SL2	25.10	25.43	638.29	2537	104	2433	3.81	ТИП 1
15	EK1OP3-SL3	24.73	25.60	633.09	2771	104	2667	4.21	ТИП 2
16	EK1OP3-SL4	25.30	25.25	638.83	2463	104	2359	3.69	ТИП 1
17	EK1OP3-SL5	24.56	25.30	621.37	2452	104	2348	3.78	ТИП 4
18	EK1OP3-SL6	24.82	25.40	630.43	2968	104	2864	4.54	ТИП 1
Средња вредност:						2532.50	4.00		
Стандардна девијација:						247.92	0.38		
Коефицијент варијације:						9.79%	9.44%		
Повећање према EK4 (%):						-2.26%	-2.56%		

Узорци плоча Комбинације 2 формирани са ојачањем постављеним у четири сљубнице показују знатно другачије понашање при лому од плоча Комбинације 1. Додатна два слоја карбонске тканине оријентисана су управно на правац дрвних влаканаца спољашњих листова фурнира, односно паралелно правцу влаканаца средишњег фурнира и уз њега позиционирана. Иако је жљебовима (урезима) на узорцима предвиђено да до лома дође кроз средишњи, 4. лист фурнира, у овој диспозицији ојачања то није случај. Испитивањем су уочена претходно дефинисана три типа лома. Само код две епрувете је дошло до првог типа лома, односно лом на за то предвиђеном месту, у средишњем, четвртном слоју фурнира (сл. 93). Следећи тип лома је ТИП 3 - лом кроз 3. лист фурнира, тј. непосредно уз средишње ојачање, али кроз лист

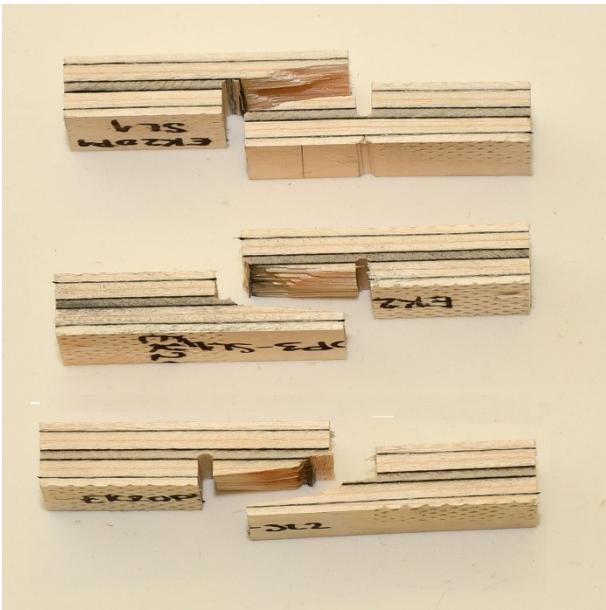
фурнира у коме су влакна подужно оријентисана (сл.94). Лом ТИП 4 приказан на слици 95. представља лом кроз 2. и 3. лист фурнира, односно кроз листове између два ојачања, тј. између две карбонске тканине. Код неких узорака до лома је дошло кроз више слојева фурнира, укључујући и средишњи лист. Најчешће то је лом кроз трећи и четврти лист, а врло често кроз други, трећи и четврти лист. Приликом пуцања, лом се дешава и кроз слој ојачања, али не долази до прекидања карбонских влакана, већ само до њиховог смицања, јер су она постављена паралелно правцу лома. Ојачање које је постављено уз средишњи лист фурнира спречава лом на за то предвиђеном месту, односно влакна постављена паралелно средишњем листу фурнира ојачавају га тако да најслабији лист не доживљава смичућа напрезања, већ се лом догађа на другим местима. Код неколико епрувета долази до класичног лома дрвета затезањем (сл.96), те су вредности добијене за овај тип лома изостављене у даљем прорачуну средњих вредности. Код једне епрувете је дошло до лома по линији лепљења, и она такође није разматрана у прорачуну. Резултати испитивања приказани су у Табели 41. Средња вредност максималне силе при којој је дошло до лома епрувета износи $F = 2512.31 \text{ N}$, са коефицијентом варијације 13.42%. Средња вредност напона смицања за плоче Комбинације 2 (ЕК2) износи $f_{v,0,flat} = 3.97 \text{ N/mm}^2$, са коефицијентом варијације 13.24%.



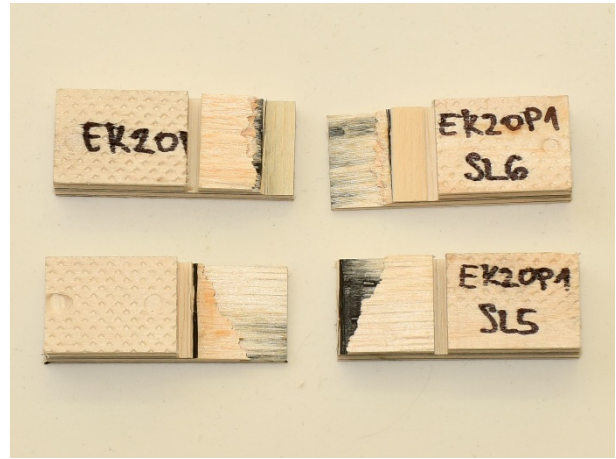
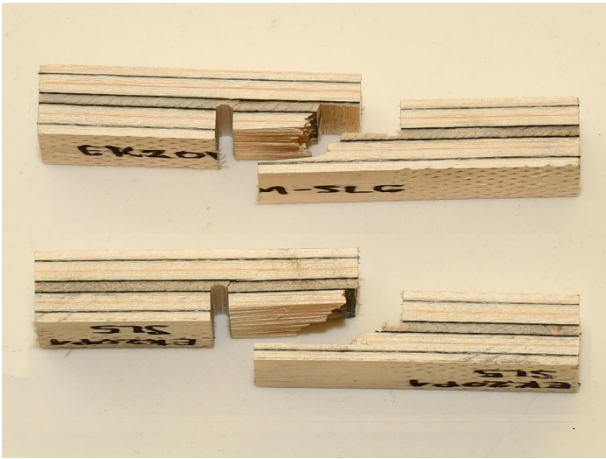
Слика 93. ЕК2 лом по средишњем листу фурнира – ТИП 1



Слика 94. ЕК2 лом по трећем листу фурнира – ТИП 3



Слика 95. EK2 лом по више листова фурнира – ТИП 4

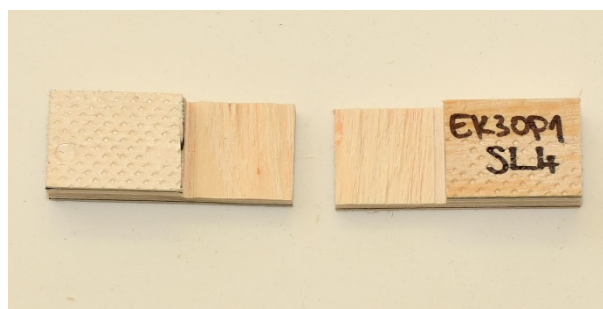
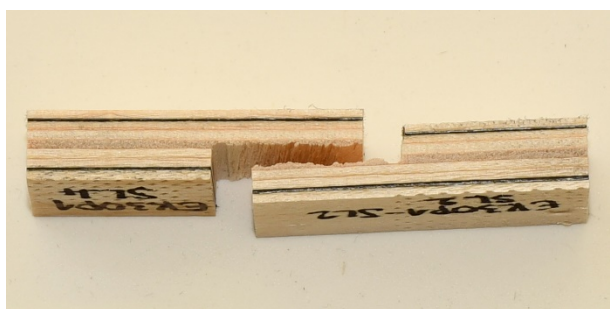


Слика 96. EK2 лом затезањем

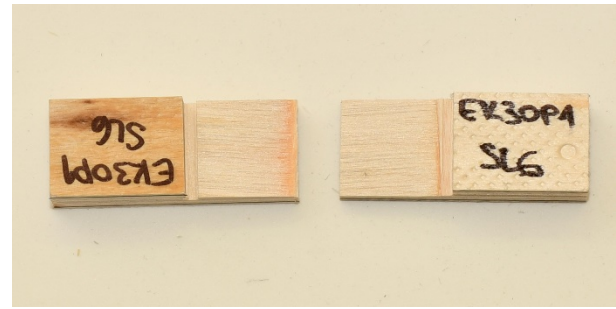
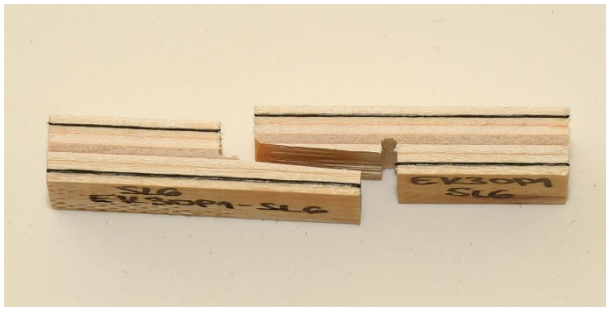
Табела 41. Резултати испитивања чврстоће на смицање у равни плоче ЕК2

К2	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ								
	Ознака	Димензије епрувета		Смичућа површина А	Макс. сила F'	Калибр. узорка ΔF	Стварна сила F=F'-ΔF	Напон смицања $f_{v,0,flat}$	Тип лома
		дужина а	ширина б						
		mm	mm	mm ²	N	N	N	N/mm ²	
1	EK2OP1-SL1	24.45	25.52	623.96	2184	107	2077	3.33	ТИП 4
2	EK2OP1-SL2	25.87	25.5	659.69	2643	107	2536	3.84	затезање
3	EK2OP1-SL3	24.6	25.75	633.45	2708	107	2601	4.11	ТИП 3
4	EK2OP1-SL4	24.86	25.3	628.96	2825	107	2718	4.32	ТИП 3
5	EK2OP1-SL5	25.4	25.26	641.60	2721	107	2614	4.07	затезање
6	EK2OP1-SL6	25.1	25.47	639.30	2955	107	2848	4.45	затезање
7	EK2OP2-SL2	25.29	25.26	638.83	2574	107	2467	3.86	ТИП 4
8	EK2OP2-SL3	24.88	25.38	631.45	2020	107	1913	3.03	ТИП 3-30%
9	EK2OP2-SL4	24.65	25.31	623.89	2535	107	2428	3.89	по лепку
10	EK2OP2-SL5	25.01	25.29	632.50	2637	107	2530	4.00	ТИП 1
11	EK2OP2-SL6	24.81	25.25	626.45	2450	107	2343	3.74	ТИП 1
12	EK2OP3-SL1	24.82	25.27	627.20	2922	107	2815	4.49	ТИП 3
13	EK2OP3-SL2	24.73	25.52	631.11	2970	107	2863	4.54	ТИП 3
14	EK2OP3-SL3	25.2	25.27	636.80	2920	107	2813	4.42	ТИП 3
15	EK2OP3-SL4	24.98	25.28	631.49	2881	107	2774	4.39	ТИП 3
16	EK2OP3-SL5	25.41	25.41	645.67	2079	107	2774	4.30	ТИП 3
17	EK2OP3-SL6	24.84	25.52	633.92	2897	107	1972	3.11	ТИП 3
Средња вредност:							2512.31	3.97	
Стандардна девијација:							337.12	0.53	
Коефицијент варијације:							13.42%	13.24%	
Повећање према ЕК4 (%):							-3.04%	-3.37%	

Код узорака Комбинације 3, ојачаних у првој и шестој сљубници у два слоја тканине, тако оријентисаних да формирају мрежу, догађају се три од претходно дефинисана четири типа лома. Најчешћи тип лома је лом по средишњем слоју, предвиђеном слоју за лом смичућим напрезањима (сл.97). Лом у трећем слоју, првом слоју са подужно оријентисаним влакнима до неутралне осе такође је врло заступљен и дешава се чистим смицањем (сл.98). Четврти тип лома је такав да лом започиње у средишњем слоју, али се наставља кроз још 2 слоја до ојачане сљубнице. Резултати испитивања приказани су у Табели 39. Средња вредност максималне силе при којој је дошло до лома епрувета износи $F = 2518.5 N$, са коефицијентом варијације 8.46%. Средња вредност напона смицања за плоче Комбинације 3 (ЕК3) износи $f_{v,0,flat} = 3.98 N/mm^2$, са коефицијентом варијације 8.75%.



Слика 97. ЕК3 лом у средишњем слоју ТИП 1



Слика 98. ЕК3 лом у трећем слоју ТИП 3

Табела 42. Резултати испитивања чврстоће на смицање у равни плоче ЕК3

КЗ	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ								
	Ознака	Димензије епрувета		Смичућа површина А	Макс. сила F'	Калибр. узорка ΔF	Стварна сила F=F'-ΔF	Напон смицања $f_{v,0,flat}$	Тип лома
		дужина а	ширина б						
		mm	mm	mm ²	N	N	N	N/mm ²	
1	EK3OP1-SL1	24.85	25.35	629.95	2824	107	2717	4.31	ТИП 4
2	EK3OP1-SL2	24.81	25.32	628.19	2344	107	2237	3.56	ТИП 1
3	EK3OP1-SL3	24.92	25.35	631.72	2473	107	2366	3.75	ТИП 3
4	EK3OP1-SL4	24.69	25.25	623.42	2418	107	2311	3.71	ТИП 1
5	EK3OP1-SL5	24.73	25.25	624.43	3018	107	2911	4.66	ТИП 1
6	EK3OP1-SL6	25.34	25.42	644.14	2544	107	2437	3.78	ТИП 3
7	EK3OP2-SL1	24.81	25.26	626.70	2756	107	2649	4.23	ТИП 4
8	EK3OP2-SL2	24.9	25.32	630.47	2784	107	2677	4.25	ТИП 3
9	EK3OP2-SL3	24.63	25.33	623.88	2751	107	2644	4.24	ТИП 3
10	EK3OP2-SL4	25.43	25.33	644.14	2784	107	2677	4.16	ТИП 1
11	EK3OP2-SL5	24.7	25.37	626.64	2868	107	2761	4.41	ТИП 1
12	EK3OP2-SL6	25.12	25.41	638.30	2680	107	2573	4.03	ТИП 3
13	EK3OP3-SL1	24.78	25.3	626.93	2457	107	2350	3.75	ТИП 1
14	EK3OP3-SL2	25.15	25.57	643.09	2706	107	2599	4.04	ТИП 4
15	EK3OP3-SL3	24.8	25.32	627.94	2725	107	2618	4.17	ТИП 3
16	EK3OP3-SL4	25.15	25.53	642.08	2550	107	2443	3.80	ТИП 1
17	EK3OP3-SL5	24.9	25.29	629.72	2242	107	2135	3.39	ТИП 1
18	EK3OP3-SL6	25.36	25.32	642.12	2335	107	2228	3.47	ТИП 4
Средња вредност:							2518.50	3.98	
Стандардна девијација:							213.15	0.35	
Коефицијент варијације:							8.46%	8.75%	
Повећање према ЕК4 (%):							-2.80%	-3.08%	

Код контролних епрувета изрезаних из плоча Комбинације 4 при смицању у равни плоче најчешће долази до лома ТИП-а 1, односно лома у средишњем листу фурнира (сл.99). Код две епрувете дошло је до лома ТИП-а 3, лом по трећем слоју фурнира, али тако да је свега 30-40% по дрвним влакнима, а остало представља лом по линији лепљења (сл.100). Код четири епрувете је до лома дошло чистим затезањем, лома по структури дрвета, што је приказано на слици 101. Такође, ни ове епрувете нису разматране у даљем прорачуну средње вредности максималне силе и чврстоће на смицање. Средња вредност максималне силе при којој је дошло до лома епрувета ЕК4 износи $F = 2591.00 N$, са коефицијентом варијације 13.40%. Средња

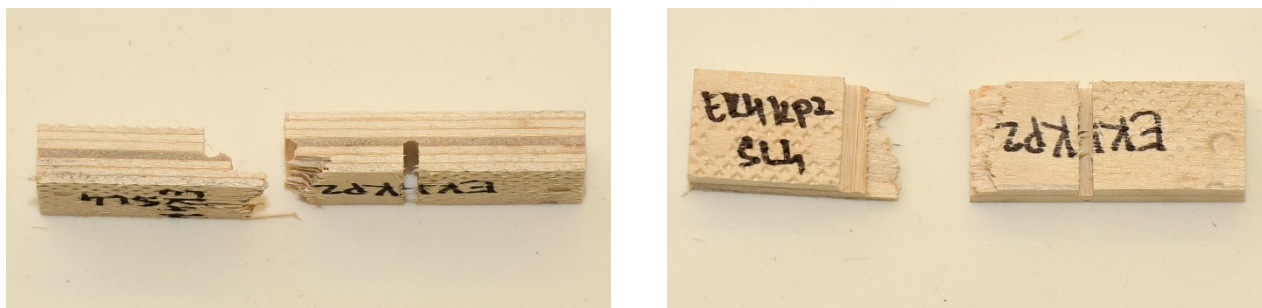
вредност напона смицања за плоче Комбинације 4 износи $f_{v,0,flat} = 4.11 \text{ N/mm}^2$, са коефицијентом варијације 13.52%. Резултати испитивања приказани су у Табели 43.



Слика 99. EK4 лом у средишњем слоју ТИП 1



Слика 100. EK4 лом у трећем слоју фурнира ТИП3

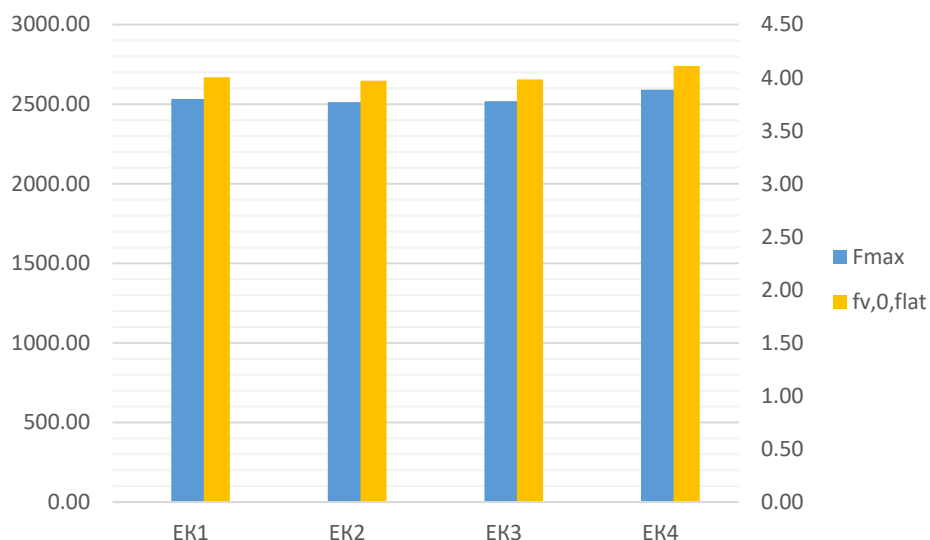


Слика 101. EK4 лом затезањем

Табела 43. Резултати испитивања чврстоће на смицање у равни плоче ЕК4

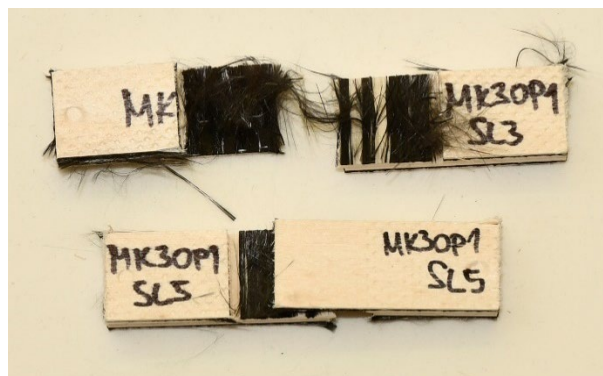
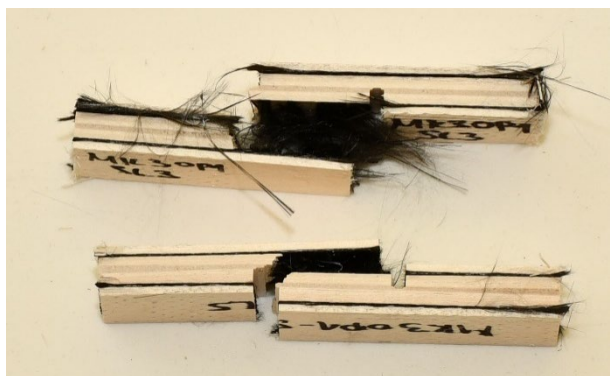
K4	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ								
	Ознака	Димензије епрувета		Смичућа површина А	Макс. сила F'	Калибр. узорка ΔF	Стварна сила F=F'-ΔF	Напон смицања $f_{v,0,flat}$	Тип лома
		дужина а	ширина б						
		mm	mm	mm ²	N	N	N	N/mm ²	
1	EK4KP1-SL1	24.73	25.6	633.09	2072	106	1966	3.11	ТИП 1
2	EK4KP1-SL2	25.06	25.19	631.26	2539	106	2433	3.85	ТИП 1
3	EK4KP1-SL3	24.68	25.29	624.16	2308	106	2202	3.53	по лепку
4	EK4KP1-SL4	24.89	25.28	629.22	2673	106	2567	4.08	ТИП 1
5	EK4KP1-SL5	24.72	25.33	626.16	2756	106	2650	4.23	затезање
6	EK4KP1-SL6	24.7	25.26	623.92	2440	106	2334	3.74	ТИП 1
7	EK4KP2-SL1	24.8	25.39	629.67	2566	106	2460	3.91	ТИП 3
8	EK4KP2-SL2	24.67	25.34	625.14	3017	106	2911	4.66	затезање
9	EK4KP2-SL3	24.68	25.25	623.17	3064	106	2958	4.75	ТИП 4
10	EK4KP2-SL4	24.88	25.45	633.20	2452	106	2346	3.71	затезање
11	EK4KP2-SL5	24.74	25.65	634.58	2328	106	2222	3.50	затезање
12	EK4KP2-SL6	24.66	25.35	625.13	2994	106	2888	4.62	ТИП 1
13	EK4KP3-SL1	25.44	25.37	645.41	2696	106	2590	4.01	ТИП 3 - 40%
14	EK4KP3-SL2	24.83	25.35	629.44	2671	106	2565	4.08	ТИП 1
15	EK4KP3-SL3	24.91	25.3	630.22	2729	106	2623	4.16	ТИП 1
16	EK4KP3-SL4	24.85	25.34	629.70	3286	106	3180	5.05	ТИП 3
17	EK4KP3-SL5	25.16	25.3	636.55	3098	106	2992	4.70	ТИП 1
18	EK4KP3-SL6	24.78	25.43	630.16	2233	106	2127	3.38	ТИП 3 - 40%
Средња вредност:							2591.00	4.11	
Стандардна девијација:							347.25	0.56	
Коефицијент варијације:							13.40%	13.52%	

Међусобним поређењем резултата испитивања епрувета из свих ојачаних плоча као и из контролних плоча, уочено је да постављање ојачања не утиче на чврстоћу на смицање у равни плоче, односно у слоју лепка. Све плоче имају скоро уједначене чврстоће на смицање које се крећу у интервалу $f_{v,0,flat} = 4.0 \pm 5\%$. Највећу чврстоћу на смицање има контролна, неојачана плоча. На графикону сл.102 приказан је упоредни преглед максималног оптерећења и напона смицања по комбинацији ојачања. Поред наведеног, уочено је да се код епрувета из плоча Комбинације 1 и Комбинације 4 најчешће лом јавља на предвиђеном месту, по средишњем листу фурнира, док код епрувета из ојачаних плоча Комбинације 2, која има ојачања попречно оријентисана уз средишњи, попречно оријентисан лист фурнира, до лома долази највише у трећем листу фурнира, подужно оријентисаном, а најмање кроз лист са попречно оријентисаним влакнима, који је додатно ојачан карбонском тканином. Посебно је важно напоменути да је код свих испитаних епрувета из плоча слепљених епоксидним адхезивом дошло до лома по дрвету и то изнад 95%.

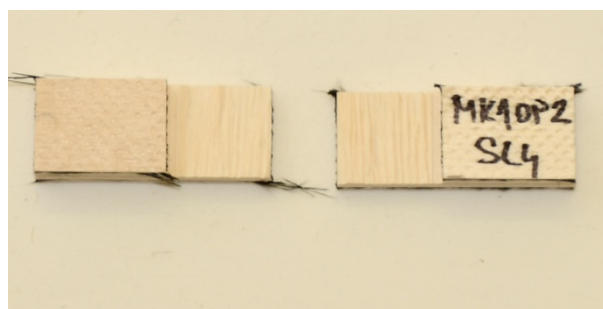
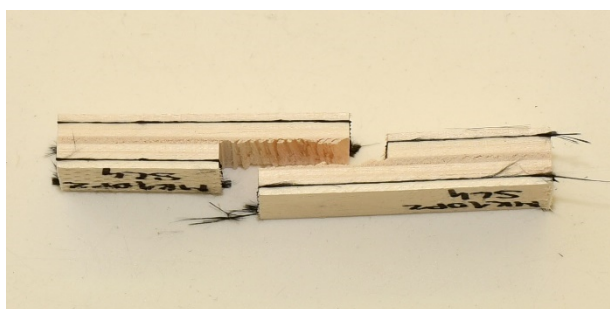


Слика 102. Дијаграм вредности F_{max} и $f_{v,0,flat}$ по комбинацијама ојачања

Испитивање плоча ојчаних применом меланим-уреа формалдехида као адхезива може се сматрати успешним за плоче Комбинације 1 и контролне плоче Комбинације 4. Из плоча Комбинације 2 узорци нису формирани с обзиром да је приликом сечења дошло до раслојавања плоча. Приликом испитивања чврстоће на смицање у равни плоче на узорцима Комбинације 3 дошло је до раслојавања између два слоја карбонске тканине, што је приказано на слици 103, тако да добијени резултати нису релевантни. Код плоча Комбинације 1 код свих узорака лом се може окарактерисати као лом ТИП 1, који се догодио у за то предвиђеном средишњем слоју, по супстрату, односно дрвету. Типски облик лома приказан је на слици 104. Резултати испитивања приказани су у Табели 43. Средња вредност стварне силе при којој је дошло до лома узорака МК1 износи $F = 1115.38 N$, са коефицијентом варијације 15.11%. Средња вредност напона смицања за плоче Комбинације 1 износи $f_{v,0,flat} = 1.77 N/mm^2$, са коефицијентом варијације 15.23%.



Слика 103. МК3 раслојавање између две тканине

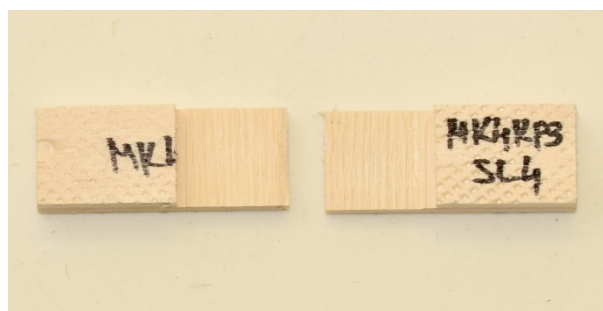
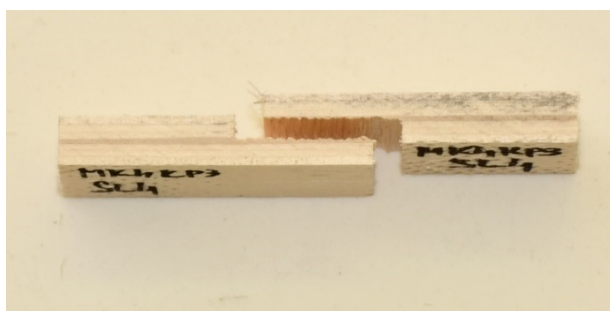


Слика 104. МК1 типски лом по супстрату ТИП 1

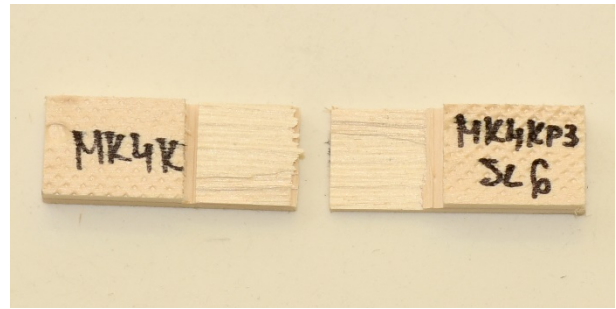
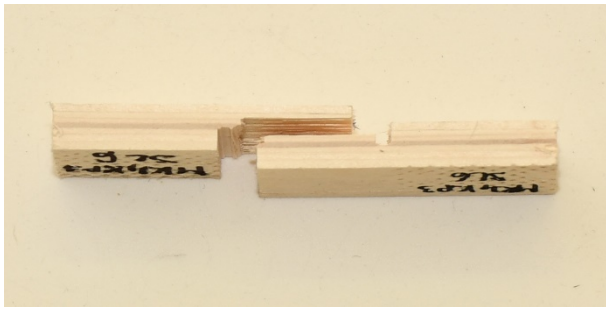
Табела 44. Резултати испитивања чврстоће на смицање у равни плоче МК1

K1	MUF	Димензије епрувета		Смичућа површина A	Макс. сила F'	Калибр. узорка ΔF	Стварна сила $F=F'-\Delta F$	Напон смицања $f_{v,0,flat}$	Тип лома
		дужина a	ширина b						
		mm	mm						
1	MK1OP1-SL1	24.8	25.26	626.45	1085	105	980	1.56	ТИП 1
2	MK1OP1-SL2	25.01	25.38	634.75	1211	105	1106	1.74	ТИП 1
3	MK1OP1-SL5	24.76	25.41	629.15	998	105	893	1.42	ТИП 1
4	MK1OP1-SL6	24.6	25.23	620.66	1284	105	1179	1.90	ТИП 1
5	MK1OP2-SL1	24.78	25.45	630.65	1024	105	919	1.46	ТИП 1
6	MK1OP2-SL2	24.85	25.53	634.42	1271	105	1166	1.84	ТИП 1
7	MK1OP2-SL3	24.92	25.27	629.73	1568	105	1463	2.32	ТИП 1
8	MK1OP2-SL4	24.72	25.28	624.92	998	105	893	1.43	ТИП 1
9	MK1OP2-SL5	25.17	25.8	649.39	1061	105	956	1.47	ТИП 1
10	MK1OP2-SL6	24.88	25.46	633.44	1195	105	1090	1.72	ТИП 1
11	MK1OP3-SL1	24.79	25.41	629.91	1404	105	1299	2.06	ТИП 1
12	MK1OP3-SL2	24.96	25.47	635.73	1251	105	1146	1.80	ТИП 1
13	MK1OP3-SL3	24.78	25.28	626.44	1152	105	1047	1.67	ТИП 1
14	MK1OP3-SL4	24.83	25.3	628.20	1205	105	1100	1.75	ТИП 1
15	MK1OP3-SL5	24.87	25.4	631.70	1357	105	1252	1.98	ТИП 1
16	MK1OP3-SL6	24.79	25.42	630.16	1462	105	1357	2.15	ТИП 1
Средња вредност:							1115.38	1.77	
Стандардна девијација:							168.52	0.27	
Коефицијент варијације:							15.11%	15.23%	
Повећање према МК4 (%):							-23.04%	-23.09%	

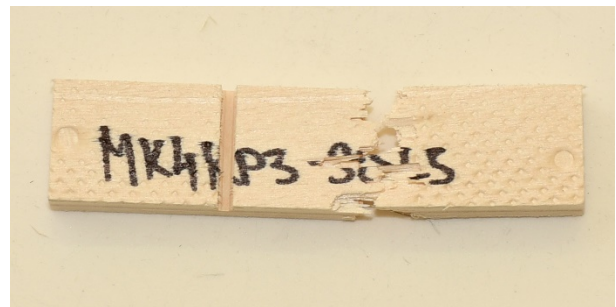
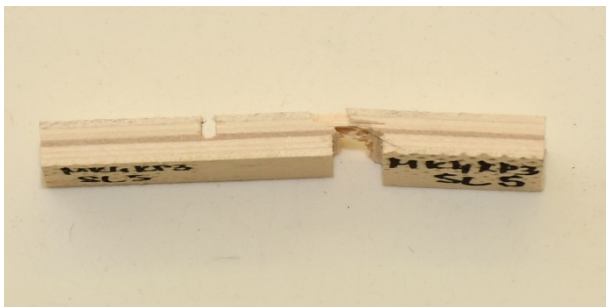
Контролни узорци плоча слепљених меланим-уреа формалдехидним адхезивом показују нешто боље резултате од ојачаних плоча. Углавном се лом може класификовати као лом ТИП 1, преко 95% по дрвету (сл.105). Код три епрувете је дошло до лома ТИП-а 3, по трећем листу фурнира, такође по дрвету (сл.106). Три епрувете код којих је лом наступио прекорачењем напона затезања нису узета у разматрање и обрачун (сл.107). Резултати испитивања приказани су у Табели 44. Средња вредност максималне силе при којој је дошло до лома епрувета МК4 износи $F = 1322.00 N$, са коефицијентом варијације 22.03%. Средња вредност напона смицања за плоче Комбинације 4 износи $f_{v,0,flat} = 2.09 N/mm^2$, са коефицијентом варијације 22.64%.



Слика 105. МК4 типски лом по супстрату



Слика 106. МК4 лом по трећем слоју (ТИП3)



Слика 107. МК4 лом по дрвету затезањем

Табела 45. Резултати испитивања чврстоће на смицање у равни плоче МК4

K4	MUF	Ознака	Димензије епрувете		Смичућа површина А	Макс. сила F'	Калибр. узорка ΔF	Стварна сила F=F'-ΔF	Напон смицања $f_{v,0,flat}$	Тип лома
			дужина а	ширина б						
			mm	mm	mm ²	N	N	N	N/mm ²	
1		MK4KP1-SL1	25.62	25.33	648.95	1151	105	1046	1.61	ТИП 1
2		MK4KP1-SL2	24.89	25.36	631.21	1350	105	1245	1.97	ТИП 1
3		MK4KP1-SL3	24.93	25.52	636.21	1077	105	972	1.53	ТИП 1
4		MK4KP1-SL4	24.81	25.24	626.20	1119	105	1014	1.62	ТИП 1
5		MK4KP1-SL5	24.75	25.24	624.69	1808	105	1703	2.73	ТИП 1
6		MK4KP1-SL6	24.84	25.27	627.71	1585	105	1480	2.36	ТИП 1
7		MK4KP2-SL2	24.9	25.25	628.73	1540	105	1435	2.28	ТИП 1
8		MK4KP2-SL3	25.23	25.23	636.55	1177	105	1072	1.68	ТИП 1
9		MK4KP2-SL5	25.05	25.28	633.26	1266	105	1161	1.83	ТИП 3
10		MK4KP2-SL6	25.38	25.29	641.86	1185	105	1080	1.68	ТИП 3
11		MK4KP3-SL1	24.93	25.3	630.73	1737	105	1632	2.59	ТИП 1
12		MK4KP3-SL2	24.84	25.35	629.69	1981	105	1876	2.98	затезање
13		MK4KP3-SL3	24.93	25.58	637.71	1978	105	1873	2.94	затезање
14		MK4KP3-SL4	24.74	25.26	624.93	1627	105	1522	2.44	ТИП 1
15		MK4KP3-SL5	24.97	25.48	636.24	2030	105	1925	3.03	затезање
16		MK4KP3-SL6	25.03	25.23	631.51	1929	105	1824	2.89	ТИП 3
Средња вредност:								1322.00	2.09	
Стандардна девијација:								291.18	0.47	
Коефицијент варијације:								22.03%	22.64%	

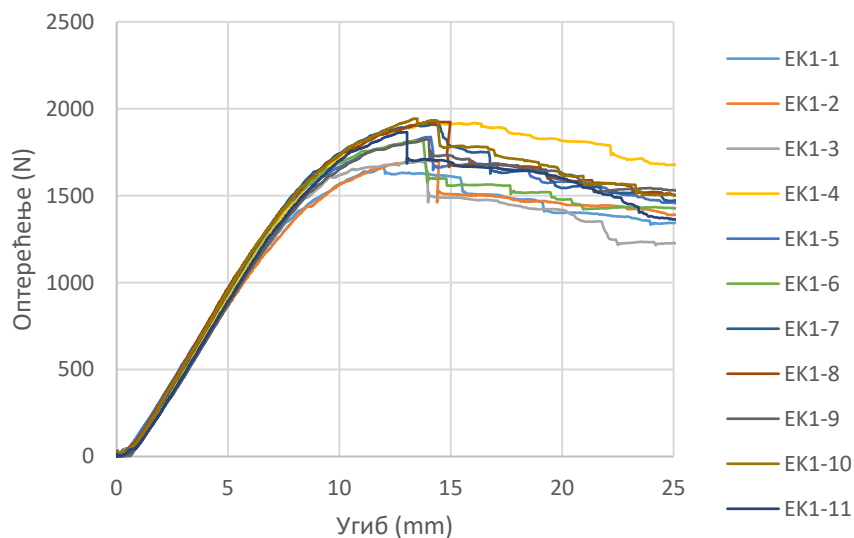
Код обе серије плоча, и слепљених епоксидним и меламин-уреа формалдехидним адхезивом, ојачање плоча карбонским влакнима нема значајног утицаја на смицајну чврстоћу у равни плоче. Код плоча слепљених епоксидним адхезивом ојачане плоче показале су нешто слабије резултате смицајне чврстоће од контролних плоча, али с обзиром да се разлика у вредностима креће у границама до 5%, не може се сматрати да увођење ојачања утиче на смањење смицајне чврстоће. Код плоча слепљених меламин-уреа формалдехидним адхезивом, ојачане плоче Комбинације 1 показују за 23% ниже вредности чврстоће на смицање у равни плоче у односу на контролне узорке. Коефицијенти варијације резултата за обе серије плоча, а посебно за плоче слепљене MUF-ом су велики. Поређењем контролних плоча Комбинације 4 обе серије, може се закључити да су за плоче слепљене епоксидним адхезивом резултати смицајне чврстоће два пута већи у односу на плоче слепљене MUF-ом. Осим наведеног, испитивањем плоча Комбинације 3 слепљених MUF-ом, до лома епрувета је дошло смицањем у слоју адхезива између две карбонске тканине, док је код плоча слепљених епоксидним адхезивом и у том случају лом настао по дрвету. На основу приказаних резултата може се закључити да MUF није погодан за адхезију синтетичких влакана међусобно, а да је у адхезији са дрветом постојан, и тада се лом јавља по дрвету при испитивањима. Епоксидни адхезив се показао добар како за адхезију у слоју FRP-дрво, тако и за адхезију у слоју FRP-FRP.

5.5.2 Савојна чврстоћа у равни плоче и модул еластичности при савијању

5.5.2.1 Понашање носача под оптерећењем и облик лома

Узорци плоча слепљених епоксидним адхезивом показују добро понашање при испитивању савојне чврстоће у равни плоче. Све епрувете из ојачаних плоча приликом савијања показују слично понашање. На обједињеном дијаграму оптерећење-угиб приказаном на слици 108 може се видети понашање носача Комбинације 1. Носачи ојачани карбонским тканинама постављеним у прву и шесту слубницу, влакнима оријентисаним паралелно влакнима спољашњих листова фурнира, показују одређено дуктилно понашање. Зона нелинеарног понашања испитаних епрувета је нешто краћа од очекиване. Пластично течење композита прекинуто је ломом носача који је код свих испитаних епрувета наступио у затегнутој зони пресека. Код свих епрувета лом је наступио у средњој трећини распона, односно на средини распона гредног носача, на месту дејства силе. Лом свих епрувета настао је по чистом дрвету, односно у средишњим слојевима носача, између две карбонске тканине. Типичан лом носача приказан је на слици 109. Потом се лом наставио ка спољашњим листовима фурнира, праћен пресецањем веома малог броја влакана (сл. 110). Приањање између дрвета и ојачања било је ефикасно све до лома носача. Након лома долази до деламинације карбонске тканине од дрвета, а код два узорка ЕК1-6 (ЕК1ОР2-SE3) и ЕК1-8 (ЕК1ОР3-SE1) долази до цепања слоја фурнира по супстрату у подужном правцу, један део дрвета остаје причвршћен за карбонску тканину, ток други део остаје у средњој зони плоче (сл.111). Код свих испитаних епрувета након лома, при деловању максималне притисне силе, у горњој притиснутој зони, дошло је до гњечења дрвета услед притиска управно на влакна (сл.110.а), што је резултирало збијањем влакана и гужвањем спољашњих листова фурнира. Ово је праћено мањим одвајањем карбонске тканине од дрвета на месту примене силе. С обзиром да су ова оштећења локалног карактера и да су настала након лома носача услед савијања, она немају утицај на носивост носача, нити на резултате испитивања. Претпоставља се да до оваквих оштећења не би дошло да приликом испитивања није одступљено од стандарда, односно да је испитивање спроведено применом силе у две тачке, на трећинама распона и да су испод ваљкастих лежајева постављене челичне плочице које би минимизовале

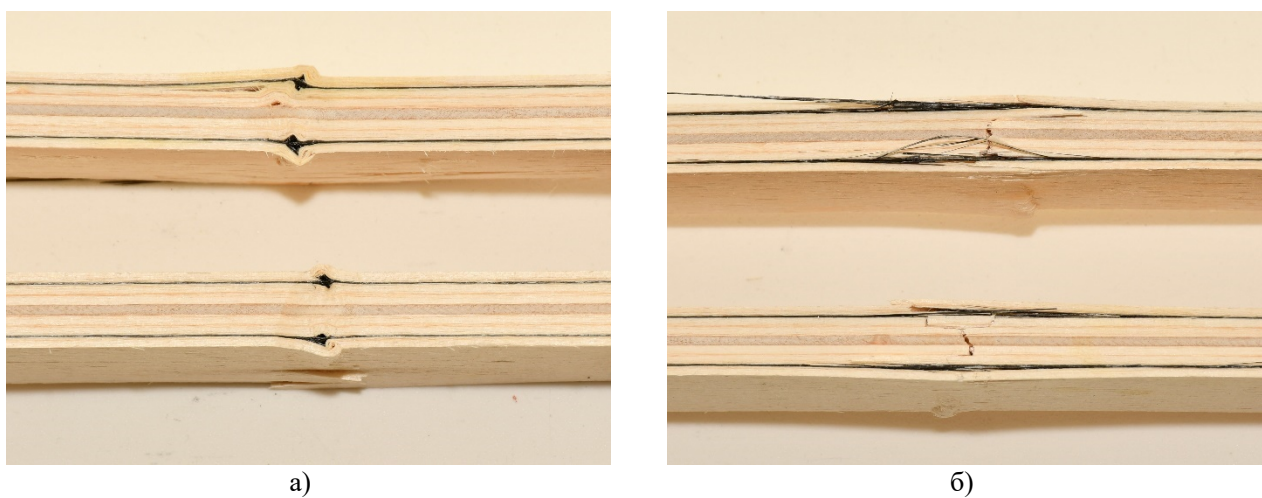
локална оштећења. Да је носач оптерећен у две притисне тачке, контактни напон на месту дејства силе био би за 50% смањен. Непосредно након испитивања савојне чврстоће испитан је и садржај влажности у плочи, описан у претходном поглављу. Просечна вредност влажности за плоче слепљене епоксидним адхезивом у тренутку испитивања износила је 5.525%.



Слика 108. Дијаграм оптерећење-угиб за носаче ЕК1



Слика 109. ЕК1 типски лом носача на савијање у равни плоче (лом влакана у затегнутој зони)



а)

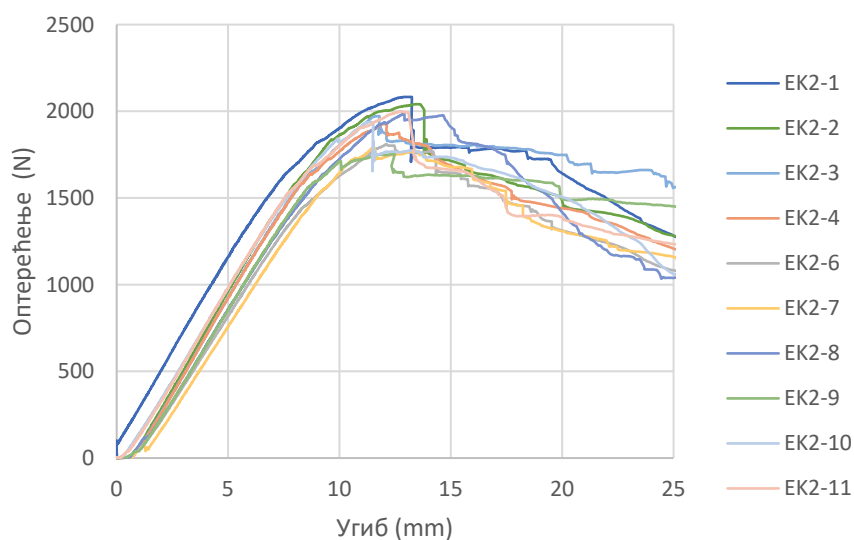
б)

Слика 110. ЕК1 типски лом носача на савијање у равни плоче: а) гњечење влакана и раслојавање FRP-дрво, б) пукотина по слоју дрвета, праћена пресецањем влакана

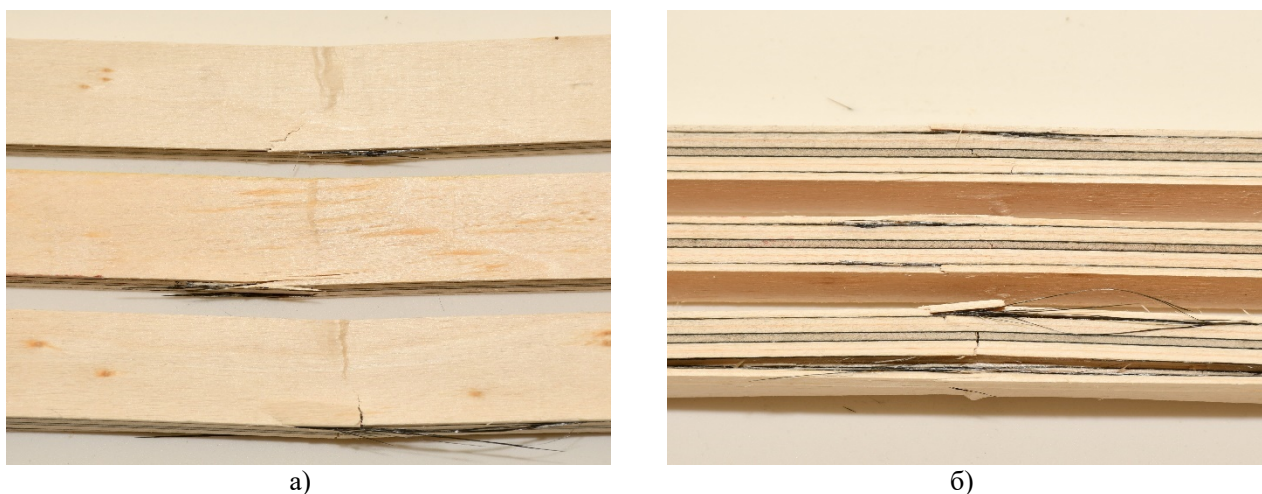


Слика 111. Лом фурнира по супстрату код узорака ЕК1ОР2-СЕ3 и ЕК1ОР3-СЕС

На слици 112. приказан је дијаграм оптерећење-угиб за носаче Комбинације 2, ојачане карбонским тканинама постављеним у четири слојеве, односно у првој и шестој слојевима у правцу влакана, а у трећој и четвртој слојевима управно на правац влакана спољашњих листова фурнира. Као што је и очекивано за ово механичко својство, слојеви карбонске тканине који се налазе у трећој и четвртој слојевима постављени су у правцу дејства силе, те немају утицај на ојачање плоче, односно не доприносе промени понашања композитног производа под оптерећењем, а што показује и дијаграм оптерећење-деформација, који је веома сличан дијаграму Комбинације 1. Понашање материјала је скоро истоветно као и код претходно приказане комбинације, у одређеној мери дуктилно. Већим делом дијаграм показује линеарни тренд, а потом пластично понашање прекинуто ломом. Лом свих епрувета Комбинације 2 наступио је такође у средишњој трећини распона, чистим ломом средишњих слојева носача по дрвету, што је приказано на слици 113. Карбонска тканина постављена у средишњим слојевима није имала утицај на овај лом, а линија лома је између карбонских влакана, што је такође приметно на слици 113. Лом се даље наставио ка спољашњим листовима фурнира, праћен пресецањем мањег броја подужних карбонских влакана и пуцањем спољашњих листова фурнира. Изузетак представља узорак ЕК1-3 (ЕК2ОР1-СЕ3) код кога је лом узорка иницирао наставак лома кроз други лист фурнира у подужном правцу затегнуте зоне, тако да је скоро целом дужином узорка дошло до цепања другог листа фурнира на два дела. Један део фурнира је остао залепљен за средишњи део плоче, док се други део одвајао заједно са првим листом фурнира и карбонским влакнима што доводи до подужне пукотине у правцу влакана, кроз спољашњи лист фурнира, скоро читавом дужином узорка, што се уочава на слици 114.



Слика 112. Дијаграм оптерећење-угиб за носаче ЕК2



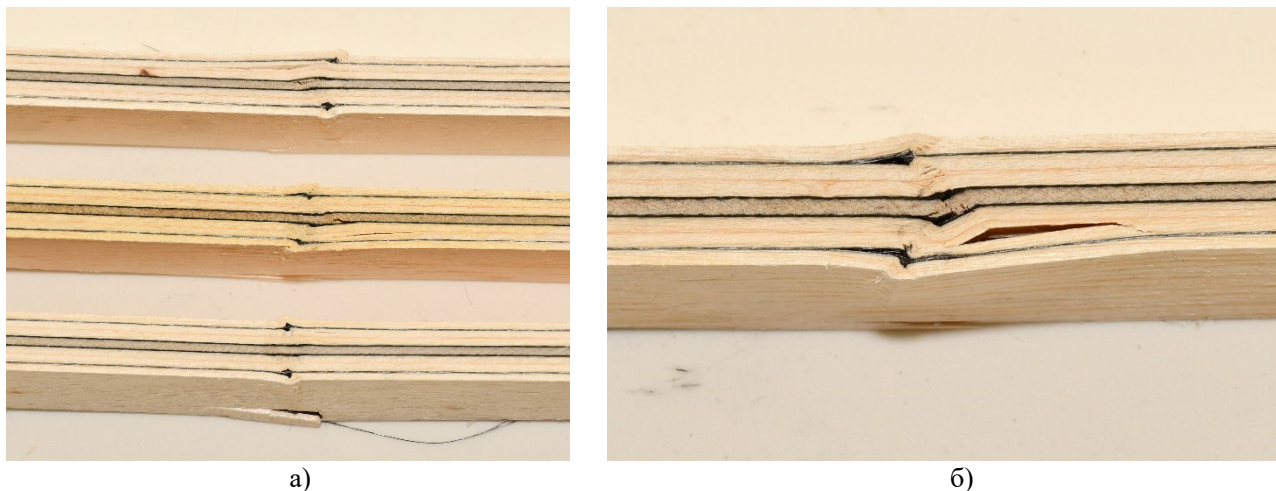
Слика 113. Оштећења епрувета из плоча ЕК2 приликом испитивања савојне чврстоће у равни плоче
а) гужвање влакана у зони притиска, цепање влакана у затегнутој зони; б) лом узорака у затегнутој зони



Слика 114. Оштећења епрувете ЕК2ОР1-СЕ3 приликом испитивања савојне чврстоће у равни плоче, цепање другог фурнирског листа

Као и код плоча Комбинације 1, приликом испитивања након лома, а применом максималне притискајуће силе дошло је до прекорачења напона притиска, а тиме и до гњечења дрвета у притиснутој зони пресека (сл.115). Ово је резултирало гужвањем спољашњих листова фурнира у горњој зони, тачкастом деламинацијом ојачања од дрвета насталом као последица гужвања влака, али и појавом подужне пукотине у другом фурнирском листу, односно

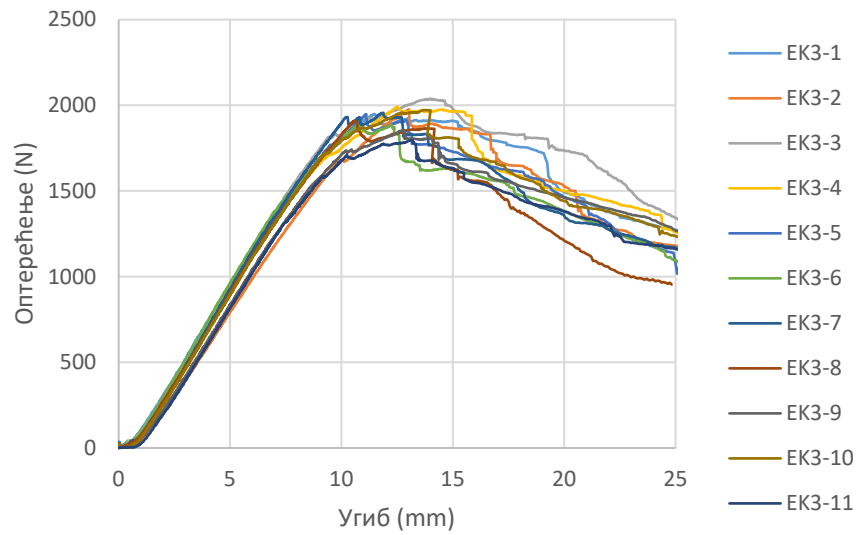
цепањем једног слоја фурнира на два и то у седам испитаних епрувета, што је приказано на слици 115. Иако је евидентније нешто боље понашање плоче на месту притиска управно на влакна у односу на узорке из претходне комбинације, а што је резултата постављања додатних ојачања у правцу дејства силе, као и у претходном случају сматра се да до овог локалног оштећења не би дошло да је носач оптерећен путем две притисне тачке. Осим тога, с обзиром да је разматрано оштећење настало након лома узорка, није релевантно за даљу анализу.



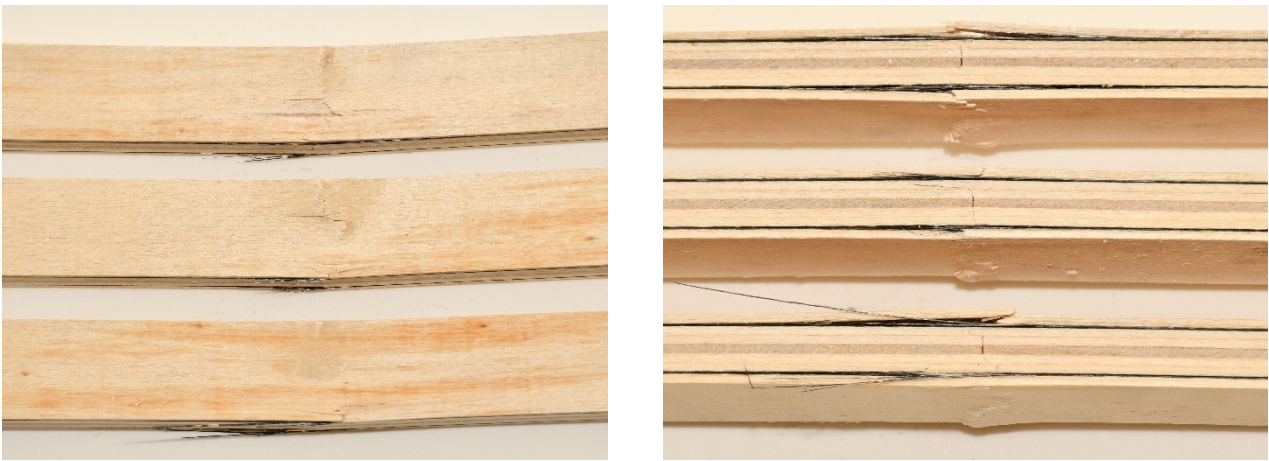
Слика 115. Оштећења епрувета ЕК2: а) у притисној зони, настала гъечењем; б) пукотина у притисној зони кроз други фурнирски лист

Дијаграм оптерећење-угиб узорка Комбинације 3, приказан на слици 116, показује изразито линеарно еластично понашање до лома, што није очекивано понашање за LVL плочу ојачану карбонским влакнима. У овој комбинацији влакна су постављена у првој и шестој сљубници, у два слоја управно један на други, формирајући мрежу у два правца. Осим што је код ове комбинације ојачања зона пластичног понашања пре лома скоро занемарљива, приметно је да код одређених епрувета након лома интензитет оптерећења опада, потом поново расте, а након тога трајно опада. Лом свих епрувета је био по дрвету, у средишњем делу носача, у линији позиције примене оптерећења, што је приказано на слици 117. До прекида карбонских влакана код ових узорка скоро да и не долази, односно код одређених узорка дошло је до прекида неколико влакана и то углавном са једне стране ојачања. Карбонска влакна формирана у мрежу преузела су улогу носећег слоја, те је и након лома епрувете по дрвету у зони затезања дошло до пораста силе, али је тај раст прекинут пуцањем мањег слоја влакана и спољашњих листова фурнира у затегнутој зони (сл.117). Као и код претходне две комбинације, у горњој зони пресека, а након пуцања дрвета у затегнутој зони, дошло је до прекорачења притисне чврстоће праћене гъечењем дрвеног елемента. Услед овог оштећења долази до раслојавања у ојачаном слоју FRP-FRP, као и до гужвања спољашњих листова фурнира у зони дејства силе притиска. Ово оштећење приказано је на слици 118.

Код свих испитаних епрувета из ојачаних плоча лом у дрвету био је експлозивне природе, праћен пресецањем мањег броја карбонских влакана у затегнутој зони пресека. Ово нарушавање адхезије између слојева FRP-дрво и FRP-FRP у епруветама из ојачаних плоча догодило се искључиво након лома у дрвету.



Слика 116. Дијаграм оптерећење-угиб за носаче ЕК3



а)

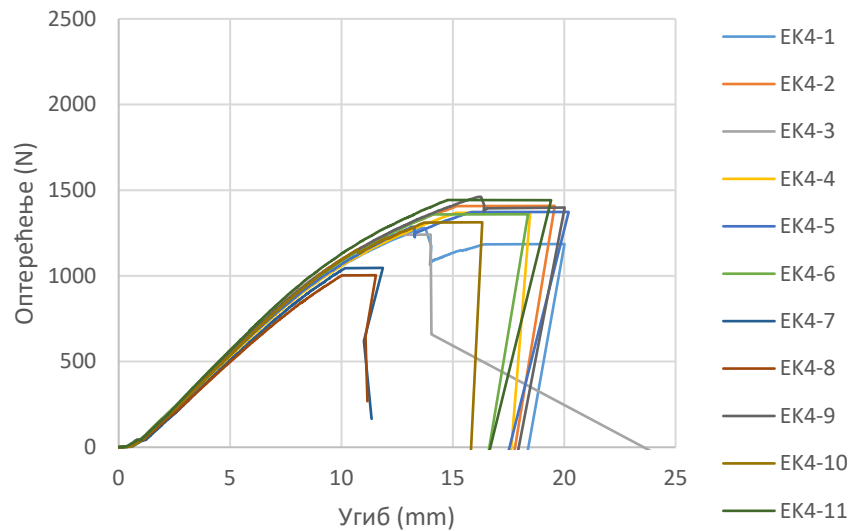
б)

Слика 117. Оштећења епрувета ЕК3: а) у притисној зони, сабијање влакана, лом у затегнутој зони; б) лом кроз слојеве фурнира у затегнутој зони

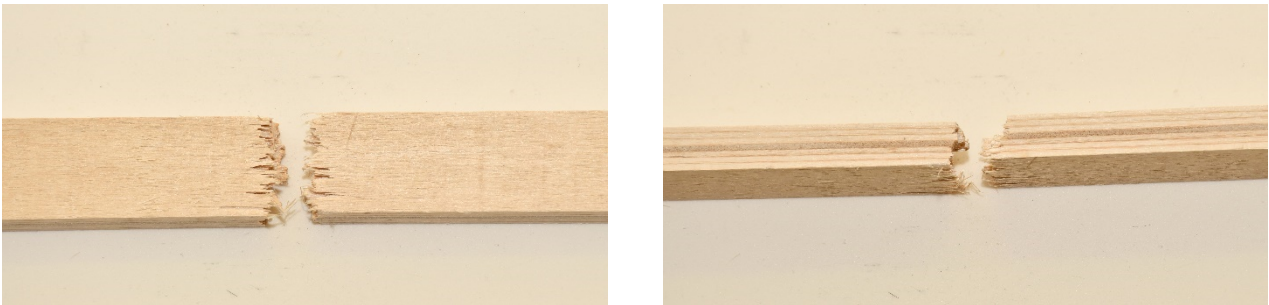


Слика 118. Оштећења епрувета ЕК3 у притисној зони, гњечење влакана и раслојавање у слоју FRP-FRP

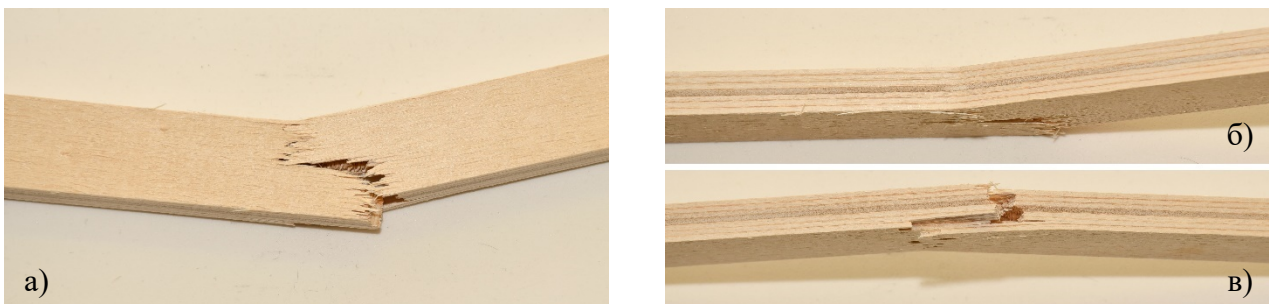
Контролни неојачани узорци плоча (Комбинација 4) показују дуктилније понашање у односу на ојачане плоче (сл.119), што није очекивано. Пластично понашање прекинуто је колапсом испитаних епрувета, до кога долази кртим ломом у затегнутој зони пресека. Лом је исти код свих испитаних епрувета Комбинације 4. Лом је изненадан, експлозиван и за разлику од ојачаних узорака који остају компактни, лом пресеца сва влакна, односно епрувете су у већини случајева поломљене на два дела. Карактеристични ломови приказани су на слици 120. Свега три епрувете су остале спојене у притиснутој зони и на њима се примећује гњечење услед силе притиска, али у много мањој мери у односу на неојачане епрувете, што је такође последица доста мање примењене силе (сл.121).



Слика 119. Дијаграм оптерећење-угиб за носаче ЕК4

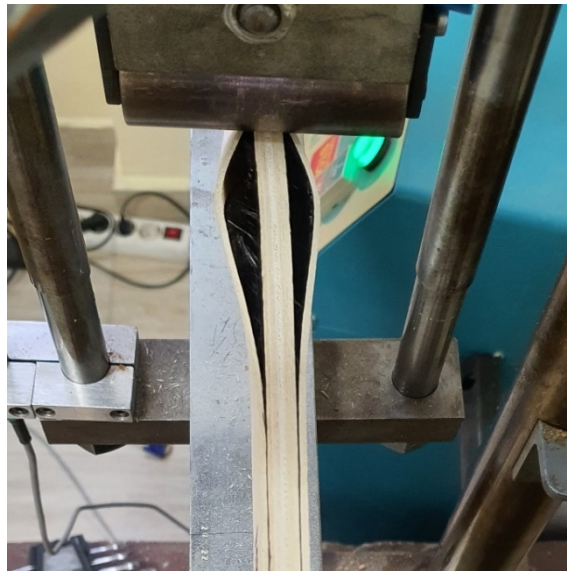


Слика 120. Карактеристични лом носача ЕК4 при испитивању савијања у равни плоче



Слика 121. Контролне неојачане епрувете ЕК4: а) лом епрувете, б) гњечење епрувете прекорачењем силе притиска, в) лом у затегнутој зони пресека

При испитивању плоча лепљених MUF-ом уочено је да се при оптерећењу, најчешће при интензитету од 70% од максималне силе, пре него што дође до пуцања епрувете услед прекорачења силе, јавља дeламинација епрувете између слојева FRP-FRP у плочама МК3, или у слоју FRP-дрво у плочама МК1. Дeламинација епрувета настаје у горњој зони пресека, односно у притиснутој зони око места дејства силе (сл.122, 123). Након тога епрувета и даље трпи оптерећење, доживљава правилан лом у затегнутој зони пресека у средњој трећини распона, али је њена целокупна носивост сведена на средишње слојеве фурнира, односно у Комбинацији МК1 понаша се као петослојна плоча, занемаривши два слоја фурнира и карбонска влакна. Ово је потврђено чињеницом да су резултати просечних максималних сила узорка тестираних као контролни узорци из плоча МК4 већи од просечних максималних сила за ојачане плоче МК1 и МК3. Модули еластичности утврђују се на основу 10% ($0.1F_{max}$) и 40% ($0.4F_{max}$) максималне силе. До раслојавања плоче долази на 70% F_{max} . Ипак, иако су модули еластичности ојачаних плоча већи од модула еластичности контролних плоча, не могу се узети као валидни податак због упитности максималне силе којом је узорак оптерећен. На основу наведеног, у овој фази експерименталног испитивања одлучено је да се у даљем раду изузму узорци плоча слеplени меламина-уреа формалдехидним адхезивом због раслојавања одређених плоча при резању, а затим даље и при испитивању својне чврстоће. Даљи рад на испитивању механичких својстава ојачаних плоча базиран је искључиво на плочама слеplеним епоксидним адхезивом.

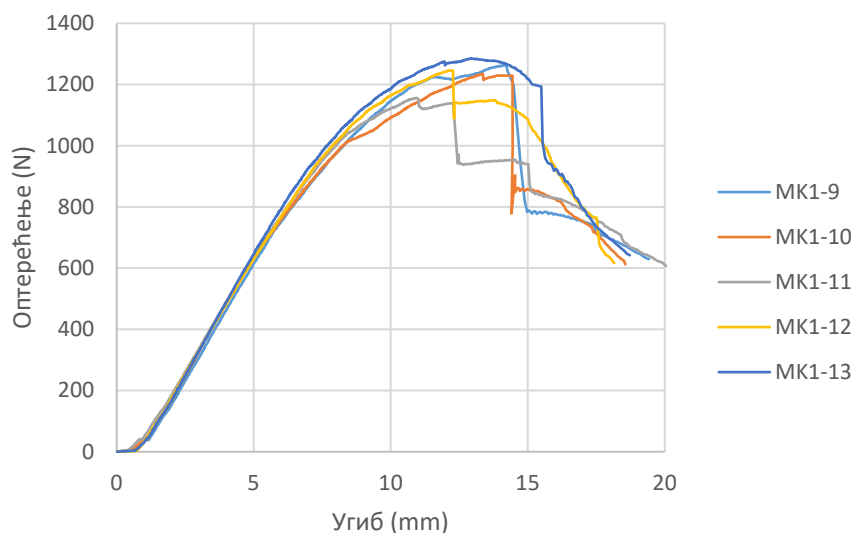


Слика 122. Дeламинација у слоју FRP-FRP у епруветама из плоче МК3

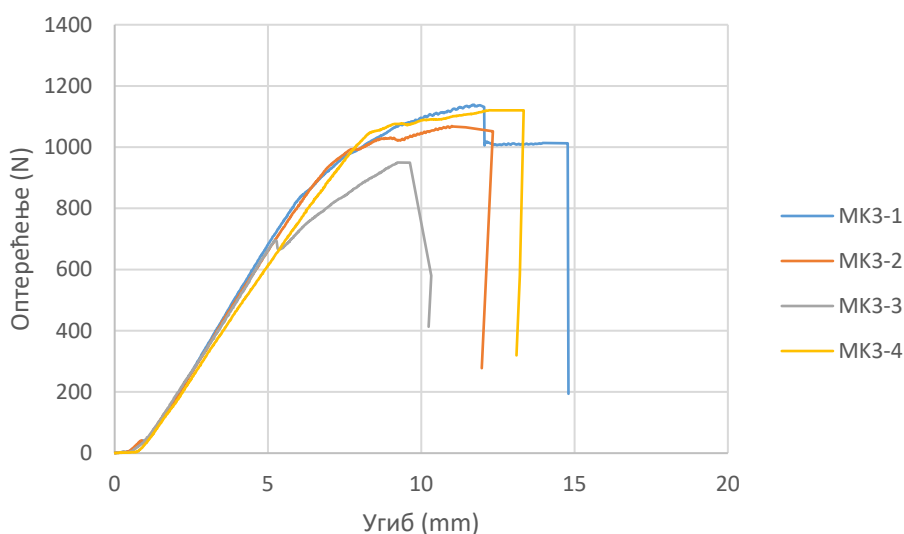


Слика 123. Дeламинација у слоју FRP-FRP у епруветама из плоче МК3 након извршеног тестирања

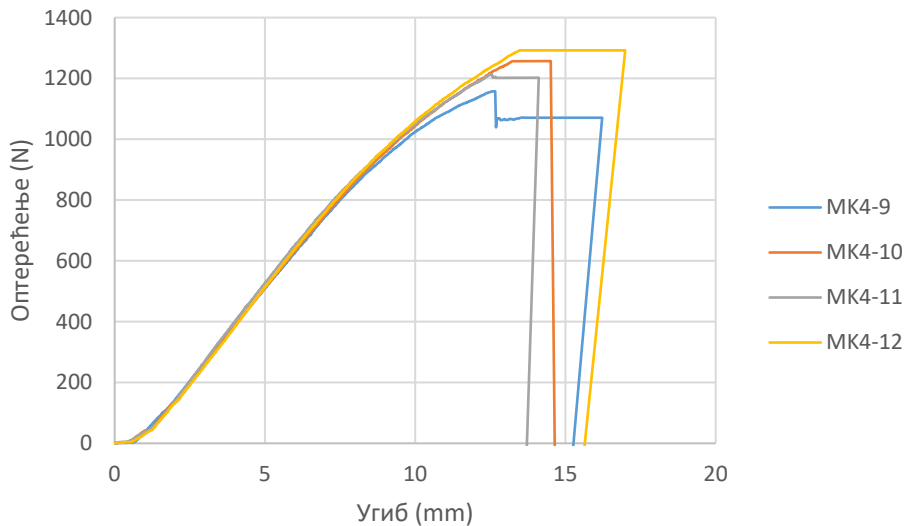
С обзиром да су извршена испитивања савојне чврстоће у равни плоче епрувета из ојачаних плоча које нису доживеле деламинацију приликом сечења, резултати типских епрувета ће бити приказани, понајвише због поређења дијаграма оптерећење-угиб за исте комбинације оптерећења, а различите типове примењеног адхезива. О типовима лома приказаних комбинација неће бити речи, из разлога што се лом не може дефинисати као лом композитног производа, јер је пре самог лома наступила деламинација ојачања и спољашњих слојева фурнира од средишњег дела пресека. Дијаграм оптерећење-угиб носача Комбинације 1 (сл. 124) показује дуктилно понашање носача до лома, што је знатно израженија дуктилност у односу на исту комбинацију ојачања код плоча слеplених са епоксидним адхезивом. На дијаграму плоча Комбинације 3 (сл.125) уочава се колапс носача путем чистог лома, што је карактеристика неојачаног носача. Овим се потврђује претходна констатација да након деламинације FRP-а петослојна фурнирска плоча која се налази у централној зони попречног пресека носача наставља да носи оптерећење, и њеним ломом долази до отказа епрувете. Понашање контролне плоче Комбинације 4 слеplене MUF-ом (сл.126) на дијаграму оптерећење-угиб показује слично понашање контролној плочи слеplеној епоксидним адхезивом. И код ових епрувета лом је изненадан праћен пресецањем влакна свих листова фурнира, односно епрувете су поломљене на два дела.



Слика 124. Дијаграм оптерећење-угиб за носаче МК1



Слика 125. Дијаграм оптерећење-угиб за носаче МК3



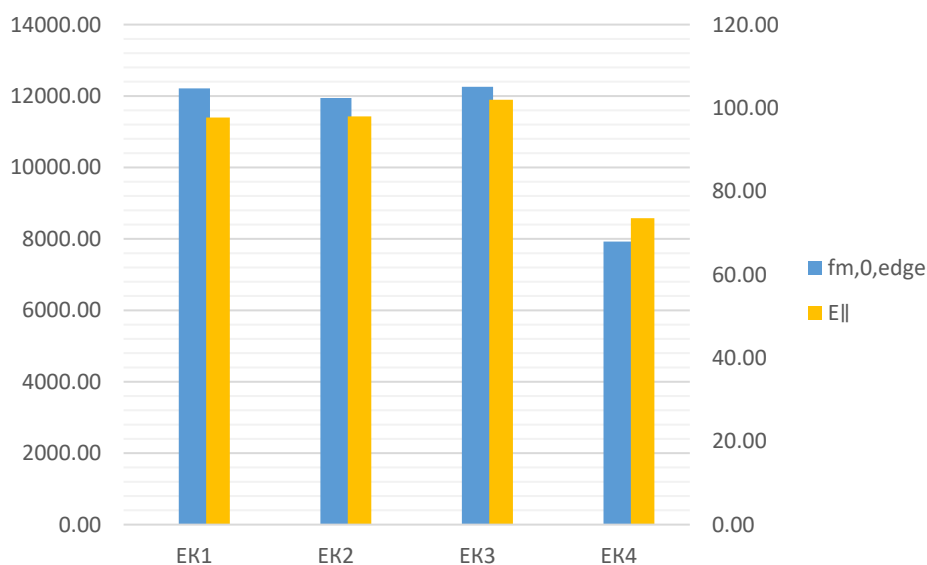
Слика 126. Дијаграм оптерећење-угиб за носаче МК4

5.5.2.2 Капацитет носивости и модул еластичности носача

Приказ експерименталних резултата испитаних епрувета у погледу максималног оптерећења, угиба носача, чврстоће на савијање и модула еластичности плоче при савијању у равни, по комбинацијама ојачања приказани су у Табелама 46-49. Све вредности су добијене приликом испитивања носача, а забележене су и очитане путем аквизиционог система „Console“. Средње вредности, вредности стандардне девијације и коефицијента варијације су израчунате на основу вредности за појединачне епрувете.

Средња вредност капацитета носивости неојачаних контролних плоча лепљених епоксидним адхезивом износи $F = 1299.88 \text{ N}$, са коефицијентом варијације 11.61%. Вредности чврстоће на савијање такође има велики степен варијације – 11.69%, а њена средња вредност износи $f_{m,0,edge} = 73.54 \text{ MPa}$. Вредности модула еластичности плоче имају много мањи коефицијент варијације који износи 3.54%, а средња вредност модула еластичности плоче за савијање у равни плоче $E_{\parallel} = 7925.08 \text{ MPa}$.

Капацитет носивости ојачаних носача је врло сличан за све три ојачане комбинације плоча, као што су слични и дијаграми оптерећење-угиб. Ово је резултат тога што промена начина ојачања додавањем карбонске тканине у попречном правцу, односно у правцу дејства силе нема ефекта на значајно повећање носивости приликом савијања у равни плоче. Капацитет носивости ојачаних носача Комбинације 1 (S1||6||) износи $F = 1828.56 \text{ N}$, са коефицијентом варијације 5.44%, средња вредност чврстоће на савијање $f_{m,0,edge} = 97.71 \text{ MPa}$, са коефицијентом варијације 5.98% и модул еластичности је $E_{\parallel} = 12214.47 \text{ MPa}$, са коефицијентом варијације 4.92%. Носачи ојачани са четири слоја карбонске тканине према распореду S1||3+4+6|| имају средњу вредност капацитета носивости $F = 1923.69 \text{ N}$, са коефицијентом варијације 5.56%, средњу вредност чврстоће на савијање $f_{m,0,edge} = 97.98 \text{ MPa}$, са коефицијентом варијације 5.76% и модул еластичности $E_{\parallel} = 11943.99 \text{ MPa}$, са коефицијентом варијације 4.17%. Носачи ојачани у виду мреже, односно тканинама постављеним према распореду S1||+6+||, имају капацитет носивости $F = 1924.63 \text{ N}$, са коефицијентом варијације 3.82%, средњу вредност чврстоће на савијање $f_{m,0,edge} = 101.97 \text{ MPa}$, са коефицијентом варијације 5.50% и модул еластичности $E_{\parallel} = 12256.66 \text{ MPa}$, са коефицијентом варијације 3.77%. Међусобно поређење вредности савојних чврстоћа и модула еластичности по комбинацијама приказано је на графикону на слици 126.



Слика 127. Дијаграм вредности $f_{m,0,edge}$ и $E_{||}$ по комбинацијама ојачања

У поређењу са неојачаним носачима, код ојачаних носача до пуцања долази на много већим оптерећењима. Процентуално посматрано, повећање капацитета носивости ојачаних носача у односу на контролне узорке креће се од 40.7% за носаче Комбинације 1, до 48% и 48.1% за носаче Комбинације 2 и Комбинације 3. Исти случај је и са чврстоћом на савијање, чији се степен ојачања у односу на контролне узорке креће у интервалу од 32.9% за К1, до 38.7% за К3. Модули еластичности код свих узорака су увећани за око 50% у односу на контролни узорак, а највеће повећање модула еластичности постигнуто је код узорка К3 и износи 54.7%. Иако су гредни носачи из ојачаних плоча Комбинације 3 процентуално показали највеће побољшање граничне носивости, чврстоће на савијање и модула еластичности, проценат увећања је занемарљив у односу на ојачане плоче Комбинације 1 (око 5% за F и $\sigma_{m||d}$), а за формирање плоча Комбинације 3 неопходно је дупло више FRP материјала. С обзиром да су додатни слојеви карбонске тканине оријентисани управно на носећи правац и немају улогу прихватања оптерећења на савијање, овакви резултати су очекивани. Са аспекта повећања савојне чврстоће у равни плоче и модула еластичности није економично правити ојачане плоче Комбинације 2 и 3.

Оно што је веома важно споменути је то да се уочава знатно смањење варијабилности у резултатима ојачаних плоча у односу на контролне узорке плоча Комбинације 4, а посебно са аспекта граничног оптерећења и чврстоће на савијање. Увођење карбонских влакана у подужном правцу смањило је варијабилност резултата при савијању и допринело уједначенијем понашању структуре. Осим тога, приметно је и да су епрувете из ојачаних плоча претрпеле много мање деформације при много већим силама у односу на епрувете из неојачаних плоча, чему доприноси првенствено карбонска влакна и њихово понашање у затегнутој зони пресека, где код неојачаних узорака долази до изненадног кртог лома.

Иако се резултати плоча добијених слеplивањем меламина-уреа формалдехидним адхезивом неће даље обрађивати због претходно описаних проблема при испитивању епрувета, мора се напоменути да контролне плоче слеplене овим адхезивом показују за 6.96% веће вредности савојне чврстоће и за 16.28% веће вредности модула еластичности у односу на контролне плоче слеplене епоксидним адхезивом. Резултати испитивања епрувета из контролних плоча, слеplених MUF-ом, Комбинације 4 приказани су у Табели 50.

Табела 46. Резултати испитивања савојне чврстоће у равни плоче за плоче ЕК1

К1	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ						
	Ознака	Димензије епрувете		Максимална	Максимални	Чврстоћа на	Модул
		висина	ширина	сила	угиб	савијање	еластичности
		mm	mm	N	mm	N/mm ²	N/mm ²
1	EK1OP1-SE1	30.48	13.37	1664.3	11.978	90.44	11589.80
2	EK1OP1-SE3	30.43	13.54	1706.5	13.806	91.88	11830.54
3	EK1OP1-SE4	30.5	13.94	1698.1	13.595	88.39	11284.62
4	EK1OP2-SE1	30.4	13.63	1926.1	14.352	103.22	12399.53
5	EK1OP2-SE2	30.54	13.71	1837.8	14.103	97.01	12136.97
6	EK1OP2-SE3	30.49	13.38	1814.7	13.592	98.48	12629.37
7	EK1OP2-SE4	30.46	13.63	1909.4	14.215	101.92	12688.27
8	EK1OP3-SE1	30.45	13.56	1924.0	14.484	103.29	12890.32
9	EK1OP3-SE2	30.78	13.91	1823.9	13.850	93.42	11398.03
10	EK1OP3-SE3	30.43	13.51	1944.0	13.496	104.89	12934.47
11	EK1OP3-SE4	30.42	13.35	1865.4	13.036	101.92	12577.29
Средња вредност:				1828.56	13.68	97.71	12214.47
Стандардна девијација:				99.52	0.70	5.85	601.04
Коефицијент варијације:				5.44%	5.15%	5.98%	4.92%
Повећање према ЕК4 (%):				40.7%	-14.1%	32.9%	54.1%

Табела 47. Резултати испитивања савојне чврстоће у равни плоче за плоче ЕК2

К2	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ						
	Ознака	Димензије епрувете		Максимална	Максимални	Чврстоћа на	Модул
		висина	ширина	сила	угиб	савијање	еластичности
		mm	mm	N	mm	N/mm ²	N/mm ²
1	EK2OP1-SE1	30.48	14.27	2082.6	12.879	106.04	12518.28
2	EK2OP1-SE2	30.76	14.76	2041.2	13.416	98.66	11902.85
3	EK2OP1-SE3	31.07	14.42	1972.9	11.793	95.67	11620.46
4	EK2OP1-SE4	30.58	14.61	1927.0	11.695	95.21	11992.61
5	EK2OP2-SE1	30.46	14.02	1861.0	11.192	97.43	12042.02
6	EK2OP2-SE2	30.34	14.61	1811.5	12.109	90.92	11127.31
7	EK2OP2-SE3	30.35	14.38	1791.8	11.559	91.31	11214.06
8	EK2OP2-SE4	30.41	14.24	1984.3	12.914	101.71	11814.56
9	EK2OP3-SE1	30.4	13.97	1752.3	12.486	91.62	11995.97
10	EK2OP3-SE2	30.37	13.71	1936.9	11.227	103.39	12522.96
11	EK2OP3-SE3	30.54	13.67	1999.1	12.751	105.83	12632.81
Средња вредност:				1923.69	12.18	97.98	11943.99
Стандардна девијација:				106.92	0.75	5.64	497.70
Коефицијент варијације:				5.56%	6.16%	5.76%	4.17%
Повећање према ЕК4 (%):				48.0%	-23.5%	33.2%	50.7%

Табела 48. Резултати испитивања савојне чврстоће у равни плоче за плоче ЕК3

КЗ	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ						
	Ознака	Димензије епрувете		Максимална сила N	Максимални угиб mm	Чврстоћа на савијање N/mm ²	Модул еластичности N/mm ²
	висина mm	ширина mm					
1	ЕК3ОР1-SE1	30.49	13.79	1948.3	11.482	102.58	12479.59
2	ЕК3ОР1-SE2	29.33	13.75	1976.0	13.036	112.76	12871.87
3	ЕК3ОР1-SE3	30.59	13.73	2038.5	13.979	107.10	12433.98
4	ЕК3ОР1-SE4	30.52	13.7	1992.3	12.518	105.38	12130.79
5	ЕК3ОР2-SE1	30.58	13.6	1947.9	11.121	103.38	12233.01
6	ЕК3ОР2-SE2	30.63	13.56	1886.8	12.233	100.11	12743.92
7	ЕК3ОР2-SE3	30.7	13.49	1955.6	11.819	103.90	12661.91
8	ЕК3ОР2-SE4	30.45	13.48	1910.4	10.603	103.17	12501.35
9	ЕК3ОР3-SE1	30.44	14.05	1855.9	12.774	96.22	11617.99
10	ЕК3ОР3-SE2	30.42	14.07	1972.3	13.694	102.25	12265.32
11	ЕК3ОР3-SE3	30.44	14.08	1795.5	13.144	92.89	11737.14
12	ЕК3ОР3-SE4	30.41	14.12	1816.0	12.588	93.87	11403.04
Средња вредност:				1924.63	12.42	101.97	12256.66
Стандардна девијација:				73.45	1.02	5.61	461.63
Коефицијент варијације:				3.82%	8.19%	5.50%	3.77%
Повећање према ЕК4 (%):				48.1%	-22.0%	38.7%	54.7%

Табела 49. Резултати испитивања савојне чврстоће у равни плоче за плоче ЕК4

К4	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ						
	Ознака	Димензије епрувете		Максимална сила N	Максимални угиб mm	Чврстоћа на савијање N/mm ²	Модул еластичности N/mm ²
	висина mm	ширина mm					
1	ЕК4КР1-SE1	30.41	12.95	1279.20	13.768	72.10	7903.97
2	ЕК4КР1-SE2	30.38	12.82	1408.50	19.576	80.35	8155.25
3	ЕК4КР1-SE3	30.39	12.97	1241.10	14.003	69.94	8110.61
4	ЕК4КР1-SE4	30.53	13.06	1368.80	18.472	75.90	7666.52
5	ЕК4КР2-SE1	30.45	13.07	1373.10	20.201	76.14	7748.92
6	ЕК4КР2-SE2	30.46	13.03	1359.70	18.377	75.69	7817.76
7	ЕК4КР2-SE3	30.4	12.83	1046.80	11.860	59.59	7775.27
8	ЕК4КР2-SE4	30.39	12.84	1004.00	11.547	57.15	7421.57
9	ЕК4КР3-SE1	30.42	12.72	1461.60	16.265	83.95	8095.26
10	ЕК4КР3-SE2	30.41	12.72	1313.00	16.322	75.34	8031.16
11	ЕК4КР3-SE4	30.42	12.71	1442.90	14.791	82.81	8449.54
Средња вредност:				1299.88	15.93	73.54	7925.08
Стандардна девијација:				150.91	3.00	8.60	280.80
Коефицијент варијације:				11.61%	18.81%	11.69%	3.54%

Табела 50. Резултати испитивања савојне чврстоће у равни плоче за плоче МК4

K4	MUF	Димензије епрувете		Максимална сила N	Максимални угиб mm	Чврстоћа на савијање N/mm ²	Модул еластичности N/mm ²
		висина mm	ширина mm				
1	МКЗОР1-SE1	30.34	10.82	1038.26	10.210	70.39	9044.14
2	МКЗОР1-SE2	30.32	10.97	1013.80	13.337	67.86	9074.77
3	МКЗОР1-SE3	30.37	10.89	1105.40	13.419	74.28	8966.36
4	МКЗОР1-SE4	30.54	10.86	1016.30	10.179	67.73	8773.15
5	МКЗОР2-SE1	30.36	11.23	1083.30	14.221	70.69	8098.20
6	МКЗОР2-SE2	30.46	10.47	1216.73	16.727	83.39	8322.97
7	МКЗОР2-SE3	30.35	10.75	1028.40	11.709	70.10	7954.79
8	МКЗОР2-SE4	30.34	10.92	1058.70	11.435	71.09	8451.24
9	МКЗОР3-SE1	30.44	9.89	1157.60	12.662	85.27	9993.39
10	МКЗОР3-SE2	30.27	9.84	1257.00	14.511	94.10	10309.15
11	МКЗОР3-SE3	30.31	9.63	1213.90	12.553	92.42	11061.33
12	МКЗОР3-SE4	30.4	9.77	1292.20	13.493	96.60	10536.20
Средња вредност:				1123.47	12.87	78.66	9215.47
Стандардна девијација:				100.13	1.86	11.01	1021.49
Коефицијент варијације:				8.91%	14.47%	14.00%	11.08%
Повећање према ЕК4 (%):				-13.57%	-19.18%	6.96%	16.28%

Претходно је напоменуто у поглављу 5.4.3 *Одређивање савојне чврстоће у равни плоче и модула еластичности при савијању*³²⁴ да је испитивање савојне чврстоће у равни плоче спроведено према стандарду за структурну примену LVL-a – SRPS EN 14374:2012 у оквиру кога се дефинишу корекциони коефицијенти за одређивање савојне чврстоће у односу на димензије епрувета. С обзиром да су димензије епрувета мале скале, мање од димензије епрувета које се испитују исецањем из индустријских плоча, приликом тестирања готовог производа, добијени резултати морају се помножити корекционим коефицијентима. Резултати приказани у претходним табелама су служили само за међусобно поређење Комбинација и степена ојачања.

Према Стандарду дефинисано је да се уколико је висина епрувета мања од 300 mm вредности добијених резултата савојне чврстоће множе корекционим коефицијентом $k_{m,corr.}$, према следећем изразу:

$$k_{m,corr.} = \left(\frac{b}{300}\right)^s,$$

где је:

b – висина тестиране епрувете у mm,

s – параметар утицаја величине епрувете израчунат по формули $s = 2v - 0.05$, при чему је

v – коефицијент варијације тестираних резултата и сме бити мањи од 0.10 само уколико је верификован документованим искуством током протекле две године.

³²⁴ погледати поглавље 5.4.3 *Одређивање савојне чврстоће у равни плоче и модула еластичности при савијању*, стр.158.

Коефицијент варијације тестираних резултата у оквиру испитивања савојне чврстоће ојачаних плоча износи $v = 0.0598$, а неојачане плоче $v = 0.1169$. Како је минимални дефинисани коефицијент варијације $v = 0.10$, у оквиру овог истраживања усвојено је $v = 0.12$. На основу наведеног у Табелама 51-54. израчунат је корекциони коефицијент за сваки узорак, а потом је извршена корекција вредности напона савијања у равни плоче за сваки наведени узорак. Чврстоћа на савијање израчуната је према обрасцу:

$$f_{m,0,edge} = f_{m,0,edge,test} \times k_{m,corr.},$$

где је :

$f_{m,0,edge}$ – чврстоћа на савијање у равни пресека конструкцијске LVL плоче, у N/mm^2 ,

$f_{m,0,edge,test}$ – чврстоћа на савијање у равни пресека одређена је на епруветама мале скале, у N/mm^2 .

Средња вредност чврстоће на савијање у равни плоче износи $74.27 N/mm^2$ за епрувете из плоча Комбинације 1, епрувете из плоча Комбинације 2 – $74.48 N/mm^2$, епрувете из плоча Комбинације 3 – $77.48 N/mm^2$ и за епрувете из контролних, неојачаних плоча $55.88 N/mm^2$.

Табела 51. Кориговане вредности савојне чврстоће у равни плоче за плоче ЕК1

К1	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ					
	Ознака	Димензије епрувета		Корекциони коефицијент	Чврстоћа на савијање - тест	Чврстоћа на савијање
		висина	ширина	$k_{m,corr.}$	$f_{m,0,edge,test}$	$f_{m,0,edge}$
		mm	mm		N/mm^2	N/mm^2
1	ЕК1ОР1-СЕ1	30.48	13.37	13.768	90.44	68.74
2	ЕК1ОР1-СЕ3	30.43	13.54	19.576	91.88	69.82
3	ЕК1ОР1-СЕ4	30.5	13.94	14.003	88.39	67.18
4	ЕК1ОР2-СЕ1	30.4	13.63	18.472	103.22	78.42
5	ЕК1ОР2-СЕ2	30.54	13.71	20.201	97.01	73.75
6	ЕК1ОР2-СЕ3	30.49	13.38	18.377	98.48	74.85
7	ЕК1ОР2-СЕ4	30.46	13.63	11.860	101.92	77.46
8	ЕК1ОР3-СЕ1	30.45	13.56	11.547	103.29	78.49
9	ЕК1ОР3-СЕ2	30.78	13.91	16.265	93.42	71.08
10	ЕК1ОР3-СЕ3	30.43	13.51	16.322	104.89	79.70
11	ЕК1ОР3-СЕ4	30.42	13.35	14.791	101.92	77.44
Средња вредност:					97.71	74.27

Табела 52. Кориговане вредности савојне чврстоће у равни плоче за плоче ЕК2

	Ознака	Димензије епрувета		Корекциони коефицијент $k_{m,corr.}$	Чврстоћа на савија-е - тест $f_{m,0,edge,test}$ N/mm ²	Чврстоћа на савијање $f_{m,0,edge}$ N/mm ²
		висина mm	ширина mm			
1	ЕК2ОР1-SE1	30.48	14.27	0.760	106.04	80.59
2	ЕК2ОР1-SE2	30.76	14.76	0.761	98.66	75.07
3	ЕК2ОР1-SE3	31.07	14.42	0.762	95.67	72.88
4	ЕК2ОР1-SE4	30.58	14.61	0.760	95.21	72.39
5	ЕК2ОР2-SE1	30.46	14.02	0.760	97.43	74.04
6	ЕК2ОР2-SE2	30.34	14.61	0.760	90.92	69.06
7	ЕК2ОР2-SE3	30.35	14.38	0.760	91.31	69.36
8	ЕК2ОР2-SE4	30.41	14.24	0.760	101.71	77.28
9	ЕК2ОР3-SE1	30.4	13.97	0.760	91.62	69.61
10	ЕК2ОР3-SE2	30.37	13.71	0.760	103.39	78.54
11	ЕК2ОР3-SE3	30.54	13.67	0.760	105.83	80.45
Средња вредност:					97.98	74.48

Табела 53. Кориговане вредности савојне чврстоће у равни плоче за плоче ЕК3

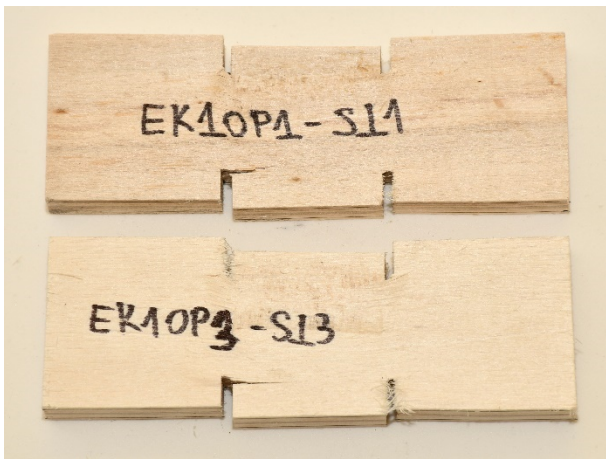
	Ознака	Димензије епрувета		Корекциони коефицијент $k_{m,corr.}$	Чврстоћа на савија-е - тест $f_{m,0,edge,test}$ N/mm ²	Чврстоћа на савијање $f_{m,0,edge}$ N/mm ²
		висина mm	ширина mm			
1	ЕК3ОР1-SE1	30.49	13.79	0.760	102.58	77.97
2	ЕК3ОР1-SE2	29.33	13.75	0.757	112.76	85.31
3	ЕК3ОР1-SE3	30.59	13.73	0.760	107.10	81.43
4	ЕК3ОР1-SE4	30.52	13.7	0.760	105.38	80.10
5	ЕК3ОР2-SE1	30.58	13.6	0.760	103.38	78.60
6	ЕК3ОР2-SE2	30.63	13.56	0.760	100.11	76.13
7	ЕК3ОР2-SE3	30.7	13.49	0.761	103.90	79.03
8	ЕК3ОР2-SE4	30.45	13.48	0.760	103.17	78.40
9	ЕК3ОР3-SE1	30.44	14.05	0.760	96.22	73.12
10	ЕК3ОР3-SE2	30.42	14.07	0.760	102.25	77.69
11	ЕК3ОР3-SE3	30.44	14.08	0.760	92.89	70.59
12	ЕК3ОР3-SE4	30.41	14.12	0.760	93.87	71.32
Средња вредност:					101.97	77.48

Табела 54. Кориговане вредности савојне чврстоће у равни плоче за плоче ЕК4

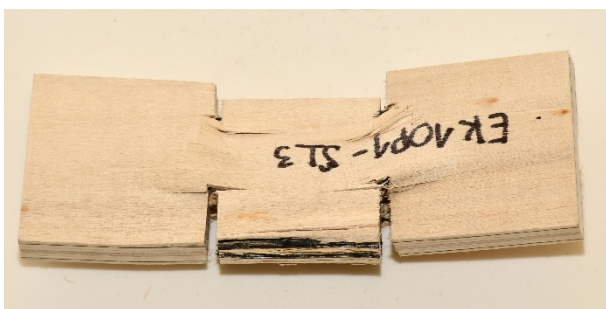
К4	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ					
	Ознака	Димензије епрувета		Корекциони коефицијент $k_{m,corr.}$	Чврстоћа на савијање - е - тест $f_{m,0,edge,test}$ N/mm ²	Чврстоћа на савијање $f_{m,0,edge}$ N/mm ²
		висина mm	ширина mm			
1	ЕК4КР1-SE1	30.41	12.95	0.760	72.10	54.78
2	ЕК4КР1-SE2	30.38	12.82	0.760	80.35	61.04
3	ЕК4КР1-SE3	30.39	12.97	0.760	69.94	53.14
4	ЕК4КР1-SE4	30.53	13.06	0.760	75.90	57.70
5	ЕК4КР2-SE1	30.45	13.07	0.760	76.14	57.86
6	ЕК4КР2-SE2	30.46	13.03	0.760	75.69	57.52
7	ЕК4КР2-SE3	30.4	12.83	0.760	59.59	45.28
8	ЕК4КР2-SE4	30.39	12.84	0.760	57.15	43.42
9	ЕК4КР3-SE1	30.42	12.72	0.760	83.95	63.79
10	ЕК4КР3-SE2	30.41	12.72	0.760	75.34	57.24
11	ЕК4КР3-SE4	30.42	12.71	0.760	82.81	62.92
Средња вредност:					73.54	55.88

5.5.3 Чврстоћа на смицање управно на раван плоче

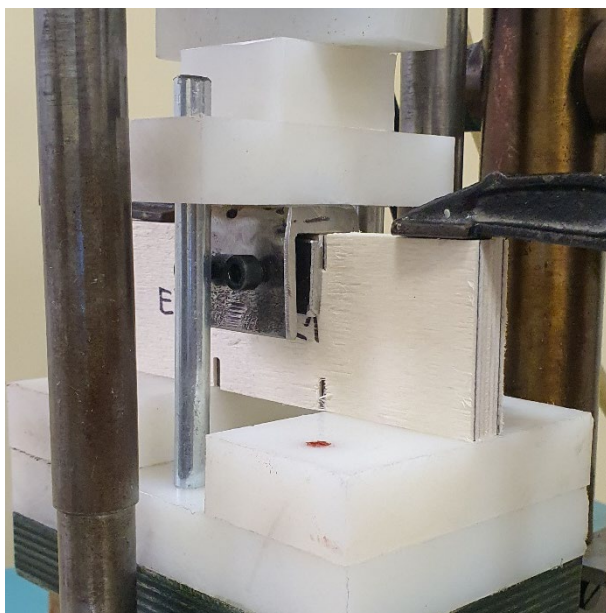
Испитивање чврстоће на смицање управно на раван плоче (Panel shear test) било је могуће само за епрувете изрезане из плоча слепљених епоксидним адхезивом. Код свих испитаних епрувета дошло је до лома прекорачењем напона смицања. Код епрувета из плоча ојачаних карбонском тканином постављеном у првој и шестој слубници – Комбинација 1, лом се јавља у неколико фаза током времена. Лом почиње у средишњем листу фурнира, чија су дрвна влакна попречно оријентисана у односу на спољашње листове фурнира, у правцу деловања силе притиска. У свим осталим слојевима долази до смицања које се манифестује гужвањем влакана. До потпуног лома и пресецања влакана дрвета не долази, с обзиром да је ојачање постављено управно на правац дејства силе, односно у правцу влакана, тканина потпомаже да испитна епрувета остане кохерентна. У тренутку достизања максималне силе, долази до пуцања епрувета појавом подужних пукотина у правцу влакана, а на месту њеног ослабљења (сл. 128). До ових пукотина долази прекорачењем напона притиска на месту лома. Код једне епрувете ЕК1-3 (ЕК1ОР1-S+3) дошло је до лома пресецањем карбонских влакана и влакана листова фурнира подужно оријентисаних што је приказано на слици 129. Процес тестирања приказан је на сликама 130 и 131. На слици 131 уочава се гужвање влакана и појава пукотина на местима ослабљења пресека. На слици 132 приказан је типски дијаграм промене оптерећења и деформација по јединици времена. На дијаграму су јасно уочљиве пластичне деформације, што је видљиво и на самим испитним епруветама где се пластификација уочава збијањем влакана и крајњим ломом узорка. Осим тога, уочава се да је након лома епрувета наставила да трпи оптерећење, односно бележи се раст силе док није дошло до потпуног пуцања. У табели 55 приказани су резултати чврстоће на смицање управно на раван плоче за плоче Комбинације 1. Средња вредност максималне силе при којој је дошло до лома узорака износи $F = 12437.89 \text{ N}$, са коефицијентом варијације 7.02%. Средња вредност напона смицања за плоче ЕК1 износи $f_{v,0,edge} = 15.16 \text{ N/mm}^2$, са коефицијентом варијације 5.88%.



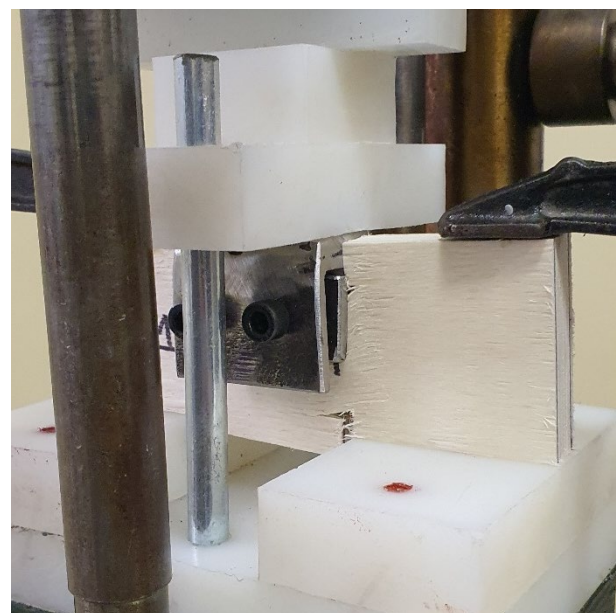
Слика 128. Испитивање чврстоће на смицање управно на раван плоче – карактеристичан лом за епрувете из плоча ЕК1



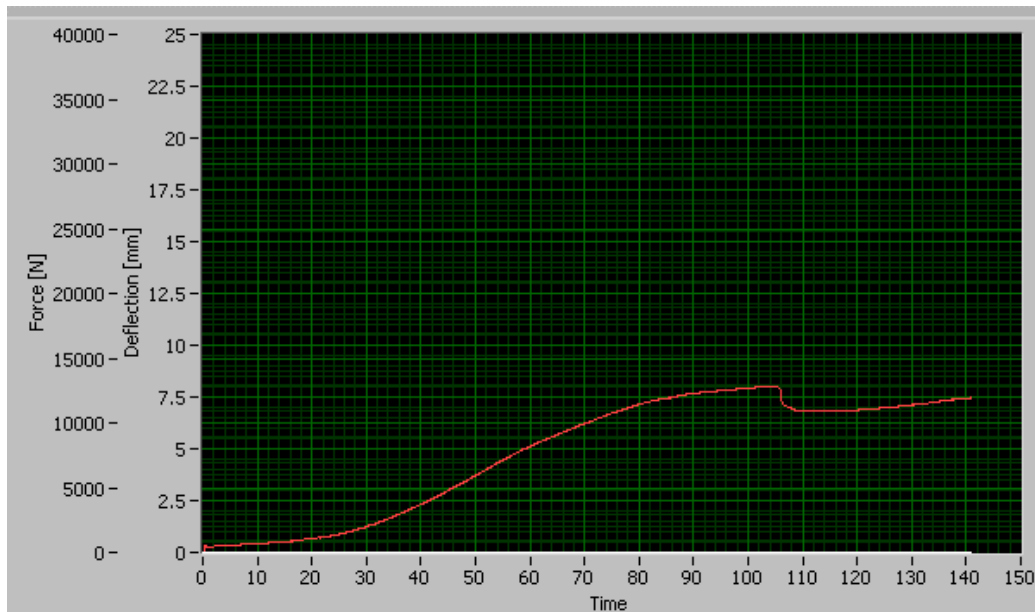
Слика 129. Апсолутни лом за епрувете из плоча EK1OP1-S13 при испитивању чврстоће на смицање



Слика 130. Испитивање чврстоће на смицање управно на раван плоче – почетак оптерећења



Слика 131. Испитивање чврстоће на смицање управно на раван плоче – током оптерећења



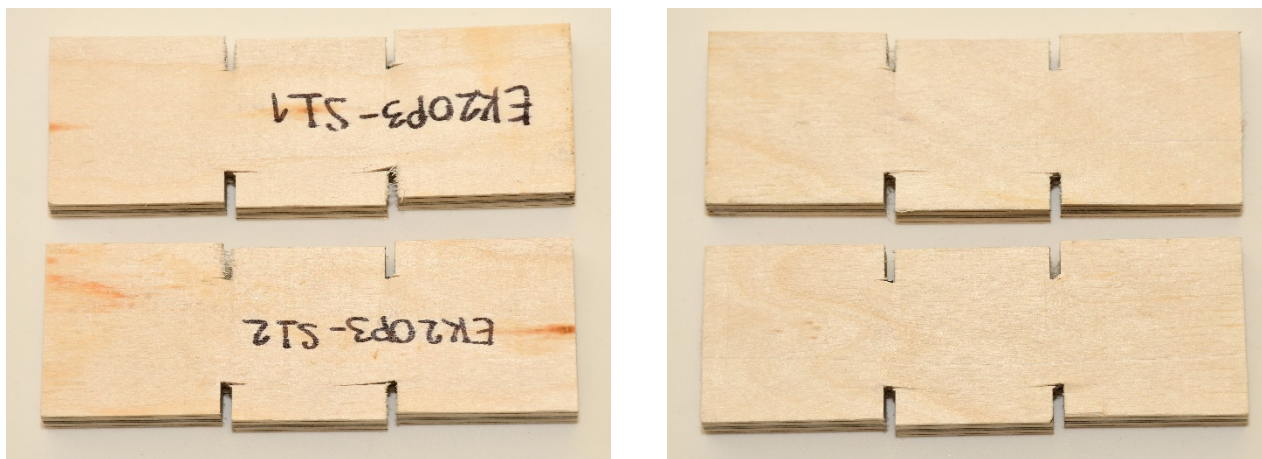
Слика 132. Типски дијаграм оптерећење-деформација-време при испитивању чврстоће на смицање управно на раван плоче ЕК1

Табела 55. Резултати испитивања чврстоће на смицање управно на раван плоче ЕК1

К1 ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ								
	Ознака	Димензије епрувете		Смичућа површина А	Макс. сила F'	Калибр. узорка ΔF	Стварна сила F=F'-ΔF	Напон смицања $f_{v,0,edge}$
		дужина а	ширина б					
		mm	mm	mm ²	N	N	N	N/mm ²
1	EK1OP1-S \perp 1	30.3	13.35	404.51	12869	155	12714	15.72
2	EK1OP1-S \perp 2	30.3	13.34	404.20	12243	155	12088	14.95
3	EK1OP1-S \perp 3	30.05	13.3	399.67	10580	155	10425	13.04
4	EK1OP2-S \perp 1	30.4	13.63	414.35	12754	155	12599	15.20
5	EK1OP2-S \perp 2	30.2	13.5	407.70	13160	155	13005	15.95
6	EK1OP2-S \perp 3	30.3	13.35	404.51	12328	155	12173	15.05
7	EK1OP3-S \perp 1	30.18	13.72	414.07	12860	155	12705	15.34
8	EK1OP3-S \perp 2	30.3	13.82	418.75	12802	155	12647	15.10
9	EK1OP3-S \perp 3	30.67	13.77	422.33	13740	155	13585	16.08
Средња вредност:							12437.89	15.16
Стандардна девијација:							873.15	0.89
Коефицијент варијације:							7.02%	5.88%
Повећање према ЕК4 (%):							26.35%	20.42%

Испитивањем чврстоће на смицање управно на раван плоче узорака Комбинације 2, ојачаних кроз четири слубнице према следећем распореду S1||3 \perp 4 \perp 6|| уочени су модели лома слични моделима лома код плоча Комбинације 1. Ипак, разлика је у томе што је код плоча Комбинације 2 степен збијености влакана при смицању много мање изражен, односно механичко оштећење епрувета је изражено у много мањој мери (сл. 133). Све епрувете имају исте облике оштећења. Осим наведеног, пукотине настале на местима ослабљења су мање изражене, што је последица ојачања у попречном правцу, тј. постављања карбонских влакана

у попречном смеру која су умањила могућност цепања по подужним влакнима дрвета. Иако је постојање влакана у попречном правцу утицало да облици лома физички буду мање изражени, вредности оптерећења при којима долази до смицања су врло сличне вредностима за плоче Комбинације 1. Средња вредност максималне остварене силе при којој је дошло до лома епрувета из плоча Комбинације 2 износи $F = 13093.33 \text{ N}$, са коефицијентом варијације 4.10%. Средња вредност напона смицања за епрувете из плоча Комбинације ЕК2 износи $f_{v,0,edge} = 15.36 \text{ N/mm}^2$, са коефицијентом варијације 6.52%. Резултати испитивања чврстоће на смицање управно на раван плоче Комбинације ЕК2 приказани су у Табели 56.



Слика 133. Испитивање чврстоће на смицање управно на раван плоче – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК2

Табела 56. Резултати испитивања чврстоће на смицање управно на раван плоче Комбинације ЕК2

К2	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ							
	Ознака	Димензије епрувета		Смичућа	Макс.	Калибр.	Стварна	Напон
		дужина	ширина	површина	сила	узорка	сила	смицања
		a	b	A	F'	ΔF	$F=F'-\Delta F$	$f_{v,0,edge}$
		mm	mm	mm ²	N	N	N	N/mm ²
1	EK2OP1-S \perp 1	30.28	14.28	432.40	12947	155	12792	14.79
2	EK2OP1-S \perp 2	30.10	14.29	430.13	13436	155	13281	15.44
3	EK2OP1-S \perp 3	30.52	14.12	430.94	13498	155	13343	15.48
4	EK2OP2-S \perp 1	30.31	14.20	430.40	12947	155	12792	14.86
5	EK2OP2-S \perp 2	30.37	14.47	439.45	12480	155	12325	14.02
6	EK2OP2-S \perp 3	30.35	14.06	426.72	13413	155	13258	15.53
7	EK2OP3-S \perp 1	30.06	13.88	417.23	13602	155	13447	16.11
8	EK2OP3-S \perp 2	30.14	13.37	402.97	14228	155	14073	17.46
9	EK2OP3-S \perp 3	30.79	13.97	430.14	12684	155	12529	14.56
Средња вредност:							13093.33	15.36
Стандардна девијација:							536.18	1.00
Коефицијент варијације:							4.10%	6.52%
Повећање према ЕК4 (%):							33.01%	22.04%

На свим испитним епруветама из плоча Комбинације 3, ојачаним по принципу мреже постављене у прву и шесту слубницу, до лома је дошло смицањем, али су деформације на епруветама врло мале, а на појединим једва уочљиве. На епруветама је дошло до појаве

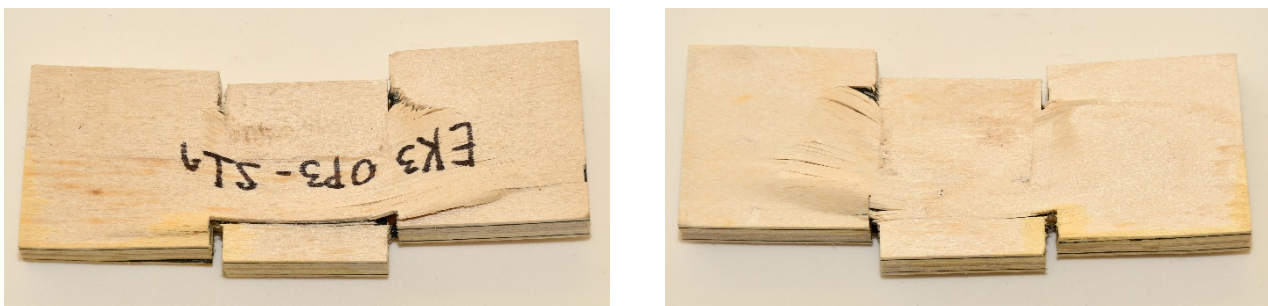
пластичних деформација сабијањем и гужвањем влакана на месту ослабљења материјала, а посебно у горњој зони ближе месту деловања оптерећења. До појаве подужних пукотина у дрвету на месту ослабљена у доњој зони дошло је у врло малој мери, док их у горњој зони није било. На слици 134 приказана су карактеристична оштећења за епрувете из плоча Комбинације 3. Код једне епрувете ЕК3-7 (ЕК3ОР3-S \perp 1) је дошло до израженог гужвања спољашњих фурнирских листова и до њиховог цепања у подужном правцу, а при чему је дошло и до мање израженог раслојавања између слоја FRP-а и спољашњег листа фурнира, али не и до оштећења карбонских влакана. Карбонска влакна у овој епрувети остала су континуална, нису прекинута ломом. Ово оштећење приказано је на слици 135. Постављањем ојачања у правцу дејства силе, како код Комбинације 2 тако и код Комбинације 3, смањен је проценат физичких оштећења. Позиција ојачања постављена тако да формира мрежу у првој и шестој слубници утицала је на цепање влакана у притиснутој зони пресека и додатно повећала отпорност епрувете на смицање. Средња вредност максималне остварене силе при којој је дошло до лома епрувета из плоча Комбинације 3 износи $F = 15459.67 \text{ N}$, са коефицијентом варијације 4.90%. Средња вредност напона смицања за плоче Комбинације ЕК3 износи $f_{v,0,edge} = 18.22 \text{ N/mm}^2$, са коефицијентом варијације 6.86%. Резултати испитивања чврстоће на смицање управно на раван плоче Комбинације ЕК3 приказани су у Табели 57.

Табела 57. Резултати испитивања чврстоће на смицање управно на раван плоче ЕК3

КЗ	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ							
	Ознака	Димензије епрувета		Смичућа	Макс.	Калибр.	Стварна	Напон
		дужина	ширина	површина	сила	узорка	сила	смицања
		a	b	A	F'	ΔF	$F=F'-\Delta F$	$f_{v,0,edge}$
		mm	mm	mm ²	N	N	N	N/mm ²
1	ЕК3ОР1-S \perp 1	30.90	13.71	423.64	16704	155	16549	19.53
2	ЕК3ОР1-S \perp 2	30.23	13.70	414.15	16611	155	16456	19.87
3	ЕК3ОР1-S \perp 3	30.20	13.89	419.48	15407	155	15252	18.18
4	ЕК3ОР2-S \perp 1	30.29	13.80	418.00	15706	155	15551	18.60
5	ЕК3ОР2-S \perp 2	30.53	13.51	412.46	16231	155	16076	19.49
6	ЕК3ОР2-S \perp 3	32.44	13.86	449.62	15048	155	14893	16.56
7	ЕК3ОР3-S \perp 1	30.32	14.04	425.69	15316	155	15161	17.81
8	ЕК3ОР3-S \perp 2	30.43	14.26	433.93	14551	155	14396	16.59
9	ЕК3ОР3-S \perp 3	30.34	14.04	425.97	14958	155	14803	17.38
Средња вредност:							15459.6	
							7	18.22
Стандардна девијација:							756.93	1.25
Коефицијент варијације:							4.90%	6.86%
Повећање према ЕК4 (%):							57.05%	44.75%

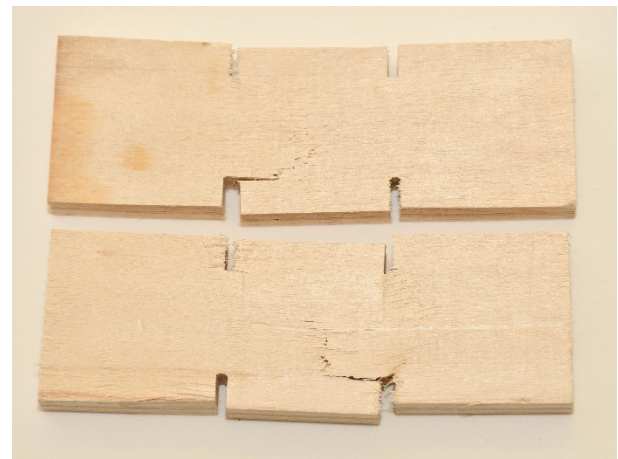
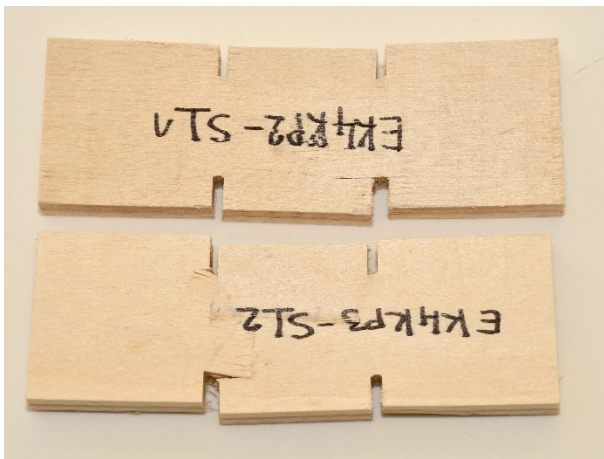


Слика 134. Испитивање чврстоће на смицање управно на раван плоче – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК3

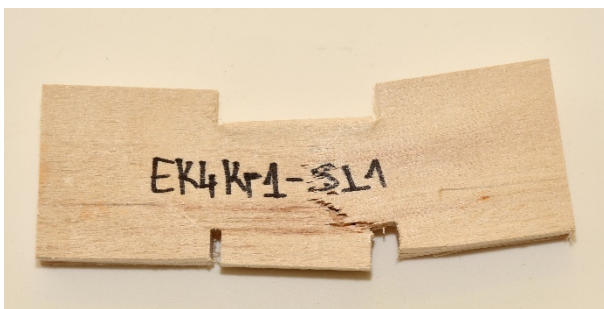


Слика 135. Оштећење епрувета из плоча ЕК3OP3-S[⊥]1 при испитивању чврстоће на смицање управно на раван плоче

Код свих епрувета из контролних, неојачаних плоча Комбинације 4, до лома је дошло као последица смичућих напрезања. У односу на ојачане узорке, лом епрувета је поприлично изражен. Карактеристични облици лома приказани су на слици 136. Лом настаје у доњој зони, на месту ослабљења пресека, при чему долази до пресецања подужно оријентисаних влакана фурнира, а што има тенденцију комплетног лома епрувете. Код једне епрувете (ЕК4KP1-S[⊥]1) из плоче К4-1 дошло је до прекорачења напона притиска у горњој зони на месту деловања силе, при чему је дошло до мрвљења епрувете сабијањем влакана фурнира и њиховим цепањем по подужном правцу. Ова оштећења приказана су на слици 137. Средња вредност максималне остварене силе при којој је дошло до лома епрувете из плоча контролне серије износи $F = 9843.86 \text{ N}$, са коефицијентом варијације 6.89%. Средња вредност напона смицања за епрувете из плоча Комбинације ЕК4 износи $f_{v,0,edge} = 12.59 \text{ N/mm}^2$, са коефицијентом варијације 7.08%. Резултати испитивања чврстоће на смицање управно на раван плоче Комбинације ЕК4 приказани су у Табели 58.



Слика 136. Испитивање чврстоће на смицање управно на раван плоче – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК4



Слика 137. Испитивање чврстоће на смицање управно на раван плоче – прекорачење напона притиска при испитивању епрувета из плоча ЕК4КР1- $S_{\perp 1}$

Табела 58. Резултати испитивања чврстоће на смицање управно на раван плоче ЕК4

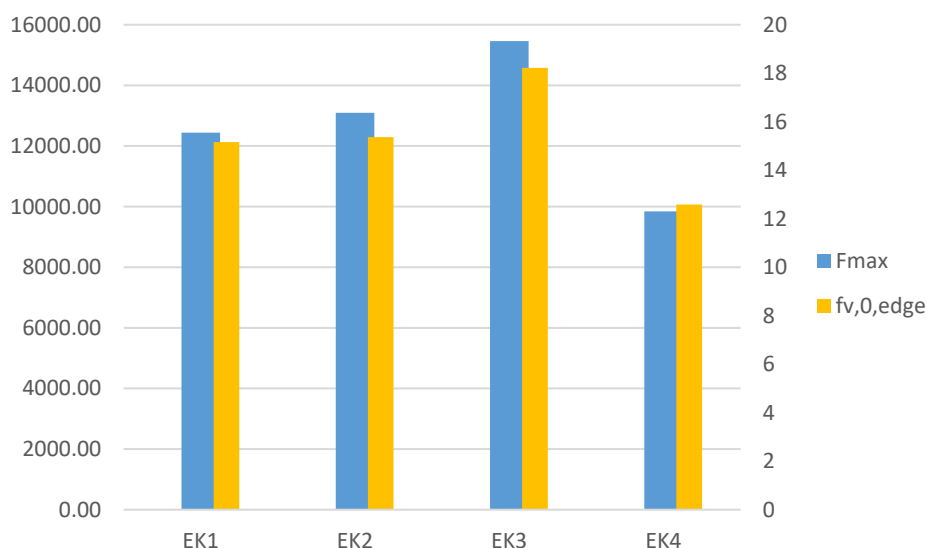
K4	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ							
	Ознака	Димензије епрувете		Смичућа	Макс.	Калибр.	Стварна	Напон
		дужина	ширина	површина	сила	узорка	сила	смицања
		a	b	A	F'	ΔF	F=F'- ΔF	$f_{v,0,edge}$
		mm	mm	mm ²	N	N	N	N/mm ²
1	EK4KP1-S \perp 1	30.16	13.00	392.08	10045	155	9890	12.61
2	EK4KP1-S \perp 2	29.99	13.09	392.57	10251	155	10096	12.86
3	EK4KP1-S \perp 3	30.30	12.81	388.14	9629	155	9474	12.20
4	EK4KP2-S \perp 1	30.12	13.15	396.08	9600	155	9445	11.92
5	EK4KP2-S \perp 2	30.09	12.98	390.57	8930	155	8775	11.23
6	EK4KP2-S \perp 3							
7	EK4KP3-S \perp 1	30.43	12.88	391.94	10955	155	10800	13.78
8	EK4KP3-S \perp 2	30.24	12.76	385.86	10582	155	10427	13.51
9	EK4KP3-S \perp 3							
Средња вредност:							9843.86	12.59
Стандардна девијација:							678.02	0.89
Коефицијент варијације:							6.89%	7.08%

Ојачане плоче Комбинације 1 и Комбинације 2 показују врло сличан капацитет носивости. Облик лома је исти за оба ојачања плоча, с тим што при ојачању плоча Комбинације 2 сам лом је много мање физички изражен захваљујући карбонским влакнима постављеним у попречном правцу у односу на спољашње листове фурнира, који су умањили

процент цепања дрвних влакана по подужном правцу на местима ослабљења, и умањили њихово гужвање. На графику на слици 138 приказане су упоредне вредности максималне силе при којој је дошло до лома и напона смицања за сваку комбинацију плоча. У односу на неојачане носаче (ЕК4), код носача ојачаних постављањем карбонске тканине у подужном правцу у прву и шесту слубницу (ЕК1) сила при којој је дошло до лома увећана је за 26.35%, док проценат побољшања напона смицања износи 20.42%. Код ојачаних носача из плоча Комбинације 2 (ЕК2), код којих је у односу на претходну Комбинацију 1, додато ојачање у попречном правцу у трећу и четврту слубницу, сила при којој је дошло до лома увећана је за 33.01%, док проценат побољшања напона смицања износи 22.04% у односу на контролну плочу (ЕК4). Може се закључити да ојачање плоча Комбинације 2 у односу на плоче Комбинације 1 није економично са аспекта утрошка материјала у односу на степен повећања носивости плоча.

Ојачање плоча Комбинације 3, где је карбонска тканина постављена у прву и шесту слубницу у два слоја, управно оријентисана један на други, формирајући мрежу, показује много већи степен повећања носивости на смицање управно на раван плоче. Сила при којој је дошло до лома увећана је за 57.05%, док проценат побољшања напона смицања износи 44.75% у односу на контролни узорак (ЕК4). Код епрувета из ових плоча уочено је да је степен оштећења најмањи у односу на све испитане епрувете. До сабијања влакана дошло је у много мањој мери, и то преваходно у горњој зони, ближе месту деловања силе притиска. Попречна карбонска влакна постављена између два листа фурнира са подужно оријентисаним дрвним влакнима спрегнула су ове слојеве, чиме су спречила пластичне деформације, сабијање и гужвање влакана дрвета, али и смањила степен подужних пукотина које су се јављале између две ослабљене зоне.

Као и код претходних испитивања, уочава се да је увођење ојачања у виду карбонске тканине утицало на смањење варијабилности у резултатима ојачаних плоча у односу на контролне плоче Комбинације 4 и допринело уједначенијем понашању структуре. И у овом случају приметно је и да су епрувете из ојачаних плоча претрпеле много мање деформације при много већим силама у односу на епрувете из неојачане плоче.



Слика 138. Дијаграм вредности F_{max} и $f_{v,0,edge}$ за различите комбинације ојачања плоча

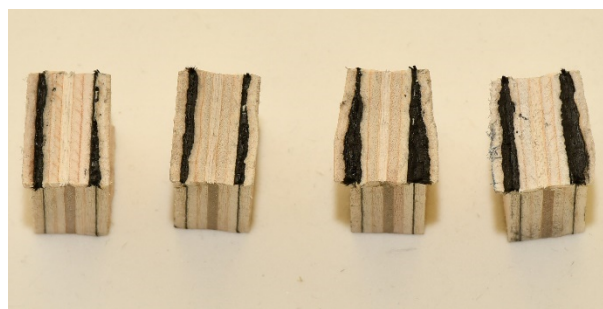
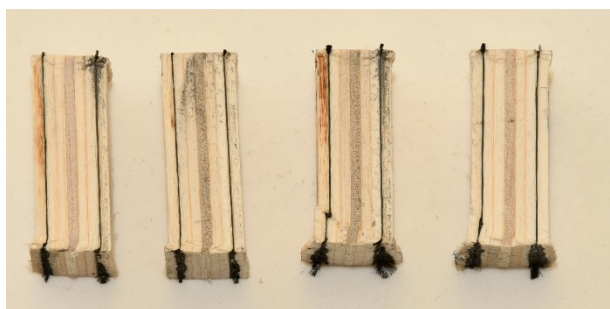
5.5.4 Притисна чврстоћа у равни плоче

5.5.4.1 Притисак паралелан влакнима спољних листова фурнира

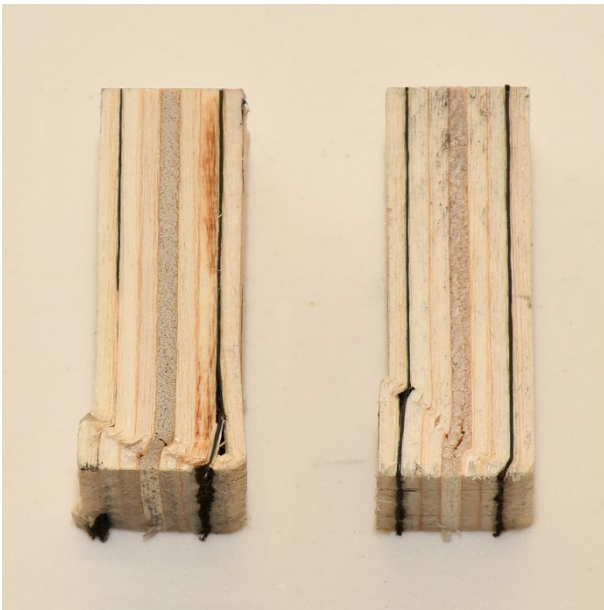
Притисна чврстоћа у правцу влакана и управно на влакна спољних фурнирских листова испитана је за плоче слепљене епоксидним адхезивом. Код свих ојачаних плоча постоје слични модели понашања епрувета под оптерећењем, као и веома слични модели лома. Код епрувета из плоча Комбинације 1, код које је ојачање у виду подужних влакана постављено у прву и шесту слубницу, појавила су се два модела лома. Код свих епрувета долази до сабијања и гужвања фурнирских и карбонских влакана, али код неких се то догађа у горњој зони, на месту деловања силе, док код неких то буде на месту фиксног цилиндра (доњег цилиндра). Типски облик оштећења приказан је на сл.139. Код четири епрувете долази до лома кроз фурнирски лист. Код епрувета: ЕК1ОР1-Р11 из плоче ЕК-1, ЕК1ОР2-Р11 из плоче ЕК-7 и ЕК1ОР2- Р13 из плоче ЕК-9, лом је уочљив у четвртом, попречно оријентисаном листу фурнира, на месту деловања силе. Код епрувете ЕК1ОР2-Р15 из плоче ЕК-1 лом се појављује по читавој дужини средишњег слоја, што је приказано на слици 140. Средња вредност максималне силе при којој је дошло до лома епрувета из плоча ЕК1 износи $F = 15020.22 \text{ N}$, са коефицијентом варијације 6.52%. Средња вредност напона при притиску у правцу влакана за плоче Комбинације 1 (ЕК1) износи $f_{c,0} = 52.93 \text{ N/mm}^2$, са коефицијентом варијације 6.95%. Вредности за сваку испитану епрувету приказане су у Табели 59.

Табела 59. Резултати испитивања притисне чврстоће у равни плоче паралелно влакнима за плоче ЕК1

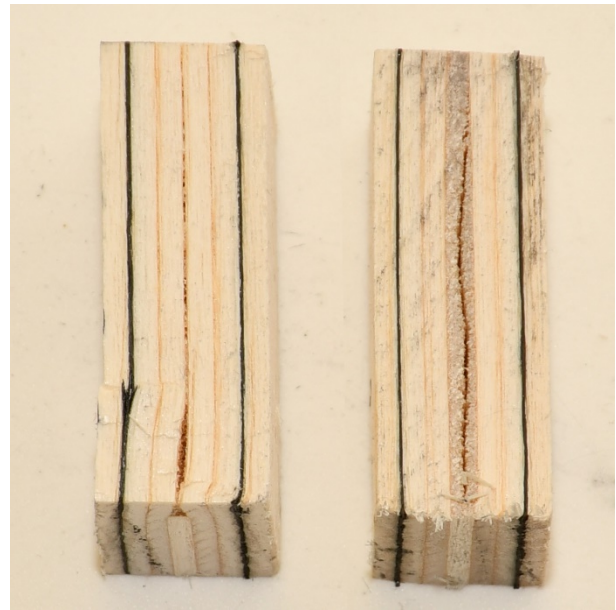
К1	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ							
	Ознака	Димензије епрувете		Затезна површина А mm ²	Макс. сила F' N	Калибр. узорка ΔF N	Стварна сила F=F'-ΔF N	Напон затезања f _{c,0} N/mm ²
		ширина b mm	дебљина t mm					
1	ЕК1ОР1-Р 1	20.51	13.72	281.40	12998	152	12846	45.651
2	ЕК1ОР1- Р 2	20.52	13.82	283.59	14911	152	14759	52.044
3	ЕК1ОР1- Р 3	20.27	13.82	280.13	14625	152	14473	51.665
4	ЕК1ОР1-Р 4	20.39	14.00	285.46	14919	152	14767	51.731
5	ЕК1ОР1- Р 5	20.40	13.79	281.32	15088	152	14936	53.093
6	ЕК1ОР1- Р 6	20.43	13.78	281.53	14067	152	13915	49.427
7	ЕК1ОР2- Р 1	20.53	13.75	282.29	15334	152	15182	53.782
8	ЕК1ОР2- Р 2	20.42	13.77	281.18	15414	152	15262	54.278
9	ЕК1ОР2- Р 3	20.35	13.64	277.57	14208	152	14056	50.639
10	ЕК1ОР2- Р 4	20.41	13.68	279.21	16902	152	16750	59.991
11	ЕК1ОР2- Р 5	20.34	13.78	280.29	15537	152	15385	54.891
12	ЕК1ОР2- Р 6	20.49	13.70	280.71	16862	152	16710	59.527
13	ЕК1ОР3- Р 1	20.42	14.42	294.46	14206	152	14054	47.729
14	ЕК1ОР3- Р 2	20.64	14.27	294.53	14845	152	14693	49.886
15	ЕК1ОР3- Р 3	20.35	14.31	291.21	15323	152	15171	52.097
16	ЕК1ОР3- Р 4	20.39	13.92	283.83	15883	152	15731	55.424
17	ЕК1ОР3- Р 5	20.51	13.97	286.52	16071	152	15919	55.559
18	ЕК1ОР3- Р 6	20.45	13.93	284.87	15907	152	15755	55.306
Средња вредност:							15020.22	52.93
Стандардна девијација:							979.16	3.68
Коефицијент варијације:							6.52%	6.95%
Повећање према ЕК4 (%):							52.30%	44.60%



Слика 139. Испитивање притисне чврстоће паралелно влакнима – карактеристичан лом епрувете из плоче ЕК1



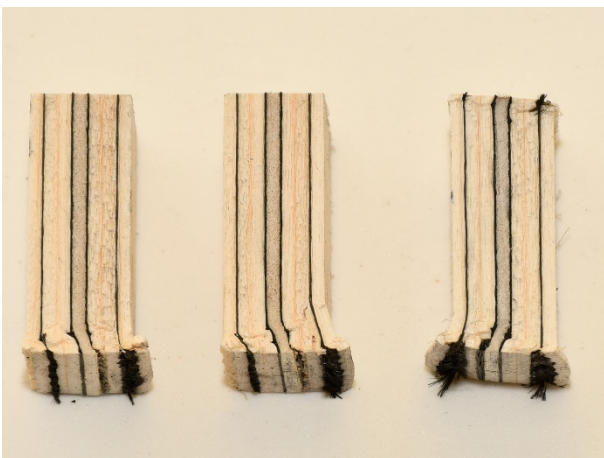
а)



б)

Слика 140. Испитивање притисне чврстоће паралелно влакнима: а) лом кроз средишњи слој; б) епрувета ЕК1ОР2-Р15 лом дужином средишњег фурнирског листа

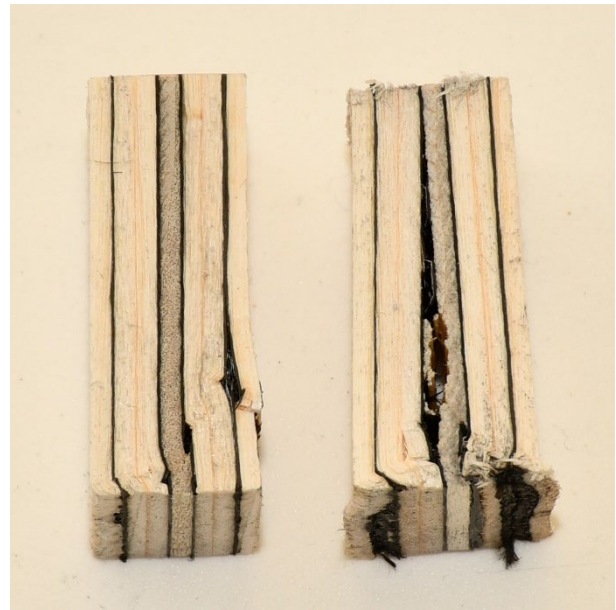
Код ојачаних плоча Комбинације 2 ($S1 \parallel 3 \perp 4 \perp 6 \parallel$), појављују се слични модели лома као код плоча Комбинације 1. Као што је претпостављено, додатна влакна у попречном правцу уведена у два нова слоја не утичу на повећање отпорности плоче на притисак у правцу влакана спољашњих листова фурнира. Поред карактеристичног пуцања епрувета који се манифестовао сабијањем и гужвањем фурнирских и карбонских влакна (сл.141) код четири епрувете је дошло до пукотина у средишњем, попречном листу фурнира. Наведене пукотине уочене су код епрувета ЕК2-5 (ЕК2ОР1- Р15), ЕК2-6 (ЕК2ОР1- Р16), ЕК2-9 (ЕК2ОР2- Р13) и ЕК2-16 (ЕК2ОР3- Р14), а приказане су на слици 142. Код узорака ЕК2-6 (ЕК2ОР1- Р16) и ЕК2-16 (ЕК2ОР3- Р14), лом је праћен деламинацијом између слојева FRP-дрво (сл.143). У Табели 60 приказани су резултати испитивања притисне чврстоће за различите комбинације ојачања. Средња вредност максималне силе при којој је дошло до лома узорака ЕК2 износи $F = 14442.50 \text{ N}$, са коефицијентом варијације 10.68%. Средња вредност напона при притиску у правцу влакана за плоче ЕК2 износи $f_{c,0} = 49.42 \text{ N/mm}^2$, са коефицијентом варијације 11.27%.



Слика 141. Испитивање притисне чврстоће паралелно влакнима – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК2



Слика 142. Лом епрувета из плоча ЕК2 по средњем фурнирском листу



Слика 143. Деламинација у слоју FRP – дрво при испитивању епрувета из плоча ЕК2

Табела 60. Резултати испитивања притисне чврстоће у равни плоче паралелно влакнима за плоче ЕК2

К2	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ							
	Ознака	Димензије епрувете		Затезна површина	Макс. сила	Калибр. узорка	Стварна сила	Напон затезања
		ширина b	дебљина t	A	F'	ΔF	$F=F'-\Delta F$	$f_{c,0}$
		mm	mm	mm ²	N	N	N	N/mm ²
1	ЕК2ОР1-Р 1	20.43	14.33	292.76	16911	152	16759	57.244
2	ЕК2ОР1- Р 2	20.43	14.44	295.01	16630	152	16478	55.856
3	ЕК2ОР1- Р 3	20.45	14.68	300.21	15460	152	15308	50.992
4	ЕК2ОР1-Р 4	20.42	14.42	294.46	14775	152	14623	49.661
5	ЕК2ОР1- Р 5	20.50	14.35	294.18	15018	152	14866	50.535
6	ЕК2ОР1- Р 6	20.47	14.30	292.72	15323	152	15171	51.828
7	ЕК2ОР2- Р 1	20.57	14.22	292.51	12491	152	12339	42.184
8	ЕК2ОР2- Р 2	20.39	14.23	290.15	12592	152	12440	42.874
9	ЕК2ОР2- Р 3	20.51	14.16	290.42	12687	152	12535	43.161
10	ЕК2ОР2- Р 4	20.40	14.60	297.84	14543	152	14391	48.318
11	ЕК2ОР2- Р 5	20.55	14.66	301.26	11894	152	11742	38.976
12	ЕК2ОР2- Р 6	20.42	14.75	301.20	13415	152	13263	44.035
13	ЕК2ОР3- Р 1	20.35	14.26	290.19	13664	152	13512	46.562
14	ЕК2ОР3- Р 2	20.33	14.08	286.25	13971	152	13819	48.277
15	ЕК2ОР3- Р 3	20.59	14.00	288.26	15148	152	14996	52.022
16	ЕК2ОР3- Р 4	20.50	13.96	286.18	15878	152	15726	54.951
17	ЕК2ОР3- Р 5	20.40	14.01	285.80	16711	152	16559	57.938
18	ЕК2ОР3- Р 6	20.41	13.99	285.54	15590	152	15438	54.067
Средња вредност:							14442.50	49.42
Стандардна девијација:							1542.34	5.57
Коефицијент варијације:							10.68%	11.27%
Повећање према ЕК4 (%):							46.45%	35.00%

У односу на претходне две комбинације, епрувете из плоча Комбинације 3 (S1||±6±||) имају исте моделе пуцања. Карактеристични модел пуцања епрувета се огледа у сабијању и гужвању фурнирских и карбонских влакна сл.144. За разлику од претходне две комбинације, код епрувета из плоча Комбинације 3 не долази до пуцања влакана ни у једном слоју фурнира. Код четири епрувете: ЕК3-1(ЕК3ОР1-Р||1), ЕК3-6 (ЕК3ОР1- Р||6), ЕК2-8 (ЕК3ОР2- Р||2) и ЕК3-10 (ЕК3ОР2- Р||4) уочљиви су трагови деламинације у слоју FRP-FRP, што је приказано на слици 145. Вредности чврстоће на притисак су као што је и очекивано сличне вредностима за епрувете из плоча Комбинације 1, с обзиром да попречна влакна не учествују у прихватању овог оптерећења. Средња вредност максималне силе при којој је дошло до лома епрувета из плоча ЕК3 износи $F = 14740.00 \text{ N}$, са коефицијентом варијације 4.53%. Средња вредност напона при притиску у правцу влакана спољашњих листова фурнира за плоче ЕК3 износи $f_{c,0} = 50.54 \text{ N/mm}^2$, са коефицијентом варијације 5.05%. Сви резултати испитаних епрувета приказани су у Табели 61.

Табела 61. Резултати испитивања притисне чврстоће у равни плоче паралелно влакнима за плоче ЕК3

КЗ	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ							
	Ознака	Димензије епрувете		Затезна површина	Макс. сила	Калибр. узорка	Стварна сила	Напон затезања
		ширина b mm	дебљина t mm	A mm ²	F' N	ΔF N	F=F'-ΔF N	$f_{c,0}$ N/mm ²
1	ЕК3ОР1-Р 1	20.50	14.04	287.82	14835	152	14683	51.015
2	ЕК3ОР1- Р 2	20.35	14.10	286.94	15193	152	15041	52.420
3	ЕК3ОР1- Р 3	20.50	14.01	287.21	15221	152	15069	52.468
4	ЕК3ОР1-Р 4	20.38	14.26	290.62	15683	152	15531	53.441
5	ЕК3ОР1- Р 5	20.47	14.18	290.26	16037	152	15885	54.726
6	ЕК3ОР1- Р 6	20.48	14.26	292.04	16029	152	15877	54.365
7	ЕК3ОР2- Р 1	20.48	14.29	292.04	14745	152	14593	49.968
8	ЕК3ОР2- Р 2	20.37	14.25	292.66	14913	152	14761	50.438
9	ЕК3ОР2- Р 3	20.36	14.36	290.27	15536	152	15384	52.998
10	ЕК3ОР2- Р 4	20.52	14.18	290.97	14270	152	14118	48.520
11	ЕК3ОР2- Р 5	20.44	14.26	291.47	15496	152	15344	52.643
12	ЕК3ОР2- Р 6	20.30	14.32	290.70	14241	152	14089	48.466
13	ЕК3ОР3- Р 1	20.37	14.45	294.35	13822	152	13670	46.442
14	ЕК3ОР3- Р 2	20.31	14.53	295.10	14341	152	14189	48.081
15	ЕК3ОР3- Р 3	20.33	14.43	293.36	14585	152	14433	49.199
16	ЕК3ОР3- Р 4	20.35	14.43	293.65	14648	152	14496	49.365
17	ЕК3ОР3- Р 5	20.34	14.44	293.71	14048	152	13896	47.312
18	ЕК3ОР3- Р 6	20.40	14.60	297.84	14413	152	14261	47.881
Средња вредност:							14740.00	50.54
Стандардна девијација:							668.09	2.55
Коефицијент варијације:							4.53%	5.05%
Повећање према ЕК4 (%):							49.46%	38.07%



Слика 144. Испитивање притисне чврстоће паралелно влакнима – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК3



Слика 145. Деламинација у слоју FRP-FRP при испитивању притисне чврстоће паралелно влакнима епрувета из плоча ЕК3

Код свих испитаних епрувета неојачаних - контролних плоча ЕК4, лом је настао у горњој зони пресека, на месту где се преко цилиндра сила преноси на узорак. При деловању силе долази до сабијања влакана фурнира, при чему долази до избочавања епрувета. Код свих епрувета долази до лома, који настаје већином у средишњем слоју фурнира, попречно оријентисаним, мада се код неколико епрувета лом догађа по трећем листу фурнира са подужно оријентисаним влакнима. Типски облици лома приказани су на сл. 146. У Табели 62 приказани су резултати испитивања притисне чврстоће паралелно влакнима спољашњих листова фурнира, за епрувета из плоча Комбинације 4. Средња вредност максималне силе при којој је дошло до лома епрувета из плоча ЕК4 износи $F = 9862.00 \text{ N}$, са коефицијентом варијације 6.81%. Средња вредност напона при притиску паралелно влакнима за плоче ЕК4 износи $f_{c,0} = 36.60 \text{ N/mm}^2$, са коефицијентом варијације 8.49 %.



а)



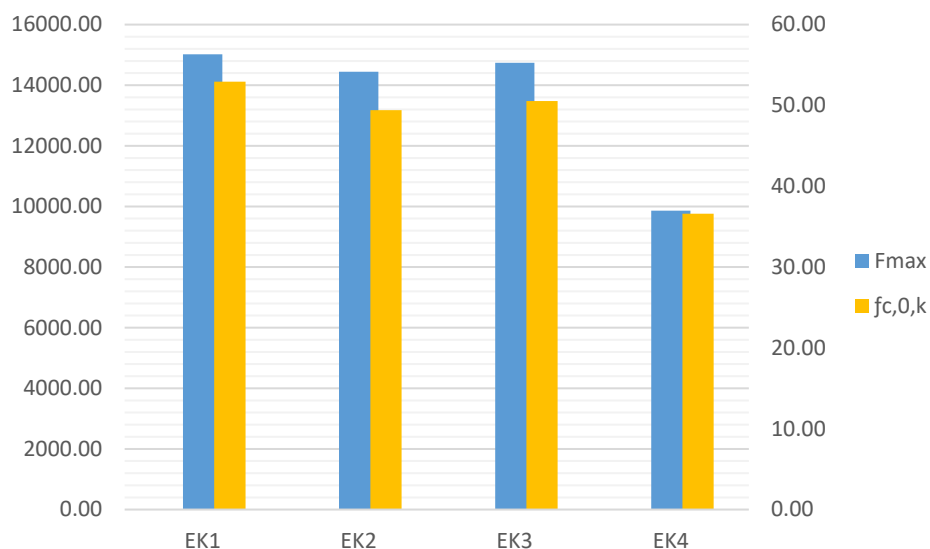
б)

Слика 146. Испитивање притисне чврстоће паралелно влакнима – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК4: а) епрувете са избочавањем, б) епрувете са избочавањем и пуцањем влакана средишњих слојева фурнира

Табела 62. Резултати испитивања притисне чврстоће у равни плоче паралелно влакнима за плоче ЕК4

К4	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ							
	Ознака	Димензије епрувете		Затезна површина	Макс. сила	Калибр. узорка	Стварна сила	Напон затезања
		ширина b	дебљина t	A	F'	ΔF	F=F'- ΔF	$f_{c,0}$
		mm	mm	mm ²	N	N	N	N/mm ²
1	ЕК4КР1-Р 1	20.38	13.04	265.76	10478	152	10326	38.86
2	ЕК4КР1- Р 2	20.46	13.18	269.66	10242	152	10090	37.42
3	ЕК4КР1- Р 3	20.35	13.06	265.77	10262	152	10110	38.04
4	ЕК4КР1-Р 4	20.38	13.20	269.02	10294	152	10142	37.70
5	ЕК4КР1- Р 5	20.12	13.24	266.39	10015	152	9863	37.02
6	ЕК4КР1- Р 6	20.12	13.34	268.40	9743	152	9591	35.73
7	ЕК4КР2- Р 1	20.42	13.65	278.73	8824	152	8672	31.11
8	ЕК4КР2- Р 2	20.39	13.65	278.32	9017	152	8865	31.85
9	ЕК4КР2- Р 3	20.36	13.51	275.06	9005	152	8853	32.19
10	ЕК4КР2- Р 4	20.28	13.63	276.42	9807	152	9655	34.93
11	ЕК4КР2- Р 5	20.57	13.50	277.70	9783	152	9631	34.68
12	ЕК4КР2- Р 6	20.45	13.31	272.19	9690	152	9538	35.04
13	ЕК4КР3- Р 1	20.58	12.85	264.45	11395	152	11243	42.51
14	ЕК4КР3- Р 2	20.44	12.90	263.68	10931	152	10779	40.88
15	ЕК4КР3- Р 3	20.27	12.99	263.31	10561	152	10409	39.53
16	ЕК4КР3- Р 4	20.41	13.06	266.55	10255	152	10103	37.90
17	ЕК4КР3- Р 5	20.41	13.00	265.33	9936	152	9784	36.87
Средња вредност:							9862.00	36.60
Стандардна девијација:							671.82	3.11
Коефицијент варијације:							6.81%	8.49%

Унапређење ове механичке карактеристике постигнуто је постављањем тканине од карбонских влакана у подужном правцу, односно правцу дејства силе. Положај влакана карбонске тканине у подужном правцу је у свим епруветама у једном слоју, те се о утицају њиховог положаја у конструктивном склопу не може говорити. С обзиром да карбонске тканине са попречно постављеним влакнима нису утицала на носивост целокупног система, њихово постојање у овом случају може се занемарити. Највеће повећање притисне чврстоће у односу на контролни узорак бележи се код епрувета из ојачаних плоча ЕК1, и износи 44.60% у односу на контролни узорак. На слици 147 дат је обједињени графички приказ максималне силе и притисне чврстоће за све комбинације плоча.



Слика 147. Дијаграм вредности F_{max} и $f_{v,0,edge}$ за различите комбинације ојачања

5.5.4.2 Притисак управан на влакна спољних листова фурнира

При испитивању чврстоће на притисак у равни плоче управно на правац спољашњих листова фурнира, код свих епрувета се јављају исти модели лома. Приликом достизања критичне силе епрувете се извијају, те у притиснутој зони долази до набијања влакана спољашњих фурнирских листова, при чему долази и до пуцања самих листова, а које је врло често праћено деламинацијом од слоја карбонске тканине чија су влакна такође попречно оријентисана. У затегнутој зони долази до појаве попречних пукотина кроз два или три фурнирска листа (сл.148). Осим тога, на великом броју епрувета уочава се подужни лом кроз трећи и пети лист фурнира, у коме су влакна попречно оријентисана. С обзиром да су влакна у овом случају попречно оријентисана на правац дејства силе, она немају велики утицај на сам резултате, односно на повећање носивости плоча при деловању притиска управно на влакна фурнира. Резултати испитивања свих епрувета приказани су у Табели 63. Средња вредност максималне силе при којој је дошло до лома епрувета из плоча ЕК1 износи $F = 4288.44 \text{ N}$, са коефицијентом варијације 6.34%. Средња вредност напона при деловању притиска управно на влакна фурнира за плоче Комбинације ЕК1 износи $f_{c,90,edge} = 15.32 \text{ N/mm}^2$, са коефицијентом варијације 7.41%.



Слика 148. Испитивање притисне чврстоће управно на влакна – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК1

Табела 63. Резултати испитивања притисне чврстоће у равни плоче управно на влакна за плоче ЕК1

K1	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ							
	Ознака	Димензије епрувете		Затезна површина A	Макс. сила F'	Калибр. узорка ΔF	Стварна сила F=F'-ΔF	Напон затезања $f_{c,90,edge}$ N/mm ²
		ширина b mm	дебљина t mm					
1	EK1OP1- P⊥1	20.47	14.16	289.86	4263	152	4111	14.183
2	EK1OP1- P⊥2	20.41	13.98	285.33	4302	152	4150	14.544
3	EK1OP1- P⊥3	20.30	13.98	283.79	4142	152	3990	14.059
4	EK1OP1- P⊥4	20.26	13.95	282.63	4714	152	4562	16.141
5	EK1OP1- P⊥5	20.31	13.94	283.12	4321	152	4169	14.725
6	EK1OP1- P⊥6	20.38	13.88	282.87	4219	152	4067	14.377
7	EK1OP2- P⊥1	20.24	13.78	278.91	4615	152	4463	16.002
8	EK1OP2- P⊥2	20.30	13.81	280.34	5067	152	4915	17.532
9	EK1OP2- P⊥3	20.50	13.68	280.44	4787	152	4635	16.528
10	EK1OP2- P⊥4	20.32	13.71	278.59	4486	152	4334	15.557
11	EK1OP2- P⊥5	20.33	13.68	278.11	4372	152	4220	15.174
12	EK1OP2- P⊥6	20.35	13.76	275.00	4341	152	4189	15.233
13	EK1OP3- P⊥1	20.31	13.54	275.00	4408	152	4256	15.477
14	EK1OP3- P⊥2	20.39	13.60	277.30	3951	152	3799	13.700
15	EK1OP3- P⊥3	20.38	13.68	278.80	4142	152	3990	14.311
16	EK1OP3- P⊥4	20.45	13.57	277.51	4504	152	4352	15.683
17	EK1OP3- P⊥5	20.44	13.52	276.35	4676	152	4524	16.371
18	EK1OP3- P⊥6	20.43	13.46	274.99	4618	152	4466	16.241
Средња вредност:							4288.44	15.32
Стандардна девијација:							272.07	1.03
Коефицијент варијације:							6.34%	6.72%
Повећање према ЕК4 (%):							12.50%	7.41%

Плоче Комбинације 2 показују знатно боље резултате у односу на плоче Комбинације 1, а то је захваљујући карбонским влакнима у средњим сљубницама, постављеним у правцу дејства силе, односно попречно у односу на спољашње листове фурнира. При испитивању је утврђено да су епрувете врло постојане и да све имају идентичне облике лома. Оштећење настаје на месту контакта епрувете са притискивачем, тако што долази до сабијања влакана а потом у знатно мањој мери и избочавања епрувета. Код неких епрувета дошло је и до деламинације у слоју FRP-дрво, и то у веома малом проценту. Типски облици лома приказани су на слици 149. Средња вредност максималне силе при којој је дошло до лома епрувета из плоча ЕК2 износи $F = 8181.67 N$, са коефицијентом варијације 7.06%. Средња вредност напона при деловању притиска управно на влакна фурнира за плоче ЕК1 износи $f_{c,90,edge} = 28.28 N/mm^2$, са коефицијентом варијације 7.96%. Вредности максималне силе и напона за све испитане епрувете приказане су у Табели 64.



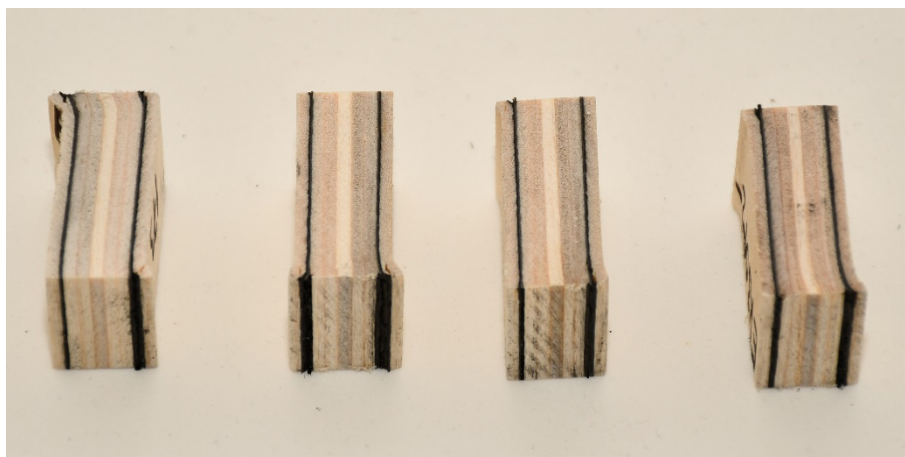
Слика 149. Испитивање притисне чврстоће управно на влакна – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК2

Табела 64. Резултати испитивања притисне чврстоће у равни плоче управно на влакна за плоче ЕК2

К2	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ							
	Ознака	Димензије епрувета		Затезна површина	Макс. сила	Калибр. узорка	Стварна сила	Напон затезања
		ширина	дебљина	A	F'	ΔF	$F=F'-\Delta F$	$f_{c,90,edge}$
		b	t					
		mm	mm	mm ²	N	N	N	N/mm ²
1	ЕК2ОР1-р⊥1	20.39	14.22	289.95	8973	152	8821	30.423
2	ЕК2ОР1- р⊥2	19.44	14.19	275.85	8462	152	8310	30.125
3	ЕК2ОР1- р⊥3	20.40	14.13	288.25	8608	152	8456	29.335
4	ЕК2ОР1-р⊥4	20.36	14.27	290.54	7904	152	7752	26.682
5	ЕК2ОР1- р⊥5	20.30	14.30	290.29	7790	152	7638	26.312
6	ЕК2ОР1- р⊥6	20.43	14.43	294.80	7562	152	7410	25.135
7	ЕК2ОР2- р⊥1	20.23	14.65	296.37	7613	152	7461	25.175
8	ЕК2ОР2- р⊥2	20.29	14.68	297.86	8313	152	8161	27.399
9	ЕК2ОР2- р⊥3	20.28	14.52	294.47	7706	152	7554	25.653
10	ЕК2ОР2- р⊥4	20.39	14.40	293.62	8429	152	8277	28.190
11	ЕК2ОР2- р⊥5	20.37	14.55	296.38	9146	152	8994	30.346
12	ЕК2ОР2- р⊥6	20.36	14.31	291.35	8707	152	8555	29.363
13	ЕК2ОР3- р⊥1	20.39	13.97	284.85	8313	152	8161	28.650
14	ЕК2ОР3- р⊥2	20.39	14.01	285.66	8919	152	8767	30.690
15	ЕК2ОР3- р⊥3	20.09	13.99	281.06	9574	152	9422	33.523
16	ЕК2ОР3- р⊥4	20.51	14.01	287.35	8071	152	7919	27.559
17	ЕК2ОР3- р⊥5	20.35	14.03	285.51	8225	152	8073	28.276
18	ЕК2ОР3- р⊥6	20.28	14.14	286.76	7691	152	7539	26.290
Средња вредност:							8181.67	28.28
Стандардна девијација:							577.70	2.25
Коефицијент варијације:							7.06%	7.96%
Повећање према ЕК4 (%):							114.63%	98.26%

Испитане епрувете из плоча Комбинације 3 показују сличне резултате и идентичне облике лома (сл.150), као претходно описане епрувете из плоча Комбинације 2, те неће бити додатно разматране. Средња вредност максималне силе при којој је дошло до лома епрувета из плоча ЕК2 износи $F = 7784.06 N$, са коефицијентом варијације 6.59%. Средња вредност

напона попречног притиска за епрувете из плоча ЕКЗ износи $f_{c,90,edge} = 27.13 \text{ N/mm}^2$, са коефицијентом варијације 7.89%. Вредности максималне силе и напона за све испитане епрувете приказане су у Табели 65.



Слика 150. Испитивање притисне чврстоће управно на влакна – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕКЗ

Табела 65. Резултати испитивања притисне чврстоће у равни плоче управно на влакна за плоче ЕКЗ

КЗ	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ							
	Ознака	Димензије епрувете ширина b mm	дебљина t mm	Затезна површина A mm ²	Макс. сила F' N	Калибр. узорка ΔF N	Стварна сила F=F'-ΔF N	Напон затезања $f_{c,90,edge}$ N/mm ²
1	ЕКЗОР1-Р⊥1	20.32	13.92	282.85	8357	152	8205	29.008
2	ЕКЗОР1- Р⊥2	20.34	13.91	282.93	8424	152	8272	29.237
3	ЕКЗОР1- Р⊥3	20.34	13.93	283.34	8670	152	8518	30.063
4	ЕКЗОР1-Р⊥4	20.32	14.04	285.29	7629	152	7477	26.208
5	ЕКЗОР1- Р⊥5	20.47	13.90	284.53	7894	152	7742	27.209
6	ЕКЗОР1- Р⊥6	20.32	13.90	282.45	8739	152	8587	30.402
7	ЕКЗОР2- Р⊥2	20.49	14.11	289.11	7304	152	7152	24.738
8	ЕКЗОР2- Р⊥3	20.39	13.95	284.44	7468	152	7316	25.721
9	ЕКЗОР2- Р⊥4	20.29	13.82	280.41	8548	152	8396	29.942
10	ЕКЗОР2- Р⊥5	20.70	13.73	284.21	8088	152	7936	27.923
11	ЕКЗОР2- Р⊥6	20.28	13.97	283.31	7709	152	7557	26.674
12	ЕКЗОР3- Р⊥1	20.38	14.50	295.51	8044	152	7892	26.706
13	ЕКЗОР3- Р⊥2	20.42	14.59	297.93	7123	152	6971	23.398
14	ЕКЗОР3- Р⊥4	20.40	14.30	291.72	7849	152	7697	26.385
15	ЕКЗОР3- Р⊥5	20.33	14.41	292.96	7225	152	7073	24.144
16	ЕКЗОР3- Р⊥6	20.41	14.40	293.90	7906	152	7754	26.383
Средња вредност:							7784.06	27.13
Стандардна девијација:							513.11	2.14
Коефицијент варијације:							6.59%	7.89%
Повећање према ЕК4 (%):							104.20%	90.19%

Епрувете из контролних, неојачаних плоча показују уједначене облике лома и сличне епруветама из плоча Комбинације 1. Приликом притиска долази до извијања епрувета, лом настаје само у затегнутој зони и то као попречни лом, кроз три листа фурнира (сл.151). Средња

вредност максималне остварене силе при којој је дошло до лома епрувета из плоча ЕК4 износи $F = 3641.59 \text{ N}$, са коефицијентом варијације 8.28%. Средња вредност напона попречног притиска за узорке из плоча ЕК4 износи $f_{c,90,edge} = 13.46 \text{ N/mm}^2$, са коефицијентом варијације 9.30%. Вредности максималне силе и напона за све испитане епрувете приказане су у Табели 66.

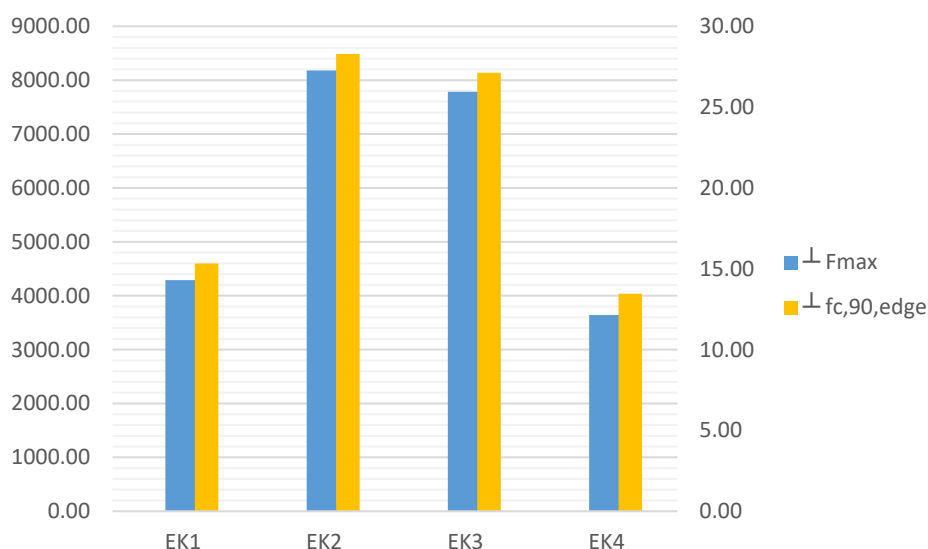


Слика 151. Испитивање притисне чврстоће управно на влакна – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК4

Табела 66. Резултати испитивања притисне чврстоће у равни плоче управно на влакна за плоче ЕК4

К4	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ							
	Ознака	Димензије епрувете		Затезна површина	Макс. сила	Калибр. узорка	Стварна сила	Напон затезања
		ширина b	дебљина t	A	F'	ΔF	$F=F'-\Delta F$	$f_{c,90,edge}$
		mm	mm	mm ²	N	N	N	N/mm ²
1	ЕК4КР1-Р \perp 1	20.42	13.42	274.04	3466	152	3314	12.093
2	ЕК4КР1- Р \perp 2	20.40	13.65	278.46	3365	152	3213	11.538
3	ЕК4КР1- Р \perp 3	20.35	13.50	274.73	3211	152	3059	11.135
4	ЕК4КР1-Р \perp 4	20.42	13.44	274.44	3721	152	3569	13.004
5	ЕК4КР1- Р \perp 5	20.40	13.55	276.42	3297	152	3145	11.378
6	ЕК4КР1- Р \perp 6	20.35	13.29	270.45	3847	152	3695	13.662
7	ЕК4КР2- Р \perp 1	20.33	13.10	266.32	4170	152	4018	15.087
8	ЕК4КР2- Р \perp 2	20.33	13.12	266.73	3832	152	3680	13.797
9	ЕК4КР2- Р \perp 3	20.22	13.21	267.11	3667	152	3515	13.160
10	ЕК4КР2- Р \perp 4	20.34	13.00	264.42	3716	152	3564	13.479
11	ЕК4КР2- Р \perp 5	20.24	12.98	262.72	3676	152	3524	13.414
12	ЕК4КР2- Р \perp 6	20.32	13.09	265.99	3917	152	3765	14.155
13	ЕК4КР3- Р \perp 1	20.36	13.05	265.70	3859	152	3707	13.952
14	ЕК4КР3- Р \perp 2	20.40	13.26	270.50	4098	152	3946	14.588
15	ЕК4КР3- Р \perp 3	20.38	13.29	270.85	4007	152	3855	14.233
16	ЕК4КР3- Р \perp 4	20.36	13.12	267.12	3803	152	3651	13.668
17	ЕК4КР3- Р \perp 5	20.51	13.02	267.04	4341	152	4189	15.687
18	ЕК4КР3- Р \perp 6	20.35	13.13	267.20	3964	152	3812	14.267
Средња вредност:							3641.59	13.46
Стандардна девијација:							301.44	1.25
Коефицијент варијације:							8.28%	9.30%

На слици 152 представљена је упоредна анализа вредности максималне силе и напона при деловању притиска управно на влакна фурнира за различите комбинације ојачања и за контролну, неојачану плочу. Као што је претходно уочено, плоче Комбинације 1 немају значајно повећање притисне чврстоће, због попречно оријентисаних карбонских влакана у односу на правац дејства силе, која не учествују у прихватању оптерећења. Плоче Комбинације 3 и 4 оствариле су повећање притисне чврстоће за 98.26% (плоче ЕК2) и 90.19% (плоче ЕК3) у односу на неојачане плоче. Позиција карбонских влакана оријентисаних у правцу дејства силе, односно попречно на листове фурнире, није значајно утицала на повећање притисне чврстоће у равни плоче. Нешто боље резултате показале су плоче код којих је ојачање карбонским влакнима у правцу дејства силе притиска постављено ближе средишњем слоју плоче.



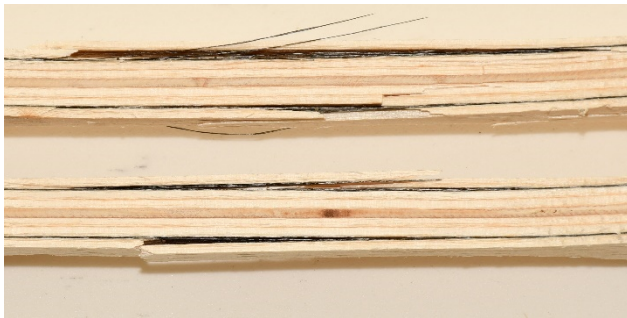
Слика 152. Дијаграм вредности F_{max} и $f_{t,0,k}$ за различите комбинације ојачања

5.5.5 Затезна чврстоћа у равни плоче паралелно влакнима спољашњих листова фурнира

Испитивање затезне чврстоће у равни плоче паралелно влакнима спољашњих листова фурнира показало је изузетне резултате за плоче ојачане карбонским влакнима. Испитане су само плоче слепљене епоксидним адхезивом. Код свих епрувета из плоча Комбинације 1, које су ојачане карбонским влакнима подужно постављеним у прву и шесту слубницу, дошло је до лома затезањем. Типски облици лома приказани су на сликама 153 и 154. Лом се догодио на ослабљеном месту пресека, у предвиђеној зони лома. Код епрувета ЕК1-1 (ЕК1ОР1-З1), ЕК1-3 (ЕК1ОР1-З3), ЕК1-4 (ЕК1ОР2-З1) до лома је дошло на месту преласка у кривину (сл. 155), што може бити последица концентрисаних напона у фурниру приликом моделовања епрувета. Приликом лома долази до напрснућа епрувета кроз све слојеве фурнира, али не долази до прекида карбонских влакана, при чему епрувете остају компактне. При лому долази и до деламинације између слојева дрво-FRP-дрво, а спољашњи листови фурнира одвајају од остатка епрувете. У Табели 67 приказани су резултати испитивања затезне чврстоће за епрувете из плоче Комбинације 1. Средња вредност максималне силе при којој је дошло до лома епрувета из плоча ЕК1 износи $F = 9043.40 \text{ N}$, са коефицијентом варијације 14.80%. Средња вредност напона затезања за плоче ЕК1 износи $f_{t,0,k} = 118.68 \text{ N/mm}^2$, са коефицијентом варијације 15.94%.



Слика 153. Испитивање затезне чврстоће паралелно влакнима – карактеристичан лом епрувета из плоче ЕК1



Слика 154. Детаљ типског лома

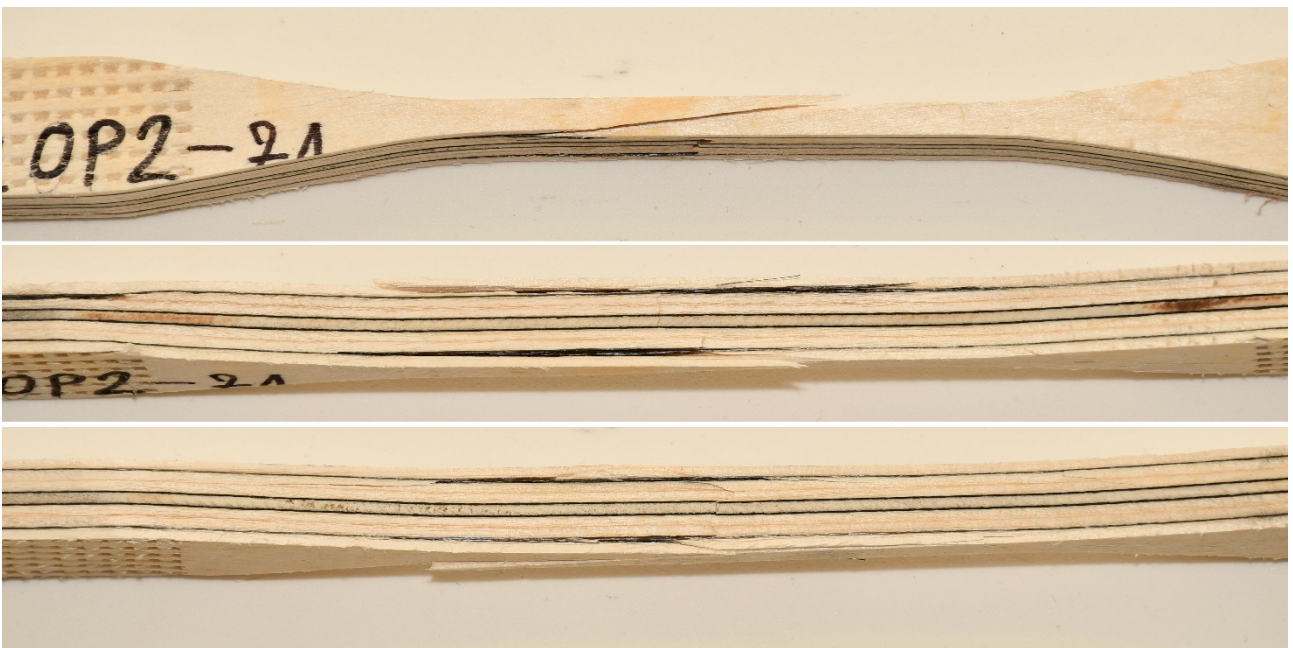


Слика 155. Детаљ лома у радијусу закривљена

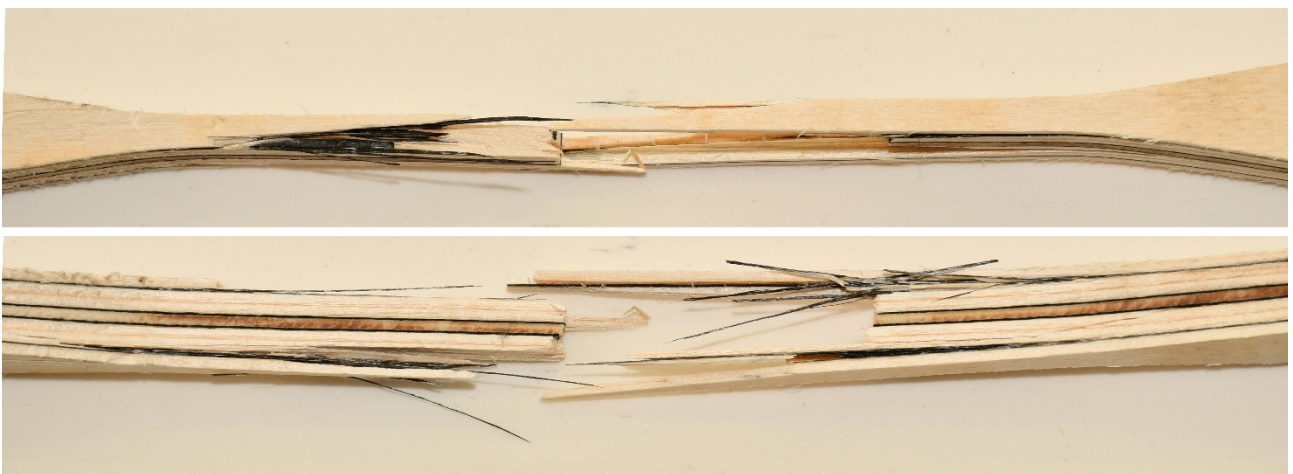
Табела 67. Резултати испитивања затезне чврстоће у равни плоче ЕК1

К1	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ							
	Ознака	Димензије епрувете		Затезна	Макс.	Калибр.	Стварна	Напон
		ширина	дебљина	површина	сила	узорка	сила	затезања
		b	t	A	F'	ΔF	F=F'-ΔF	$f_{t,0,k}$
		mm	mm	mm ²	N	N	N	N/mm ²
1	EK1OP1-Z1	5.57	13.86	77.20	8333	179	8154	105.62
2	EK1OP1-Z2	5.72	13.34	76.30	9760	179	9581	125.56
3	EK1OP1-Z3	5.70	13.38	76.27	7897	179	7718	101.20
4	EK1OP2-Z1	5.87	13.40	78.66	7193	179	7014	89.17
5	EK1OP2-Z3	5.65	13.64	77.07	11321	179	11142	144.58
6	EK1OP2-Z4	5.00	13.65	68.25	8912	179	8733	127.96
7	EK1OP3-Z1	5.24	13.72	71.89	9632	179	9453	131.49
8	EK1OP3-Z2	6.04	13.66	82.51	8146	179	7967	96.56
9	EK1OP3-Z3	5.80	13.88	80.50	10449	179	10270	127.57
10	EK1OP3-Z4	5.41	14.03	75.90	10581	179	10402	137.04
Средња вредност:							9043.40	118.68
Стандардна девијација:							1338.839	18.92
Коефицијент варијације:							14.80%	15.94%
Повећање према ЕК4 (%):							92.22%	106.82%

Плоче Комбинације 2, са додатним слојевима ојачања карбонским влакнима попречно оријентисаним постављеним у трећу и четврту слубницу показују нешто веће резултате по питању максималне силе (око 3%), али лошије резултате по питању напона затезања (око 5%) у односу на плоче Комбинације 1. С тим у вези не може се сматрати да су додатна карбонска влакна утицала на повећање носивости плоче на затезање. Лом скоро свих епрувета догодио се у предвиђеној зони лома и то позициониран ка средини епрувете (сл.156). Код једне епрувете ЕК2-12 (ЕК2ОР3-Z4) лом се појавио на месту радијуса закривљења епрувете, односно преласка са уског на широки део епрувете. Код пет од дванаест епрувета дошло је до потпуног лома, односно епрувете су на месту лома растављене на два дела (сл.157). Код ових епрувета дошло је и до кидања подужно оријентисане карбонске тканине. Као и код плоча Комбинације 1, после лома дошло је до деламинације подужно оријентисане карбонске тканине од дрвета и то око места лома. Код карбонске тканине попречно оријентисане није дошло до деламинације, већ су све епрувете на том месту остале компактне. У Табели 68 приказани су резултати испитивања затезне чврстоће за епрувете из плоча Комбинације 2. Средња вредност максималне силе при којој је дошло до лома епрувете из плоча ЕК2 износи $F = 9317.83 N$, са коефицијентом варијације 21.58%. Средња вредност напона затезања за плоче ЕК1 износи $f_{t,0,k} = 112.65/mm^2$, са коефицијентом варијације 22.35%.



Слика 156. Испитивање затезне чврстоће паралелно влакнима – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК2



Слика 157. Испитивање затезне чврстоће паралелно влакнима – апсолутни лом епрувета из плоча ЕК2

Табела 68. Резултати испитивања затезне чврстоће у равни плоче ЕК2

К2	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ							
	Ознака	Димензије епрувете		Затезна	Макс.	Калибр.	Стварна	Напон
		ширина	дебљина	површина	сила	узорка	сила	затезања
		b	t	A	F'	ΔF	F=F'-ΔF	$f_{t,0,k}$
		mm	mm	mm ²	N	N	N	N/mm ²
1	EK2OP1-Z1	5.74	14.37	82.48	13127	179	12948	156.98
2	EK2OP1-Z2	5.52	14.70	81.14	11528	179	11349	139.86
3	EK2OP1-Z3	5.52	14.61	80.65	9422	179	9243	114.61
4	EK2OP1-Z4	5.74	14.40	82.66	12482	179	12303	148.85
5	EK2OP2-Z1	5.68	14.11	80.14	7149	179	6970	86.97
6	EK2OP2-Z2	5.68	14.29	81.17	9190	179	9011	111.02
7	EK2OP1-Z3	6.26	14.07	88.08	7084	179	6905	78.40
8	EK2OP2-Z4	5.75	13.93	80.10	9441	179	9262	115.63
9	EK2OP3-Z1	5.70	13.77	78.49	8126	179	7947	101.25
10	EK2OP3-Z2	6.46	13.78	89.02	9143	179	8964	100.70
11	EK2OP3-Z3	6.18	13.83	85.47	7342	179	7163	83.81
12	EK2OP3-Z4	6.19	13.85	85.73	9928	179	9749	113.72
Средња вредност:							9317.83	112.65
Стандардна девијација:							2011.00	25.17
Коефицијент варијације:							21.58%	22.35%
Повећање према ЕК4 (%):							98.06%	96.32%

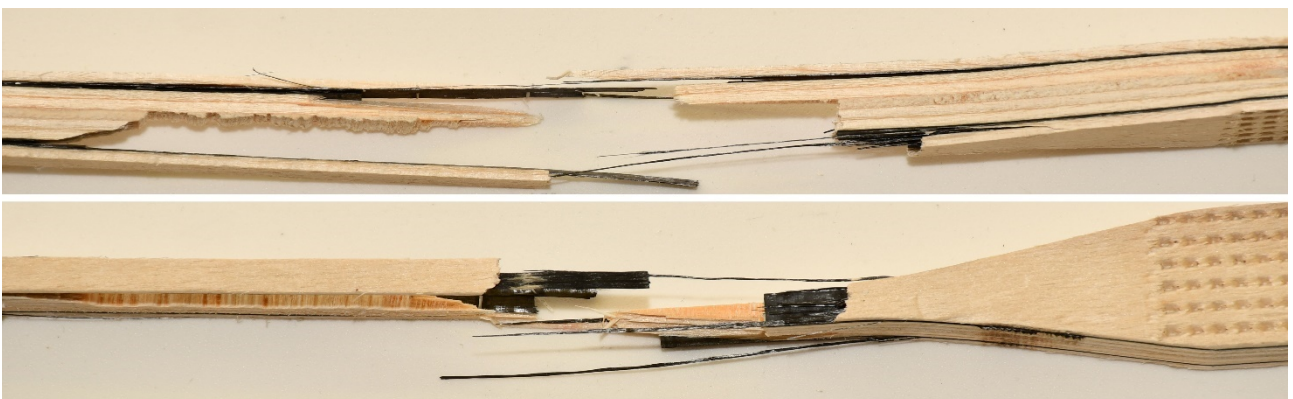
Плоче Комбинације 3 показују много уједначеније понашање и знатно смањену варијабилност резултата у односу на плоче Комбинације 1 и 2. Осим тога, свих епрувета из плоча Комбинације 3 ојачаних по принципу мреже у првој и шестој слубници (S1||±6±||) лом се појавио на средини епрувете, на месту ослабљења, предвиђеном за лом (сл. 158). Код свих епрувета дошло је до прелома кроз све слојеве фурнира, али су оне у већини случајева остале компактне захваљујући карбонским влакнима која су остала у континуитету. Код ових епрувета након лома у слоју дрвета дошло је до деламинације карбонске тканине у зони лома, тако да је код свих епрувета карбонска тканина попречно оријентисана остала у адхезији са слојем дрвета, док је карбонска тканина код које су влакна подужно оријентисана доживела деламинацију како у слоју FRP-FRP, тако и у слоју FRP-дрво, што је и приказано на сликама 158 и 159. Код две епрувете ЕК3-2 (ЕК3OP1-Z2) И ЕК3-3 (ЕК3OP1-Z3) дошло је до потпуног лома, односно до пуцања слоја FRP-а са подужно оријентисаним влакнима (сл.160). У Табели 69 приказани су резултати испитивања затезне чврстоће за епрувете из плоча Комбинације 3. Средња вредност максималне силе при којој је дошло до лома епрувета из плоча ЕК3 износи $F = 9763.00 \text{ N}$, са коефицијентом варијације 13.21%. Средња вредност напона затезања за епрувете из плоча ЕК3 износи $f_{t,0,k} = 112.83/\text{mm}^2$, са коефицијентом варијације 11.94%. С обзиром на уједначене резултате са плочама претходних комбинација ојачања, закључује се да попречно оријентисана карбонска влакна, као што је и очекивано нису допринела повећању носивости плоча на затезање, али су утицала на уравнотеженије понашање структуре и умањена оштећења при лому.



Слика 158. Испитивање затезне чврстоће паралелно влакнима – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК3



Слика 159. Деламинација у слоју FRP-FRP и FRP - дрво

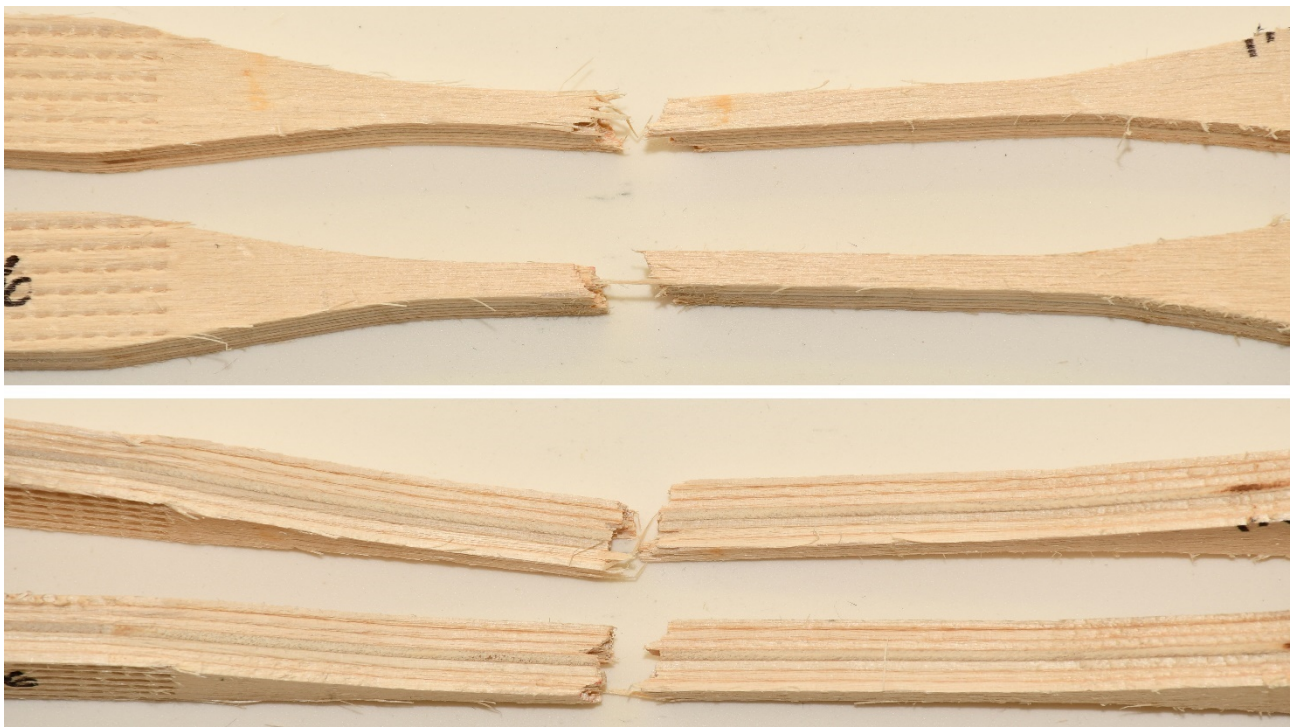


Слика 160. Испитивање затезне чврстоће паралелно влакнима – епрувете из плоча ЕК3 са апсолутним ломом

Табела 69. Резултати испитивања затезне чврстоће у равни плоче ЕК3

КЗ	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ							
	Ознака	Димензије епрувете		Затезна	Макс.	Калибр.	Стварна	Напон
		ширина	дебљина	површина	сила	узорка	сила	затезања
		b	t	A	F'	ΔF	F=F'- ΔF	$f_{t,0,k}$
		mm	mm	mm ²	N	N	N	N/mm ²
1	ЕКЗОР1-Z1	6.10	14.05	85.71	10904	179	10725	125.14
2	ЕКЗОР1-Z2	6.22	13.96	86.83	11587	179	11408	131.38
3	ЕКЗОР1-Z3	6.36	13.79	87.70	11868	179	11689	133.28
4	ЕКЗОР1-Z4	6.34	13.92	88.25	11234	179	11055	125.27
5	ЕКЗОР2-Z1	6.13	13.81	84.66	9629	179	9450	111.63
6	ЕКЗОР2-Z2	5.95	13.92	82.82	8749	179	8570	103.47
7	ЕКЗОР1-Z3	6.15	13.64	83.89	7873	179	7694	91.72
8	ЕКЗОР2-Z4	6.42	13.58	87.18	9214	179	9035	103.63
9	ЕКЗОР3-Z1	6.39	14.05	89.78	10100	179	9921	110.50
10	ЕКЗОР3-Z2	5.92	14.04	83.12	8331	179	8152	98.08
11	ЕКЗОР3-Z3	6.33	14.14	89.51	9498	179	9319	104.12
12	ЕКЗОР3-Z4	6.25	14.01	87.56	10317	179	10138	115.78
Средња вредност:							9763	112.83
Стандардна девијација:							1289.828	13.47
Коефицијент варијације:							13.21%	11.94%
Повећање према ЕК4 (%):							107.52%	96.64%

Апсолутно код свих испитаних епрувета из неојачаних, контролних плоча Комбинације 4, дошло је до кртог лома који је настао затезањем у ослабљеној зони пресека. Тип лома је веома карактеристичан за лом у дрвету, настао пресецањем подужних влакана. Типски облик лома приказан је на слици 161. У Табели 70 приказани су резултати испитивања затезне чврстоће за епрувете из плоча Комбинације 4. Средња вредност максималне силе при којој је дошло до лома епрувета из плоча ЕК4 износи $F = 4704.67 N$, са коефицијентом варијације 14.70%. Средња вредност напона на затезање за плоче ЕК3 износи $f_{t,0,k} = 57.38 N/mm^2$, са коефицијентом варијације 13.69%.



Слика 161. Испитивање затезне чврстоће паралелно влакнима – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК4

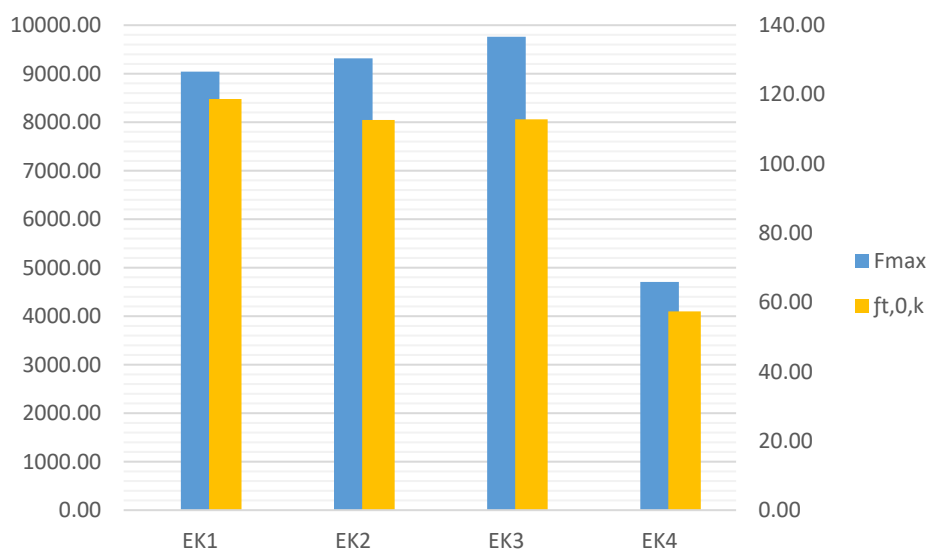
Табела 70. Резултати испитивања затезне чврстоће у равни плоче ЕК4

К4	ЕПОКСИДНИ АДХЕЗИВ							
	Ознака	Димензије епрувете		Затезна	Макс.	Калибр.	Стварна	Напон
		ширина	дебљина	површина	сила	узорка	сила	затезања
		b	t	A	F'	ΔF	F=F'-ΔF	$f_{t,0,k}$
		mm	mm	mm ²	N	N	N	N/mm ²
1	EK4OP1-Z1	6.48	13.05	84.56	5650	179	5471	64.70
2	EK4OP1-Z2	6.10	12.97	79.12	3866	179	3687	46.60
3	EK4OP1-Z3	6.27	12.98	81.38	5412	179	5233	64.30
4	EK4OP1-Z4	6.42	12.95	83.14	6002	179	5823	70.04
5	EK4OP2-Z1	6.00	13.21	79.26	4962	179	4783	60.35
6	EK4OP2-Z2	6.27	13.18	82.64	5194	179	5015	60.69
7	EK4OP1-Z3	6.10	13.28	81.01	5051	179	4872	60.14
8	EK4OP2-Z4	6.08	13.25	80.56	3851	179	3672	45.58
9	EK4OP3-Z1	6.23	13.38	83.36	4307	179	4128	49.52
10	EK4OP3-Z2	6.21	13.39	83.15	5243	179	5064	60.90
11	EK4OP3-Z3	6.18	13.12	81.08	4214	179	4035	49.76
12	EK4OP3-Z4	6.41	13.02	83.46	4852	179	4673	55.99
Средња вредност:							4704.67	57.38
Стандардна девијација:							691.55	7.85
Коефицијент варијације:							14.70%	13.69%

Све ојачане плоче показују врло сличан капацитет носивости на затезање, као и сличне облике лома. Облик лома је нешто мање физички изражен код ојачаних плоча ЕК2 и ЕК3, захваљујући карбонским влакнима постављеним по попречном правцу у односу на спољашње листове фурнира, а који су умањили проценат цепања дрвних влакана по подужном правцу на местима ослабљења. На графику на слици 162 приказане су упоредне вредности максималне

силе при којој је дошло до лома и напона на затезање за сваку комбинацију плоча. У односу на неојачане носаче (ЕК4), код ојачаних носача из плоча Комбинације 1 (ЕК1), сила при којој је дошло до лома увећана је за 92.22%, док проценат побољшања напона на затезање износи 106.82%. Код ојачаних носача из плоча Комбинације 2 (ЕК2), код којих је, у односу на плоче из претходне комбинације, додато карбонско ојачање у попречном правцу у трећу и четврту слубницу, сила при којој је дошло до лома увећана је за 98.06%, док проценат побољшања напона на затезање износи 96.32% у односу на неојачане, контролне плоче (ЕК4). Код ојачаних плоча Комбинације 3, где су карбонске тканине постављене у прву и шесту слубницу у два слоја, управно оријентисане једна на другу, формирајући мрежу, сила при којој је дошло до лома увећана је за 107.52%, док проценат побољшања напона на затезање износи 96.64% у односу на неојачане, контролне плоче (ЕК4). На основу наведеног, потврђује се почетна претпоставка да ће карбонска влакна оријентисана у подужном правцу знатно допринети повећању носивости носача на затезање. Осим тога, закључује се да ојачање плоча Комбинације 2 и 3 у односу на плоче Комбинације 1 није економично са аспекта утршка материјала у односу на степен повећања носивости плоча.

Оно што није очекивано је да ће ојачане плоче имати велике коефицијенте варијације, што је очекивано за неојачане узорке. Очекивано је као и код претходних испитивања, да се увођењем карбонских влакана уједначи понашање структуре, односно да се умање коефицијенти варијације, што се у овом случају није догодило. Такође, као и код свих других испитивања, приметно је и да су ојачане епрувете претрпеле много мања оштећења при много већим силама у односу на епрувете из неојачаних плоча, што је свакако последица ојачања и самих карактеристика карбонских влакна постављених у подужном правцу.

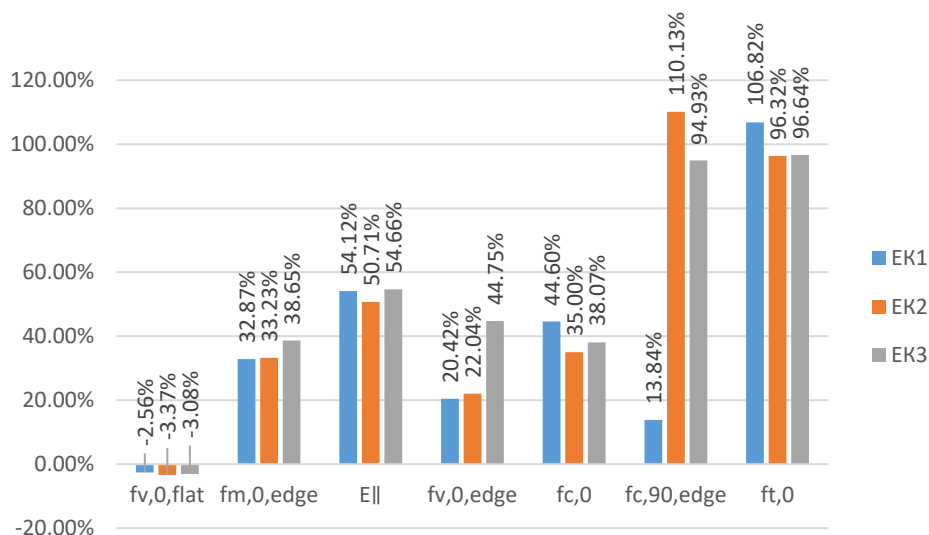


Слика 162. Дијаграм вредности F_{max} и $f_{t,0,k}$ за различите комбинације ојачања плоча

5.6 Дискусија резултата

Код свих плоча слеplених епоксидним адхезивом и ојачаних карбонском тканином постављеном у једном или у два правца, постигнуто је побољшање свих механичких карактеристика осим чврстоће на смицање у равни плоче, односно у слоју адхезива. Процент побољшања у односу на контролни узорак за сваку механичку особину и за сваку комбинацију ојачања приказан је на слици 163. У Табели 71. приказана је рекапитулација претходно приказаних резултата испитаних механичких особина са стандардним девијацијама.

При испитивању чврстоће на смицање у слоју адхезива уочено је да се код свих епрувета лом јавља по дрвету, с тим што је вредност чврстоће на смицање умањена за око 3% код свих ојачаних плоча у односу на контролне плоче. Оно што је важно истаћи је да се приликом овог испитивања није јавио лом у слоју адхезива, као и то да није дошло до деламинације у слоју FRP-FRP, нити у слоју FRP-дрво. Ово значи да је адхезив успешно деловао у преношењу оптерећења међу слојевима, како између два фурнира, тако и између фурнира и FRP-а. Даље испитивање адхезива није рађено, али би у наредним корацима било неопходно испитати јачину лепљене везе на мокрим узорцима, претходно кондиционираним према стандарду, како би се потврдио квалитет лепљене везе при изложености различитим утицајима средине при експлоатацији конструктивних елемената.



Чврстоћа на смицање у равни плоче	$f_{v,0,flat}$
Савојна чврстоћа у равни плоче	$f_{m,0,edge}$
Модул еластичности при савијању	$E_{ }$
Чврстоћа на смицање управно на равни плоче	$f_{v,0,edge}$
Притисна чврстоћа у равни плоче паралелна влакнима	$f_{c,0}$
Притисна чврстоћа у равни плоче управна на влакна	$f_{c,90,edge}$
Затезна чврстоћа у равни плоче паралелна влакнима	$f_{t,0}$

Слика 163. Дијаграм побољшања механичких карактеристика за различите комбинације ојачања плоча (ЕК1, ЕК2, ЕК3) у односу на контролни узорак ЕК4

При испитивању савијања у равни плоче и модула еластичности при савијању, лом свих епрувета догодио се као чист лом у затегнутој зони пресека, изазван притискујућом силом. Приликом овог испитивања при деловању максималне критичне силе у горњој, притиснутој зони пресека, долазило је до гњечења испитне епрувете, сабијања дрвних влакна и у малој мери до деламинације слојева FRP-дрво у притиснутој зони, што је резултат прекорачења притисне чврстоће. Да је приликом испитивања епрувета оптерећена са две концентрисане силе, претпоставља се да до овог проблема не би долазило. Код свих епрувета из ојачаних плоча лом у дрвету био је експлозивне природе, а већином праћен пресецањем мањег броја карбонских влакана у затегнутој зони пресека. Услед пресецања карбонских влакана, а након лома, код неколико епрувета је дошло до деламинације FRP-дрво у затегнутој зони пресека. Поменуто нарушавање адхезије између слојева FRP-дрво и FRP-FRP у епруветама из ојачаних плоча десило се искључиво након лома у дрвету. Код епрувета из плоча Комбинације 3 (ЕК3) не долази до деламинације, а до пуцања влакана свега у неколико епрувета и то у знатно мањој мери. Процент побољшања савојне чврстоће за плоче типа ЕК1=32.9%, ЕК2=33.2% и ЕК3=38.7% у односу на контролне плоче, док је проценат повећања модула

еластичности $E_{\parallel, EK1} = 54.1\%$, $E_{\parallel, EK2} = 50.7\%$, $E_{\parallel, EK3} = 54.7\%$. Иако су све три комбинације ојачања плоча показале знатно унапређење савојне чврстоће у равни плоче, може се сматрати да је најоптималније ојачање са аспекта утрошка материјала и процента унапређења механичких карактеристика постигнуто код ојачаних плоча типа ЕК1.

При испитивању, код епрувета из ојачаних плоча Комбинације 1 и 2 (ЕК1 и ЕК2) приказало се једним делом пластично понашање до лома, док је на дијаграму за епрувете из ојачаних плоча Комбинације 3 (ЕК3), у знатној мери изражено еластично понашање, са много мањом зоном пластичног понашања. Карбонска влакана оријентисана у подужном правцу, односно у правцу влакана спољашњих листова фурнира, утицала су на смањење варијабилности резултата при савијању и допринела су уједначенијем понашању структуре. Сви испитане ојачане епрувете претрпеле су много мање деформације при много већим силама у односу на неојачане епрувете, а чему су допринела карбонска влакна и њихово понашање у затегнутој зони пресека, где код неојачаних епрувета долази до изненадног кртог лома.

Позиција карбонских влакана при испитивању савојне чврстоће и модула еластичности није битно утицала на степен побољшања ове механичке карактеристике. Карбонска влакна постављена паралелно фурнирским листовима, обједињено кроз притиснуту и затегнуту зону пресека при савијању нису утицала ни на облик лома, односно и код ојачаних и код неојачаних епрувета лом је крт у затегнутој зони, с тим што је код неојачаних епрувета лом експлозиван, изненадан и потпун, раздвајајући епрувету на два дела.

Испитивање смицајне чврстоће управно на раван плоче показало је да ни код једне од испитаних епрувета није дошло до потпуног лома епрувете, односно до пресецања свих слојева, што је резултат већинског броја слојева фурнира постављених у подужном правцу. Осим тога, на степен оштећења епрувете знатно утиче положај и оријентација карбонских влакана у склопу. Код епрувета из плоча код којих су карбонска влакна постављена у једном слоју, подужно оријентисана, долази до лома епрувете под смичућим силама, али не и до њеног потпуног пресецања. Највећи проблем код овог типа ојачања јавља се у притиснутој зони пресека, на месту контактне напона. Најчешћи облици оштећења при испитивању смицајне чврстоће су сабијање, односно гужвање влакана спољашњих листова фурнира, али и лом кроз средњи слој фурнира, попречно оријентисан. Осим тога постоји неколико епрувета код којих је дошло до лома по спољњим фурнирским листовима, што је карактеристичан облик лома за ову врсту испитивања слојевитих плоча. Најмањи степен оштећења и највећи степен побољшања постигнут је код плоча Комбинације 3 (ЕК3), где су карбонске тканине постављене у првој и шестој сљубници и оријентисане тако да формирају мрежу. Овакво ојачање плоча утицало је на смањење цепања влакана на ослабљеном месту пресека у притиснутој зони и додатно повећало свеукупну отпорност епрувета на смицање. Као и код других испитивања, попречно оријентисана карбонска влакна, постављена да повећају отпорност узорка на смицање управно на раван плоче, позиционирана су на два начина – у плочама Комбинације 2 (ЕК2) ближе тежишту пресека, у трећу и четврту сљубницу, док су у плочама Комбинације 3 (ЕК3), заједно са подужним влакнима, позиционирана у прву и шесту сљубницу. Постављање попречно оријентисаних карбонских влакана у трећу и четврту сљубницу скоро да и није утицало на повећање носивости на смицање носача, односно резултати лома и капацитет носивости истоветни су као и код носача Комбинације 1 (ЕК1), где је ојачање постављено у подужном правцу. Ојачање код плоча Комбинације 3 (ЕК3), постављено тако да у првој и шестој сљубници образује мрежу од карбонских влакана, знатно је утицало на повећање отпорности на смицање, јер ова мрежа у знатној мери преузима смичућа напрезања на себе. Позиционирање карбонских влакана на већој удаљености од

тежишта пресека, али и њихово формирање у виду мреже, довело је до повећања носивости пресека на смицање за чак 44.75% у односу на контролну, неојачану плочу.

Притисна чврстоћа у правцу паралелном влакнима спољашњих фурнирских листова, односно у правцу деловања силе код епрувета из плоча ЕК1 увећана је за 44.60% у односу на епрувете из контролне плоче ЕК4. Као што је и очекивано, ово је најзначајнији правац ојачања за наведену механичку карактеристику, те карбонска влакна оријентисана у попречном правцу немају велики утицај на ојачање плоче. При испитивању притисне чврстоће паралелно влакнима, код свих епрувета је дошло до појаве истих модела понашања до лома. Лом се код свих епрувета догодио у структури дрвета. Деламинација епрувета на линији FRP-дрво догодила се након деловања максималне силе, а као последица прекорачења притисних напона. Лом епрувета праћен је деламинацијом у малој мери, што није од посебне важности за испитивање у оквиру овог рада. С обзиром да је код свих комбинација ојачање карбонским влакнима у правцу притисне чврстоће која се испитује, постављено увек у исту слубницу, прву и шесту, не може се одредити ефекат положаја влакана на побољшање плоче.

Код попречно оријентисаних карбонских влакана, односно при испитивању притисне чврстоће управне на правац спољних листова фурнира, појављују се други модели лома. За све епрувете лом можемо класификовати у две категорије. Једна врста лома подразумева бочно извијање епрувете при чему долази до њеног попречног пуцања на средини пресека. Ова врста лома је карактеристична за плоче које немају ојачање у правцу деловања силе, а то су комбинације 1 и 4 (ЕК1 и ЕК4). Код епрувета из плоча ЕК2 и ЕК3 уочава се друга врста лома, где оштећења настају на месту контакта епрувете са притискивачем и резултирају сабијањем влакана, а у мањој мери и избочавањем епрувете при притиску. Увођењем влакана попречно оријентисаних на правац дрвних влакана спољних листова фурнира LVL плоче, односно карбонских влакана постављених у правцу дејства силе, знатно се утиче на побољшање отпорности на притисак у правцу плоче. Највећи проценат ојачања, чак 110.13% у односу на контролне плоче имају плоче Комбинације 2(ЕК2), где су носећа карбонска влакна постављена у трећу и четврту слубницу, ближе тежишту плоче. Код плоча Комбинације 3 (ЕК3) карбонска влакна постављена су даље од самог тежишта, односно у прву и трећу слубницу, и као таква утицала су на повећање носивости попречног притиска у равни плоче за 94.93% у односу на контролни узорак. Оно што је важно, као и при осталим испитивањима механичких карактеристика, код плоча слепљених епоксидним адхезивом сва оштећења настају у слоју дрвета.

Као и код притисне, тако и код затезне чврстоће у равни плоче, улогу ојачања преузимају она влакна позиционирана у правцу дејства силе. При испитивању затезне чврстоће, испитана је само затезна чврстоћа паралелна влакнима спољашњих фурнирских листова. Сходно томе, додатни слојеви карбонске тканине у Комбинацијама 2 и 3 нису имала ефекат на повећање носивости на затезање. Затезање преузимају карбонска влакна подужно постављена у прву и шесту слубницу. У односу на контролни узорак, чврстоћа плоча Комбинације 1 повећана је за 106.82%. Код свих епрувета модели лома су такви да је дошло до пуцања у слоју дрвета, затезањем. Приликом затезања, код неких епрувета је дошло до кидања мањег броја карбонских влакана у подужном правцу. При испитивању код неколико епрувета из плоча Комбинације 2 и неколико епрувета из плоча Комбинације 3 дошло је до апсолутног лома, прекидањем свих карбонских влакана подужно оријентисаних, што је карактеристика лома свих епрувета из неојачаних, контролних плоча.

Ојачања карбонским тканинама LVL плоча су значајно побољшала испитана механичка својства. Посебно изражени ефекти ојачања су постигнути код притисне и затезне чврстоће у равни плоче. У зависности од напрезања која се јављају у конструкцијама неопходно је извршити одабир метода ојачања, да ли ће ојачање карбонском тканином бити оријентисано у једном или у два правца. Побољшања механичких својстава плоча Комбинације 2 и 3 (ЕК2 и ЕК3) су у већином уравнотежена, осим код смицајне чврстоће управне на раван плоче. С обзиром да се код плоча Комбинације 3 (ЕК3) постигло значајно побољшање ове карактеристике, може се овај метод ојачања усвојити као препоручен за елементе код којих су у конструкцијама доминантна напрезања на смицање, али и изложеност великим аксијалним силама притиска. Код носача код којих су доминанте друге врсте напрезања, а где напрезања на смицање нису изражена, није потребно уводити ојачање карбонским влакнима оријентисаним управно на правац спољашњих фурнирских листова, пре свега због уштеде материјала. Како су ојачања код којих су карбонска влакна постављена у виду мреже показала најбоље резултате при испитивању механичких карактеристика, у даљем раду је потребно испитати понашање плоча ојачаних самом биаксијално оријентисаном тканином.

Облици лома показали су одличне карактеристике у споју дрво-FRP-дрво, при чему је увек долазило до лома по дрвету, односно ни код једне од епрувета није дошло до лома по линији лепљења. Деламинација између слојева код појединих епрувета догодила се тек након изложености епрувете максималној сили и након наступања лома по дрвету. Овим се потврђује успешност епоксидног адхезива, и његова изузетна способност за пренос оптерећења кроз слојеве. У даљем раду предмет истраживања треба да буде испитивање адхезивне чврстоће при цикличним променама услова средине, као и понашање узорака под дуготрајним оптерећењем.

Табела 71. Механичке карактеристике ојачаног тополовог LVL-а – вредности добијене експерименталном анализом

	$f_{v,0,flat}$ (MPa)		$f_{m,0,edge}$ (MPa)		$E_{ }$ (MPa)		$f_{v,0,edge}$ (MPa)		$f_{c,0}$ (MPa)		$f_{c,90,edge}$ (MPa)		$f_{t,0}$ (MPa)	
	sr. vred.	st. dev.	sr. vred.	st. dev.	sr. vred.	st. dev.	sr. vred.	st. dev.	sr. vred.	st. dev.	sr. vred.	st. dev.	sr. vred.	st. dev.
LVL - EK1	4.00	0.38	97.71	5.85	12214.47	601.04	15.16	0.89	52.93	3.68	15.32	1.03	118.68	18.92
LVL - EK2	3.97	0.53	97.98	5.64	11943.99	497.70	15.36	1.00	49.42	5.57	28.28	2.25	112.65	25.17
LVL - EK3	3.98	0.35	101.97	5.61	12256.66	461.63	18.22	1.25	50.54	2.55	26.24	3.33	112.83	13.47
LVL - EK4	4.11	0.56	73.54	8.60	7925.08	280.80	12.59	0.89	36.60	3.11	13.46	1.25	57.38	7.85

Легенда:

Чврстоћа на смицање у равни плоче

$f_{v,0,flat}$

Савојна чврстоћа у равни плоче

$f_{m,0,edge}$

Модул еластичности при савијању

$E_{||}$

Чврстоћа на смицање управно на равни плоче

$f_{v,0,edge}$

Притисна чврстоћа у равни плоче паралелна влакнима

$f_{c,0}$

Притисна чврстоћа у равни плоче управна на влакна

$f_{c,90,edge}$

Затезна чврстоћа у равни плоче паралелна влакнима

$f_{t,0}$

6. Анализа могућности употребе ојачаних плоча на бази фурнира као носећег конструктивног елемента

Примена ојачаних LVL плоча као егзоскелета архитектонског објекта

Кроз поглавље 3.2 *Примена плоча на бази фурнира у архитектури*³²⁵ извршена је анализа могућности примене плоча на бази фурнира у архитектури, приказана њихова посебна важност приликом пројектовања објекта са дрвеним конструктивним елементима, где је примена ових плоча истакнута у пројектовању и реализацији хоризонталних и вертикалних дијафрагми. Осим конвенционалних начина примене, анализирана је и неконвенционална примена плоча на бази фурнира у архитектури. Анализом у оквиру наведеног поглавља закључено је да су потенцијали примене плоча на бази фурнира управо у неконвенционалним начинима, а првенствено при формирању просторних структура од површинских или линијских елемената.

У оквиру овог дела рада извршиће се анализа примене ојачаних плоча на бази фурнира у архитектури и утврдити њихове предности и потенцијали. Анализа ће се извршити кроз посматрање симулационог просторног модела егзоскелетне структуре пројектоване у виду штапастих елемената постављених у равни. Циљ овог дела рада је да се прикажу потенцијали примене анализираних материјала за формирање конструкција великих распона, мале статичке висине елемената, а самим тим и мале сопствене тежине конструкције.

Статичка анализа спроведена је путем методе коначних елемената (МКЕ). Симулациони модели пројектовани су у циљу провере (симулирања) понашања структуре формиране од плоча на бази фурнира ојачаних карбонским влакнима. Нумерички прорачуни статичких утицаја извршени су коришћењем програма "Tower 8".³²⁶ Димензионисање елемената извршено је према правилнику за димензионисање LVL носача „*Design Guide: Structural Plywood and LVL*“³²⁷, а потом коначни усвојени модел проверен је и према правилнику „*Eurocode 5*“. С обзиром да „*Design Guide: Structural Plywood and LVL*“ у односу на „*Eurocode 5*“ прецизније дефинише корекционе коефицијенте који утичу на корекцију допуштених напона приликом димензионисања конструктивних елемената, а посебно у домену стабилности носача, те је из наведеног разлога овај правилник је одабран за анализу носача. За димензионисање носача употребљене су заокружене средње вредности механичких карактеристика носача добијене експерименталним путем, приказане у Табели 72.

Анализа је вршена на два симулациона модела. За оба модела усвојена је конструкција кровне структуре у виду реципрочне конструкције. Први модел распона $L = 12.82 \text{ m}$, пројектован је применом линијских елемената распона $L = 3 \text{ m}$ у кровној структури и површинских елемената висине $L = 4.5 \text{ m}$ у структури зидова (сл.164). Наведеним димензијама носача највећи проблем представљао однос ширине и висине попречног пресека елемената, који је директно утицао на извијање носача око подужне осе. Како би се анализирао носач механичких карактеристика добијених експерименталним путем, приступило се формирању другог симулационог модела. Мања ширина елемената и мањи размак између бочних придржајних тачака условили су формирање другог симулационог модела, формираног од линијских елемената мање дужине. Сходно томе, други симулациони модел

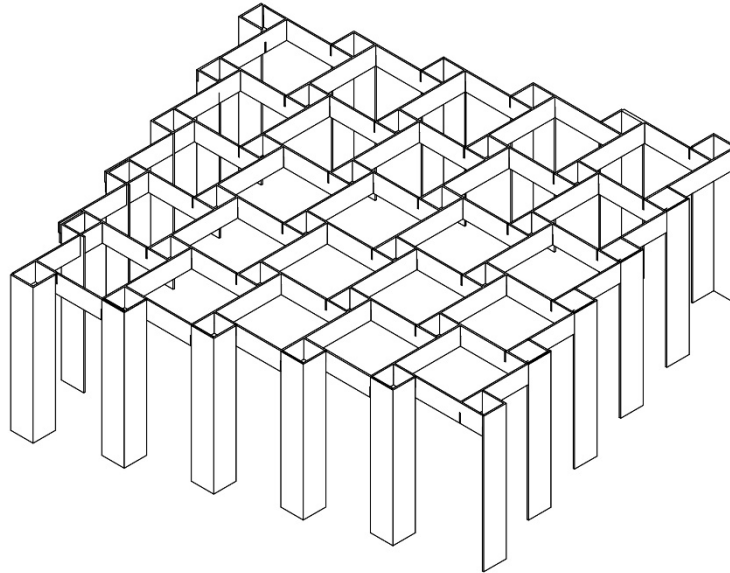
³²⁵ погледати поглавље 3.2 *Примена плоча на бази фурнира у архитектури*, стр.51.

³²⁶ Програм за статичку анализу *Radimpex Software* – „Tower8“, верзија 8.4.

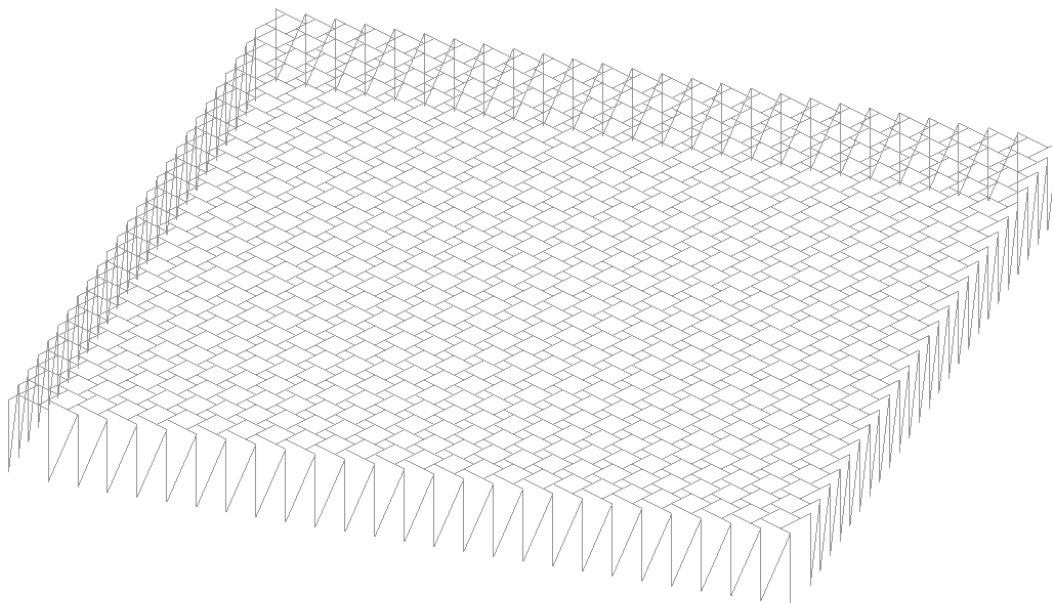
³²⁷ EWPAА. *Design Guide: Structural Plywood and LVL*, EWPAА - Engineered Wood Products Association of Australasia, (2018), str. 42.

(сл.165) распона $L = 14.75 \text{ m}$ формиран је применом линијских елемената дужине $L = 0.75 \text{ m}$, чија је ширина пресека $2b = 30 \text{ mm}$, где је b дебљина плоче формиране у експерименталном испитивању. Вертикални елементи ове структуре због малих растојања између елемената формирану су као стубови.

Везе између свих елемената у оба модела пројектоване су као зглобне везе са ослобођеним моментима савијањима око локалних оса 2 и 3 гредног носача. У првом моделу, са формираним плочастим зидним елементима, између два зидна елемента остварена је зглобна веза, ослобађањем утицаја око локалне осе $M1$.



Слика 164. Симулациони модел 1 – просторни приказ



Слика 165. Симулациони модел 2 – просторни приказ

Табела 72. Механичке карактеристике материјала унапређених конструктивних карактеристика примењене у димензионисању носача

Механичке карактеристике материјала - LVL-а ојачаног влакнима - ЕКЗ

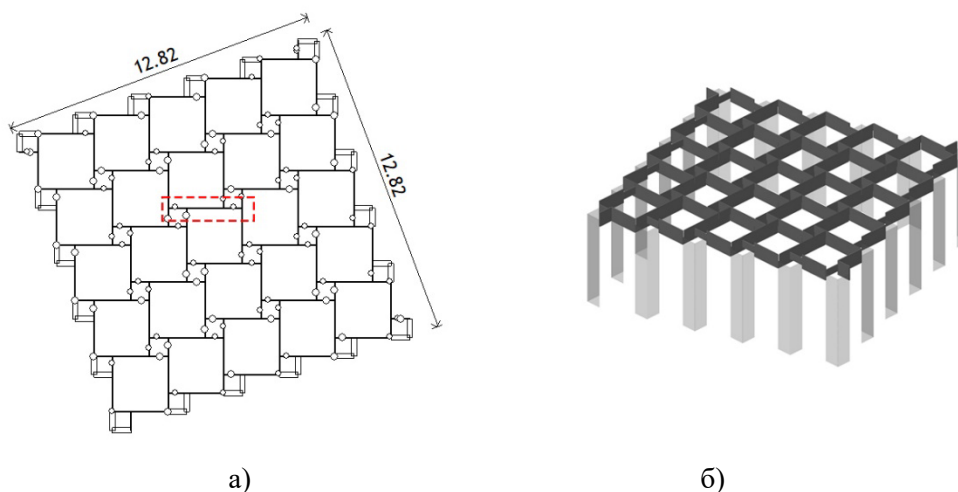
Чврстоћа на смицање у равни плоче	$f_{v,0,flat}$	4.0	МПа
Савојна чврстоћа у равни плоче	$f_{m,0,edge}$	77.0	МПа
Модул еластичности при савијању	$f_{v,0,edge}$	12250.0	МПа
Чврстоћа на смицање управно на раван плоче	$f_{v,0,edge}$	18.0	МПа
Притисна чврстоћа у равни плоче паралелна влакнима	$f_{c,0}$	50.0	МПа
Притисна чврстоћа у равни плоче управна на влакна	$f_{c,90,edge}$	26.0	МПа
Затезна чврстоћа у равни плоче паралелна влакнима	$f_{t,0}$	112.0	МПа

6.1. Примена ојачаних плоча на бази фурнира у конструкцијама формираним од гредних елемената

6.1.1 Симулациони модел 1 – димензионисање егзоскелета применом ојачаног LVL-а

Објекат је замишљен као егзоскелетна конструкција, пројектована у виду кровне конструкције формиране у систему реципрочне конструкције са линијским гредним елементима постављеним у равни (сл.166). Вертикални елементи егзоскелетне структуре формирану су у виду површинских елемената (зидова).

Кровна конструкција пројектована је као реципрочна конструкција распона $L = 12.82 \text{ m}$, у систему кратких штапова, дужине појединачног штапа $L = 3 \text{ m}$. Како би се кровна конструкција формирала у равни, везе између елемената остварене су усецањем гредних елемената на месту ослањања суседног елемента. Везе између елемената остварене су $\frac{1}{4}$ распона, а сваки елемент усечен је $\frac{1}{2}$ висина h . Све везе у конструкцији пројектоване су као зглобне везе. Зидови су пројектовани као површински елементи код којих је доминанто оптерећење у равни плоче. Ослонци су формирану као линијски зглобни ослонци са спреченим померањима у оси 1, 2 и 3.



Слика 166. Симулациони модел 1:
а) диспозиција елемената у кровној равни, б) 3D приказ структуре

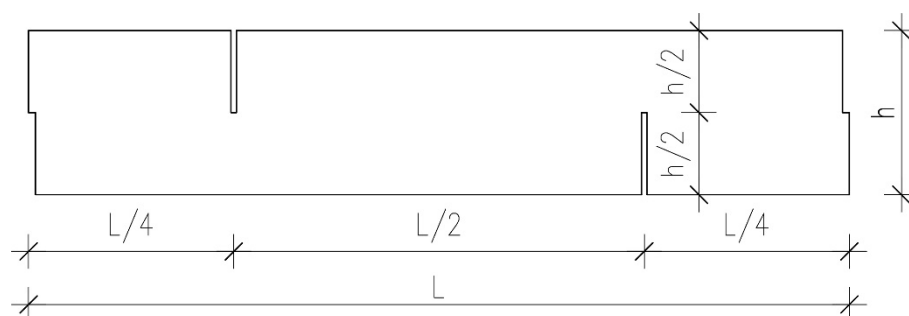
6.1.1.1 Димензионисање кровне структуре - LVL гредног носача

Димензионисање гредног елемента у кровној структури. Елемент је део структуре крова, пројектоване као реципрочна конструкција. Димензионисан је елемент са највећим утицајима момената савијања и трансверзалних сила. Статички утицаји за елемент добијени су прорачуном кроз програм "Tower8". Елемент је димензионисан према „*Design Guide: Structural Plywood and LVL*“³²⁸.

Опис елемената конструкције

1. Карактеристике конструктивних елемената:

- гредни елемент је сегмент реципрочне конструкције распона 12.82 m,
- дужина сваког појединачног штапа износи 3m,
- усеци на штапу формирану су ради остваривања веза између штапова, на удаљењу $1/4$ распона L и висини 0.5 висине штапа h (сл.167),
- диспозиција елемента у конструкцији приказана је на слици 166.а, елемент је означен црвеном испрекиданом линијом,
- конструкција је оптерећена сталним оптерећењем – сопственом тежином елемената и кровним покривачем у виду фурнирске плоче и PVC мембраном као завршном кровном облогом која се налази преко ње, као и покретним повременим оптерећењем од снега и ветра.



Слика 167. Обликовање појединачног штапа у систему реципрочне конструкције.

Анализа оптерећења LVL греде:

2. Оптерећења

Стално оптерећење

Кровни покривач

- фурнирске плоче 15 mm = 0.075 kN/m^2
- кровна PVC мембранска фолија = 0.05 kN/m^2

Сопствена тежина (урачуната кроз модел) = 5.00 kN/m^3

Корисно оптерећење – повременог карактера

Оптерећење од снега = 0.80 kN/m^2

³²⁸ EWPAА. *Design Guide: Structural Plywood and LVL*, EWPAА - Engineered Wood Products Association of Australasia, (2018), str. 42.

$$\text{Оптерећење од ветра} = -0.286 \text{ kN} \times A_{ref}$$

Прецизно дефинисање оптерећења које делује на конструкцију је од пресудне важности за стабилност конструкције, како не би дошло до последица приликом реализације или употребе објекта.³²⁹

Прорачун оптерећења од ветра приказан је у *Прилогу 4 - Дефинисање оптерећења на конструкцијама*.³³⁰ Распоред оптерећења по гредним елементима је остварен кроз програм за статичку анализу носача „Tower 8“. За сва оптерећења задато је да површинско оптерећење, које током прорачуна делује као линијско континуално оптерећење на линијским елементима.

Приликом димензионисања одређени су коефицијенти сигурности и употребљивости објекта, приказани у *Прилог 5 – Одређивање коефицијената сигурности и употребљивости објекта*³³¹.

Дефинисање комбинација оптерећења конструкције

3. Комбинације оптерећења

I комбинација – стално оптерећење	= 1.35 G
II комбинација – стално и кратка изложеност покретном оптерећењу	= 1.20 G + 1.50 Q
III комбинација – стално оптерећење и ветар	= 0.9 G + W _u
IV комбинација – стално оптерећење, ветар и кратка изложеност покретном оптерећењу	= 1.20 G + W _u + ψс Q = ψс = 1

Фактори сигурности унети су у прорачунски модел „Tower 8“ кроз комбинацију оптерећења, како би се на основу коригованог оптерећења одредили статички утицаји.

Пример 1.

Одређивање статичких утицаја и димензионисање гредног елемента променљивог попречног пресека b/d = 15/360 – 720 mm

Према претходно дефинисаном оптерећењу на моделу извршена је анализа статичких утицаја кроз софтвер „Tower 8“. У Табели 73 приказани су статички утицаји код ослонца, на месту међусобног ослањања штапова, за најоптерећенији елемент у конструкцији. У Табели 74 приказани су статички утицаји у пољу за најоптерећенији елемент, а вредности максималног угиба целокупне структуре по комбинацијама оптерећења приказане су у Табели 75. Дијаграми момената савијања, трансверзалних сила и угиба приказани су на сликама 170-172 у *Прилогу 6, пример 1*.³³²

³²⁹ Miodrag R. Grbic, Neda M. Dzombic, и Milan T. Glisic, „Investigation of the Collapse of a Building in the Final Stage of Its Construction“, *Structural Engineering International* 27:3(2017): 429-434.

³³⁰ погледати *Прилог 4 - Дефинисање оптерећења на конструкцијама*, стр.267.

³³¹ погледати *Прилог 5 – Одређивање коефицијената сигурности и употребљивости објекта*, стр. 267.

³³² погледати *Прилог 6 – Димензионисање симулационог модела 1, Пример 1*, стр. 269.

1. Статички утицаји на најоптерећенијем елементу

Табела 73. Статички утицаји код ослонца, на месту међусобног ослањања штапова – штапови
b/d=15/360-720 mm

Комбинација оптерећења	Корекциони коефицијенти	M_o (kNm)	$\frac{M}{k_1}$ (kNm)	V_o (kN)	$\frac{V}{k_1}$ (kN)
I – стално оптерећење	1.35 G	4.70	$\frac{4.70}{0.57} = 8.24$	6.38	$\frac{6.38}{0.57} = 6.78$
II – стално и кратка изложеност покретном оптерећењу	1.20 G + 1.50 Q	27.53	$\frac{27.53}{0.94} = 29.29$	36.92	$\frac{36.92}{0.94} = \mathbf{39.28}$
III – стално оптерећење и ветар (сишуће)	0.9 G – W_u	1.45	$\frac{1.45}{1.00} = 1.45$	3.09	$\frac{3.09}{1.00} = 3.09$
IV – стално оптерећење, ветар и кратка изложеност покретном оптерећењу	1.20 G – W_u + $\psi_c Q$	17.02	$\frac{17.02}{1.00} = 17.02$	19.06	$\frac{19.06}{1.00} = 19.06$

Табела 74. Статички утицаји у пољу – штапови b/d=15/360-720 mm

Комбинација оптерећења	Корекциони коефицијенти	M_p (kNm)	$\frac{M_p}{k_1}$ (kNm)	T_p (kN)	$\frac{T_p}{k_1}$ (kN)
I – стално оптерећење	1.35 G	4.78	$\frac{4.78}{0.57} = 8.38$	0	/
II – стално и кратка изложеност покретном оптерећењу	1.20 G + 1.50 Q	4.24+23.46= 27.70	$\frac{27.70}{0.94} = \mathbf{29.47}$	0	/
III – стално оптерећење и ветар (сишуће)	0.9 G – W_u	1.49	$\frac{1.49}{1.00} = 1.49$	0	/
IV – стално оптерећење, ветар и кратка изложеност покретном оптерећењу	1.20 G – W_u + $\psi_c Q$	17.12	$\frac{17.12}{1.00} = 17.12$	0	/

2. Димензионисање носача

Сваки штап формиран је као прост штап, обликован помоћу усека висине 1/2 висине штапа h , на удаљењима 1/4 дужине штапа L од његових ивица, као што је приказано на слици 165. На местима формирања ослоначких веза штап има највеће трансверзалне силе, али и најмању статичку висину која износи 0.5 h штапа. Обзиром да је разлика вредност максималног момента савијања у пољу и над ослонцем $\approx 1\%$, димензионисање штапа вршено је на основу M_{max} у средини распона појединачног елемента, као и на основу највише трансверзалне силе

T_{max} на местима ослабљења носача код ослонаца. Детаљан поступак димензионисања приказан је у Прилогу 5 – Димензионисање симулационог модела 1, Пример 1.³³³

Како се димензионисање гредног елемента врши на основу корекционих коефицијената допуштених напона, за претпоставку почетних димензија попречног пресека усвојиће се да су сви корекциони коефицијенти $k = 1$ и одредиће се димензије попречног пресека из опште формуле:

$$W_{x,pot} \geq \frac{M}{f'_b} \rightarrow d = \sqrt{\frac{6M}{f'_b b}}$$

за $b = 15 \text{ mm}$, $M = 27.70 \text{ kNm}$ и $f'_b = 77 \text{ MPa}$

$$d = 380 \text{ mm}$$

Димензије греде:

$15 \times 360 \text{ mm}$, ($b_{ef.} = 12.9 - 14\%$ слојева управно оријентисаних);

$$A_e = 4644 \text{ mm}^2, I_x = 5.02 \times 10^7 \text{ mm}^4, W_x = 2.79 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$L_{ay} = 250 \text{ mm}$ размак између бочних придржајних тачака греде у оси z .

Димензионисање на основу савијања

Одређивање потребног отпорног момента

$$M_d \geq M$$

$$M_d \geq \emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} f'_b W_x$$

$$W_{x,pot} = 2.28 \times 10^6 \text{ mm}^3 > W_{x,stv} = 2.79 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

Напони савијања су прекорачени, потребно је приступити повећању димензија попречног пресека елемената.

Потребни отпорни моменат је већи од стварног отпорног момента анализираног попречног пресека, те је потребно усвојити веће димензије попречног пресека. До прекорачења отпорног момента долази услед кориговања допуштених напона савијања корекционим коефицијентом $k_{12} = 0.196$, а чија је вредност директно условљена пропорцијама самог гредног носача и растојањем бочних придржајних тачака, тј. његовом виткошћу. Множењем допуштених напона савијања f'_b коефицијентом стабилности k_{12} долази до умањења допуштених напона за око 80%, односно због превелике виткости елемента допуштени напони износе $0.196f'_b$. Повећањем статичке висине пресека и даље се налазимо у зони прекорачене виткости, док се повећањем ширине попречног пресека знатно утиче на смањење извијања носача. Уколико постоји потреба, смањење виткости елемената може се постићи на неколико начина, пре свега повећањем ширине попречног пресека, смањењем растојања између бочних придржајних тачака или формирањем гредних елемената сложеног попречног пресека (сандучасти носач, I-носач и сл.).

³³³ погледати Прилог 6 – Димензионисање симулационог модела 1, Пример 1, стр. 269.

Димензионисање на основу смицања

Одређивање потребне површине попречног пресека

$$V_d \geq V$$

$$V_d \geq \emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 f'_s A_s$$

$$A_s = 2424.48 \text{ mm}^2 < A_e = 4644 \text{ mm}^2 \text{ за димензије } 15 \times 360 \text{ mm.}$$

$$f_{v,edge} = \frac{V}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 A}$$

$$f_{v,edge} = 9.39 \text{ MPa} < f'_s = 18 \text{ MPa}$$

Напони смицања су у границама допуштених напона.

Контрола угиба

Конструкција је пројектована као реципрочна кровна конструкција, формирана у систему кратких штапова оријентисаних у два правца, те се морају посматрати угиби целокупне структуре, а не угиби једног гредног елемента. С тога су угиби за целокупни просторни склоп вршени путем симулационог просторног модела, кроз програм „Tower 8“. Угиби су прорачунати за сваку наведену комбинацију оптерећења, узимајући у обзир корекционе коефицијенте који утичу на употребљивост објекта – j_2 и j_6 ³³⁴.

Одређивање допуштених угиба

$$\text{Стално оптерећење} \quad \Delta = L/200 = 12.82/200 = 0.064 \text{ m} = 64.10 \text{ mm}$$

$$\text{Оптећење од снега} \quad \Delta = L/100 = 12.82/100 = 0.128 \text{ m} = 128.2 \text{ mm}$$

$$\text{Оптећење од ветра} \quad \Delta = L/100 = 12.82/100 = 0.127 \text{ m} = 128.2 \text{ mm}$$

Табела 75. Угиби целокупне структуре – штапови $b/d=15/360-720 \text{ mm}$

Комбинација оптерећења	Корекциони коефицијенти		$\Delta_{\max} \text{ (mm)}$	Δ_{\max}
	$j_2 \times G$	$j_6 \times G$		
I – стално оптерећење	$2 G$	G	20.23	$L/633$
II – стално и кратка изложеност покретном оптерећењу	$2 G + 1Q$	$G + 1Q$	64.94	$L/197$
III – стално оптерећење и ветар (сишуће)	$2G - W_u$	$G - W_u$	4.25	$L/3016$
IV – стално оптерећење, ветар и кратка изложеност покретном оптерећењу	$2G - W_u + Q$	$G - W_u + Q$	48.96	$L/262$

³³⁴ погледати Прилог 5 – Одређивање коефицијената сигурности и употребљивости објекта, стр. 267.

Угиби су у границама допуштених деформација.

Максималан угиб на конструкцији је у случају комбинације оптерећења II, када на конструкцију делује стално оптерећење од кровног покривача и сопствене тежине елемената заједно са снегом. С обзиром да је снег доминантно оптерећење, а привременог је карактера са трајањем у свом пуном оптерећењу до 7 дана, допуштен угиб износи $\Delta = L/100 = 127.5 \text{ mm}$, што је више од максималног угиба који износи $\Delta_{\max} = L/229 = 55.63 \text{ mm}$.

Приликом димензионисања гредног носача приказано је да су напони смицања појединачног носача и угиби целокупне конструкције у границама допуштених, као и да су напони савијања прекорачени. Прекорачење напона савијања, као што је претходно поменуто условљено је великом виткошћу носача, тј. као последица превеликог бочног извијања долази до велике редукације допуштених напона савијања. Како би се овај проблем превазишао потребно је пројектовати носач веће ширине попречног пресека, који се може добити удвајањем носача или носач сандучастог попречног пресека са истом ширином елемента $b = 15 \text{ mm}$.

Експериментално испитивање механичких карактеристика материјала вршено је на узорцима мале скале, те је испитивање вршено на седмослојним LVL плочама, дебљине око 15 mm . У пракси се за гредне LVL носаче примењују плоче ширине 40 mm па навише. У наредном кораку димензионисаће се гредни носач ширине $3b = 45 \text{ mm}$. Механичке карактеристике носача усвојиће се исте као за плочу од $b = 15 \text{ mm}$, добијене експерименталним испитивањем, иако би се вредности механичких карактеристика, а првенствено допуштених напона савијања и смицања код вишеслојних плоча ојачаних влакнима разликовале од механичких карактеристика седмослојних плоча. Вредности механичких карактеристика вишеслојних плоча би биле веће, односно допуштени напони савијања и смицања би били већи од добијених резултата за седмослојне плоче, што показују и табличне вредности неојачаних плоча (Табеле 8 и 9)³³⁵, где се порастом броја слојева фурнира увећавају и допуштени напони.

Пример 2.

Одређивање статичких утицаја и димензионисање гредног елемента променљивог попречног пресека $b/d = 40/360 - 720 \text{ mm}$

Променом димензија попречног пресека елемента долази и до промена сопствене тежине, а самим тим и статичких утицаја у носачу. Нови статички утицаји приказани су у Табели 76. Дијаграми момената савијања, трансверзалних сила, угиба и утицаји у индиректним елементима приказани су на сликама 173-176 у Прилогу 6, пример 2.³³⁶

³³⁵ Табела 8. Вредности основних допуштених напона напрезања ламелиране фурнирске грађе формиране од свих паралелно оријентисаних слојева фурнира (LVL-P), стр.48.

Табела 9. Вредности основних допуштених напона напрезања ламелиране фурнирске грађе са одређеним бројем управно оријентисаних слојева (LVL-C), стр.49.

³³⁶ погледати Прилог 6 – Димензионисање симулационог модела 1, Пример 2, стр. 274.

1. Статички утицаји на најоптерећенијем елементу – код ослонца

Табела 76. Статички утицаји релевантни за димензионисање – штапови $b/d=15/360-720$ mm

Комбинација оптерећења	Корекциони коефицијенти	M_p (kNm)	$\frac{M}{k_1}$ (kNm)	V_o (kN)	$\frac{V}{k_1}$ (kN)
I – стално оптерећење	1.35 G	7.70	$\frac{7.70}{0.57} = 13.50$	10.33	$\frac{10.33}{0.57} = 18.12$
II – стално и кратка изложеност покретном оптерећењу	1.20 G + 1.50 Q	6.85+23.37= 30.22	$\frac{30.22}{0.94} =$ 32.15	40.32	$\frac{40.32}{0.94} =$ 42.89
III – стално оптерећење и ветар (сишуће)	0.9 G – W_u	-0.44	$\frac{-0.44}{1.00} =$ -0.44	0.59	$\frac{0.59}{1.00} =$ 0.59
IV – стално оптерећење, ветар и кратка изложеност покретном оптерећењу	1.20 G – W_u + $\psi_c Q$	16.86	$\frac{16.86}{1.00} =$ 16.86	22.52	$\frac{22.52}{1.00} =$ 22.52

2. Димензионисање носача код ослонца

Димензије греде:

40 × 300 mm, ($b_{ef} = 34.4 - 14\%$ слојева управно оријентисаних);

$$A_e = 13932 \text{ mm}^2, I_x = 1.50 \times 10^8 \text{ mm}^4, W_x = 8.36 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$L_{ay} = 250$ mm размак између бочних придржајних тачака греде у оси z.

Димензионисање на основу савијања

Одређивање потребног отпорног момента

$$M_d \geq M$$

$$M_d \geq \emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} f'_b W_x$$

$$W_{x,pot} = 8.43 \times 10^5 \text{ mm}^3 > W_{x,stv} = 8.36 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$$f'_{b,stv} = 77.68 \text{ MPa} > f'_b = 77 \text{ MPa}$$

Прекорачење напона је $\approx 1\%$, у граници до 3% .

Димензионисање на основу смицања

Одређивање потребне површине попречног пресека

$$V_d \geq V$$

$$V_d \geq \emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 f'_s A_s$$

$$A_s = 2647.75 < A_e = 13932 \text{ mm}^2$$

$$f_{v,edge} = 3.42 \text{ MPa} < f'_s = 18 \text{ MPa}$$

Напони смицања су у границама допуштених напона.

Контрола угиба носача

Табела 77. Контрола угиба – штапови $b/d=45/360-720 \text{ mm}$

Комбинација оптерећења	Корекциони коефицијенти		$\Delta_{max} \text{ (mm)}$	Δ_{max}
	$j_2 \times G$	$j_6 \times G$		
I – стално оптерећење	$2 G$	G	10.64	L/1204
II – стално и кратка изложеност покретном оптерећењу	$2 G + 1Q$	$G + 1Q$	25.21	L/508
III – стално оптерећење и ветар (сишуће)	$2G - W_u$	$G - W_u$	5.47	L/2343
IV – стално оптерећење, ветар и кратка изложеност покретном оптерећењу	$2G - W_u + Q$	$G - W_u + Q$	20.01	L/641

Угиби су у границама допуштених деформација.

Како су везе формиране усецима елемената, димензија гредног носача у средини распона износиће $40 \times 620 \text{ mm}$, при чему је $f'_{b,stv} = 25.61 \text{ MPa}$, а $f_{v,edge,stv} = 2.44 \text{ MPa}$.

Контрола контактних напона

Везе између гредних елемената остварене су њиховим усецањем. Трансверзална сила предаје се са елемента на елемент као сила притиска. Неопходно је извршити контролу контактнег напона на месту ослонца. Утицаји у најоптерећенијем штапу конструкције приказани су на слици 176.

$$f_{c,edge,stv} = \frac{Q}{A, stv} = 25.19 \text{ MPa}$$

$$f_{c,edge,stv} = 19.63 \text{ MPa} < f_{c,edge} = 26.24 \text{ MPa}$$

Контактни напони су у границама допуштених напона. Везе се могу остварити усецима елемената и њиховим непосредним контактом. Због велике статичке висине носача потребно је извршити додатно обезбеђење и стабилизацију носача.

Контролом контактних напона уочава се да је посебно значајно повећање допуштених контактних напона управно на правац влакана фурнира код ојачаних LVL плоча, чиме се омогућава формирање везе путем усецања елемената мале ширине попречног пресека, и преношење утицаја путем мале површине.

За реализацију анализиране кровне конструкције површине $12.82 \times 12.82 \text{ m}$, према дефинисаним димензијама попречног пресека носача $40/310 - 620 \text{ mm}$ утрошено је $V = 3.483 \text{ m}^3$ грађе, док укупна тежина кровне конструкције износи $m = 1.776 \text{ t}$.

Пример 3.

Одређивање статичких утицаја и димензионисање гредног елемента $b/d = 45/320 \text{ mm}$

Када би се исти конструктивни систем формирао без усека, односно да су димензије попречног пресека гредних елемената свуда једнаке, а да се везе и континуитет дрвених штапова остварују челичним оковима, остварио би се бољи однос искоришћености напона и деформација. У наставку је приказан прорачун за наведени начин обликовања елемената. С обзиром да се везе између елемената формирају помоћу дрвених елемената и вијака, извршена је поновна анализа оптерећења конструкције са додатим оптерећењем од везних елемената. За димензионисање пресека задржани су претходно постављени коефицијенти сигурности.

Статички утицаји приказани су у Табели 78, док су угиби реципрочне конструкције приказани у Табели 79. Дијаграми момената савијања, трансверзалних сила и угиба структуре приказани су на сликама 177-179 у Прилогу 6, пример 3.³³⁷

1. Оптерећења

Стално оптерећење

Кровни покривач:

- фурнирске плоче 15 mm $= 0.075 \text{ kN/m}^2$
- кровна PVC мембранска фолија $= 0.05 \text{ kN/m}^2$

Елементи за формирање везе:

- дрвени елементи везе и вијци $= 0.02 \text{ kN/m}^2$
- $= 0.145 \text{ kN/m}^2$

Сопствена тежина (урачуната кроз модел) $= 5.00 \text{ kN/m}^3$

Корисно оптерећење – повременог карактера

Оптерећење од снега $= 0.80 \text{ kN/m}^2$

Оптерећење од ветра: $= -0.286 \text{ kN} \times A_{ref}$

³³⁷ погледати Прилог 6 – Димензионисање симулационог модела 1, Пример 3, стр. 278.

2. Највећи статички утицаји релевантни за димензионисање пресека

Табела 78. Статички утицаји код ослонца – штапови $b/d=45/320$ mm

Комбинација оптерећења	Корекциони коефицијенти	M_o (kNm)	$\frac{M}{k_1}$ (kNm)	V_o (kN)	$\frac{V}{k_1}$ (kN)
I – стално оптерећење	1.35 G	-4.46	$\frac{4.46}{0.57} = 7.82$	6.01	$\frac{6.01}{0.57} = 10.54$
II – стално и кратка изложеност покретном оптерећењу	1.20 G + 1.50 Q	-3.96-17.91= -21.87	$\frac{21.87}{0.94} = \mathbf{23.26}$	29.47	$\frac{29.47}{0.94} = \mathbf{31.35}$
III – стално оптерећење и ветар (сишуће)	0.9 G – W_u	+1.29	$\frac{1.29}{1.00} = 1.29$	1.76	$\frac{1.76}{1.00} = 1.76$
IV – стално оптерећење, ветар и кратка изложеност покретном оптерећењу	1.20 G – W_u + $\psi_c Q$	-11.64	$\frac{11.64}{1.00} = 11.64$	15.68	$\frac{15.68}{1.00} = 15.68$

3. Димензионисање носача код ослонца

Димензије греде:

45 × 320 mm, ($b_{ef} = 38.7 - 14\%$ слојева управно оријентисаних);

$$A_e = 12384 \text{ mm}^2, I_x = 1.06 \times 10^8 \text{ mm}^4, W_x = 6.60 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$L_{ay} = 750$ mm размак између бочних придржајних тачака греде у оси z.

Димензионисање на основу савијања

Одређивање потребног отпорног момента

$$M_d \geq M$$

$$M_d \geq \emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} f'_b W_x$$

$$W_{x,pot} = 5.52 \times 10^5 \text{ mm}^3 < W_{x,stv} = 6.60 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$$f'_{b,stv} = 64.41 \text{ MPa} < f'_b = 77 \text{ MPa}$$

Напони савијања су у границама допуштених напона.

Димензионисање на основу смицања

Одређивање потребне површине попречног пресека

$$V_d \geq V$$

$$V_d \geq \emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 f'_s A_s$$

$$A_s = 1935.25 \text{ mm}^2 < A_e = 12384 \text{ mm}^2$$

$$f_{v,edge} = 2.81 \text{ MPa} < f'_s = 18 \text{ MPa}$$

Напони смицања су у границама допуштених напона.

Контрола угиба

Табела 79. Контрола угиба – штапови $b/d=45/320 \text{ mm}$

Комбинација оптерећења	Корекциони коефицијенти		$\Delta_{max} \text{ (mm)}$	Δ_{max}
	$j_2 \times G$	$j_6 \times G$		
I – стално оптерећење	$2 G$	G	-43.00	L/298
II – стално и кратка изложеност покретном оптерећењу	$2 G + 1 Q$	$G + 1 Q$	-120.68	L/106
III – стално оптерећење и ветар (сишуће)	$2G - W_u$	$G - W_u$	+15.23	L/841
IV – стално оптерећење, ветар и кратка изложеност покретном оптерећењу	$2G - W_u + Q$	$G - W_u + Q$	-92.91	L/138

Угиби су у границама допуштених деформација.

Последњи анализирани пример показује да се распон од $L = 12.82 \text{ m}$, може савладати применом елемената мале статичке висине, као и мале ширине пресека, при чему су дужине извијања, а самим тим бочне придржајне тачке на распону од $L_{ay} = 750 \text{ mm}$, што је управо позиција ослањања гредног елемента на суседне штапове. Код анализиране структуре све везе у кровној конструкцији се морају формирати помоћу дрвених елемената и вијака. За реализацију анализиране кровне конструкције површине $12.82 \times 12.82 \text{ m}$, према дефинисаним димензијама попречног пресека носача $45 \times 320 \text{ mm}$ утрошено је $V = 2.419 \text{ m}^3$ грађе, док укупна тежина кровне конструкције износи $m = 1.233 \text{ t}$. Конструкција пројектована на овај начин представља веома рационалну конструкцијом, што је постигнуто малим утрошком материјала, али и типским дефинисањем елемената и веза између њих, што олакшава процес монтаже.

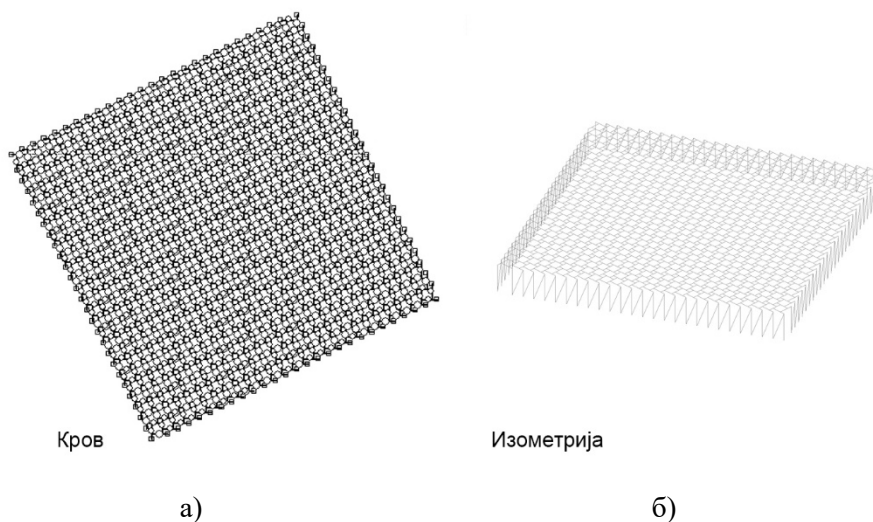
Највећи проблем у обликовању гредних носача је однос између ширине и висине попречног пресека, што је и приказано у претходним примерима прорачуна. Испитивање механичких карактеристика материјала вршена је на основу узорака мале скале, те из тог разлога није дошло до формирања плоча веће статичке висине, тј. веће дебљине плоче. Ограниченост опреме и лабораторијски услови условили су да се испитивање врши на

седмослојним фурнирским плочама, чиме се постиже дебљина плоча $\approx 15 \text{ mm}$. Како би се извршила анализа конструкције са ширином попречног пресека који је анализиран у експерименталном истраживању $b = 15 \text{ mm}$, формираће се симулациони модел конструкције са уситњеном матрицом, тј. са штаповима малих дужина. У оквиру овог модела формираће се пресек од две плоче, свака ширине $b = 15 \text{ mm}$, чиме ће се остварити ширина елемента $2 \times b = 30 \text{ mm}$. Штапови малих дужина од којих ће бити формирана кровна структура биће позиционирани у систему реципрочне конструкције, ослоњени један на други на распону $1/3 L$, чиме ће сваки суседни штап представљати бочну придржајну тачку на елементу. На овом моделу оствариће се пропорционалнији однос страница попречног пресека $b: d$ наспрам дужине бочног извијање носача L_{ay} .

6.1.2 Симулациони модел 2 – димензионисање егзоскелета применом ојачаног LVL-а

У симулационом моделу 2, као и у претходно анализираном симулационом моделу 1, објекат је замишљен као егзоскелетна конструкција, пројектована у виду кровне конструкције, при чему је кров формиран у систему реципрочне конструкције са линијским гредним елементима постављеним у равни. Вертикални елементи егзоскелетне структуре код овог модела формиран су у виду линијских елемената – стубова (сл.168).

Кровна конструкција пројектована је као реципрочна конструкција распона $L = 14.75 \text{ m}$, у систему кратких штапова, дужине појединачног штапа $L = 0.75 \text{ m}$. Како би се кровна конструкција формирала у равни, везе између елемената остварене су усецањем гредних елемената на месту ослањања суседног елемента. Везе између елемената остварене су на $1/3$ распона штапа, како би размак између бочних придржајних тачака одговарао месту ослањања суседног елемента, а сваки елемент усечен је до $1/2$ висине h . Све везе између елемената у конструкцији пројектоване су као зглобне везе. Ослонци су формиран као тачкасти непокретни ослонци са спреченим померањима у оси 1, 2 и 3.



Слика 168. Симулациони модел 2:
а) диспозиција елемената у кровној равни, б) 3D приказ структуре

6.1.2.1 Димензионисање кровне структуре - ојачани LVL гредни носач

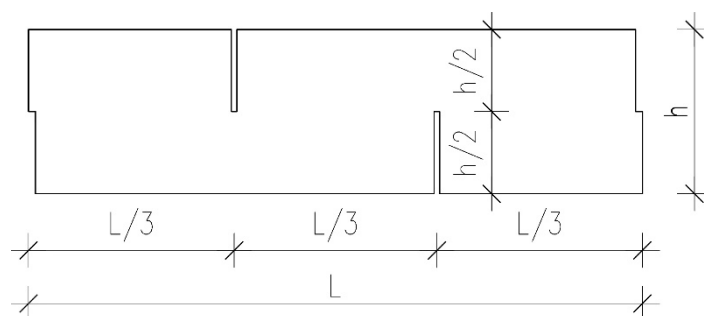
Димензионисање гредног елемента у кровној структури. Елемент је део структуре крова, пројектоване као реципрочна конструкција. Димензионисан је елемент са највећим

утицајима момената савијања и трансверзалних сила. Статички утицаји за елемент добијени су прорачуном кроз програм "Tower 8". Елемент је димензионисан према „*Design Guide: Structural Plywood and LVL*“³³⁸.

Опис елемената конструкције

1. Карактеристике конструктивних елемената:

- гредни елемент је сегмент реципрочне конструкције распона 14.75 m,
- дужина сваког појединачног штапа износи 0.75m,
- усеци на штапу формиран су ради остваривања веза између штапова, на удаљењу $1/3$ распона L и висини 0.5 висине штапа h (сл.169),
- конструкција је оптерећена сталним оптерећењем – сопственом тежином елемената, кровним покривачем у виду фурнирских плоча које ће служити и као елемент за укрућење објекта и завршном кровном облогом - мембраном, као и покретним повременим оптерећењем од снега и ветра.



Слика 169. Обликовање појединачног штапа у систему реципрочне конструкције

Анализа оптерећења LVL греде

2. Оптерећења

Стално оптерећење

Кровни покривач:

- фурнирске плоче 15 mm = 0.075 kN/m²
- кровна PVC мембранска фолија = 0.05 kN/m²

Елементи за формирање везе:

- дрвени елементи везе и вијци = 0.16 kN/m²
- = 0.285 kN/m²

Сопствена тежина (урачуната кроз модел) = 5.00 kN/m³

Корисно оптерећење – повремениг карактера

Оптерећење од снега = 0.80 kN/m²

Оптерећење од ветра = -0.286 kN × A_{ref}

³³⁸ EWPAА. *Design Guide: Structural Plywood and LVL*, EWPAА - Engineered Wood Products Association of Australasia, (2018), str. 42.

Прорачун оптерећења од ветра, дефинисани коефицијенти сигурности и дефинисане комбинација оптерећења остају непромењени у односу на претходни анализирани модел, а приказани су у поглављу *6.1.1 Симулациони модел 1* као и у прилозима: *Прилог 4* и *Прилог 5*³³⁹.

Пример 1.

Одређивање статичких утицаја и димензионисање гредног елемента 30/375 – 750 mm

1. Статички утицаји на најоптерећенијем елементу

Код модела пројектованог са међусобним ослањањем штапова на трећинама распона $1/3 L$, трансверзалне силе највеће су у првом и трећем пољу, док их у средишњем пољу нема, а моменти савијања највећи интензитет имају управо у средишњем пољу. На месту ослањања штапова међусобно, највећи је момент савијања као и трансверзална сила, те ће се димензионисање извршити на том месту. Кровна структура формирана је од штапова дужине 75 cm , док бочне придржајне тачке представљају суседни штапови и оне се налазе на удаљењу од $L_{ay} = 250 \text{ mm}$.

Статички утицаји за структуру приказани су у Табели 80. а нумерички резултати угиба у најоптерећенијем елементу по комбинацији оптерећења приказани су у Табели 81. Целокупни дијаграми за конструкцију (сл.180-187), као и димензионисање конструкције приказани су у *Прилог 7 – Димензионисање симулационог модела 2 - ојачани LVL елементи.*³⁴⁰

Табела 80. Статички утицаји код ослонца – штапови $b/d=30/310-620 \text{ mm}$

Комбинација оптерећења	Корекциони коефицијенти	M_o (kNm)	$\frac{M}{k_1}$ (kNm)	V_o (kN)	$\frac{V}{k_1}$ (kN)
I – стално оптерећење	1.35 G	11.23	$\frac{11.23}{0.57} = 19.70$	44.89	$\frac{44.89}{0.57} = 78.75$
II – стално и кратка изложеност покретном оптерећењу	1.20 G + 1.50 Q	9.99+12.21= 22.19	$\frac{22.19}{0.94} = \mathbf{23.60}$	88.67	$\frac{88.67}{0.94} = \mathbf{94.32}$
III – стално оптерећење и ветар (сишуће)	0.9 G – W_u	4.58	$\frac{4.58}{1.00} = 4.58$	18.30	$\frac{18.30}{1.00} = 18.30$
IV – стално оптерећење, ветар и кратка изложеност покретном оптерећењу	1.20 G – W_u + $\psi_s Q$	15.22	$\frac{15.22}{1.00} = 15.22$	60.79	$\frac{60.79}{1.00} = 60.79$

2. Димензионисање носача код ослонца

Димензије греде код ослонца:

³³⁹ погледати поглавље *6.1.1 Симулациони модел 1*, стр. 227, и то: Дефинисање комбинација оптерећења конструкције; *Прилог 4 - Дефинисање оптерећења на конструкцијама*, стр.267; погледати *Прилог 5 – Одређивање коефицијената сигурности и употребљивости објекта*, стр.267.

³⁴⁰ погледати *Прилог 7 – Димензионисање симулационог модела 2 - ојачани LVL елементи*, стр.296.

375 × 30 mm, ($b_{ef.} = 25.8 - 14\%$ слојева управно оријентисаних);

$$A_e = 9675 \text{ mm}^2, I_x = 1.13 \times 10^8 \text{ mm}^4, W_x = 6.05 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$L_{ay} = 250 \text{ mm}$ размак између бочних придржајних тачака греде у оси z.

Димензионисање на основу савијања

Одређивање потребног отпорног момента

$$M_d \geq M$$

$$M_d \geq \emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} f'_b W_x$$

$$W_{x,pot} \geq \frac{M}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} f'_b}$$

$$W_{x,pot} = 5.30 \times 10^5 \text{ mm}^3 < W_{x,stv} = 6.05 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$$f'_{b,stv} = 67.47 \text{ MPa} < f'_b = 77 \text{ MPa}$$

Напони савијања су у границама допуштених напона.

Димензионисање на основу смицања

Одређивање потребне површине попречног пресека

$$V_d \geq V$$

$$V_d \geq \emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 f'_s A_s$$

$$A_s = 5822.82 \text{ mm}^2$$

$A_s < A_e = 9675 \text{ mm}^2$ за димензије 30 × 375 mm.

$$f_{v,edge} = \frac{V}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 A}$$

$$f_{v,edge} = 10.83 \text{ MPa} < f'_s = 18 \text{ MPa}$$

Напони смицања су у границама допуштених напона.

Контрола угиба

Одређивање допуштених угиба

Стално оптерећење $\Delta = L/200 = 14.75/200 = 0.073\text{m} = 73.75 \text{ mm}$

Оптећење од снега $\Delta = L/100 = 14.75/100 = 0.17\text{m} = 147.5 \text{ mm}$

Оптећење од ветра $\Delta = L/100 = 14.75/100 = 0.147\text{m} = 147.5 \text{ mm}$

Табела 81. Контрола угиба – штапови $b/d=30/310-620$ mm

Комбинација оптерећења	Корекциони коефицијенти		Δ_{max} (mm)	Δ_{max}
	$j_2 \times G$	$j_6 \times G$		
I – стално оптерећење	$2 G$	G	-98.53	L/150
II – стално и кратка изложеност покретном оптерећењу	$2 G + 1 Q$	$G + 1 Q$	-146.72	L/100
III – стално оптерећење и ветар (сишуће)	$2 G - W_u$	$G - W_u$	-81.31	L/181
IV – стално оптерећење, ветар и кратка изложеност покретном оптерећењу	$2 G - W_u + Q$	$G - W_u + Q$	-129.49	L/114

Угиби су прекорачени за случај оптерећења I.

Контрола контактних напона

Везе између гредних елемената остварене су њиховим усецањем. Трансверзална сила предаје се са елемента на елемент као сила притиска. Неопходно је извршити контролу контактнoг напона на месту ослонца. Утицаји у најоптерећенијем штапу конструкције приказани су на слици 186.

$$f_{c,edge} = 26 \text{ MPa}, Q_{max} = 88.67 \text{ kN}$$

$$f_{c,edge,stv} = \frac{Q}{A, stv} = 98.52 \text{ MPa}$$

$$f_{c,edge,stv} = 98.52 \text{ MPa} > f_{c,edge} = 26 \text{ MPa}$$

Контактни напони су прекорачени.

Напони притиска по површини којом се остварује контакт између елемената и преношење силе притиска су прекорачени. Веза се мора додатно обезбедити и предвидети преношење оптерећења између елемената посредством окова у виду вијака и металних подвеза, или у виду дрвених елемената везе и вијака. Додатно оптерећење које ће везни елементи представљати на конструкцији узето је у разматрање приликом анализе оптерећења. Димензионисање и прорачун везних елемената као ни детаљи везе неће бити тема разматрања у оквиру овог рада.

Одређивање статичких утицаја у стубу димензија $100 \times 30 \text{ mm}$

1. Статички утицаји у најоптерећенијем елементу

Стубови су формиран и истоветно као и гредни елементи, путем удвојеног пресека ширине $2b = 2 \times 15 \text{ mm}$, и висине $H = 130 \text{ mm}$, како би се проверила њихова стабилност у границама допушеног извијања стуба. Статички утицаји за најоптерећенији стуб у структури приказани су у Табели 82. Статички утицаји у стубу - $b/d=30/100 \text{ mm}$. Поступак димензионисања стуба приказан је у Прилог 7 – Димензионисање симулационог модела 2 - ојачани LVL елементи.³⁴¹

Комбинација оптерећења	Корекциони коефицијенти	N_o (kN)	$\frac{M}{k_1}$ (kNm)
I – стално оптерећење	1.35 G	-3.15	$\frac{3.15}{0.57} = 3.35$
II – стално и кратка изложеност покретном оптерећењу	1.20 G + 1.50 Q	-2.80-3.39=-6.19	$\frac{6.19}{0.94} = 6.58$
III – стално оптерећење и ветар (сишуће)	0.9 G – W_u	-1.29	$\frac{1.29}{1.00} = 1.29$
IV – стално оптерећење, ветар и кратка изложеност покретном оптерећењу	1.20 G – W_u + $\psi_s Q$	-4.25	$\frac{4.25}{1.00} = 4.25$

2. Димензионисање стуба

Димензије стуба:

$100 \times 30 \text{ mm}$, ($b_{ef} = 25.8 - 14\%$ слојева управно оријентисаних);

$$A_e = 2580 \text{ mm}^2, I_x = 2.15 \times 10^6 \text{ mm}^4, I_y = 1.43 \times 10^5 \text{ mm}^4$$

$$L_a = 1300 \text{ mm} \text{ дужина извијања стуба за осе } x \text{ и } y.$$

Контрола напона у стубу

$$N_{d,cx} \geq N_c; N_{d,cy} \geq N_c;$$

$$N_{d,c} = \emptyset k_1 k_4 k_6 k_{12} f'_c A_c$$

$$f_{c,x,stv} = 2.98 \text{ MPa} < f_c = 50 \text{ MPa}$$

$$f_{c,y,stv} = 18.99 \text{ MPa} < f_c = 50 \text{ MPa}$$

Напони су у границама допуштених напона.

³⁴¹ погледати Прилог 7 – Димензионисање симулационог модела 2 - ојачани LVL елементи, стр.282.

На основу контроле допуштених напона притиска у стубу, усваја се стуб димензија попречног пресека $b/d = 30/100 \text{ mm}$.

Како се приликом димензионисања виткост стуба обезбеђује умањењем граничне носивости стуба применом коефициента виткости k_{12} , у даљем кораку приказаће се вредност граничне виткости за анализирани стуб, посматрано по осама.

$$\lambda_x = \frac{L_x}{i_x} = \frac{1300}{0.289 \times 30} = 149.94$$

$$\lambda_y = \frac{L_y}{i_y} = \frac{1300}{0.289 \times 100} = 44.98$$

Виткост елемента је мања од граничне виткости за главне конструктивне елементе која износи $\lambda_i = 150$.

6.1.3 Симулациони модел 2 – димензионисање егзоскелета применом неојачаног LVL-а

6.1.3.1 Димензионисање кровне структуре - неојачани LVL гредни носач

Како би се извршила упоредна анализа ојачаног и неојачаног носача и одредили предности и недостаци за оба наведена материјала, исти просторни модел анализираће се са механичким карактеристикама неојачаног носача, добијених експерименталним испитивањем. Механичке карактеристике неојачаних носача, тј. контролних узорака испитаних плоча, које ће се користити приликом димензионисања елемената, приказане су у Табели 83. Модел је анализиран са свим оптерећењима и корекционим коефицијентима претходно дефинисаним за модел 2.

Табела 83. Механичке карактеристике материјала неојачаног узорка примењене у димензионисању носача

Механичке карактеристике материја–а - LVL-а контролни неојачани носачи – ЕК4			
Чврстоћа на смицање у равни плоче	$f_{v,0,flat}$	4.0	MPa
Савојна чврстоћа у равни плоче	$f_{m,0,edge}$	56	MPa
Модул еластичности при савијању	$f_{v,0,edge}$	7925	MPa
Чврстоћа на смицање управно на раван плоче	$f_{v,0,edge}$	12.5	MPa
Притисна чврстоћа у равни плоче паралелна влакнима	$f_{c,0}$	36	MPa
Притисна чврстоћа у равни плоче управна на влакна	$f_{c,90,edge}$	13	MPa
Затезна чврстоћа у равни плоче паралелна влакнима	$f_{t,0}$	57	MPa

Пример 1.

Одређивање статичких утицаја и димензионисање гредног елемента 30/375 – 750 mm

1. Статички утицаји на најоптерећенијем елементу

Ради извршења упоредне анализе приликом димензионисања ојачаних и неојачаних носача, задржане су исте димензије гредних елемената, а тиме и једнака оптерећења на конструкцијама, те су вредности статичких утицаја остале непромењене. Најкритичнији статички утицаји јављају се у II комбинацији оптерећења, када је модел изложен једновремено сталном оптерећењу и оптерећењу од снега.

У Табели 84. приказани су статички утицаји релевантни за димензионисање носача, а нумерички резултати угиба у најоптерећенијем елементу по комбинацији оптерећења

приказани су у Табели 85. Целокупни дијаграми за конструкцију (сл, 188-193) као и димензионисање конструкције приказани су у Прилог 8 – Димензионисање симулационог модела 2 – неојачани LVL елементи, пример 1.³⁴²

Табела 84. Статички утицаји код ослонца – штапови b/d=30/375-750 mm

Комбинација оптерећења	Корекциони коефицијенти	M_o (kNm)	$\frac{M}{k_1}$ (kNm)	V_o (kN)	$\frac{V}{k_1}$ (kN)
II – стално и кратка изложеност покретном оптерећењу	1.20 G + 1.50 Q	9.99+12.21= 22.19	$\frac{22.19}{0.94} = \mathbf{23.60}$	88.67	$\frac{88.67}{0.94} = \mathbf{94.32}$

1. Димензионисање носача код ослонца

Димензије греде код ослонца:

30 × 375 mm, ($b_{ef} = 25.8 - 14\%$ слојева управно оријентисаних);

$$A_e = 9675 \text{ mm}^2, I_x = 1.13 \times 10^8 \text{ mm}^4, W_x = 6.05 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

Анализирани материјал се од претходног, ојачаног LVL-а разликује како у граничним напонима носивости, тако и у модулу елстичности. Сходно томе извршиће се корекција при одређивању корекционог коефицијента k_{12} , а који је у директној вези са модулом еластичности материјала и допуштеним напонима савијања.

Одређивање коефицијента k_{12}

$$k_{12}: \rho_b = 1.42$$

$$S_1 = 12.76$$

где је $L_{ay} = 250 \text{ mm}$ размак између бочних придржајних тачака греде у оси z.

$$\rho_b S_1 = 18.13$$

$$k_{12} = 1.5 - 0.05 \rho_b S_1 = 0.59 \text{ за } 10 \leq \rho_b S_1 \leq 20$$

Димензионисање на основу савијања

Одређивање потребног отпорног момента

$$M_d \geq M$$

$$M_d \geq \emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} f'_b W_x$$

$$W_{x,stv} = 6.05 \times 10^5 \text{ mm}^3 < W_{x,pot} = 7.89 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$$f'_{b,stv} = 73.10 \text{ MPa} > f'_b = 56 \text{ MPa}$$

Напони савијања носача су прекорачени ≈ 1.3 пута (30%).

³⁴² погледати Прилог 8 – Димензионисање симулационог модела 2 – неојачани LVL елементи, пример 1, стр. 290.

Димензионисање на основу смицања

Одређивање потребне површине попречног пресека

$$V_d \geq V$$

$$V_d \geq \emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 f'_s A_s$$

$$A_s \geq \frac{V}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 f'_s}$$

$$A_s = 8384.87 \text{ mm}^2 < A_e = 9675 \text{ mm}^2 \text{ за димензије } 30 \times 375 \text{ mm.}$$

$$f_{v,edge} = \frac{V}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 A}$$

$$f_{v,edge} = 10.83 \text{ MPa} < f'_s = 12.5 \text{ MPa}$$

Напони смицања су у границама допуштених напона.

Контрола угиба

Одређивање допуштених угиба

$$\text{Стално оптерећење} \quad \Delta = L/200 = 14.75/200 = 0.073\text{m} = 73.75 \text{ mm}$$

$$\text{Оптећење од снега} \quad \Delta = L/100 = 14.75/100 = 0.17\text{m} = 147.5 \text{ mm}$$

$$\text{Оптећење од ветра} \quad \Delta = L/100 = 14.75/100 = 0.147\text{m} = 147.5 \text{ mm}$$

Табела 85. Контрола угиба – штапови $b/d=30/375-750 \text{ mm}$

Комбинација оптерећења	Корекциони коефицијенти		$\Delta_{\max} \text{ (mm)}$	Δ_{\max}
	$j_2 \times G$	$j_6 \times G$		
I – стално оптерећење	$2 G$	G	-102.86	L/143
II – стално и кратка изложеност покретном оптерећењу	$2 G + 1 Q$	$G + 1 Q$	-203.21	L/72
III – стално оптерећење и ветар (сишуће)	$2 G - W_u$	$G - W_u$	-125.74	L/117
IV – стално оптерећење, ветар и кратка изложеност покретном оптерећењу	$2 G - W_u + Q$	$G - W_u + Q$	-139.31	L/106

Угиби су прекорачени за случај оптерећења I и II.

Ради даље анализе приступиће се повећању димензија попречног пресека елемената, како би се остварили допуштени напони савијања, али и утицало на умањење угиба у конструкцији.

Пример 2.

Одређивање статичких утицаја и димензионисање гредног елемента 30/630 – 1260 mm

1. Статички утицаји на најоптерећенијем елементу

Приликом промене димензија гредних елемената, долази до промене сталног оптерећења (сопствене тежине) на конструкцији, те су вредности статичких утицаја поново одређене. Као и у претходним случајевима, најкритичнији статички утицаји јављају се у II комбинацији оптерећења, када је модел изложен једновремено сталном оптерећењу и оптерећењу од снега.

У Табели 86. приказани су статички утицаји релевантни за димензионисање носача. Нумерички резултати угиба у најоптерећенијем елементу по комбинацији оптерећења приказани су у Табели 87. Целокупни дијаграми за конструкцију (сл.194-201), као и димензионисање конструкције приказани су у Прилог 8 – Димензионисање симулационог модела 2 – неојачани LVL елементи, пример 2.³⁴³

Табела 86. Статички утицаји код ослонца – штапови b/d=30/630-1260 mm

Комбинација оптерећења	Корекциони коефицијенти	M_o (kNm)	$\frac{M}{k_1}$ (kNm)	V_o (kN)	$\frac{V}{k_1}$ (kN)
II – стално и кратка изложеност покретном оптерећењу	1.20 G + 1.50 Q	14.41+12.21= 26.62	$\frac{26.62}{0.94} =$ 28.32	106.35	$\frac{106.35}{0.94} =$ 113.13

2. Димензионисање носача код ослонца

Димензије греде код ослонца:

30 × 630 mm, ($b_{ef} = 25.8 - 14\%$ слојева управно оријентисаних);

$$A_e = 16254 \text{ mm}^2, I_x = 5.38 \times 10^8 \text{ mm}^4, W_x = 1.71 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$L_{ay} = 250 \text{ mm}$ размак између бочних придржајних тачака греде у оси z.

Димензионисање на основу савијања

Одређивање потребног отпорног момента

$$M_d \geq M$$

$$M_d \geq \emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} f'_b W_x$$

$$W_{x,pot} \geq \frac{M}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} f'_b}$$

$$W_{x,pot} = 1.59 \times 10^6 \text{ mm}^3 < W_{x,stv} = 1.71 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$f'_{b,stv} = 52.06 \text{ MPa} < f'_b = 56 \text{ MPa}$$

Напони савијања носача су у границама допуштених напона. .

³⁴³ погледати Прилог 8 – Димензионисање симулационог модела 2 – неојачани LVL елементи, пример 2, стр. 295.

Димензионисање на основу смицања

Одређивање потребне површине попречног пресека

$$V_d \geq V$$

$$V_d \geq \emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 f'_s A_s$$

$$A_s \geq \frac{V}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 f'_s}$$

$$A_s = 10056.74 \text{ mm}^2 < A_e = 16254 \text{ mm}^2 \text{ за димензије } 30 \times 630 \text{ mm.}$$

$$f_{v,edge} = 7.73 \text{ MPa} < f'_s = 12.5 \text{ MPa}$$

Напони смицања су у границама допуштених напона.

Контрола угиба

Одређивање допуштених угиба

$$\text{Стално оптерећење} \quad \Delta = L/200 = 14.75/200 = 0.073 \text{ m} = 73.75 \text{ mm}$$

$$\text{Оптећење од снега} \quad \Delta = L/100 = 14.75/100 = 0.17 \text{ m} = 147.5 \text{ mm}$$

$$\text{Оптећење од ветра} \quad \Delta = L/100 = 14.75/100 = 0.147 \text{ m} = 147.5 \text{ mm}$$

Табела 87. Контрола угиба

Комбинација оптерећења	Корекциони коефицијенти		Δ_{max} (mm)	Δ_{max}
	$j_2 \times G$	$j_6 \times G$		
I – стално оптерећење	2 G	G	-107.51	L/137
II – стално и кратка изложеност покретном оптерећењу	2 G + 1Q	G + 1Q	-143.94	L/102.47
III – стално оптерећење и ветар (сишуће)	2G – W_u	G – W_u	-35.35	L/417
IV – стално оптерећење, ветар и кратка изложеност покретном оптерећењу	2G – W_u + Q	G – W_u + Q	-87.91	L/167.78

Угиби су прекорачени за случај оптерећења I.

Контрола контактних напона

$$f_{c,edge} = 13 \text{ MPa}, Q_{max} = 106.35 \text{ kN}$$

$$f_{c,edge,stv} = 118.16 \text{ MPa} > f_{c,edge} = 13 \text{ MPa}$$

Контактни напони су прекорачени.

Веза се мора додатно обезбедити и предвидети преношење оптерећења између елемената посредством окова у виду вијака и металних подвеза, или у виду дрвених подвезица и вијака. Додатно оптерећење које ће везни елементи представљати на конструкцији узето је у разматрање приликом анализе оптерећења. Утицаји у индиректним елементима који се преносе везом приказани су на слици 200.

6.1.3.2 Димензионисање стуба – неојачани LVL носач

Одређивање статичких утицаја у стубу димензија 100 × 30 mm

3. Статички утицаји у најоптерећенијем елементу

Стубови су формиран и истоветно као и гредни елементи, путем удвојеног пресека ширине $2b = 2 \times 15 \text{ mm}$, и висине $H = 130 \text{ mm}$, како би се проверила њихова стабилност у границама допуштеног извијања стуба. Табела 87. Статички утицаји у стубу – $b/d=30/100 \text{ mm}$. Димензионисање стуба приказано је у Прилог 8 – Димензионисање симулационог модела 2 – неојачани LVL елементи, одређивање статичких утицаја у стубу³⁴⁴.

Комбинација оптерећења	Корекциони коефицијенти	N_o (kN)	$\frac{M}{k_1}$ (kNm)
II – стално и кратка изложеност покретном оптерећењу	1.20 G + 1.50 Q	-4.03-3.39=-7.42	$\frac{7.42}{0.94} = 7.89$

Одређивање коефицијената сигурности и употребљивости објекта

Димензионисање стуба

Димензије стуба:

100 × 30 mm, ($b_{ef} = 25.8 - 14\%$ слојева управно оријентисаних);

$$A_e = 2580 \text{ mm}^2, I_x = 2.15 \times 10^6 \text{ mm}^4, I_y = 1.43 \times 10^5 \text{ mm}^4$$

$L_a = 1300 \text{ mm}$ дужина извијања стуба за осе x и y.

Контрола напона у стубу

$$N_{d,cx} \geq N_c; N_{d,cy} \geq N_c;$$

$$N_{d,c} = \emptyset k_1 k_4 k_6 k_{12} f'_c A_c$$

$$f_{c,stv} \leq f_c = 36 \text{ MPa}$$

$$f_{c,y,stv} = 3.75 \text{ MPa} < f_c = 36 \text{ MPa}$$

$$f_{c,y,stv} = 26.56 \text{ MPa} < f_c = 36 \text{ MPa}$$

³⁴⁴ погледати Прилог 8 – Димензионисање симулационог модела 2 – неојачани LVL елементи, одређивање статичких утицаја у стубу, стр. 301.

Напони су у границама допуштених напона.

На основу контроле допуштених напона притиска у стубу, усваја се стуб димензија попречног пресека $b/d = 30/100 \text{ mm}$.

$$\lambda_x = \frac{L_x}{i_x} = \frac{1300}{0.289 \times 30} = 149.94$$

$$\lambda_y = \frac{L_y}{i_y} = \frac{1300}{0.289 \times 100} = 44.98$$

Виткост елемента је мања од граничне виткости за главне конструктивне елементе која износи $\lambda_i = 150$.

6.1.3 Дискусија резултата

У овом истраживању анализирана је примена новоформираног материјала – LVL-а ојачаног карбонским влакнима, за формирање егзоскелетних структура архитектонских објеката. Приказани симулациони модели у овом поглављу представљају једну од могућности примене испитаног материјала, уз извршене статичке анализе на основу којих су димензионисани елементи конструкције, а у циљу анализе њиховог понашања у структури егзоскелета и одређивању интензитета напрезања у различитим напонским стањима којима могу бити изложени.

Током анализе симулационог модела 1 као основни проблем поставља се мала ширина попречног пресека гредних елемената од којих је формирана конструкција. При формирању новог композитног материјала лабораторијски услови су условили да се испитивање ради на плочама мале скале, што подразумева и испитне узорке мале скале. Сва испитивања су извршена на плочама приближне дебљине $\approx 15 \text{ mm}$. Први случај одређивања димензија попречног пресека елемената анализиран кроз симулациони модел 1, распона $L = 12.82 \text{ m}$, приказује да су напони савијања у том случају знатно прекорачени, што условљава повећање димензија попречног пресека елемената. Прекорачење напона у овом, али и у већини других случајева условљено је малом ширином попречног пресека елемента ($b = 15 \text{ mm}$). Мала ширина попречног пресека директно утиче на повећање висине попречног пресека, а самим тим и виткост носача, чиме се директно утиче на редукцију допуштених напона савијања путем коефицијента за стабилност конструкције. Коефицијент редукције допуштених напона k_{12} , у директној је зависности од односа страница попречног пресека, али и од односа статичке висине елемента и размака бочних придржајних тачака и тиме условљава бочна извијања линијских елемената.

Како би се смањило утицај извијања на даљу анализу у оквиру симулационог модела 1, приступило се повећању ширине попречног пресека гредних елемената, усвајајући минималну ширину пресека LVL гредних носача која се може наћи на тржишту ($b = 45 \text{ mm}$). Вредности механичких карактеристика материјала су задржане, иако би повећање броја слојева фурнира условило и повећање вредности допуштених напрезања у елементу. Даље нумеричке анализе у оквиру овог модела показују да је малим повећањем ширине и смањењем статичке висине попречног пресека у односу на претходно анализирани модел постигнуто оптималније искоришћење пресека, што је уочљиво у примеру 2. Елемент је такође формиран као елемент са засецима како би се формирала реципрочна конструкција у равни, без искоришћења механичких спојних средстава. Пресек је димензионисан на местима највећих момената и трансверзалних сила, што одговара месту усека, односно ослонцу суседног елемента. Напони савијања носача у овом примеру су у горњим границама искоришћености пресека, док код напона смицања постоји резерва у искоришћености напона, као и за деформацију носача.

Наведени пример показује да ојачање материјала карбонским влакнима не утиче повољно само на савојна и смичућа својства носача, већ и на повећање допуштених напона попречног притиска. Тиме је код анализираниог носача могуће силу са елемента на елемент предати искључиво путем контактне површине, односно осигурано је преношење оптерећења путем засека на елементима. Ипак, због велике висине носача, као и односа ширине и висине потребно је обезбедити додатну стабилизацију носача путем окова. Недостатак овог гредног елемента је и даље велико бочно извијања носача које условљава смањење допуштених напона савијања путем корекционих коефицијената и постављање бочних придржајних тачака на малим растојањима. Како би се избегло постављање бочних придржајних тачака, потребно је пројектовати елементе са рационалнијим односом ширина ширине и висине попречног пресека.

Кроз пример 3 димензионисањем је приказано је да се усвајањем мањих статичких висина елемената сви напони и угиби могу наћи у границама допуштених, а да се пропорционалнијим одређивањем димензија попречног пресека утиче на смањење извијања и омогућава повећање размака бочних придржајних тачака елемента. Код овог елемента није могуће формирати конструкцију у равни без примене механичких спојних средстава у вези између гредних елемената. На овом примеру уочава се предност добрих механичких особина ојачаних LVL плоча. За реализацију анализирание кровне конструкције површине $12.82 \times 12.82 \text{ m}$, према дефинисаним димензијама попречног пресека носача $40 \times 360 \text{ mm}$ утрошак материјала је веома мали и износи $V = 2.419 \text{ m}^3$ грађе, што представља свега 1.47 cm грађе по m^2 кровне конструкције, док укупна тежина кровне конструкције износи $m = 1.233 \text{ t}$.

У циљу испитивања елемената у конструкцији са већом ширином пресека, а тиме и механичким карактеристика добијених експерименталним путем приступило се формирању симулационог модела 2, распона $L = 14.75 \text{ m}$, пројектованог од штапова мале дужине $L = 0.75 \text{ m}$ и ширине $2b = 30 \text{ mm}$. Кроз димензионисање приказано је да се пројектовањем конструкције елементима ојачаним влакнима може постићи оптимално искоришћење напона савијања и смичања, са малом резервом у искоришћењу напрезања носача, док су деформације искоришћене у максималној мери, и на границама су допуштених деформација. Резултати истраживања као и прорачун показали су да су контактни напони у овој структури прекорачени, те се не може комплетна сила предати контактом, већ се мора обезбедити додатно преношење силе путем окова.

Да би се додатно указало на предности ојачаног материјала исти модел формиран је применом неојачаних LVL плоча, а потом и димензионисан на основу механичких карактеристика добијених експерименталним испитивањем за плоче комбинације 4 (ЕК4). У првом примеру димензионисања неојачаног модела извршила се контрола истих димензија попречног пресека као што је то учињено за ојачани модел. Исти елемент, једнако оптерећен и са истим димензијама попречног пресека применом неојачаног материјала достиже прекорачење напона савијања око 30% у односу на допуштени напон, прекорачење угиба $\approx 40\%$, док су смичућа напрезања у границама допуштених. Знатним повећањем статичке висине постиже се да су стварни напони и угиби у елементу у границама допуштених напрезања и деформација. Тиме се повећава утрошак употребљеног материјала за реализацију конструкције, као и сопствена тежина саме конструкције. За формирање конструкције од неојачаног материјала потребно је $\approx 65\%$ више дрвеног материјала. Упоредна анализа резултата димензионисања ојачаних и неојачаних плоча кроз симулациони модел 2 приказана је у Табели 88.

Димензионисање стубова код оба модела рађено је за висину стуба $H = 130 \text{ cm}$, како би се димензионисање извршило са ширином стуба удвојеног испитаног пресека ($2b = 30 \text{ mm}$). Виткост за оба случаја је у границама допуштеног, као и напони савијања за

обе осе стуба. Пресек је у оба случаја искоришћен са знатном резервом за повећање оптерећења у стубу.

На основу свега наведеног може се закључити да се плоче на бази фурнира ојачаног влакнима добро понашају у конструкцијама код којих су елементи изложени савијању, смицању и притиску у равни плоче.

Табела 88. Упоредне вредности остварених напрезања у носачима за модел 2

Симулациони модел 2 $A = 14.75 \times 14.75 \text{ m}$	ОЈАЧАНЕ ПЛОЧЕ (ЕК3)		НЕОЈАЧАНЕ ПЛОЧЕ (ЕК4)	
Димензије попречног пресека греде $h/h' \times b^{345}$ стуба $a \times b$	30/375 – 750 mm 30 × 100 mm		30/375 – 750 mm 30 × 100 mm	
$f'_{b,stv} (f'_b) \text{ MPa}$	67.47 (77)		73.10 (56)	
$f_{v,edge,stv} (f_{v,edge}) \text{ MPa}$	10.83 (18)		10.83 (12.5)	
$f_{c,edge,stv} (f_{c,edge}) \text{ MPa}$	98.52 (26)		118.16 (13)	
$f_{c,x,stv} (f_{c,x})$	2.98 (50)		3.75 (36)	
$f_{c,y,stv} (f_{c,y})$	18.89 (50)		26.56 (36)	
Δf	L/100		L/72	
Количина материјала (m ³)	24.345		24.345	
Тежина конструкције (Т)	12.412		12.412	
			20.524	

³⁴⁵ Где је h - висина греде у пољу, h' - висина греде код ослонца, b – ширина пресека греде/стуба, a – димензија стуба.

Плоче на бази фурнира представљају изузетан потенцијал за развој и примену у многим областима индустрије, а кроз овај рад посебно се истиче њихов значај и могућности побољшања конструктивних карактеристика формирањем композитног производа на бази фурнира и полимера ојачаним влакнима, а у циљу примене у архитектури и грађевинарству за формирање конструктивних елемената. Истраживање је структурирано у две целине. Кроз прву целину дефинишу се и анализирају начини примена плоча на бази фурнира у архитектури, при чему се пажња усмерава како на фурнирске, тако и на LVL плоче и линијске конструктивне елементе. Фурнирске плоче најчешћу примену имају у конвенционалном смислу, као елементи облоге или као површински елементи за укрућење у хоризонталним и вертикалним дијафрагмама. Оно што се уочава је да због своје мале статичке висине ови елементи не могу самостално да прихвате оптерећење које делује управно на раван плоче, те се из наведеног разлога они увек формирају у виду сендвич плоча, односно пројектују се као сложени пресеци (Т-пресек или сандучасти пресек) заједно са потконструкцијом. У тако пројектованом систему фурнирске плоче имају улогу прихватања сила смицања управно на раван плоче када је конструкција изложена хоризонталном оптерећењу, или смицања у равни плоче које се јавља као последица савијања под дејством гравитационог оптерећења. Као један од конвенционалних начина примене фурнирске плоче је у виду гредног елемента, где се због мале дебљине плоче која резултира великим бочним деформацијама не може јавити као самосталан носач већ као сложен гредни носач у виду I-носача или носача сандучастог попречног пресека. Код сложених гредних носача ребро гредног носача (фурнирска плоча) највише је изложено смичућим напрезањима и то смицању управном на раван плоче. Сложени гредни носачи у виду I-носача могу се формирати и од LVL носача у целости, или најчешће само ножице, у зони притиска и затезања носача, где се захтевају добре конструктивне карактеристике материјала, а посебно добра отпорност на савијање, притисак и затезање.

Потенцијал веће примене овог материјала у архитектури и грађевинарству посебно је уочљив у неконвенционалним начинима и то као елемента у конструкцијама са просторним носећим дејством – полигоналним љускама и наборима, или у виду гредног елемента у реципрочним структурама. Код просторних структура најзначајнија су напрезања која се јављају у површинским елементима као последица сила које делују у равни плоче, а доминантна су смичућа напрезања уз ивице плоче, у зони ослонаца. Анализом рачунских симулационих модела просторних структура уочено је да је највеће ограничење материјала немогућност плоча да прихвати моменте савијања који настају оптерећењем управно на раван плоче, при чему се морају формирати елементи потконструкције код структура које су оптерећење моментима савијања. Важно је истаћи да су у свим просторним структурама плоче на бази фурнира изложене смицању у равни плоче и смицању управном на раван плоче као и да се у одређеним структурама као што су љуске и набори силе са елемента на елемент преносе управо смицањем у равни плоче по ивицама плоче. Анализом реципрочних структура, а посебно оних формираних у једној равни, чиме се смањује висина целокупне конструкције и омогућава лакша монтажа, уочава се потреба за добром отпорношћу линијских елемената на савијање, али и смицање које је доминантно у зони засека конструктивних елемената како би се формирале везе и омогућило постављање елемената у једној равни.

На основу истраживања и анализау првом делу рада закључено је да је неопходно да материјал на бази фурнира има добру отпорност на смицање у равни и смицање управно на раван плоче нарочито на местима формирања веза између елемената и местима ослањања

конструкције. У циљу проширења могућности примене овог материјала, а посебно за формирање конструкција већих распона, мора се утицати и на унапређење савојних својстава материјала. Осим наведеног неопходно је да плочасти елементи имају добру отпорност на притисак и затезање у равни плоче, а посебно у оба правца, како би се омогућила примена плоча у конструктивним решењима са просторним носећим дејством.

У првој целини рада извршена је и анализа могућности унапређења конструктивних карактеристика плоча према претходно дефинисаним захтевима. Разматрани су потенцијали формирања композитног производа на бази фурнира и полимера ојачаним карбонским влакнима. Анализом досадашњих истраживања у том пољу закључено је да ојачање плоче уметањем FRP-а између фурнирских листова у композитним производима може вишеструко утицати на повећање носивости, као и да се положај и оријентација влакана мора одредити посматрајући тачно који финални резултат се жели постићи. Кроз претходна истраживања приказано је да се модул еластичности на овај начин може повећати и до 2.6 пута, као и да се допуштена смичућа напрезања у равни плоче могу увећати за 3 пута у односу на контролне узорке. Претходна истраживања у овој области базирала су се у највећем обиму на испитивање механичких својстава плоче за оптерећења која делују управно на раван плоче. Закључено је да су најчешћи проблеми код ојачаних плоча условљени разликом у напрезањима између слојева фурнира и FRP-а, при чему долази до деламинације у слоју FRP-дрво. Да би се таква оштећења избегла, плоче треба формирати тако да напрезање у слоју влакана има што мање ефекте на напрезање у слоју фурнира, као и да влакна треба оријентисати тако да FRP преузме највећа напрезања. Анализом адхезива који се могу применити за формирање композитних производа на бази фурнира и FRP-а дошло се до закључка да је најбоље применити адхезиве на бази резорцинол-формалдехида, фенол-формалдехида или епокси адхезива.

У другој целини рада објашњено је формирање новог композитног производа – ојачаних плоча на бази фурнира и полимера армираног карбонским влакнима. Дата је експериментална анализа конструктивних карактеристика добијених производа као и провера и анализа понашања елемената кроз симулациони модел конструкције. Први део лабораторијских испитивања има за циљ одређивање квалитета адхезива за дрвене конструкције који су расположиви у региону. Испитано је неколико врста епокси адхезива као и меламин-уреа формалдехидни адхезив, који се примењује за формирање LLD носача. Дефинисано је да ће се даље испитивање вршити тестирањем плоча формираних путем две врсте адхезива. Прва серија плоча формирана је применом епоксидног адхезива, док је за другу серију плоча одабран меламин-уреа формалдехидни адхезив, пре свега због своје знатно ниже цене у односу на епоксидни адхезив, али и због своје специфичне примене за производњу композитних производа на бази дрвета, а пре свега плоча на бази фурнира. Осим дефинисања адхезива, утврђено је да ће се плоче формирати од дрвета тополе. Предност тополе огледа се и у томе што је она дрво брзог раста, лаке обновљивости и ниске цене сировине, а њен недостатак и разлог зашто се не примењује за формирање конструктивних елемената на бази дрвета су управо слабије механичке карактеристике самог дрвета.

Централни део рада говори о формирању новог композитног производа и анализи његових механичких карактеристика. Сам производ формиран је у четири различите комбинације у односу на оријентацију и положај влакана у склопу. Свака комбинација формирана је применом две претходно наведене врсте адхезива. Комбинације ојачања дефинисане су на следећи начин:

- Комбинација 1(EK1) – плоче ојачане карбонском тканином постављеном у првој и шестој слубници (S1||6||), једносмерно оријентисаној, карбонска влакна постављена подужно, паралелна спољним листовима фурнира; ојачање доминатно утиче на повећање модула еластичности и савојних својстава материјала;

- Комбинација 2 (ЕК2) – плоче ојачане карбонском тканином постављеном у првој и шестој слубници паралелно оријентисаном и трећој и четвртој слубници управно оријентисаном у односу на правац оријентације спољашњих листова фурнира (S1||3±4±6||); ојачања постављена у првој и шестој слубници директно утичу на повећање савојних својстава, док ојачања ближе неутралној осе, у трећој и четвртој слубници доприносе повећању смичућих напрезања и притиска управно на смер влакана;
- Комбинација 3 (ЕК3) – плоче ојачане карбонском тканином постављеном у два слоја управно један на други, формирајући мрежу у два правца; тканина је постављена у првој и шестој слубници (S1||±6±||), водећи рачуна о симетрији попречног пресека; ојачања постављена паралелно влакнима утичу на повећање савојних својстава, док ојачања управно на влакна фурнира доприносе повећању смичућих напрезања и притиска управно на смер влакана; ова комбинација ојачања дефинисана је ради анализе утицаја положаја ојачања на смичућа својства;
- Комбинација 4 (ЕК4) – представља неојачане плоче, односно контролне референтне узорке.

Предмет испитивања у овом истраживању је праћење понашања носача, односно утврђивање деформацијског и напонског стања при испитивању чврстоће на смицање, савојних својстава, притисне чврстоће и затезне чврстоће при оптерећењу, све до лома. Резултати испитивања приказани су кроз поглавље 5.5 *Приказ и интерпретација резултата експерименталног истраживања*³⁴⁶. Оно што је важно истаћи је чињеница да плоче са примењеним меламина-уреа формалдехидним адхезивом нису издржале тестирања, односно да је код ојачаних плоча приликом испитивања механичких карактеристика дошло до раслојавања у слоју FRP-дрво, те се може закључити да овај адхезив, примењен на начин наведен у раду, поступком топлог пресовања, није погодан за формирање композитног производа на бази фурнира и FRP-а. За разлику од меламина-уреа формалдехидног адхезива, епоксидни адхезив даје изузетне резултате приликом испитивања механичких карактеристика. Применом епоксидног адхезива могуће је постићи адекватну везу између дрвета и ојачања, при чему се код било којег од наведених експерименталних испитивања критични лом у материјалу догађа по супстрату, односно по дрвету. У поређењу свих ојачаних плоча, приликом испитивања смицања у равни плоче, модула еластичности и напона савијања, све плоче показују уједначена понашања и резултате, где се повећање савојне чврстоће креће око 35±3%, а побољшање модула еластичности ≈50% у односу на контролни узорак. Чврстоћа на смицање у равни плоче код свих ојачаних узорака је мања у односу на чврстоћу на смицање контролног узорка. Чврстоћа на смицање управно на раван плоче неочекивано даје приближно сличне резултате за ојачане плоче Комбинације 1 и 2, код којих је увећана за ≈20% у односу на контролни узорак. Код плоче Комбинације 2 резултати не показују постојање слоја карбонских влакана управно оријентисаних на правац фурнира, а које је важно за ову врсту напрезања. Ојачањем плоча Комбинације 3, односно постављањем карбонских влакана у виду мреже и њиховим позиционирањем даље од неутралне осе испитивање је показало да је могуће утицати на повећање носивости на смицање управно на раван плоче чак 40% у односу на контролне узорке. Код испитивања притисне чврстоће у правцу паралелном влакнима спољашњих фурнирских листова, влакна постављена у управном правцу на смер дејства силе плоча Комбинације 2 (ЕК2) и плоча Комбинације 3 (ЕК3) немају посебних ефекта на побољшање. Код свих комбинација ојачања за напрезање притисне чврстоће у правцу паралелном влакнима спољашњих фурнирских листова побољшање је врло слично, а највећи

³⁴⁶ погледати поглавље 5.5 *Приказ и интерпретација резултата експерименталног истраживања*, стр. 164.

ефекат уочава се на плочама Комбинације 1 (ЕК1) где је критична сила притиска увећана за 44.60% у односу на контролни узорак Комбинације 4 (ЕК4). Као и код притисне, тако и код затезне чврстоће у равни плоче улогу ојачања преузимају она влакна позиционирана у правцу дејства силе, сходно томе, при испитивању затезне чврстоће у правцу влакана фурнира додатни слојеви карбонске тканине у плочама Комбинација 2 и 3 нису имала ефекат на повећање носивости на затезање. Затезање преузимају карбонска влакна подужно постављена у прву и шесту слубницу. У односу на контролни узорак, чврстоћа на затезање плоча Комбинације 1 повећана је за 106.82%. Влакна управно оријентисана у односу на правац влакана фурнира, осим за смицање управно на раван плоче највећи ефекат су имала на граничну носивост при испитивању попречног притиска, односно притиска у равни плоче управног на правац влакана фурнира. Код овог напонског стања гранична сила притиска највећа је у плочама Комбинације 2 (ЕК2) а то повећање је 110% у односу на контролни узорак (ЕК4). Ојачане плоче Комбинација 2 (ЕК2) и Комбинација 3 (ЕК3) показују веома уједначене резултате осим при испитивању смицања управно на раван плоче, те се не може јасно утврдити ефекат утицаја карбонског ојачања постављеног у попречном правцу у односу на положај наспрам неутралне осе плоче. Ојачања код којих су влакна постављена у виду мреже код плоча Комбинације 3 (ЕК3) показала су најбоље понашање при испитивању механичких карактеристика, а посебно приликом савијања управно на раван плоче, те су сходно томе она одабрана за даље испитивање понашања материјала при конструктивној примени у архитектури и грађевинарству.

У поређењу са резултатима испитивања других аутора, приказаних кроз литературу, резултати испитивања добијени експерименталним путем у оквиру овог рада могу се поредити са неколико истраживања, и при томе у односу на њих показују унапређење у погледу носивости. Упоредни приказ резултата извршен је у Прилогу 9³⁴⁷. Резултати савојне чврстоће и модула еластичности при савијању у равни плоче могу се поредити са резултатима испитивања које је спровео Бал³⁴⁸, ојачавајући шестослојну тополову LVL плочу полимерима армираним стакленим влакнима (GFRP), применом фенол-формалдехидног адхезива. Експерименталном анализом у оквиру овог рада, са дупло мањим утрошком карбонске тканине, постигнуто је повећање носивости на савијање у равни плоче ојачаних узорака $\approx 60\%$ у односу на ојачане узорке у наведеном истраживању, док су модули еластичности увећани за $\approx 45\%$. Чврстоћу на затезање у равни плоче испитивали су Брезовић и други³⁴⁹, ојачањем петослојне тополове фурнирске плоче двосмерно плетеним карбонским тканинама у виду мреже, применом резорцинол-фенол-формалдехидног адхезива. Наведена испитивања показују веома сличне резултате затезне чврстоће у односу на резултате добијене у оквиру експериментална истраживања у оквиру овог рада³⁵⁰, док су резултати испитивања чврстоће на смицање у слоју лепка увећани ≈ 2 пута у односу на резултате добијене у оквиру испитивања Брезовић и други³⁵¹, као и Брезовић, Јамберковић, и др.³⁵² Испитивање смичуће чврстоће управно на раван плоче, као и притисне чврстоће у равни плоче није било тема претходних истраживања, те не постоје резултати са којима би се могли поредити резултати добијени у оквиру овог рада.

³⁴⁷ погледати Прилог 9 – Упоредни приказ претходних истраживања ојачања на механичка својства плоча на бази фурнира и експерименталних истраживања спроведених у оквиру рада, стр. 303.

³⁴⁸ Bekir Cihad Bal, "Flexural properties, bonding performance and splitting strength of LVL reinforced with woven glass fiber", *Construction and Building Materials* 51(2014): 9-14.

³⁴⁹ Mladen Brezović, Vladimir Jambreković, Jaroslav Kljak, „Utjecaj karbonskih vlakana na neka relativna svojstva furnirskih ploča“, *Drvna industrija* 53 (1), (2002): 23-31.

³⁵⁰ погледати 5.4.6 Одређивање затезне чврстоће паралелно влакнима спољашњих листова фурнира, стр.163.

³⁵¹ Mladen Brezović, Vladimir Jambreković, Jaroslav Kljak, „Utjecaj karbonskih vlakana na neka relativna svojstva furnirskih ploča“, *Drvna industrija* 53 (1), (2002): 23-31.

³⁵² Brezović, Mladen, Vladimir Jambreković, и Stjepan Pervan. "Bending properties of carbon fiber reinforced plywood." *Wood Research* 48(4),(2003):13-24.

Анализа симулационог модела архитектонске структуре и њено димензионисање представља завршну фазу рада, у коме се анализирају начини понашања материјала у конструктивном склопу, као и могућности које он пружа. У овом делу рада као механичке карактеристике материјала дефинисани су капацитети носивости добијени претходно спроведеним експерименталним испитивањем у лабораторијским условима. Приступило се формирању два симулациона модела, обликованих као реципрочна конструкција у равни крова, док су вертикални елементи (зидови) формирану у виду плоча или стубова. Симулациони модел 1 обликован је као конструкција распона $L = 12.82 \text{ m}$, формирана од штапова дужине $L = 3 \text{ m}$, постављених у равни. Како би се реципрочна конструкција формирала у равни и омогућило оптерећење штапова чистим савијањем, везе између елемената формиране су усецима, те је на местима највећих смичућих напрезања у елементу уједно и најмања статичка висина попречног пресека штапа. Димензионисањем елемената кровне конструкције кроз неколико корака утврђено је да је највећи недостатак управо мала ширина попречног пресека елемента а тиме и однос ширине и висине попречног пресека, који резултира бочним извијањем носача и захтева постављање елемената у виду бочних придржајних тачака на малим растојањима. Димензионисањем истих елемената са нешто већом ширином попречног пресека смањује се могућност бочног извијања, и показују предности ојачаних плоча у конструктивном склопу. Основна предност ојачаних плоча је њено добро понашање при изложености савијању, где се малим димензијама попречног пресека елемената, пре свега малим статичким висинама формирају конструкције великог распона у односу на димензије попречног пресека, што резултира малим утрошком материјала. За кровну структуру распона $12.82 \times 12.82 \text{ m}$, утрошак материјала је свега 3.389 m^3 , што је изузетно занемарљиво у односу на површину кровне конструкције, и одговара запремини од $0.02 \text{ m}^3/\text{m}^2$ конструкције. Другу предност представљају остварене мале димензије попречног пресека елемената, које се крећу у опсегу $h \approx L/20$. Овај материјал захваљујући својим високим вредностима чврстоће на смицање пружа могућност формирања веза путем усека, и добро подноси смичућа напрезања на местима ослабљења пресека. Највећа предност материјала истиче се унапређењем понашања материјала приликом изложености силама притиска и повећања напона попречног притиска, што омогућава формирање везе усецањем и преношењем оптерећења са елемента на елемент непосредним контактом.

Водећи рачуна о томе да је испитивање вршено на елементима мале скале, а како би се утврдила носивост материјала у својој испитаној ширини попречног пресека $b = 15 \text{ mm}$, приступило се формирању симулационог модела 2, распона $L = 14.75 \text{ m}$, пројектованог од штапова малих дужина $L = 0.75 \text{ m}$, код којих бочне придржајне тачке представљају суседни штапови који се ослањају или на које се штап ослања. За ширину попречног пресека елемента усвојена је удвојена плоча, ширина $2b = 30 \text{ mm}$. У овом моделу конструкција је доминантно изложена трансверзалним силама, а потом и моментима савијања. Ојачани материјал добро прихвата обе врсте напрезања, а као проблем јављају се велики угиби, који захтевају повећање статичке висине попречног пресека. И поред наведеног, пресек је и даље у границама статичке висине $h \approx L/20$. Иако су напони попречног притиска знатно увећани у односу на неојачани узорак, због мале ширине пресека и великих сила које се јављају у елементима, напони су прекорачени, те је неопходно осим усецима везе додатно обезбедити оковима.

Исти модел анализиран је и са неојачаним плочама, где резултати показују да су са истим висинама попречног пресека напони савијања и угиби знатно прекорачени ($\approx 30\%$), те да је неопходно повећати статичке висине елемената. Како би се остварили напони савијања, напони смицања и деформације елемента у границама допуштених, статичка висина увећана је 1.7 пута у односу на неојачане плоче, и тиме остварена висина пресека $h \approx L/12$. Самим тим, утрошак материјала за реализацију конструкције од неојачаних плоча је 1.65 пута већи у односу на утрошак дрвета код ојачаних плоча, а тиме и сопствена тежина конструкције. На повећање сопствене тежине конструкције у том случају утичу и елементи везе путем којих се

оне морају остварити, јер због прекорачења напона попречног притиска није могуће везе остварити само усецањем елемената и њиховим контактом.

Анализом стубова, захваљујући високим притисним чврстоћама како ојачаног, тако и неојачаног материјала напони су у границама допуштених за испитане димензије стубова, с тим што су код ојачаних елемената напони неискоришћени, а код неојачаних јавља се боље искоришћење напона притиска. Код ових елемената мала ширина попречног пресека такође представља проблем приликом испитивања виткости елемената, те је анализа извршена на стубовима мале висине.

Оно што је неопходно напоменути да су резултати чврстоће на смицање управно на раван плоче како ојачаних (ЕК1, ЕК2 и ЕК3), тако неојачаних (ЕК4) узорака вишеструко већи од резултата комерцијалних LVL плоча, што се претпоставља да је додатан утицај примењеног епоксидног адхезива на механичка својства плоче. Вредности модула еластичности ојачаних плоча су у границама модула еластичности неојачаних LVL плоча, што је резултат примене дрвета лошијих механичких карактеристика.

7.2 Закључна разматрања

Истраживањем у оквиру друге целине рада потврђене су обе претпостављене хипотезе. Доказано је да се ојачањем плоча на бази фурнира уметањем полимера армираним влакнима побољшавају механичке карактеристике плоча на бази фурнира, као и да се она као таква може користити као примарни конструктивни елемент архитектонских објеката. Овим се доказује да дрво лошијих механичких карактеристика, попут тополе, примењено као композит у виду ојачане LVL плоче може имати конструктивну примену и то са веома малим утрошком материјала. Ово је посебно приказано димензионисањем просторне архитектонске структуре у форми егзоскелета кроз симулациони модел 1 – Пример 3. Анализом кроз симулационе моделе и димензионисањем елемената применом ојачаног материјала потврђено је да наведени материјал може бити једини носећи елемент, примењен без елемената потконструкције, у форми егзоскелета у архитектонском склопу. Како би се реализовала структура овог типа и избегли проблеми са бочним извијањима носача, за конструктивну примену непоходно је формирати плоче веће дебљине, односно елементе веће ширине попречног пресека.

У раду се посебно истичу могућности примене фурнира дрвета слабијих механичких карактеристика, односно примене технички слабијег дрвета, а пре свега локалних врста попут тополе, које се иначе не примењује као конструктивна дрвна грађа. Србија је једна од водећих европских земаља по проценту узгоја дрвета тополе, а тиме и по производњи тополовог фурнира. Формирање композитног производа комбинацијом тополовог фурнира и полимерима армираним влакнима добија се производ уједначеног квалитета и бољих физичких и механичких карактеристика дрвета од кога је фурнир настао, чиме долази до боље искоришћености дрвне сировине. Ово је од посебне користи за дрвну индустрију јер утиче на у економску исплативости и рационалније коришћење дрвних резерви, што представља економски и еколошки допринос. Применом адхезива који су доступни на тржишту у региону, применом тополовог фурнира и карбонских влакана, створио би се производ који може бити конкурентан на тржишту и имати велики потенцијал примене у грађевинској индустрији.

Потенцијал примене испитаног материјала у архитектури је у виду егзоскелета - структуре са површинским или линијским конструктивним елементима и просторним преношењем оптерећења. Ови објекти могу се користити као објекти сталног или привременог карактера у виду павиљона, надстрешница или мањих објеката отвореног плана. Примена новоформираног композитног материјала пружа могућности за формирање просторних структура великих распона са малим димензијама попречних пресека елемената. Даљим

истраживањем овог материјала кроз архитектуру верификовала би се његова примена као носећег конструктивног елемента.

7.3 Смернице за даља истраживања

У домену даљег испитивања материјала формираног током овог истраживања фокус треба поставити на анализу модела са површинским елементима конструкције и просторним носећим дејством, посебно у конструкцијама полигоналних љуски и набора. У даљим истраживањима неопходно је проверити и потврдити не само кроз симулационе већ и кроз просторне моделе егзоскелетне структуре резултате добијене анализом просторних егзоскелетних структура у оквир овог рада. Праћењем понашања материјала на реализованом просторном моделу и његове експлоатације током времена, а посебно при променама услова средине омогућила би се сазнања о даљим могућностима унапређења материјала, као и о могућностима примене у другим архитектонским структурама.

Испитивањем у оквиру рада као главни недостатак уочена је мала ширина плоча, која је овде била условљена ограниченим лабораторијским условима. У даљим истраживањима у оквиру ове теме, а у циљу примене ојачаних плоча у пракси, неопходно је испитати утицај ојачања на вишеслојне фурнирске плоче, веће дебљине, како би се спречили проблеми бочног извијања линијских елемената или прекорачења угиба површинских елемената. Поред наведеног, значајно би било испитати понашање ојачаних плоча формираних применом још неког адхезива заступљеног у дрвној индустрији, попут полиуретанског или резорцинол-формалдехидног адхезива, како би се упоредио однос ојачања и економска исплативост композитног производа. Могућност унапређења испитаног производа лежи и у формирању композитних плоча са модификованим епоксидним адхезивима, како би се створио еколошки прихватљивији производ.

За сложеније конструкције са већим оптерећењима потребно је испитати ојачане плоче формиране комбинацијом различитих врста дрвета, слабијих и јачих механичких карактеристика, како би се постигао уједначенији ефекат ојачања и добио производ већих модула еластичности и савојних својстава. Комбинацијом више врста фурнира уз комбинацију више адхезива, и ојачањем тих плоча полимерима армираним влакнима, створили би се производи који својим карактеристикама могу испунити и најсложеније захтеве у погледу носивости и експлоатације конструкција.

- Прилог 1 – Табела резултата претходних истраживања утицаја ојачања на механичка својства плоча на бази фурнира
- Прилог 2 – Произвођачка спецификација адхезива LG 700
- Прилог 3 – Произвођачка спецификација адхезива MareWrap31
- Прилог 4 – Дефинисање оптерећења на конструкцијама
- Прилог 5 – Одређивање коефицијената сигурности и употребљивости објекта
- Прилог 6 – Димензионисање симулационог модела 1
- Прилог 7 – Димензионисање симулационог модела 2 - Ојачани LVL елементи
- Прилог 8 – Димензионисање симулационог модела 2 - Неојачани LVL елементи
- Прилог 9 – Упоредни приказ претходних истраживања ојачања на механичка својства плоча на бази фурнира и експерименталних истраживања спроведених у оквиру рада

*Прилог 1 – Табела резултата претходних истраживања
утицаја ојачања на механичка својства плоча на бази фурнира*

Време желирања (ламинирање 1 mm на различитим температурама)

LG 700	HG 700 F	HG 700 R	HG 700 M	HG 700	HG 737
NA 25°C	1 – 2 SATA	2 SATA	2 – 3 SATA	3 – 5 SATI	8 – 12 SATI
NA 50°C	25 min.	35 min.	50 min.	1,5 SAT	2 – 3 SATA

TERMICKA OTPORNOST

LG 700	HG 700 F	HG 700 R	HG 700 M	HG 700	HG 737
NA 23°C (2-7 days)	55°C	60°C	60°C	60°C	55°C
NA 50°C (3 hours)	65°C	70°C	70°C	70°C	65°C
NA 60°C (> 3 hours)	75°C	80°C	80°C	80°C	75°C
NA 90°C (> 2 hours)	95°C	100°C	100°C	100°C	95°C
NA 120°C (2 hours)	105°C	110°C	110°C	110°C	105°C

ODNOS MESANJA SMOLE I UCVRSCIVACA

MASENI ODNOS	100 : 30
ZAPREMINSKI ODNOS	100 : 38

2.2 TEHNIČKI PARAMETRI

		LG 700
GUSTOĆA	g/cm ³ (25°C)	1,18 - 1,23
VIZKOZNOST	mPa/s (25°C)	600 – 900
EPOKSI EKVALENT	mol/kg	156 – 165
EPOKSI INDEKS	-	0,60 - 0,64
BOJA	Gardner	max 3

		HG 700 F	HG 700 R	HG 700 M	HG 700	HG 737
GUSTOĆA	g/cm ³ (25°C)	0,98	0,96	0,96	0,94	0,98
VIZKOZNOST	mPa/s (25°C)	30 - 40	50 – 60	35 - 50	15 - 20	10 - 15
HIDROGENSKI EKVALENT	-	48	48	48	48	48
BOJA	Gardner	max 3*	Max 2	max 3*	max 3*	max 3*

* ODNOSI SE NA NE OBOJENE UCVRSCIVACE

DETALJI

	LG 700	HG 700 F	HG 700 R	HG 700 M	HG 700	HG 737
PROSEČNE EPOKSI VREDNOSTI	0,62	-	-	-	-	-
PROSEČNI AMINO EKVALENT	-	48	48	48	48	48
SKLADISTENJE	24 months (epoxy resin), 12 months (hardeners) in the original package					

MEHANICKI PARAMETRI SAZRELE NEOJACANE SMOLE:

ELASTICNOST	MPa	110 - 120
E-MODUL SAVIJANJA	MPa	2700 - 3300
OTPORNOST NA ISTEZANJE	MPa	65 - 75
OTPORNOST NA SABIJANJE	MPa	120 - 140
ELONGACIJA	%	6 - 8
ELASTICNI ZAMOR	KJ/m ²	38 - 48
TVRDOĆA U SHOR-IMA	-	85

Прилог 3 – Произвођачка спецификација адхезива МареWrap31

TECHNICAL DATA (typical values)			
PRODUCT IDENTITY			
	component A	component B	
Consistency:	paste	liquid	
Colour:	yellow	transparent yellow	
Specific gravity (g/cm ³):	1.05	1.12	
Brookfield viscosity (mPa·s):	17.000 (shaft 5 - rev. 10)	110 (shaft 2 - rev. 100)	
APPLICATION DATA (after 7 days at +23°C - 50% R.H.)			
Mix ratio:	component A : component B = 4 : 1		
Mix consistency:	gelatinous paste		
Colour of mix:	yellow		
Specific gravity of the mix (g/cm ³):	1.06		
Brookfield viscosity (mPa·s):	6,500 (shaft 3 - rev. 10)		
Workability time:			
- at +10°C:	60'		
- at +23°C:	40'		
- at +30°C:	20'		
Setting time:			
- at +10°C:	90'		
- at +23°C:	50'		
- at +30°C:	30'		
Application temperature:	from +5°C to +30°C		
Adhesion to concrete (N/mm ²):	> 3 (after 7 days - concrete failure)		
Tensile strength* (ASTM D 638) (N/mm ²):	≥ 40		
Tensile strain* (ASTM D 638) (%):			
- after 28 days:	≥ 1.6		
Compressive strength (ASTM D 695) (N/mm ²):	≥ 70		
Flexural strength* (ISO 178) (N/mm ²):	≥ 70		
Modulus of elasticity under compression (ASTM D 695) (N/mm ²):	≥ 3,000		
Modulus of elasticity in flexion (ISO 178) (N/mm ²):	≥ 2,500		
Tensile modulus of elasticity* (ASTM D 638) (N/mm ²):	≥ 2,600		
Glass transition temperature Tg (°C) (ASTM E 1640-09):	≥ 70 (after 3 days at +23°C + 4 days at +60°C)		
FINAL PERFORMANCES			
Performance characteristic	Test method	Requirements according to EN 1504-4	Performance of product
BONDED MORTAR OR CONCRETE			
Compressive strength (N/mm ²):	EN 12190	≥ 30	> 70
Shear strength (N/mm ²):	EN 12615	≥ 6	> 10
Compressive modulus of elasticity (N/mm ²):	EN 13412	≥ 2,000	> 3,000
STRENGTHENING USING BONDED PLATE			
Shear strength (N/mm ²):	EN 12188	≥ 12	50° > 40 60° > 35 70° > 30
Bond strength: - pull out (N/mm ²):	EN 12188	≥ 14	> 20
Bond strength: - inclined shear strength (N/mm ²):	EN 12188	50° ≥ 50 60° ≥ 60 70° ≥ 70	50° > 90 60° > 85 70° > 100

* 5 sample coupons per test series (testing temperature +23°C (+73°F) - 50% H.R.)

Прилог 4 – Дефинисање оптерећења на конструкцијама

Оптерећење од ветра

$$\begin{aligned} \text{Пројектована основна брзина ветра} &= V_{m,T,10} = k_t \times k_T \times V_{m,50,10}^B \\ &= V_{m,T,10} = 1.0 \times 1.0 \times 21 = 21.0 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Основни притисак ветра} &= q_{m,T,10} = q_b = \frac{1}{2} \rho \times V_{m,50,10}^2 \times 10^{-3} \\ &= \frac{1}{2} \times 1.209 \times 21^2 \times 10^{-3} = 0.22 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Ударни притисак ветра} = q_p = C_e \times q_b = 1 \times 0.22 = 0.22 \text{ kN/m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Притисак ветра који делује на} \\ \text{глобалне површине} &= w_e = q_p \times C_{p,net} \end{aligned}$$

Облик крова: једноводна надстрешница, $\alpha=0^\circ$, коефицијент попуњености $\phi=1$.

Сишуће дејство

$$\begin{aligned} \text{Спољашњи притисак ветра} &= w_e = q_p \times C_f \\ &= 0.22 \times (-1.3) = -0.286 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Сила ветра која делује на конструкцију} = F_w = c_s c_d c_f q_p (Z_e) A_{ref}$$

$$\text{Сила ветра која делује на конструкцију} = F_{w,e} = c_s c_d \sum w_e A_{ref}$$

$$\text{Коефицијенти конструкције } h < 15 \text{ m} = c_s c_d = 1$$

$$\text{Сила ветра која делује на конструкцију} = F_{w,e} = \sum w_e A_{ref} = -0.286 \times A_{ref}$$

Напомена: Разматрана је варијанта оптерећења – отворена надстрешница са кровом нагиба – 0° уз присуство терета. Приказана схема није адекватна стварном стању на пројектованом објекту функције надстрешнице, али је најприближнија. Усвојена рачунска оптерећења од ветра биће примењена при димензионисању конструкције.

Прилог 5 – Одређивање коефицијената сигурности и употребљивости објекта

Коефицијенти сигурности и коефицијенти прорачунске вредности чврстоће

Савијање	$\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12}$
Смицање	$\emptyset k_1 k_4 k_6$
Савијање	$j_2 j_6$

$$\text{Коефицијент носивости} = \emptyset = 0.90$$

Категорија 2 – примарни структурни елемент у структурама које нису стамбени објекти.

Коефицијент трајања оптерећења

Стално оптерећење $k_1 = 0.57$

Стално и повремено оптерећење (кровна конструкција) $k_1 = 0.94$

Стално оптерећење и ветар $k_1 = 1.00$

Стално оптерећење, ветар и кратка изложеност покретном оптерећењу $k_1 = 1.00$

Коефицијент влажности дрвета ($w \leq 15\%$) $k_4 = 1.00$

Температурни коефицијент $k_6 = 1.00$

Коефицијент модификације расподеле носивости за решеткасте системе $k_9 = 1.00$

Запремински коефицијент $k_x = 1.00$

Коефицијент стабилности (извијање штапа) $k_{12} = \frac{200}{(\rho_b S_1)^2} \quad \rho_b S_1 > 20$

$$k_{12} = 1.5 - 0.05 \rho_b S_1 \quad 10 \leq \rho_b S_1 \leq 20$$

Коефицијенти употребљивости објекта

Коефицијент пузања у зависности од трајања оптерећења (савијање, притисак и смицање)

Стално оптерећење ≥ 1 година $j_2 = 2.0 \quad (w \leq 15\%)$

Покретно оптерећење (снег и ветар) - 7 дана $j_2 = 1.2 \quad (w \leq 15\%)$

Утицај садржаја воде на коефицијент крутости $j_6 = 1.0 \quad (w \leq 15\%)$

Одређивање коефицијената сигурности и употребљивости објекта приликом прорачуна елемената изложених притиску

1. Коефицијенти сигурности и коефицијенти прорачунске вредности чврстоће

Притисак $\emptyset k_1 k_4 k_6 k_{12}$

Коефицијент стабилности (виткост штапа) $k_{12} = \frac{200}{(\rho_b S)^2} \quad \rho_b S > 20$

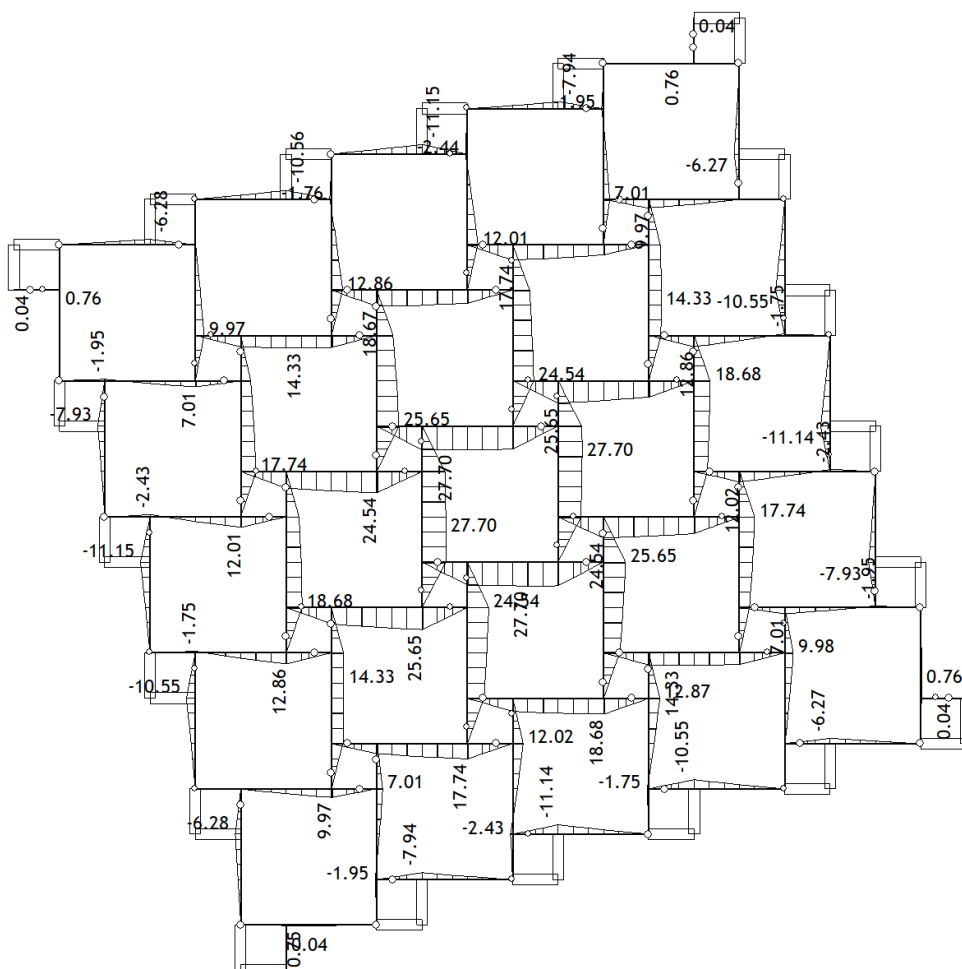
$$k_{12} = 1.5 - 0.05 \rho_b S \quad 10 \leq \rho_b S \leq 20$$

Коефицијент дужине извијања на основу ослоначких веза зглобне везе $g_{13} = 1$

Пример 1.

На слици 170. приказан је дијаграм момената савијања свих елемената у кровној конструкцији, дијаграм трансверзалних сила приказан је на слици 171., док је дијаграм угиба у кровној конструкцији приказан на слици 172.

Опт. 9: 1.2xI+1.5xII

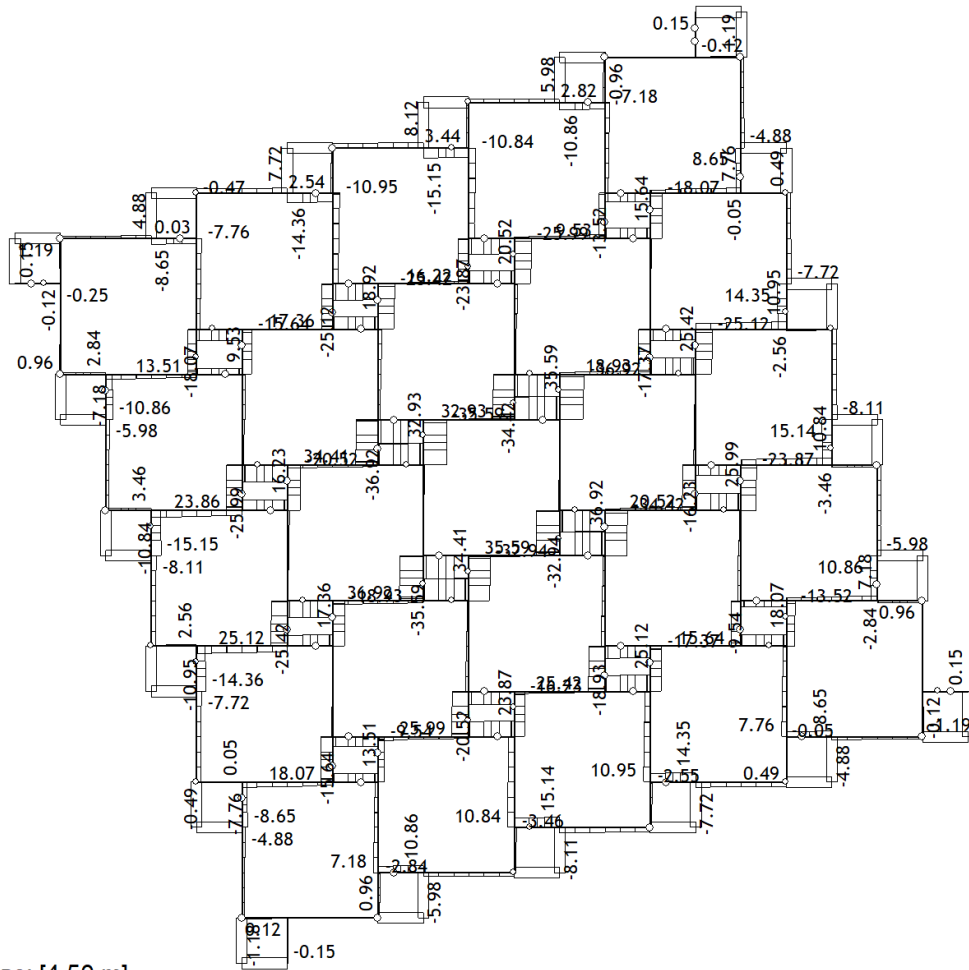


Ниво: [4.50 m]

Утицаји у греди: max M₃= 27.70 / min M₃= -11.15 kNm

Слика 170. Моменти савијања у реципрочној конструкцији – штапови b/d=15/360-720 mm

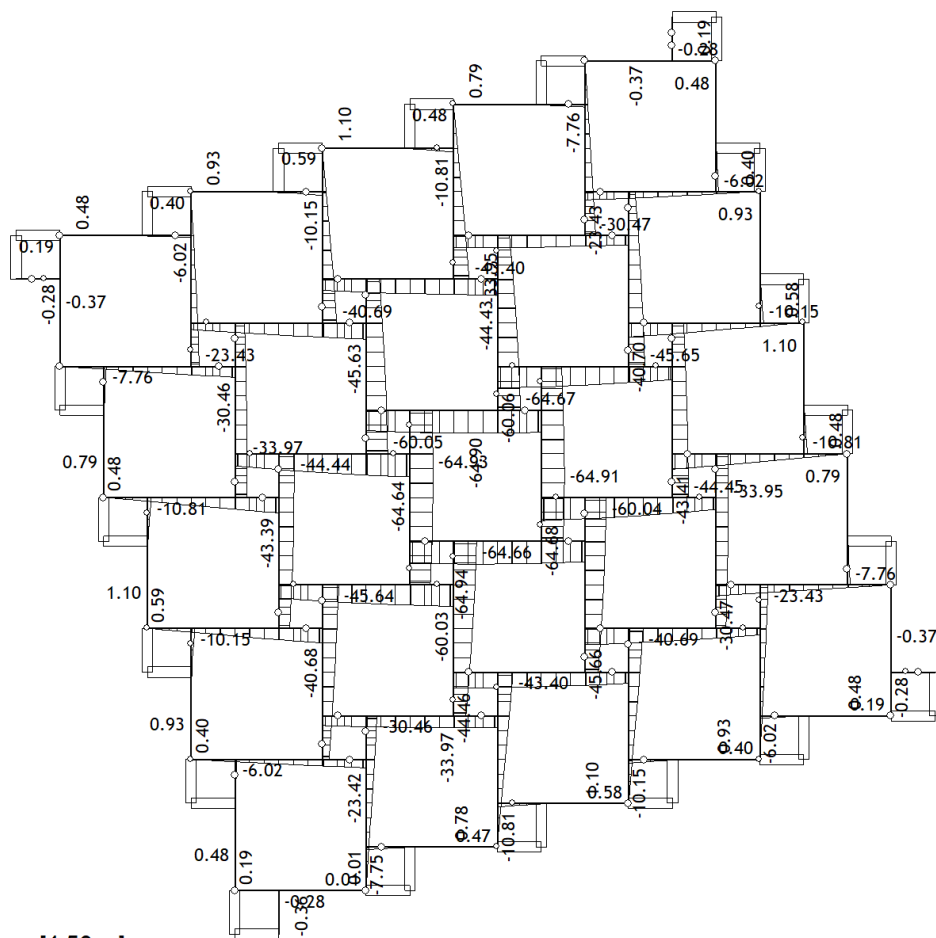
Опт. 9: 1.2xI+1.5xII



Ниво: [4.50 m]

Утицаји у греди: max T2= 36.92 / min T2= -36.92 kN

Слика 171. Трансверзалне силе у реципрочној конструкцији – штапови b/d=15/360-720 mm



Ниво: [4.50 m]

Утицаји у греди: max Zп= 1.10 / min Zп= -64.94 m / 1000

Слика 172. Угиби у реципрочној конструкцији – штапови b/d=15/360-720 mm

Одређивање статичких утицаја и димензионисање гредног елемента променљивог попречног пресека b/d = 15/360 – 720 mm

Одређивање геометрије попречног пресека:

15 × 360 mm, (b_{ef} = 12.9 – 14% слојева управно оријентисаних);

$$A_e = 4644 \text{ mm}^2, I_x = 5.02 \times 10^7 \text{ mm}^4, W_x = 2.79 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$$I_{x,e} = \frac{(b - t_l) d^3}{12} = \frac{(15 - 2.1) \times 360^2}{12} = 5.02 \times 10^7 \text{ mm}^4$$

$$W_{x,e} = \frac{(b - t_l) d^2}{6} = \frac{(15 - 2.1) \times 360^2}{6} = 2.79 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$$A_e = (b - t_l) d = (15 - 2.1) \times 360 = 4644 \text{ mm}^2$$

Одређивање коефицијента k₁₂

$$k_{12} \cdot \rho_b = 14.71 \left(\frac{E}{f_{m, edge}} \right)^{-0.480} r^{-0.061}$$

$$\begin{aligned}
&= 14.71 \times \left(\frac{12250}{77}\right)^{-0.480} \times \frac{23.46^{-0.061}}{29.47} \\
&= 14.71 \times \left(\frac{12250}{77}\right)^{-0.480} \times \frac{23.46^{-0.061}}{29.47} \\
&= 1.31 \\
S_1 &= 1.25 \left(\frac{d}{b}\right) \left(\frac{L_{ay}}{d}\right)^{0.50} \\
&= 1.25 \times \left(\frac{360}{15}\right) \times \left(\frac{250}{360}\right)^{0.50} = 25.0
\end{aligned}$$

где је $L_{ay} = 250 \text{ mm}$ размак између бочних придржајних тачака греде у оси z .

$$\rho_b S_1 = 1.31 \times 25 = 32.72$$

$$k_{12} = \frac{200}{(\rho_b S_1)^2} = \frac{200}{(1.31 \times 25.0)^2} = 0.19 \quad \text{за} \quad \rho_b S_1 > 20$$

Димензионисање на основу савијања

Одређивање потребног отпорног момента

$$M_d \geq M$$

$$M_d \geq \emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} f'_b W_x$$

$$W_{x,pot} \geq \frac{M}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} f'_b}$$

$$W_{x,pot} \geq \frac{27.70 \times 10^6}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0.19 \times 77}$$

$$W_{x,pot} = 2.28 \times 10^6 \text{ mm}^3 > W_{x,stv} = 2.79 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

Напони савијања су прекорачени, потребно је приступити повећању димензија попречног пресека елемената.

Димензионисање на основу смицања

Одређивање потребне површине попречног пресека

$$V_d \geq V$$

$$V_d \geq \emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 f'_s A_s$$

$$A_s \geq \frac{V}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 f'_s}$$

$$A_s \geq \frac{36.92 \times 10^3}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 1 \times 1 \times 18} = 2424.48 \text{ mm}^2$$

$A_s < A_e = 4644 \text{ mm}^2$ за димензије $15 \times 360 \text{ mm}$.

$$f_{v,edge} = \frac{V}{\phi k_1 k_4 k_6 k_9 A}$$

$$f_{v,edge} = \frac{36.92 \times 10^3}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 1 \times 1 \times 3870} = 9.39 \text{ MPa}$$

$$f_{v,edge} = 9.39 \text{ MPa} < f'_s = 18 \text{ MPa}$$

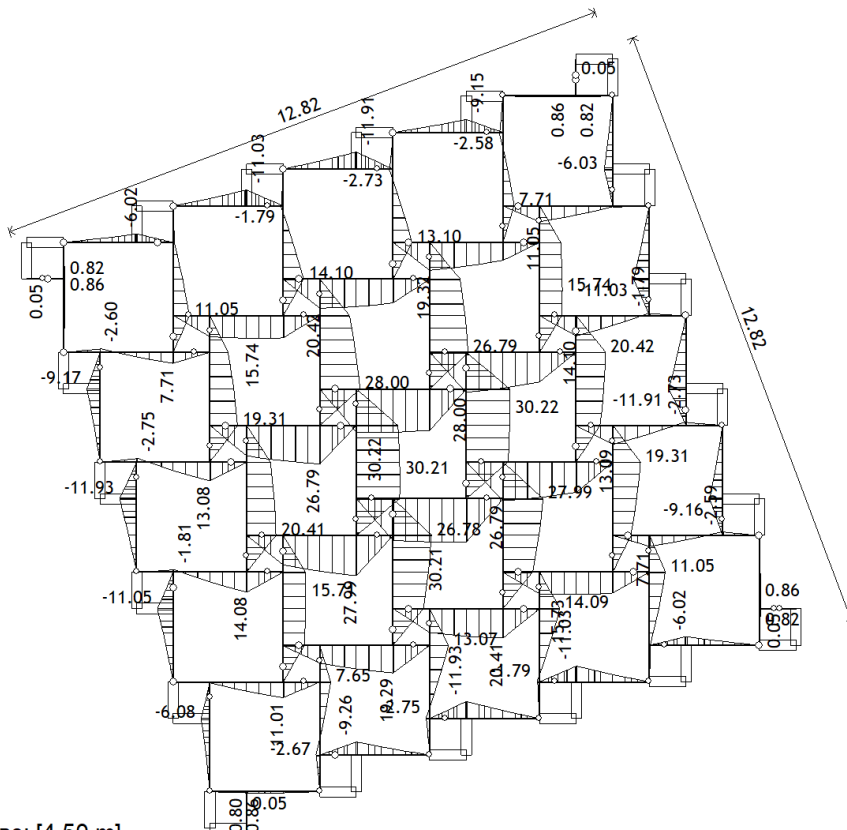
Напони смицања су у границама допуштених напона.

Пример 2.

Одређивање статичких утицаја и димензионисање гредног елемента променљивог попречног пресека $b/d = 45/360 - 720 \text{ mm}$

На слици 173 приказан је дијаграм момената савијања свих елемената у кровној конструкцији, на слици 174 приказан је дијаграм трансверзалних сила, угиби у реципрочној конструкцији приказани су на слици 175, док су статички утицаји у индиректним елементима неопходни за прорачун контактних напона на месту ослањања штапова приказани на слици 176.

Опт. 9: 1.2xl+1.5xll

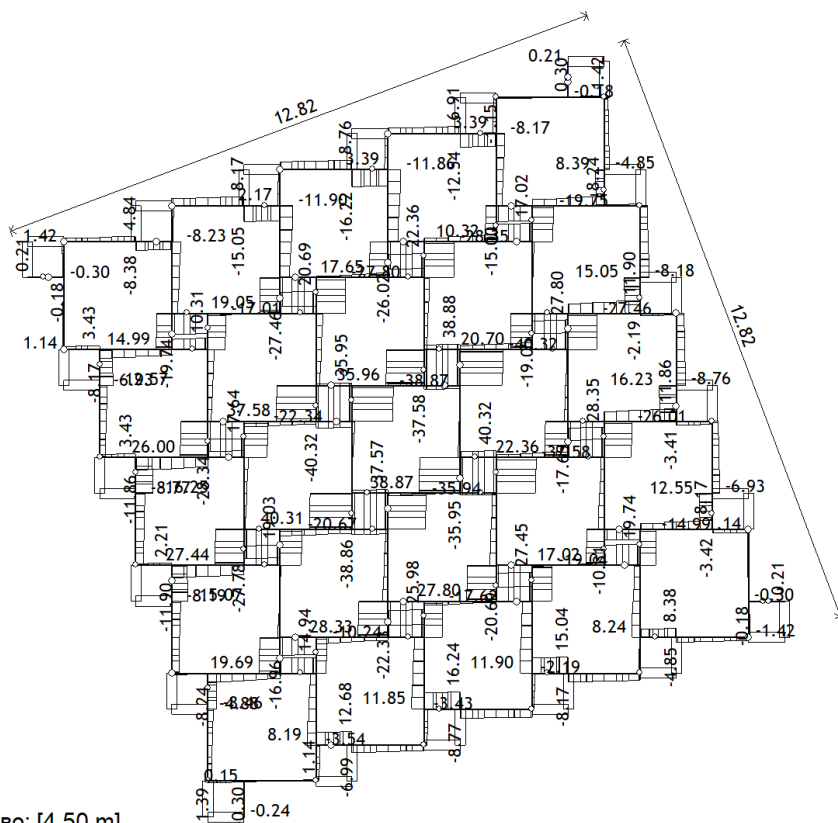


Ниво: [4.50 m]

Утицаји у греди: max M3= 30.22 / min M3= -11.93 kNm

Слика 173. Моменти савијања у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=45/360-720 \text{ mm}$

Опт. 9: 1.2xI+1.5xII

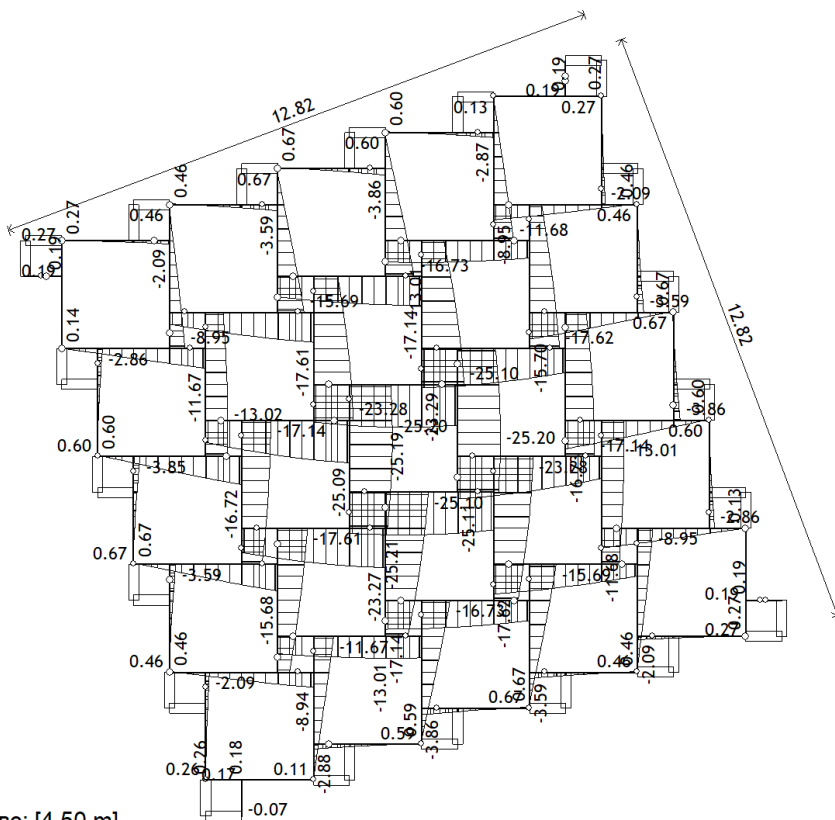


Ниво: [4.50 m]

Утицаји у греди: max T2= 40.32 / min T2= -40.32 kN

Слика 174. Трансверзалне силе у реципрочној конструкцији – штапови b/d=45/360-720 mm

Опт. 14: 2xI+II - ugib stalno i sneg

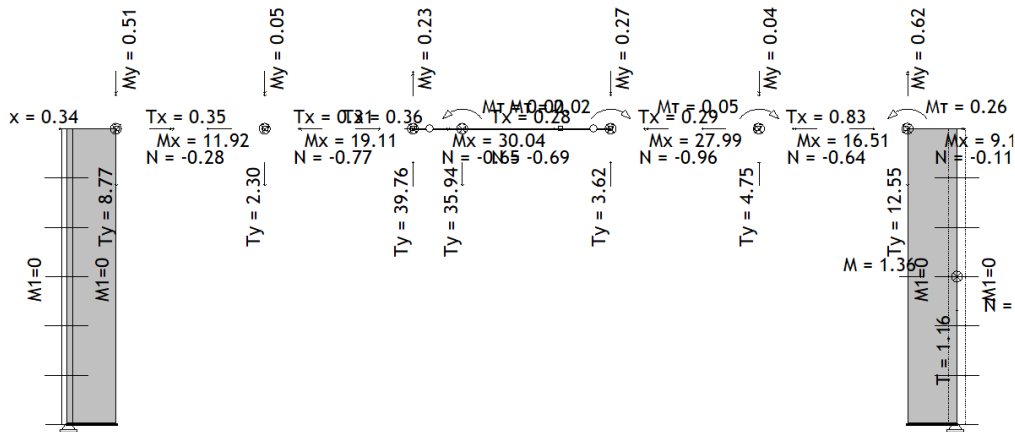


Ниво: [4.50 m]

Утицаји у греди: max Zp= 0.67 / min Zp= -25.21 m / 1000

Слика 175. Угиби у реципрочној конструкцији – штапови b/d= b/d=45/360-720 mm

Опт. 9: 1.2xI+1.5xII



Рам: H_9

Утицаји у индиректним елементима - Изнад/Испред

Слика 176. Утицаји у индиректним елементима – штапови $b/d = 45/360 - 720 \text{ mm}$

1. Димензионисање носача код ослонца

Одређивање геометрије попречног пресека:

$45 \times 360 \text{ mm}$, ($b_{ef} = 38.7 - 14\%$ слојева управно оријентисаних);

$$A_e = 13932 \text{ mm}^2, I_x = 1.50 \times 10^8 \text{ mm}^4, W_x = 8.36 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$$I_{x,e} = \frac{(b - t_l) d^3}{12} = \frac{(45 - 6.3) \times 360^2}{12} = 1.50 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$W_{x,e} = \frac{(b - t_l) d^2}{6} = \frac{(45 - 6.3) \times 360^2}{6} = 8.36 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$$A_e = (b - t_l) d = (45 - 6.3) \times 360 = 13932 \text{ mm}^2$$

Одређивање коефицијента k_{12}

$$k_{12} \cdot \rho_b = 14.71 \left(\frac{E}{f_{m, edge}} \right)^{-0.480} r^{-0.061}$$

$$= 14.71 \times \left(\frac{12250}{77} \right)^{-0.480} \times \frac{23.37}{32.10}$$

$$= 14.71 \times \left(\frac{12250}{77} \right)^{-0.480} \times \frac{23.37}{32.10}$$

$$= 1.32$$

$$S_1 = 1.25 \left(\frac{d}{b} \right) \left(\frac{L_{ay}}{d} \right)^{0.50}$$

$$= 1.25 \times \left(\frac{360}{45}\right) \times \left(\frac{750}{360}\right)^{0.50} = 14.43$$

где је $L_{ay} = 750 \text{ mm}$ размак између бочних придржајних тачака греде у оси z .

$$\rho_b S_1 = 1.32 \times 14.43 = 18.99$$

$$k_{12} = \frac{200}{(\rho_b S_1)^2} = \frac{200}{(1.32 \times 14.43)^2} = 0.55 \quad \text{за } 10 \leq \rho_b S_1 \leq 20$$

Димензионисање на основу савијања

Одређивање потребног отпорног момента

$$M_d \geq M$$

$$M_d \geq \emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} f'_b W_x$$

$$W_{x,pot} \geq \frac{M}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} f'_b}$$

$$W_{x,pot} \geq \frac{30.22 \times 10^6}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0.50 \times 77}$$

$$W_{x,pot} = 8.43 \times 10^5 \text{ mm}^3 > W_{x,stv} = 8.36 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$$f'_{b,stv} \geq \frac{M}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} W_x}$$

$$f'_{b,stv} \geq \frac{30.22 \times 10^6}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0.93 \times 8.36 \times 10^5} = 77.68 \text{ MPa}$$

$$f'_{b,stv} = 77.68 \text{ MPa} > f'_b = 77 \text{ MPa}$$

Прекорачење напона је $\approx 1\%$ у граници до 3% .

Димензионисање на основу смицања

Одређивање потребне површине попречног пресека

$$V_d \geq V$$

$$V_d \geq \emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 f'_s A_s$$

$$A_s \geq \frac{V}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 f'_s}$$

$$A_s \geq \frac{40.32 \times 10^3}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 1 \times 1 \times 18} = 2647.45 \text{ mm}^2$$

$$A_s = 2647.45 < A_e = 13932 \text{ mm}^2 \quad \text{за димензије } 45 \times 360 \text{ mm.}$$

$$f_{v,edge} = \frac{V}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 A}$$

$$f_{v,edge} = \frac{40.32 \times 10^3}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 1 \times 13932} = 3.42 \text{ MPa}$$

$$f_{v,edge} = 3.42 \text{ MPa} < f'_s = 18 \text{ MPa}$$

Напони савијања су у границама допуштених напона.

Контрола контактних напона

$$f_{c,edge} = 26.24 \text{ MPa}$$

$$f_{c,edge,stv} = \frac{Q}{A, stv} = \frac{39.76 \times 10^3}{45^2} = 19.63 \text{ MPa}$$

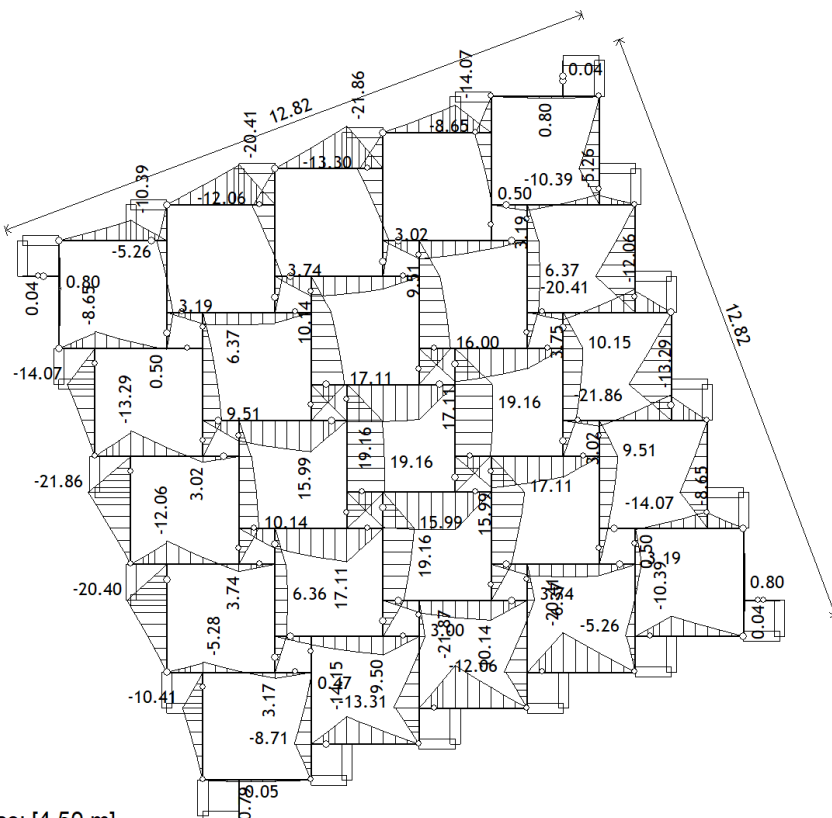
$$f_{c,edge,stv} = 19.63 \text{ MPa} < f_{c,edge} = 26.24 \text{ MPa}$$

Пример 3.

Одређивање статичких утицаја и димензионисање гредног елемента променљивог попречног пресека $b/d = 45/320 \text{ mm}$

На слици 177 приказан је дијаграм момената савијања свих елемената у кровној конструкцији, на слици 178 приказан је дијаграм трансверзалних сила, а угиби у реципрочној конструкцији приказани су на слици 179.

Опт. 9: 1.2x1+1.5x11

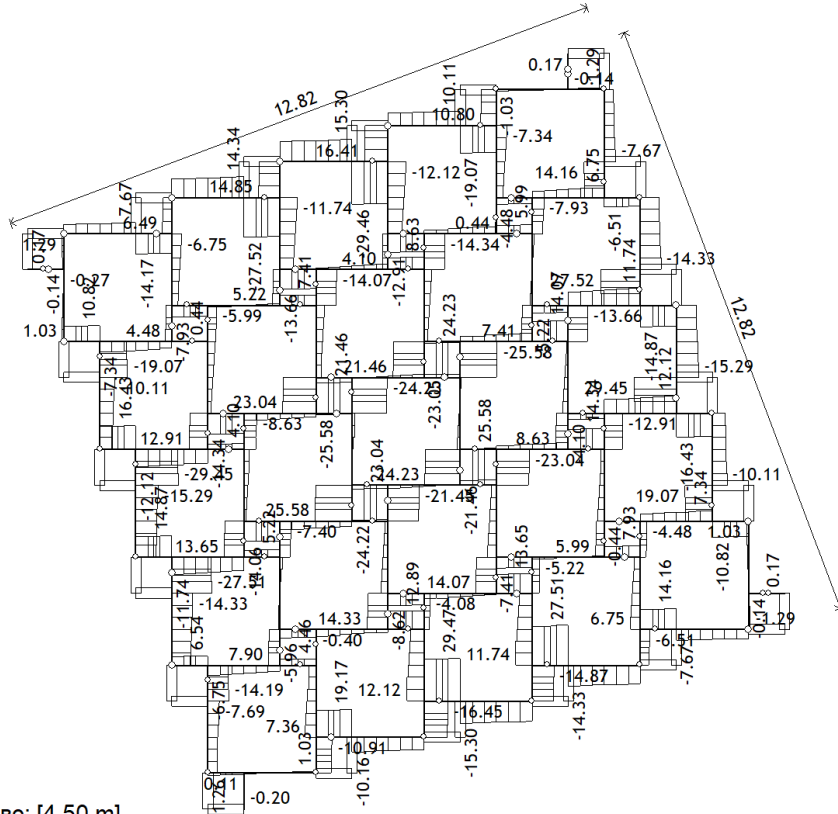


Ниво: [4.50 m]

Утицаји у греди: max M3= 19.16 / min M3= -21.87 kNm

Слика 177. Моменти савијања у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=45/320 \text{ mm}$

Опт. 9: 1.2xI+1.5xII

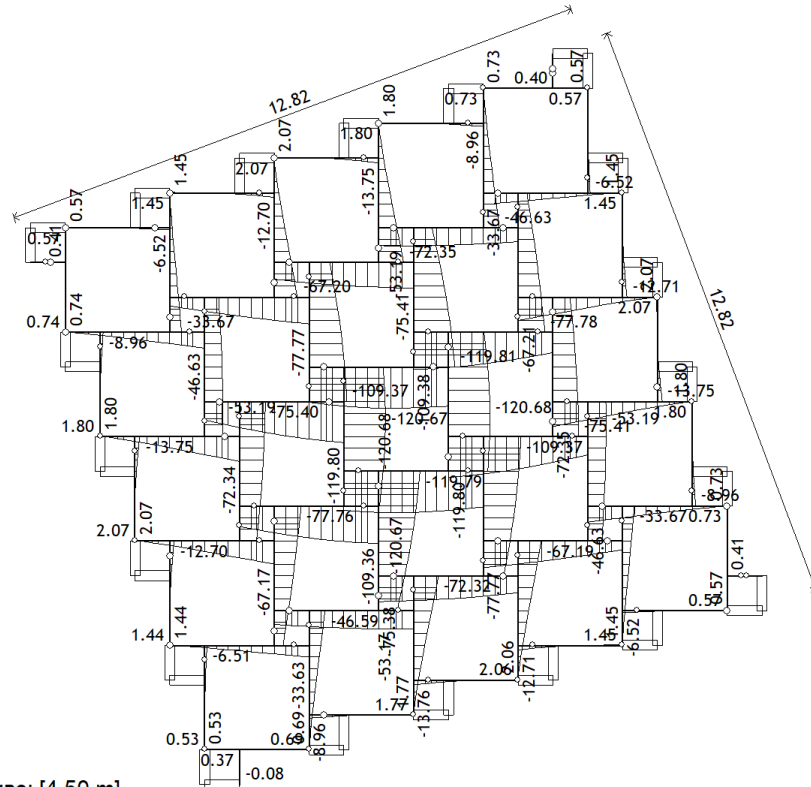


Ниво: [4.50 m]

Утицаји у греди: max T2= 29.47 / min T2= -29.46 kN

Слика 178. Трансверзалне силе у реципрочној конструкцији – штапови b/d=45/320 mm

Опт. 14: 2xI+II - ugib stalno i sneg



Ниво: [4.50 m]

Утицаји у греди: max Zp= 2.07 / min Zp= -120.68 m / 1000

Слика 179. Угиби у реципрочној конструкцији – штапови b/d=45/320 mm

1. Димензионисање носача код ослонца

Одређивање геометрије попречног пресека:

$45 \times 320 \text{ mm}$, ($b_{ef.} = 38.7 - 14\%$ слојева управно оријентисаних);

$$A_e = 12384 \text{ mm}^2, I_x = 1.06 \times 10^8 \text{ mm}^4, W_x = 6.60 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$$I_{x,e} = \frac{(b - t_l) d^3}{12} = \frac{(45 - 6.3) \times 320^2}{12} = 1.06 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$W_{x,e} = \frac{(b - t_l) d^2}{6} = \frac{(45 - 6.3) \times 320^2}{6} = 6.60 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$$A_e = (b - t_l) d = (45 - 6.3) \times 320 = 12384 \text{ mm}^2$$

Одређивање коефицијента k_{12}

$$\begin{aligned} k_{12}: \rho_b &= 14.71 \left(\frac{E}{f_{m, edge}} \right)^{-0.480} r^{-0.061} \\ &= 14.71 \times \left(\frac{12250}{77} \right)^{-0.480} \times \frac{17.91^{-0.061}}{23.26} \\ &= 14.71 \times \left(\frac{12250}{77} \right)^{-0.480} \times \frac{17.91^{-0.061}}{23.26} \\ &= 1.31 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_1 &= 1.25 \left(\frac{d}{b} \right) \left(\frac{L_{ay}}{d} \right)^{0.50} \\ &= 1.25 \times \left(\frac{320}{45} \right) \times \left(\frac{750}{320} \right)^{0.50} = 13.61 \end{aligned}$$

где је $L_{ay} = 750 \text{ mm}$ размак између бочних придржајних тачака греде у оси z .

$$\rho_b S_1 = 1.31 \times 13.61 = 17.84$$

$$k_{12} = \frac{200}{(\rho_b S_1)^2} = \frac{200}{(1.30 \times 13.61)^2} = 0.60 \quad \text{за } 10 \leq \rho_b S_1 \leq 20$$

Димензионисање на основу савијања

Одређивање потребног отпорног момента

$$M_d \geq M$$

$$M_d \geq \emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} f'_b W_x$$

$$W_{x, pot} \geq \frac{M}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} f'_b}$$

$$W_{x,pot} \geq \frac{21.87 \times 10^6}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0.60 \times 77} = 5.52 \times 10^5$$

$$W_{x,pot} = 5.52 \times 10^5 \text{ mm}^3 < W_{x,stv} = 6.60 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$$f'_{b,stv} \geq \frac{M}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} W_x}$$

$$f'_{b,stv} \geq \frac{21.87 \times 10^6}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0.60 \times 6.60 \times 10^5} = 64.41 \text{ MPa}$$

$$f'_{b,stv} = 64.41 \text{ MPa} < f'_b = 77 \text{ MPa}$$

Напони савијања су у границама допуштених напона.

Димензионисање на основу смицања

Одређивање потребне површине попречног пресека

$$V_d \geq V$$

$$V_d \geq \emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 f'_s A_s$$

$$A_s \geq \frac{V}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 f'_s}$$

$$A_s \geq \frac{29.47 \times 10^3}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 1 \times 1 \times 18} = 1935.25 \text{ mm}^2$$

$$A_s = 1935.25 \text{ mm}^2 < A_e = 12384 \text{ mm}^2 \text{ за димензије } 45 \times 320 \text{ mm.}$$

$$f_{v,edge} = \frac{V}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 A}$$

$$f_{v,edge} = \frac{29.47 \times 10^3}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 1 \times 1 \times 12384} = 2.81 \text{ MPa}$$

$$f_{v,edge} = 2.81 \text{ MPa} < f'_s = 18 \text{ MPa}$$

Напони смицања су у границама допуштених напона.

Исти пресек $b/d = 45/320 \text{ mm}$ проверен је према правилнику „Eurocode 5“, према коефицијентима сигурности и корекционим коефицијентима дефинисаним правилником. На основу тога добијени су следећи резултати:

$$\sigma_{m,d} = 49.93 \text{ MPa} < f_{m,0,edge,d} = 50.65 \text{ MPa}$$

$$\tau_{m,d} = 3.58 \text{ MPa} < f_{v,0,edge,d} = 12 \text{ MPa}$$

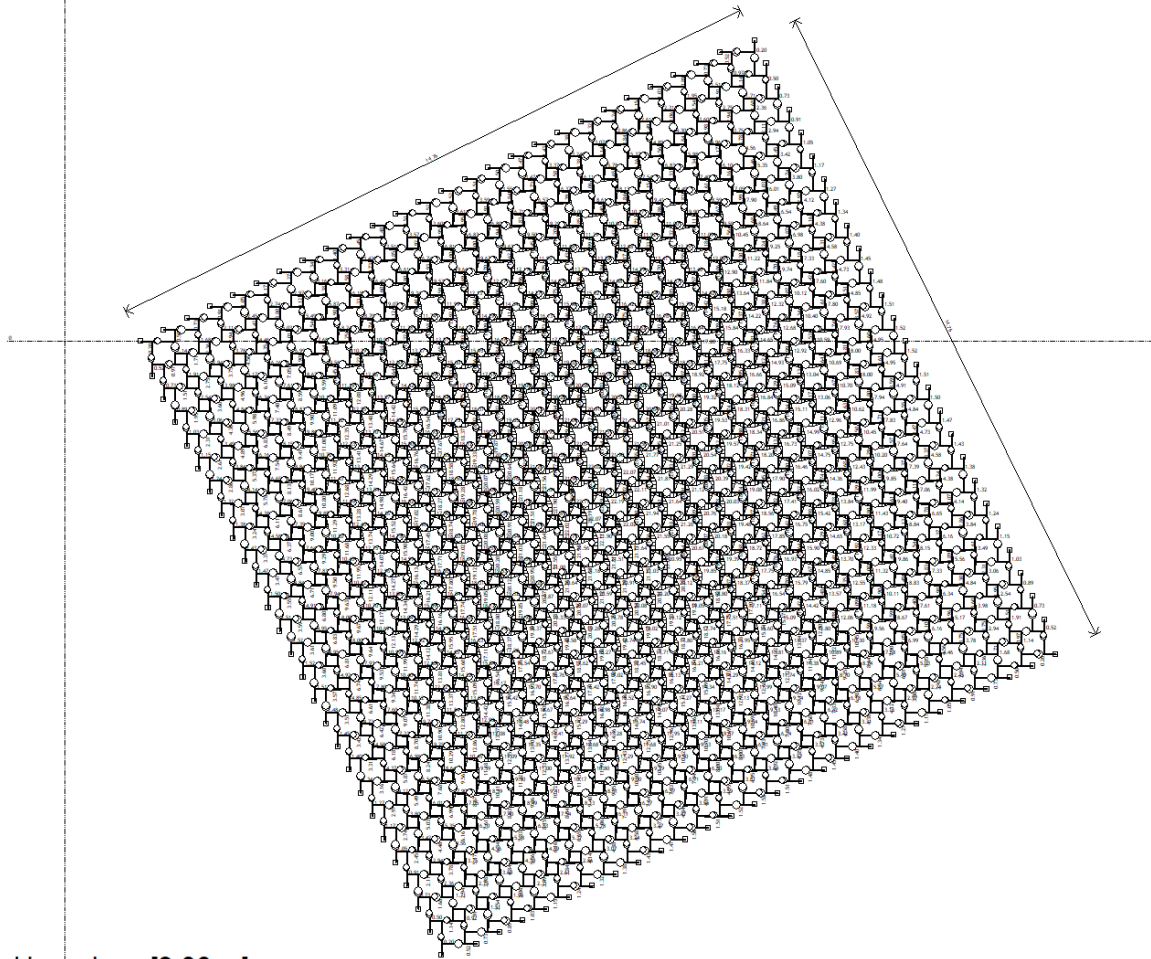
$$w_{net,fin} = 118.29 \text{ mm} \rightarrow L/108$$

Пример 1.

Одређивање статичких утицаја и димензионисање гредног елемената 30/375 – 750 *mm*.

На слици 180 приказан је дијаграм момената савијања целокупне структуре, сегмент дијаграма момената савијања приказан је на слици 181. Дијаграм трансверзалних сила приказан је на слици 182, а сегмент дијаграма трансверзалних сила на слици 183. Дијаграм угиба структуре приказан је на слици 184, а његов сегмент на слици 185. Статички утицаји у индиректним елементима неопходни за прорачун контактних напона на месту ослањања штапова приказани на слици 186.

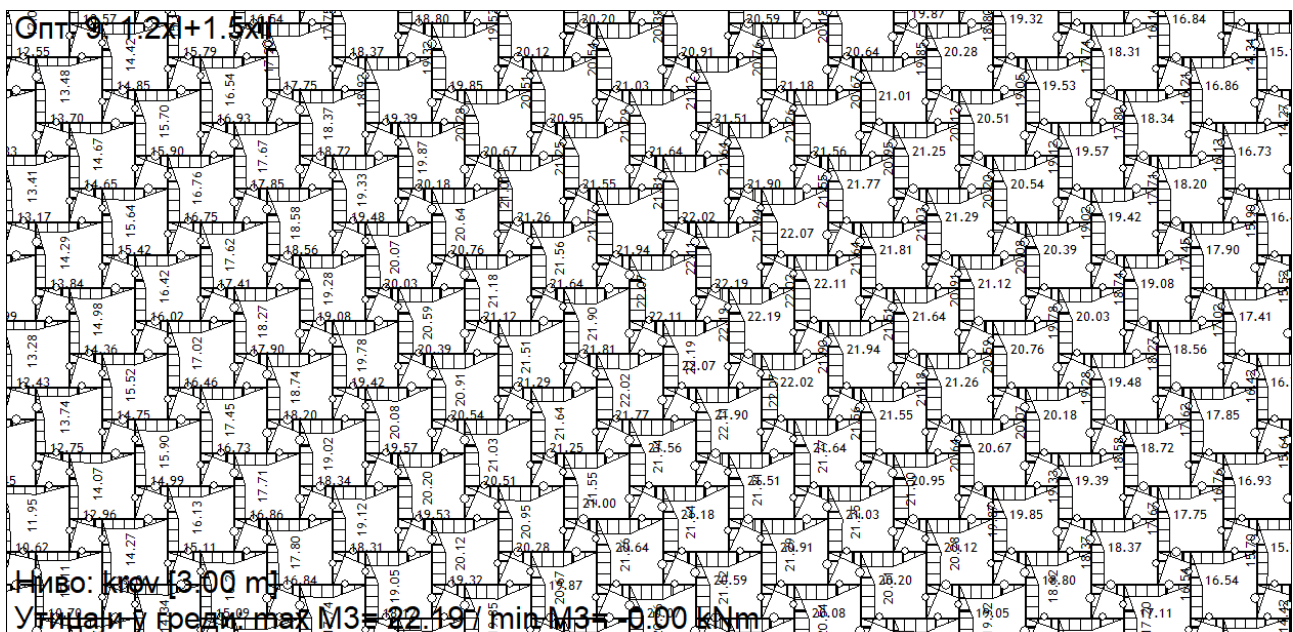
Опт. 9: 1.2xI+1.5xII



Ниво: кров [3.00 m]

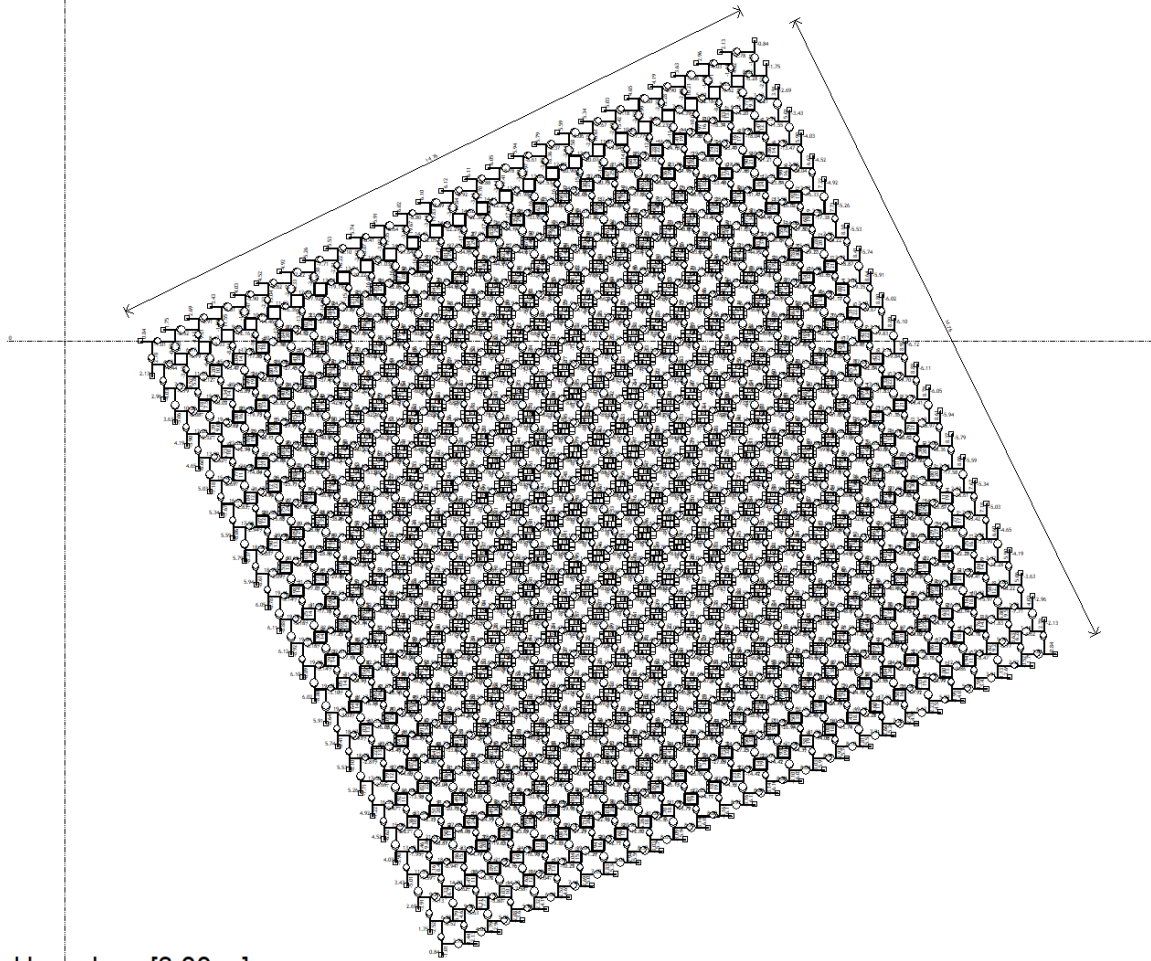
Утицаји у греди: max M3= 22.19 / min M3= -0.00 kNm

Слика 180. Моменти савијања у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/310-620$ mm



Слика 181. Средишњи сегмент дијаграма момената савијања у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/310-620$ mm

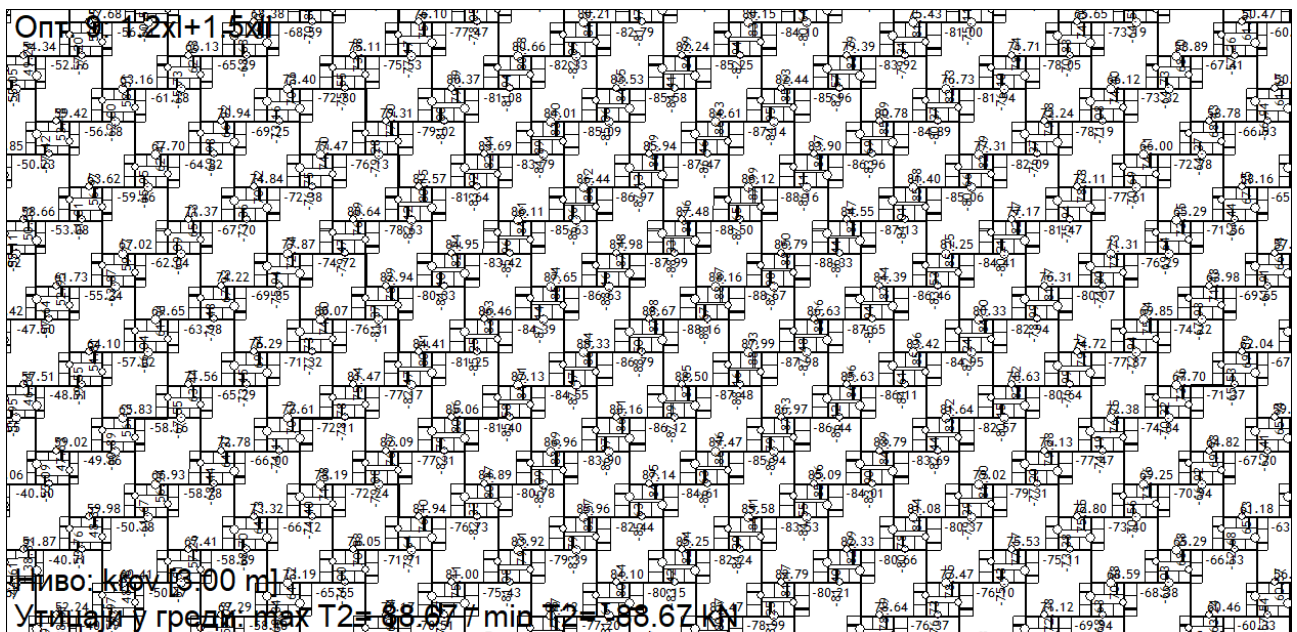
Опт. 9: 1.2xl+1.5xll



Ниво: кров [3.00 m]

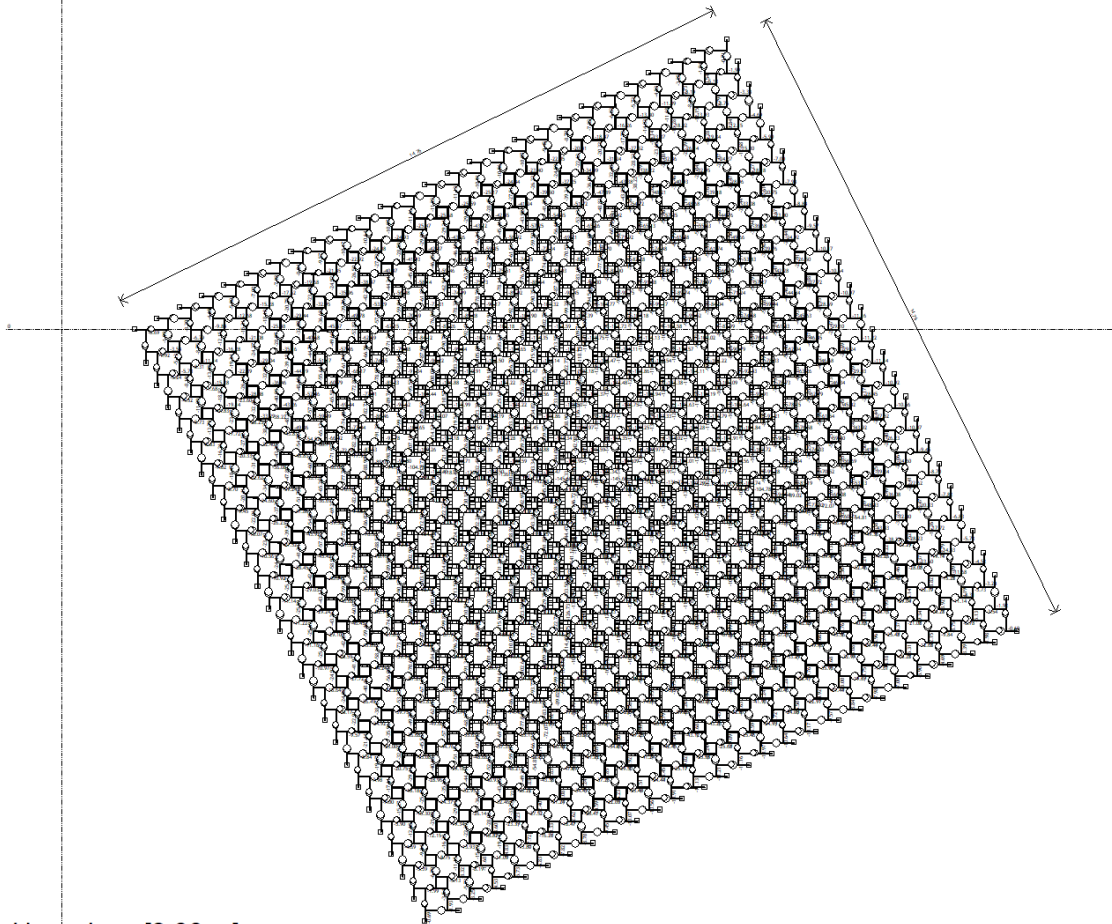
Утицаји у греди: max T2= 88.67 / min T2= -88.67 kN

Слика 182. Трансверзалне силе у реципрочној конструкцији – штапови b/d=30/310-620 mm



Слика 183. Средишњи сегмент дијаграма трансверзалних сила у реципрочној конструкцији – штапови b/d=30/310-620 mm

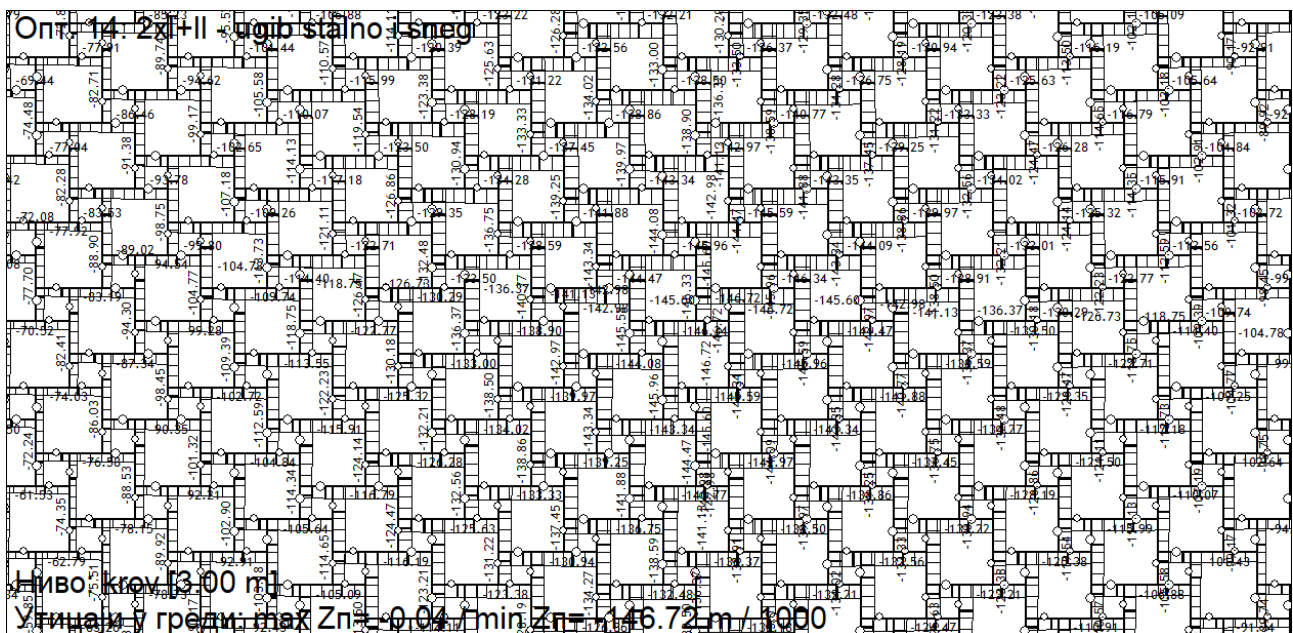
Опт. 14: 2xI+II - угиб stalno i снег



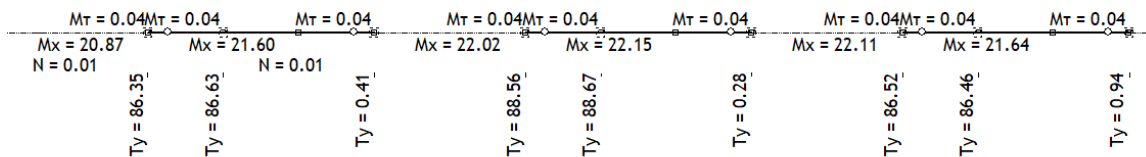
Ниво: кров [3.00 m]

Утицаји у греди: max $Z_p = -0.04$ / min $Z_p = -146.72$ m / 1000

Слика 184. Угиби у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/310-620$ mm



Слика 185. Средишњи сегмент дијаграма угиба у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/310-620$



Слика 186. Рам X₄₀ – утицаји у индиректним елементима

Одређивање геометрије попречног пресека:

1. Димензионисање носача код ослонца

Димензије греде код ослонца:

$375 \times 30 \text{ mm}$, ($b_{ef} = 25.8 - 14\%$ слојева управно оријентисаних);

$$A_e = 9675 \text{ mm}^2, I_x = 1.13 \times 10^8 \text{ mm}^4, W_x = 6.05 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$$I_{x,e} = \frac{(b - t_l) d^3}{12} = \frac{(30 - 4.2) \times 375^2}{12} = 1.13 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$W_{x,e} = \frac{(b - t_l) d^2}{6} = \frac{(30 - 4.2) \times 375^2}{6} = 6.05 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$$A_e = (b - t_l) d = (30 - 4.2) \times 375 = 9675 \text{ mm}^2$$

Одређивање коефицијента k_{12}

$$k_{12}: \rho_b = 14.71 \left(\frac{E}{f_{m, edge}} \right)^{-0.480} r^{-0.061}$$

$$= 14.71 \times \left(\frac{12250}{77} \right)^{-0.480} \times \frac{12.21}{23.60}$$

$$= 14.71 \times \left(\frac{12250}{77} \right)^{-0.480} \times \frac{12.21}{23.60}$$

$$= 1.34$$

$$S_1 = 1.25 \left(\frac{d}{b} \right) \left(\frac{L_{ay}}{d} \right)^{0.50}$$

$$= 1.25 \times \left(\frac{375}{30} \right) \times \left(\frac{250}{375} \right)^{0.50} = 12.76$$

где је $L_{ay} = 250 \text{ mm}$ размак између бочних придржајних тачака греде у оси z .

$$\rho_b S_1 = 1.34 \times 12.76 = 17.14$$

$$k_{12} = 1.5 - 0.05 \rho_b S_1 \quad \text{за } 10 \leq \rho_b S_1 \leq 20$$

$$= 1.5 - 0.05 \times 17.14 = 0.64$$

Димензионисање на основу савијања

Одређивање потребног отпорног момента

$$M_d \geq M$$

$$M_d \geq \emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} f'_b W_x$$

$$W_{x,pot} \geq \frac{M}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} f'_b}$$

$$W_{x,pot} \geq \frac{22.19 \times 10^6}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0.64 \times 77} = 5.30 \times 10^5$$

$$W_{x,stv} = 6.05 \times 10^5 \text{ mm}^3 > W_{x,pot} = 5.30 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$$f'_{b,stv} \geq \frac{M}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} W_x}$$

$$f'_{b,stv} \geq \frac{22.19 \times 10^6}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0.64 \times 6.05 \times 10^5} = 67.47 \text{ MPa}$$

$$f'_{b,stv} = 67.47 \text{ MPa} < f'_b = 77 \text{ MPa}$$

Напони савијања су у границама допуштених напона.

Димензионисање на основу смицања

Одређивање потребне површине попречног пресека

$$V_d \geq V$$

$$V_d \geq \emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 f'_s A_s$$

$$A_s \geq \frac{V}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 f'_s}$$

$$A_s \geq \frac{88.67 \times 10^3}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 1 \times 1 \times 18} = 5822.82 \text{ mm}^2$$

$$A_s < A_e = 9675 \text{ mm}^2 \text{ за димензије } 375 \times 30 \text{ mm.}$$

$$f_{v,edge} = \frac{V}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 A}$$

$$f_{v,edge} = \frac{88.67 \times 10^3}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 1 \times 1 \times 9675} = 10.83 \text{ MPa}$$

$$f_{v,edge} = 10.83 \text{ MPa} < f'_s = 18 \text{ MPa}$$

Напони смицања су у границама допуштених напона.

Контрола контактних напона

$$f_{c,edge} = 26 \text{ MPa}, Q_{max} = 88.67 \text{ kN}$$

$$f_{c,edge,stv} = \frac{Q}{A_{stv}} = \frac{88.67 \times 10^3}{30^2} = 98.52 \text{ MPa}$$

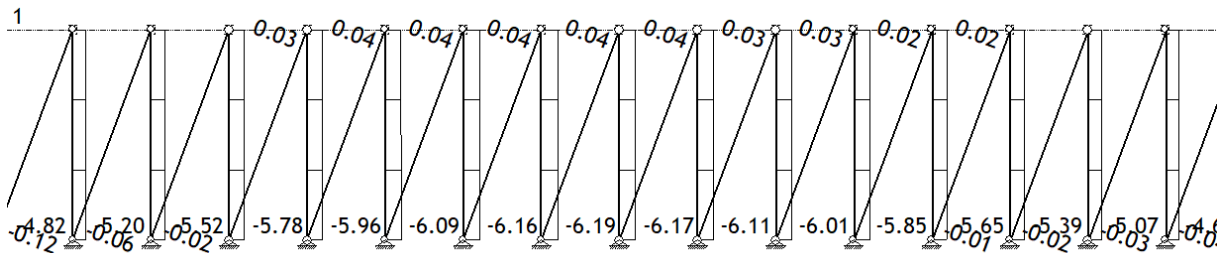
$$f_{c,edge,stv} = 98.52 \text{ MPa} > f_{c,edge} = 26 \text{ MPa}$$

$$Q_{stv} = A_{stv} f_{c,edge} = 30^2 \times 26 = 23\,400 \text{ N} = 23.4 \text{ kN}$$

Контактни напони су прекорачени.

Одређивање статичких утицаја у стубу димензија $100 \times 30 \text{ mm}$

Сегмент дијаграма нормалних сила у стубовима приказан је на слици 187.



Поглед: зид1

Утицаји у греди: $\max N1 = 0.48 / \min N1 = -6.19 \text{ kN}$

Слика 187. Нормалне силе у стубу (сегмент конструкције) – штапови $b/d=30/100 \text{ mm}$

1. Димензионисање стуба

Одређивање геометрије попречног пресека:

$100 \times 30 \text{ mm}$, ($b_{ef} = 25.8 - 14\%$ слојева управно оријентисаних);

$$A_e = 2580 \text{ mm}^2, I_x = 2.15 \times 10^6 \text{ mm}^4, I_y = 1.43 \times 10^5 \text{ mm}^4$$

$$I_{x,e} = \frac{(b - t_l) d^3}{12} = \frac{(30 - 4.2) \times 100^2}{12} = 2.15 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_{y,e} = \frac{d (b - t_l)^3}{12} = \frac{100 \times (30 - 4.2)^2}{12} = 1.43 \times 10^5 \text{ mm}^4$$

$$A_e = (b - t_l) d = (30 - 4.2) \times 100 = 2580 \text{ mm}^2$$

Одређивање коефицијента k_{12}

$$k_{12}: \rho_b = 11.39 \left(\frac{E}{f_{c,edge}} \right)^{-0.480} r^{-0.074}$$

$$= 11.39 \times \left(\frac{12250}{50} \right)^{-0.480} \times \frac{3.39^{-0.074}}{6.58}$$

$$= 11.39 \times \left(\frac{12250}{50}\right)^{-0.480} \times \frac{3.39^{-0.074}}{6.58}$$

$$= 0.84$$

Извијање око x – осе $S_3 = \frac{g_{13} L_x}{d}$

$$S_3 = \frac{1.0 \times 1300}{100} = 13.0$$

Извијање око y – осе $S_4 = \frac{g_{13} L_y}{b}$

$$S_4 = \frac{1.0 \times 1300}{30} = 43.33$$

где је $L_a = 1300 \text{ mm}$ дужина извијања стуба за посматрану осу.

$$\rho_b S_3 = 0.84 \times 13.0 = 10.92$$

$$\rho_b S_4 = 0.84 \times 43.33 = 36.40$$

$$S_3 \rightarrow k_{12} = 1.5 - 0.05 \rho_b S_3 \quad \text{за } 10 \leq \rho_b S_1 \leq 20$$

$$= 1.5 - 0.05 \times 10.92 = 0.95$$

$$S_4 \rightarrow k_{12} = \frac{200}{(\rho_b S_4)^2} = \frac{200}{36.40^2} = 0.15 \quad \text{за } \rho_b S_4 > 20$$

Контрола напона у стубу

$$N_{d,cx} \geq N_c; N_{d,cy} \geq N_c;$$

$$N_{d,c} = \emptyset k_1 k_4 k_6 k_{12} f'_c A_c$$

$$f_{c,stv} \leq f_c = 50 \text{ MPa}$$

$$f_{c,stv} = \frac{N}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_{12,S3} A_{stv}}$$

$$f_{c,x,stv} = \frac{6.19 \times 10^6}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 0.95 \times 50} = 2.98 \text{ MPa}$$

$$f_{c,x,stv} = 2.98 \text{ MPa} < f_c = 50 \text{ MPa}$$

$$f_{c,stv} = \frac{N}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_{12,S4} A_{stv}}$$

$$f_{c,y,stv} = \frac{6.19 \times 10^6}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 0.15 \times 50} = 18.99 \text{ MPa}$$

$$f_{c,y,stv} = 18.99 \text{ MPa} < f_c = 50 \text{ MPa}$$

Напони су у границама допуштених напона.

Прорачун виткости

$$\lambda_x = \frac{L_x}{i_x} = \frac{1300}{0.289 \times 30} = 149.94$$

$$\lambda_y = \frac{L_y}{i_y} = \frac{1300}{0.289 \times 100} = 44.98$$

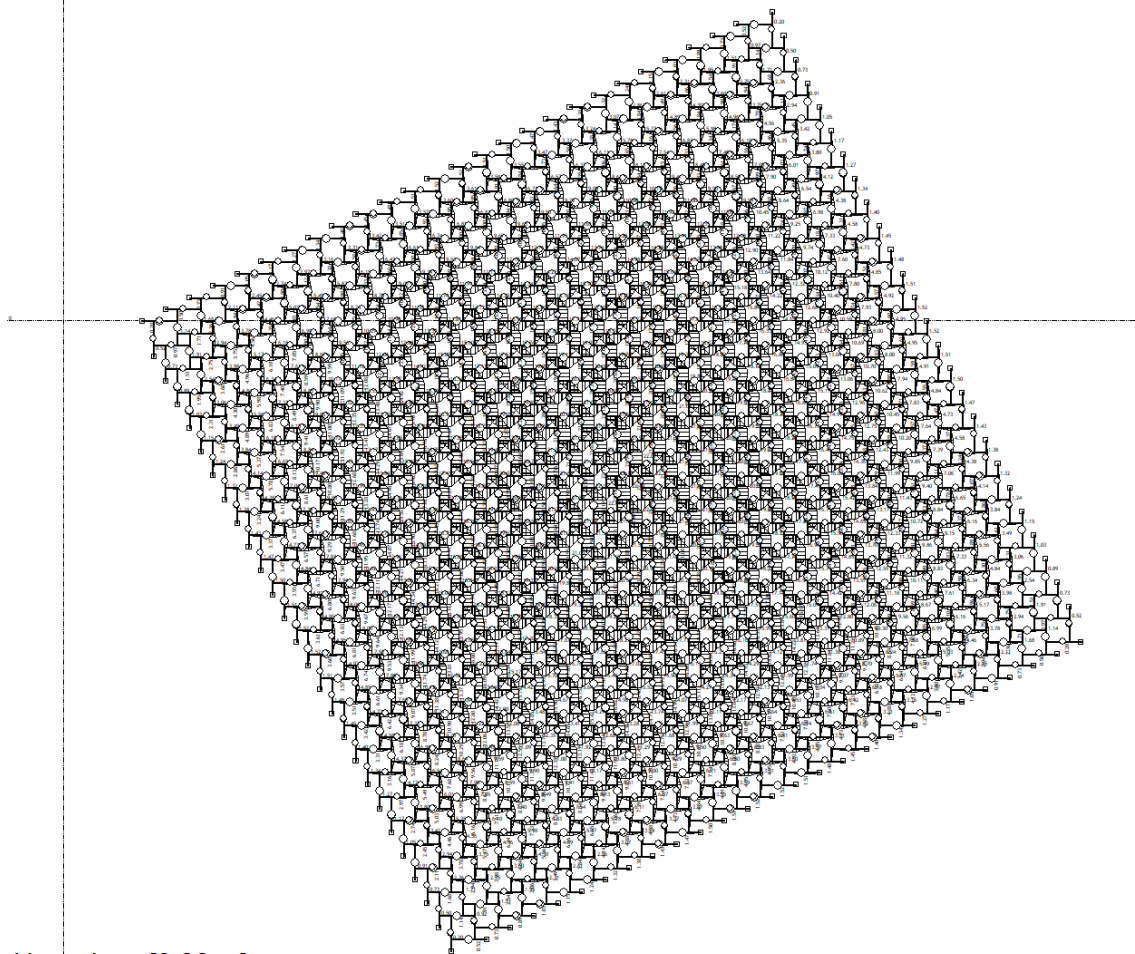
Прилог 8 – Димензионисање симулационог модела 2 - нејачани LVL елементи

Пример 1.

Одређивање статичких утицаја и димензионисање гредног елемената 30/375 – 750 mm.

На слици 188 приказан је дијаграм момената савијања целокупне структуре, а његов сегмент на слици 189. Дијаграм трансверзалних сила приказан је на слици 190, са сегментом на слици 191, а дијаграм угиба на слици 192 и својим увећаним сегментом на слици 193.

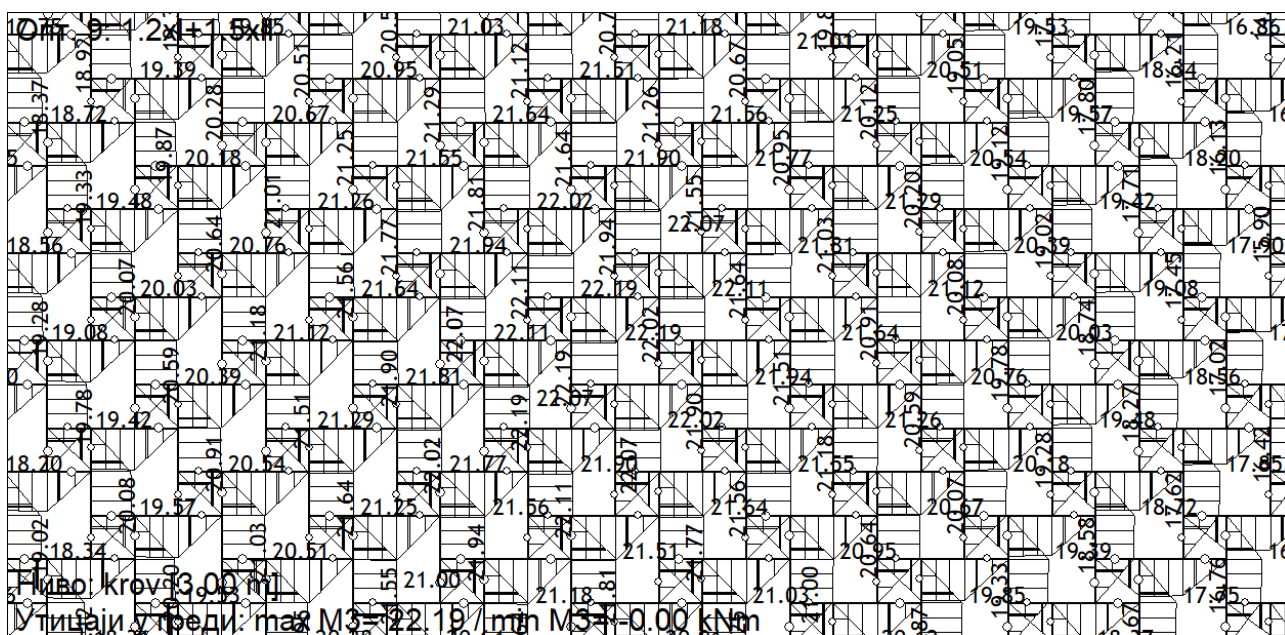
Опт. 9: 1.2xl+1.5xll



Ниво: кров [3.00 m]

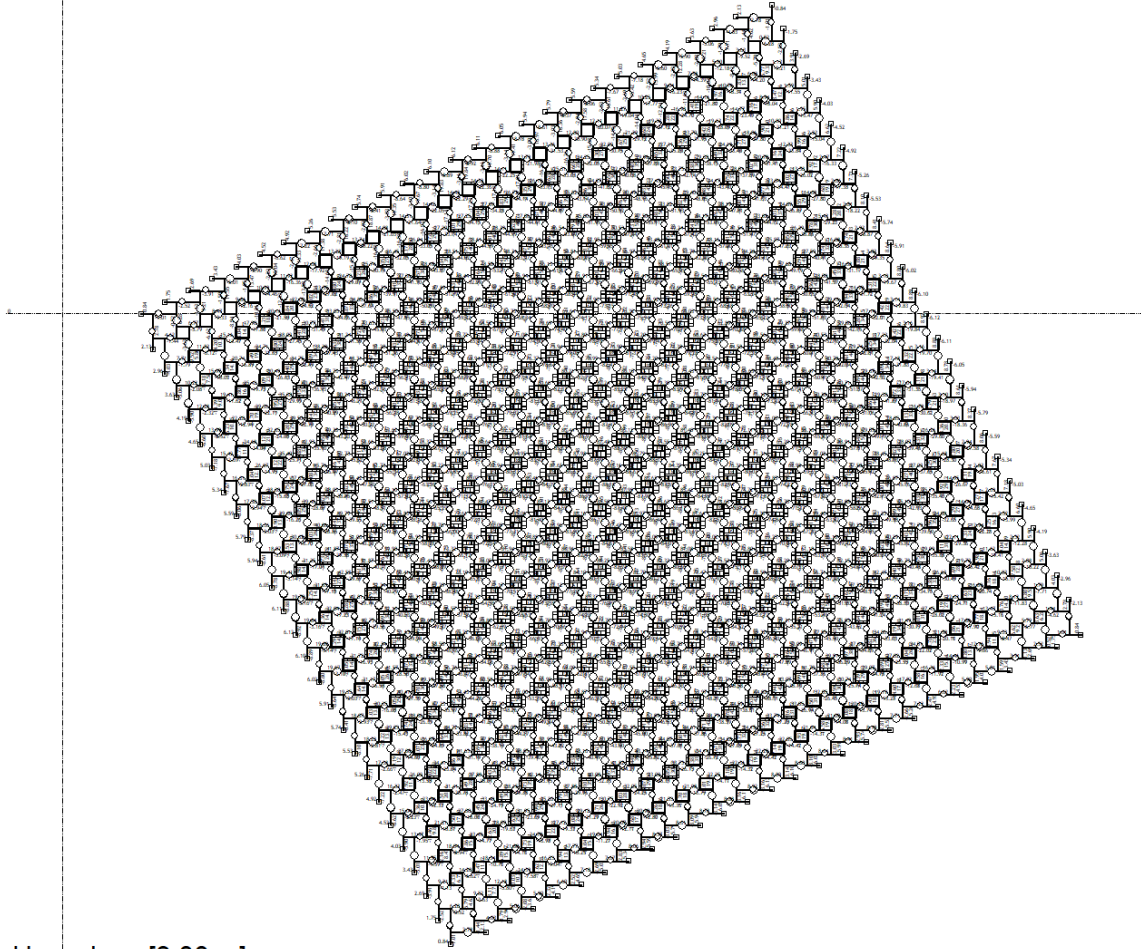
Утицаји у греди: max M3= 22.19 / min M3= -0.00 kNm

Слика 188. Моменти савијања у реципрочној конструкцији – штапови b/d=30/375-750 mm



Слика 189. Средишњи сегмент дијаграма момената савијања у реципрочној конструкцији – штапови b/d=30/375-750 mm

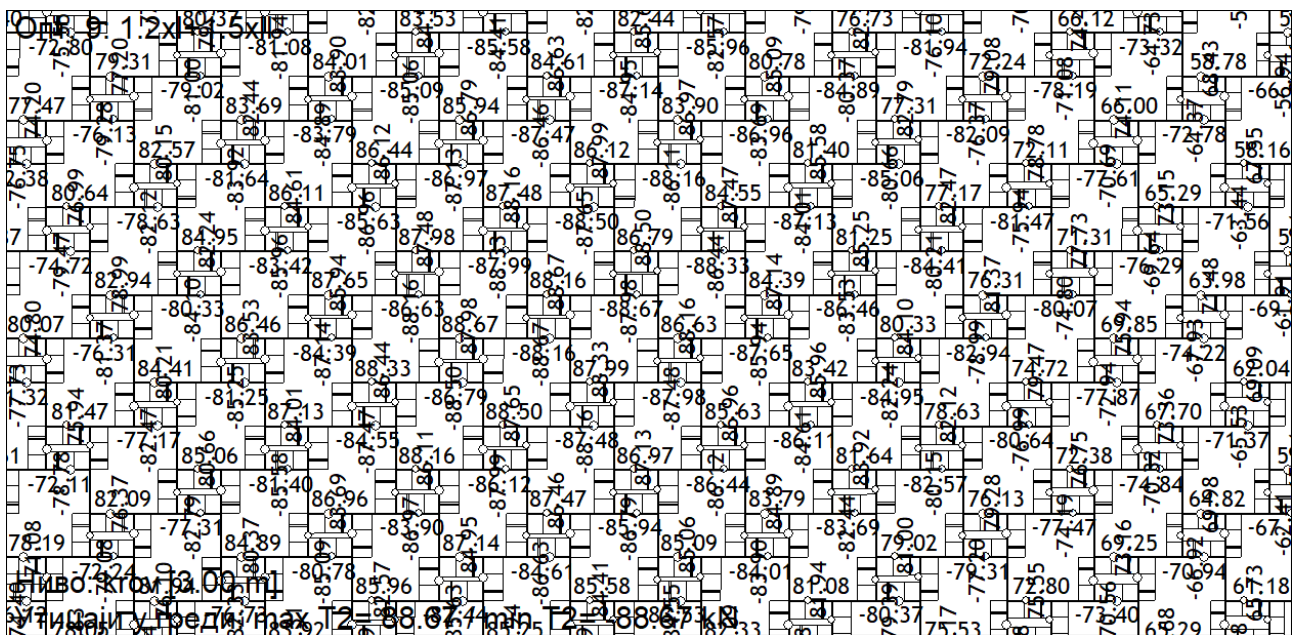
Опт. 9: 1.2xI+1.5xII



Ниво: кров [3.00 m]

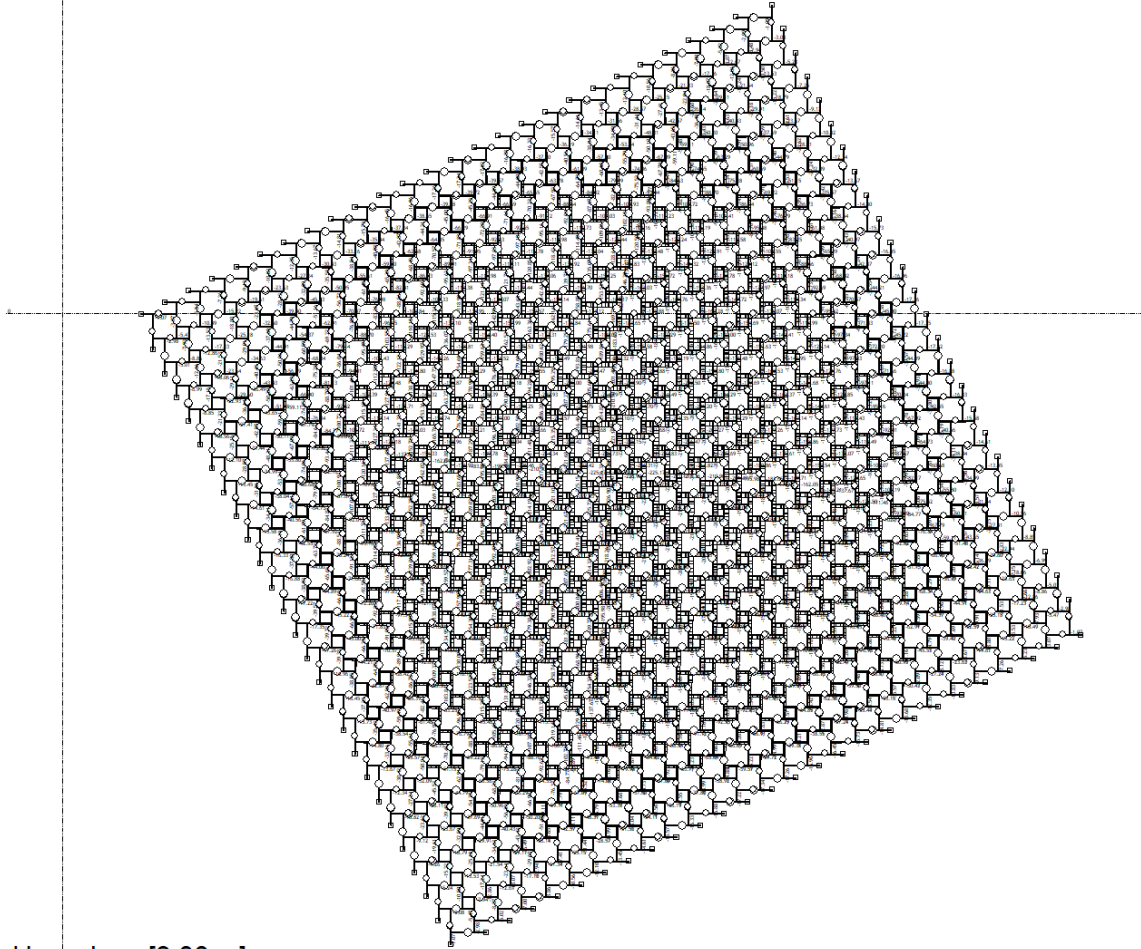
Утицаји у греди: max T2= 88.67 / min T2= -88.67 kN

Слика 190. Трансверзалне силе у реципрочној конструкцији – штапови b/d=30/375-750 mm



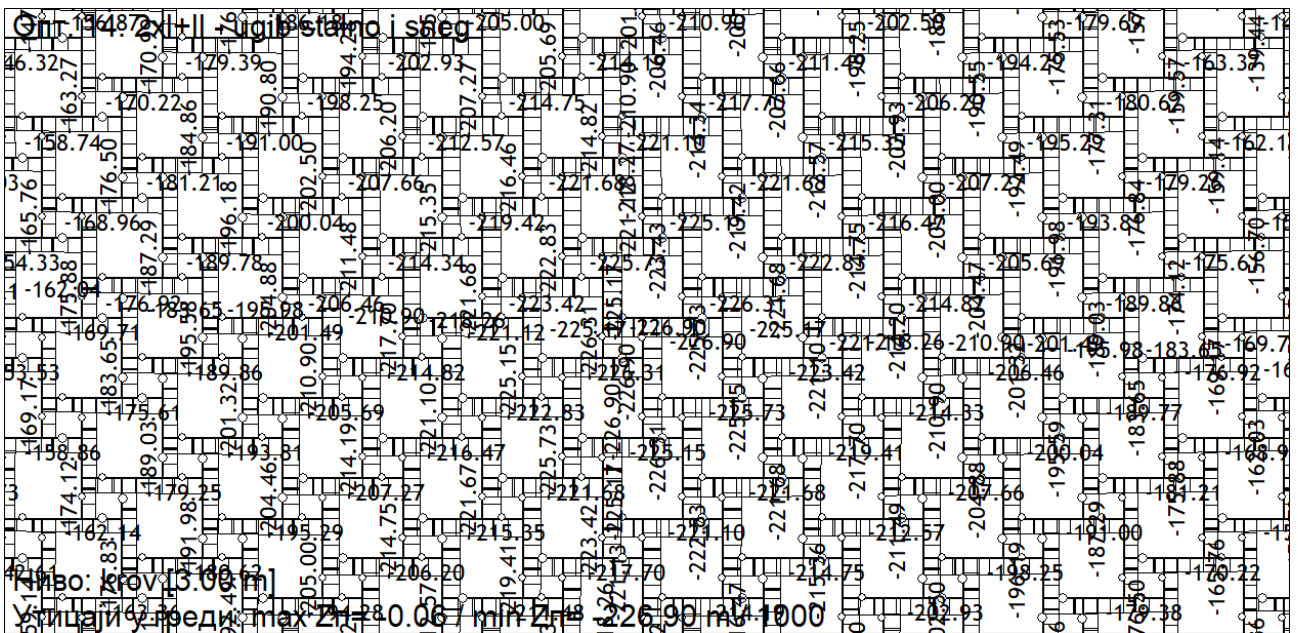
Слика 191. Средишњи сегмент дијаграма трансверзалних сила у реципрочној конструкцији – штапови b/d=30/375-750 mm

Опт. 14: 2xI+II - угиб stalno i sneg



Ниво: кров [3.00 m]
 Утицаји у греди: max $Z_p = -0.06$ / min $Z_p = -226.90$ m / 1000

Слика 192. Угиби у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/375-750$ mm



Слика 193. Средишњи сегмент дијаграма угиба у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/375-750$ mm

1. Димензионисање носача код ослонца

Одређивање геометријских карактеристика пресека:

$30 \times 375 \text{ mm}$, ($b_{ef} = 25.8 - 14\%$ слојева управно оријентисаних);

$$A_e = 9675 \text{ mm}^2, I_x = 1.13 \times 10^8 \text{ mm}^4, W_x = 6.05 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

Одређивање коефицијента k_{12}

$$\begin{aligned} k_{12}: \rho_b &= 14.71 \left(\frac{E}{f_{m, edge}} \right)^{-0.480} r^{-0.061} \\ &= 14.71 \times \left(\frac{7925}{56} \right)^{-0.480} \times \frac{12.21^{-0.061}}{23.60} \\ &= 14.71 \times \left(\frac{7925}{56} \right)^{-0.480} \times \frac{12.21^{-0.061}}{23.60} \\ &= 1.42 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_1 &= 1.25 \left(\frac{d}{b} \right) \left(\frac{L_{ay}}{d} \right)^{0.50} \\ &= 1.25 \times \left(\frac{375}{30} \right) \times \left(\frac{250}{375} \right)^{0.50} = 12.76 \end{aligned}$$

где је $L_{ay} = 250 \text{ mm}$ размак између бочних придржајних тачака греде у оси z .

$$\rho_b S_1 = 1.42 \times 12.76 = 18.13$$

$$k_{12} = 1.5 - 0.05 \rho_b S_1 \quad \text{за } 10 \leq \rho_b S_1 \leq 20$$

$$= 1.5 - 0.05 \times 18.13 = 0.59$$

Димензионисање на основу савијања

Одређивање потребног отпорног момента

$$M_d \geq M$$

$$M_d \geq \emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} f'_b W_x$$

$$W_{x, pot} \geq \frac{M}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} f'_b}$$

$$W_{x, pot} \geq \frac{22.19 \times 10^6}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0.59 \times 56} = 7.89 \times 10^5$$

$$W_{x, stv} = 6.05 \times 10^5 \text{ mm}^3 < W_{x, pot} = 7.89 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$$f'_{b, stv} \geq \frac{M}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} W_x}$$

$$f'_{b,stv} \geq \frac{22.19 \times 10^6}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0.59 \times 6.05 \times 10^5} = 73.10 \text{ MPa}$$

$$f'_{b,stv} = 73.10 \text{ MPa} > f'_b = 56 \text{ MPa}$$

Напони савијања носача су прекорачени ≈ 1.3 пута (30%).

Димензионисање на основу смицања

Одређивање потребне површине попречног пресека

$$V_d \geq V$$

$$V_d \geq \emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 f'_s A_s$$

$$A_s \geq \frac{V}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 f'_s}$$

$$A_s \geq \frac{88.67 \times 10^3}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 12.5} = 8384.87 \text{ mm}^2$$

$$A_s < A_e = 9675 \text{ mm}^2 \text{ за димензије } 375 \times 30 \text{ mm.}$$

$$f_{v,edge} = \frac{V}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 A}$$

$$f_{v,edge} = \frac{88.67 \times 10^3}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 9675} = 10.83 \text{ MPa}$$

$$f_{v,edge} = 10.83 \text{ MPa} < f'_s = 12.5 \text{ MPa}$$

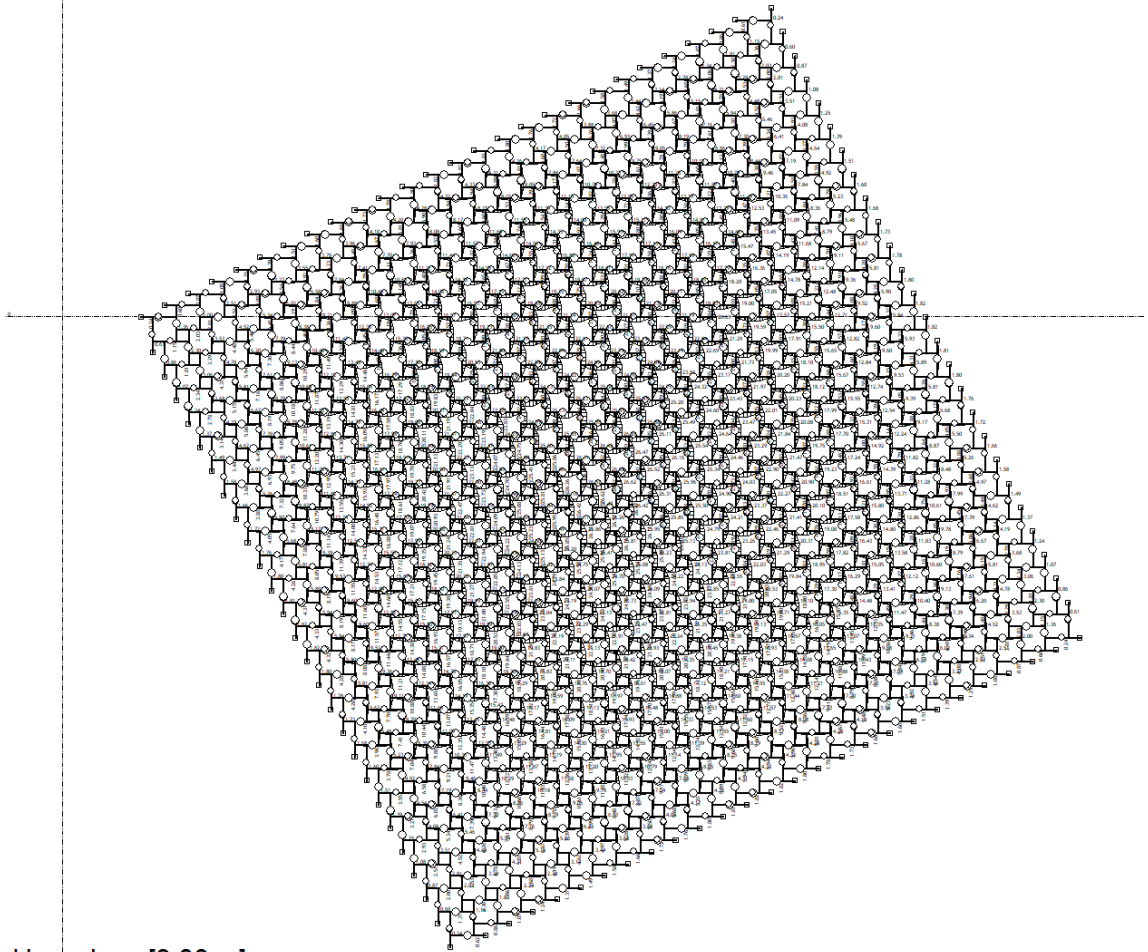
Напони смицања су у границама допуштених напона.

Пример 2.

Одређивање статичких утицаја и димензионисање гредног елемената 30/630 – 1260 mm.

На слици 194 приказан је дијаграм момената савијања целокупне структуре, а на слици 195 сегмент дијаграма момената савијања. Дијаграм трансверзалних сила приказан је на слици 196, са својим увећаним сегментом на слици 197. Дијаграм угиба целокупне структуре приказан је на слици 198, а његов увећани сегмент на слици 199. Утицаји у индиректним елементима потребни за контролу контактних напона на месту ослањања елемената приказани су на слици 200.

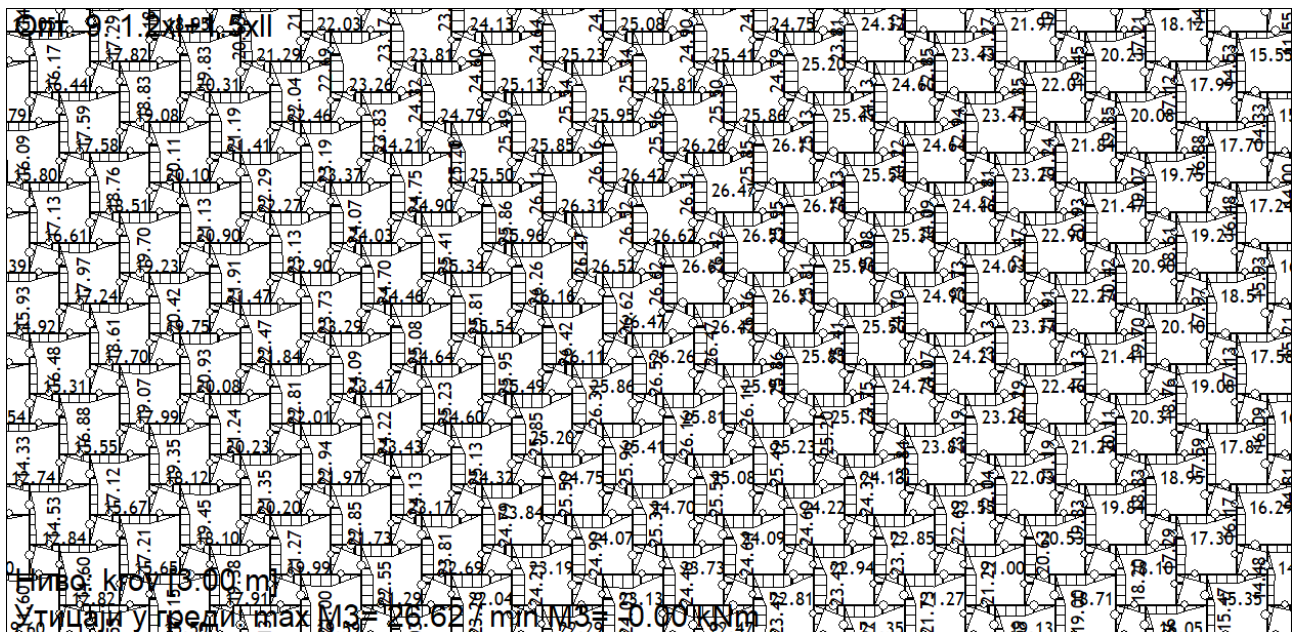
Опт. 9: 1.2xl+1.5xII



Ниво: кров [3.00 m]

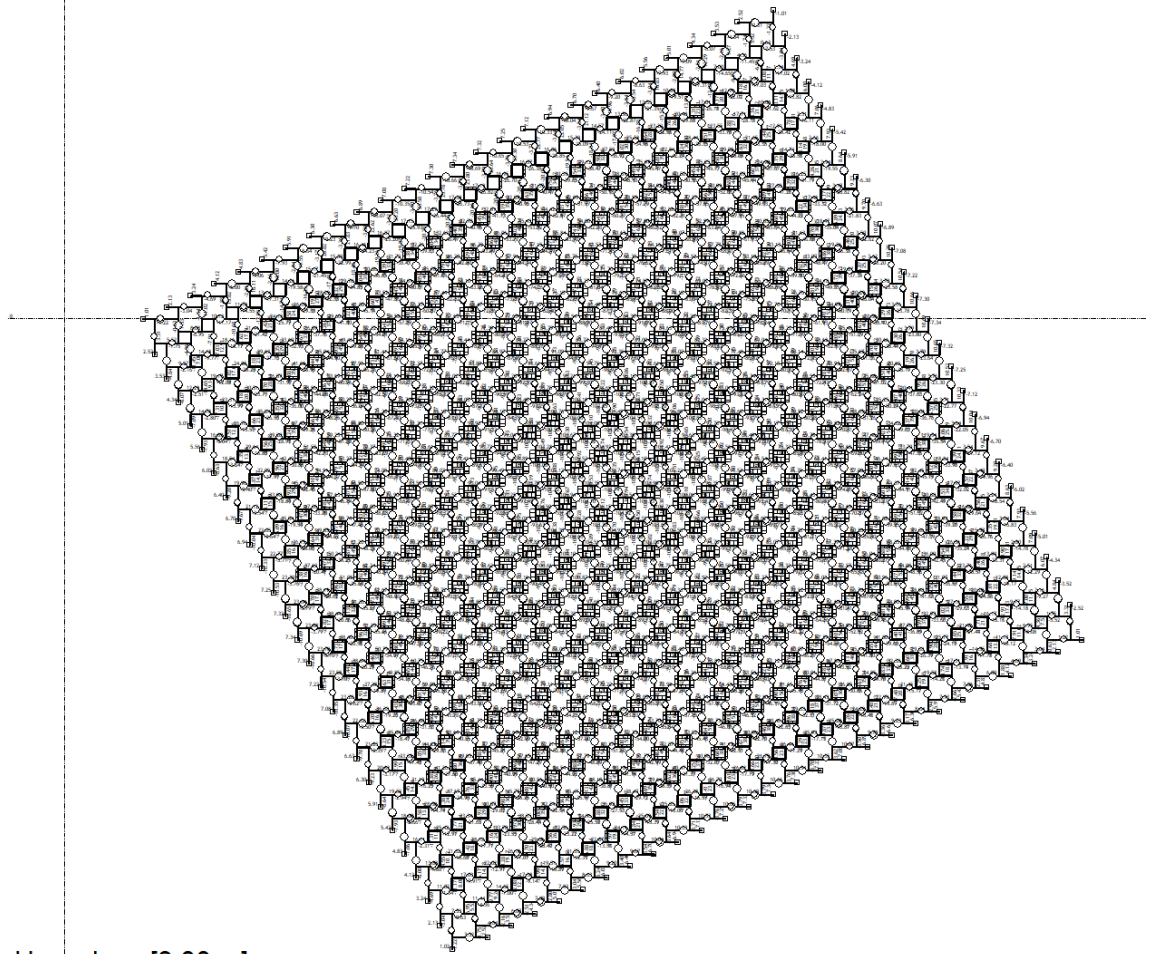
Утицаји у греди: max M3= 26.62 / min M3= -0.00 kNm

Слика 194. Моменти савијања у реципрочној конструкцији – штапови b/d=30/630-1260 mm



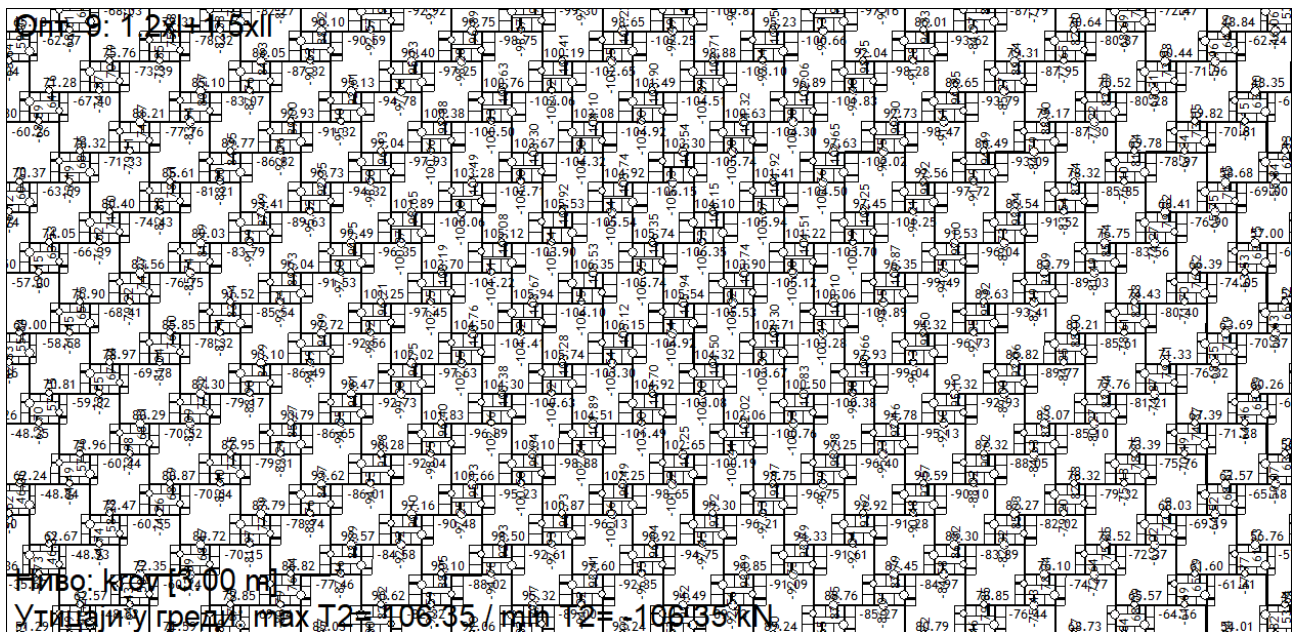
Слика 195. Средишњи сегмент дијаграма момената савијања у реципрочној конструкцији – штапови b/d=30/630-1260 mm

Опт. 9: 1.2xI+1.5xII



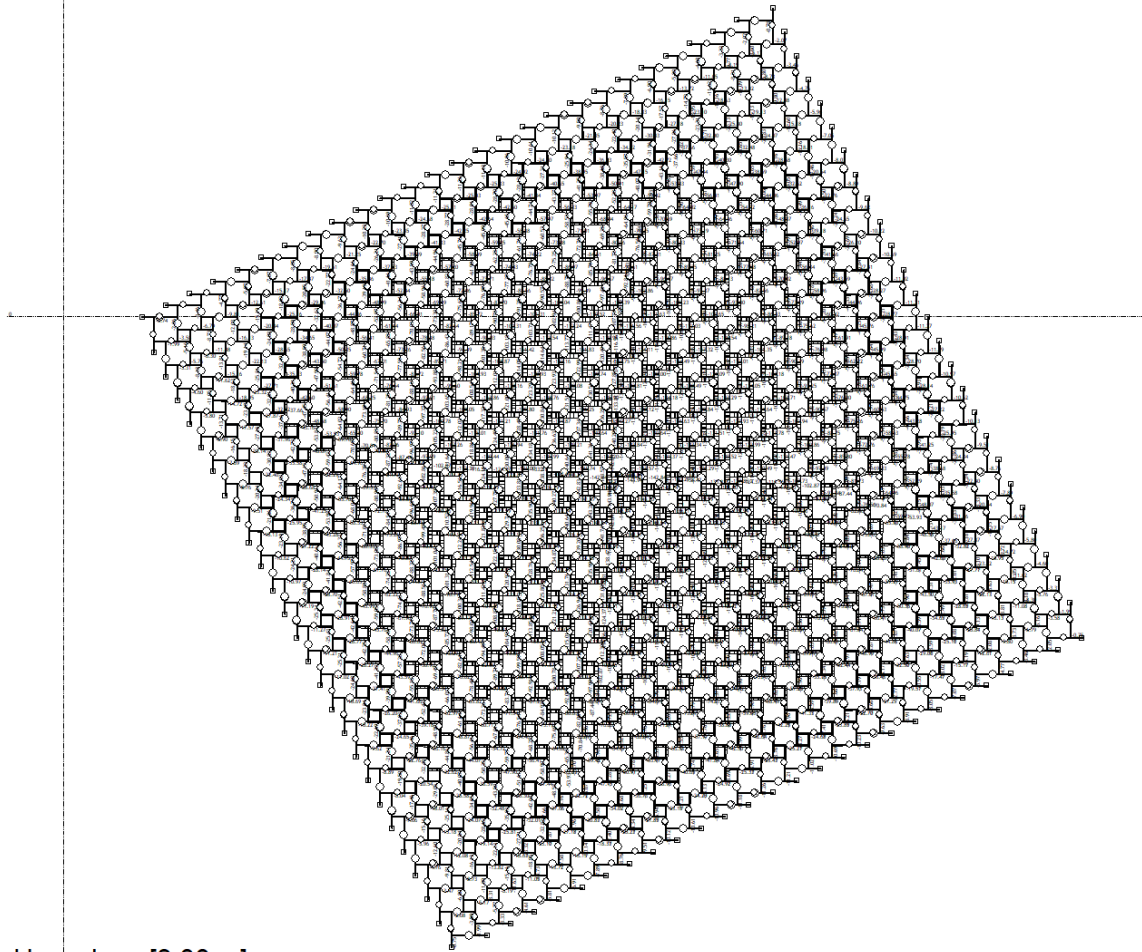
Ниво: кров [3.00 m]
Утицаји у греди: max T2= 106.35 / min T2= -106.35 kN

Слика 196. Трансверзалне силе у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/630-1260$ mm



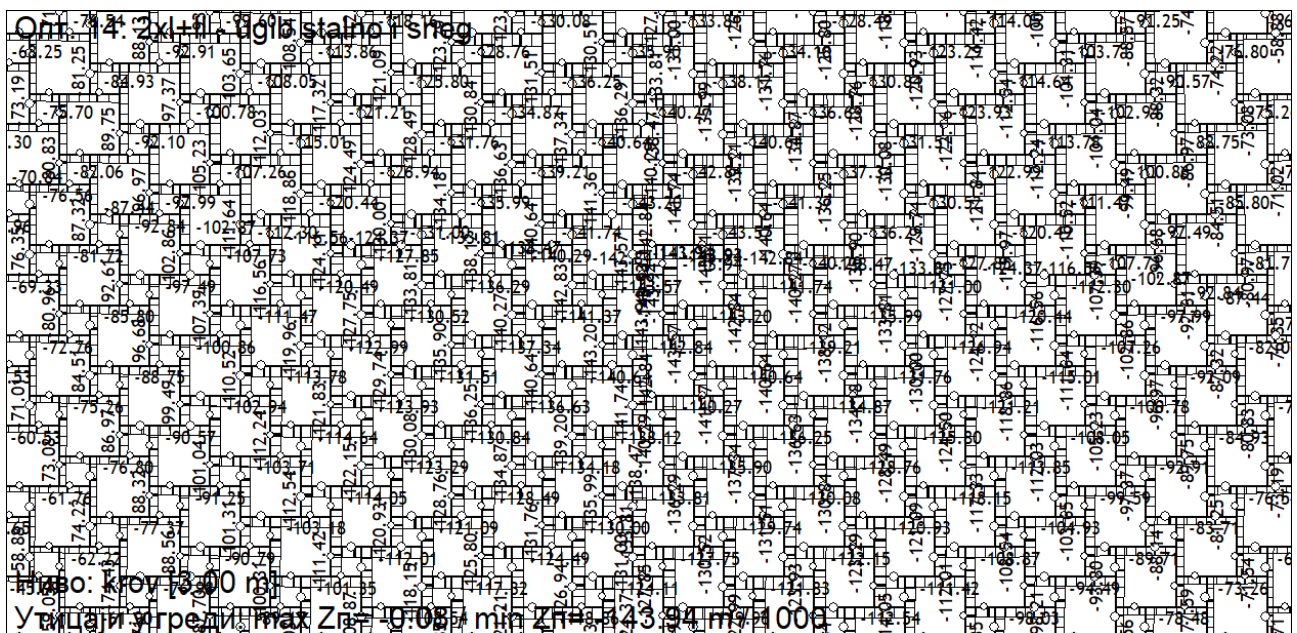
Слика 197. Средишњи сегмент дијаграма трансверзалних сила у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/630-1260$ mm

Опт. 14: 2xI+II - угиб stalno i sneg

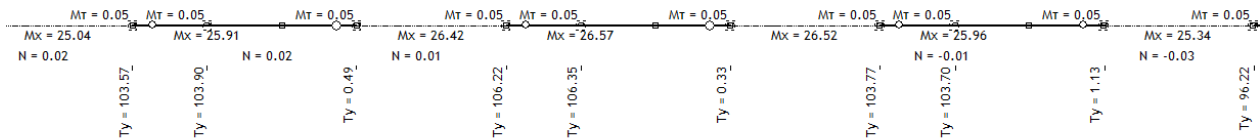


Ниво: кров [3.00 m]
 Утицаји у греди: max $Z_p = -0.08$ / min $Z_p = -143.94$ m / 1000

Слика 198. Угиби у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/630-1260$ mm



Слика 199. Средишњи сегмент дијаграма угиба у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/630-1260$ mm



Слика 200. Рам X₄₀ – утицаји у индиректним елементима

1. Димензионисање носача код ослонца

Одређивање геометријских карактеристика пресека:

$30 \times 630 \text{ mm}$, ($b_{ef} = 25.8 - 14\%$ слојева управно оријентисаних);

$$A_e = 16254 \text{ mm}^2, I_x = 5.38 \times 10^8 \text{ mm}^4, W_x = 1.71 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

Одређивање коефицијента k_{12}

$$\begin{aligned} k_{12}: \rho_b &= 14.71 \left(\frac{E}{f_{m, edge}} \right)^{-0.480} r^{-0.061} \\ &= 14.71 \times \left(\frac{7925}{56} \right)^{-0.480} \times \frac{12.21}{28.32} \\ &= 14.71 \times \left(\frac{7925}{56} \right)^{-0.480} \times \frac{12.21}{28.32} \\ &= 1.44 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_1 &= 1.25 \left(\frac{d}{b} \right) \left(\frac{L_{ay}}{d} \right)^{0.50} \\ &= 1.25 \times \left(\frac{630}{30} \right) \times \left(\frac{250}{630} \right)^{0.50} = 16.54 \end{aligned}$$

где је $L_{ay} = 250 \text{ mm}$ размак између бочних придржајних тачака греде у оси z .

$$\rho_b S_1 = 1.44 \times 16.54 = 23.76$$

$$k_{12} = \frac{200}{(\rho_b S_1)^2} = \frac{200}{23.76^2} = 0.35 \quad \text{за} \quad \rho_b S_1 > 20$$

Димензионисање на основу савијања

Одређивање потребног отпорног момента

$$M_d \geq M$$

$$M_d \geq \emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} f'_b W_x$$

$$W_{x, pot} \geq \frac{M}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} f'_b}$$

$$W_{x, pot} \geq \frac{26.62 \times 10^6}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0.35 \times 56} = 1.59 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$W_{x,stv} = 1.71 \times 10^6 \text{ mm}^3 > W_{x,pot} = 1.59 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$f'_{b,stv} \geq \frac{M}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 k_x k_{12} W_x}$$

$$f'_{b,stv} \geq \frac{26.62 \times 10^6}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0.35 \times 1.71 \times 10^6} = 52.06 \text{ MPa}$$

$$f'_{b,stv} = 52.06 \text{ MPa} < f'_b = 56 \text{ MPa}$$

Напони савијања носача су у границама допуштених напона. .

Димензионисање на основу смицања

Одређивање потребне површине попречног пресека

$$V_d \geq V$$

$$V_d \geq \emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 f'_s A_s$$

$$A_s \geq \frac{V}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 f'_s}$$

$$A_s \geq \frac{106.35 \times 10^3}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 1 \times 1 \times 12.5} = 10056.74 \text{ mm}^2$$

$$A_s < A_e = 16254 \text{ mm}^2 \text{ за димензије } 30 \times 630 \text{ mm.}$$

$$f_{v,edge} = \frac{V}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_9 A}$$

$$f_{v,edge} = \frac{106.35 \times 10^3}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 1 \times 1 \times 16254} = 7.73 \text{ MPa}$$

$$f_{v,edge} = 7.73 \text{ MPa} < f'_s = 12.5 \text{ MPa}$$

Напони смицања су у границама допуштених напона.

Контрола контактних напона

$$f_{c,edge} = 13 \text{ MPa}, Q_{max} = 106.35 \text{ kN}$$

$$f_{c,edge,stv} = \frac{Q}{A_{stv}} = \frac{106.35 \times 10^3}{30^2} = 118.16 \text{ MPa}$$

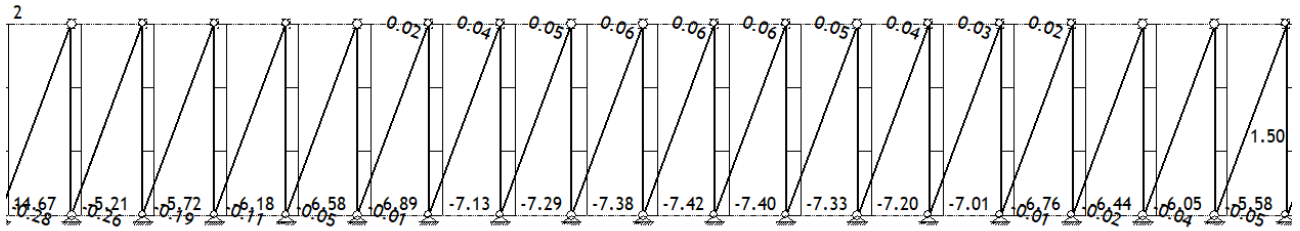
$$f_{c,edge,stv} = 118.16 \text{ MPa} > f_{c,edge} = 13 \text{ MPa}$$

$$Q_{stv} = A_{stv} f_{c,edge} = 30^2 \times 13 = 11700 \text{ N} = 11.7 \text{ kN}$$

Контактни напони су прекорачени.

Одређивање статичких утицаја у стубу димензија $100 \times 30 \text{ mm}$

Сегмент дијаграма нормалних сила за најоптерећенији стуб у структури приказан је на слици 201.



Поглед: зид 1

Утицаји у греди: $\max N_1 = 0.71 / \min N_1 = -7.42 \text{ kN}$

Слика 201. Нормалне силе у стубу (сегмент конструкције) – штапови $b/d=30/100 \text{ mm}$

1. Димензионисање стуба

Димензије стуба:

$100 \times 30 \text{ mm}$, ($b_{ef} = 25.8 - 14\%$ слојева управно оријентисаних);

$$A_e = 2580 \text{ mm}^2, I_x = 2.15 \times 10^6 \text{ mm}^4, I_y = 1.43 \times 10^5 \text{ mm}^4$$

$$I_{x,e} = \frac{(b - t_l) d^3}{12} = \frac{(30 - 4.2) \times 100^2}{12} = 2.15 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_{y,e} = \frac{d (b - t_l)^3}{12} = \frac{100 \times (30 - 4.2)^2}{12} = 1.43 \times 10^5 \text{ mm}^4$$

$$A_e = (b - t_l) d = (30 - 4.2) \times 100 = 2580 \text{ mm}^2$$

Одређивање коефицијента k_{12}

$$k_{12}: \rho_b = 11.39 \left(\frac{E}{f_{c, edge}} \right)^{-0.480} r^{-0.074}$$

$$= 11.39 \times \left(\frac{7925}{36} \right)^{-0.480} \times \frac{3.39^{-0.074}}{7.89}$$

$$= 11.39 \times \left(\frac{7925}{36} \right)^{-0.480} \times \frac{3.39^{-0.074}}{7.89} = 0.91$$

Извијање око x – осе

$$S_3 = \frac{g_{13} L_x}{d}$$

$$S_3 = \frac{1.0 \times 1300}{100} = 13.0$$

Извијање око y – осе

$$S_4 = \frac{g_{13} L_y}{b}$$

$$S_4 = \frac{1.0 \times 1300}{30} = 43.33$$

где је $L_a = 1300 \text{ mm}$ дужина извијања стуба за посматрану осу.

$$\rho_b S_3 = 0.91 \times 13.0 = 11.86$$

$$\rho_b S_4 = 0.91 \times 43.33 = 39.53$$

$$S_3 \rightarrow k_{12} = 1.5 - 0.05 \rho_b S_3 \quad \text{за } 10 \leq \rho_b S_1 \leq 20$$

$$= 1.5 - 0.05 \times 11.86 = 0.91$$

$$S_4 \rightarrow k_{12} = \frac{200}{(\rho_b S_4)^2} = \frac{200}{39.53^2} = 0.13 \quad \text{за } \rho_b S_4 > 20$$

Контрола напона у стубу

$$N_{d,cx} \geq N_c; \quad N_{d,cy} \geq N_c;$$

$$N_{d,c} = \emptyset k_1 k_4 k_6 k_{12} f'_c A_c$$

$$f_{c,stv} \leq f_c = 36 \text{ MPa}$$

$$f_{c,stv} = \frac{N}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_{12,S3} A_{stv}}$$

$$f_{c,x,stv} = \frac{7.42 \times 10^6}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 0.91 \times 36} = 3.75 \text{ MPa}$$

$$f_{c,x,stv} = 3.75 \text{ MPa} < f_c = 36 \text{ MPa}$$

$$f_{c,stv} = \frac{N}{\emptyset k_1 k_4 k_6 k_{12,S4} A_{stv}}$$

$$f_{c,y,stv} = \frac{7.42 \times 10^6}{0.9 \times 0.94 \times 1 \times 0.13 \times 36} = 26.56 \text{ MPa}$$

$$f_{c,y,stv} = 26.56 \text{ MPa} < f_c = 36 \text{ MPa}$$

Напони су у границама допуштених напона.

На основу контроле допуштених напона притиска у стубу, усваја се стуб димензија попречног пресека $b/d = 30/100 \text{ mm}$.

$$\lambda_x = \frac{L_x}{i_x} = \frac{1300}{0.289 \times 30} = 149.94$$

$$\lambda_y = \frac{L_y}{i_y} = \frac{1300}{0.289 \times 100} = 44.98$$

Виткост елемента је мања од граничне виткости за главне конструктивне елементе која износи $\lambda_i = 150$.

Прилог 9 – Упоредни приказ претходних истраживања ојачања на механичка својства плоча на бази фурнира и експерименталних истраживања спроведених у оквиру рада

Преглед ознака

Акроними

LVL	laminated veneer lumber	ламелирана фурнирска грађа
PW	plywood	фурнирске плоче
APA	The Engineered Wood Association (некада American Plywood Association)	
ASTM	American Society for Testing and Materials	Америчко друштво за испитивање и материјале
EN	European Standard	Европски стандарди
SRPS		Стандарди и сродна документа - Институт за стандардизацију Србије
FRP	Fiber Reinforced Polymer	полимерни материјали армирани влакнима
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer	полимерни материјали армирани стакленим влакнима
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer	полимерни материјали армирани карбонским влакнима
AFRP	Aramid Fiber Reinforced Polymers	полимерни материјали армирани араמידним влакнима
BCF	bi-directional carbon fiber	двосмерно плетена карбонска влакна
UCF	uni-directional carbon fiber	једносмерно плетена карбонска влакна
LSL	laminated strand lumber	грађа од ламелираног иверја
CLT	cross-laminated timber	унакрсно ламелирано дрво
PSL	parallel strand lumber	грађа од паралелно оријентисаног иверја
OSB	oriented strand lumber	грађа од оријентисаног иверја
UF	urea-formaldehyde	уреа-формалдехидни адхезив
MF	melamine-formaldehyde	меламин-формалдехидни адхезив
MUF	melamine-urea-formaldehyde	меламин-уреа-формалдехидни адхезив
PUF	Phenol-urea-formaldehyde	фенол-уреа-формалдехидни адхезив
BPA	bisphenol-A epoxy	бисфенол-А-епоксидне смоле
EPN	phenolic novolac epoxy	новолак-епоксидне смоле
PF	phenol formaldehyde resins	фенол-формалдехидни адхезив
RF	Resorcinol-formaldehyde	резорцинол-формалдехидни адхезив
PRF	phenol-resorcinol-formaldehyde	фенол-резорцинол-формалдехидни адхезив
MDI	methylene diphenyl diisocyanate	метилен дифенил диизоцијанат
PMDI	polymeric diphenylmethane diisocyanate	поли(дифенилметан-4,4'-диизоцијанат)
EPI	emulsion polymer isocyanates	емулзиони полимеризовани изоцијанат
PVAc	poly(vinyl acetate)	поли(винил-ацетат)

PVA	poly(vinyl alcohol)	поли(винил-алкохол)
EVA	ethylene vinyl acetate	етилен-винил-ацетат
HMR	hydroxymethylated resorcinol	хидроксиметилован резорцинол
WPC	wood plastic composite	композитни производи на бази дрвета и пластике

Симболи

E_m	модул еластичности
$f_{m,0,flat}$	чврстоћа на савијање управно на раван плоче, у правцу влакана
$f_{m,90}$	чврстоћа на савијање управно на раван плоче, управно на правац влакана
$\sigma_m; f_{m,0,edge}$	чврстоћа на савијање у равни плоче
$\sigma_m; f_{m,0,flat}$	чврстоћа на савијање у управно на раван плоче
$\sigma_{t\parallel}; f_{t,0}$	чврстоћа на затезање у равни плоче у правцу влакна
$\sigma_{t\perp}; f_{t,90}$	чврстоћа на затезање у равни плоче управно на правац влакна
$\sigma_{c\parallel}; f_{c,0}$	чврстоћа на притисак у равни плоче у правцу влакна
$\sigma_{c\parallel}; f_{c,90}$	чврстоћа на затезање у равни плоче управно на правац влакна
$\tau_{\perp}; f_v$	чврстоћа на смицање управна на раван плоче
$\tau_{\parallel}; f_r$	чврстоћа на смицање у равни плоче
Δf	угиб
I	момент инерције
W	отпорни моменат
A	површина попречног пресека
A_e	ефективна површина попречног пресека
i	полупречник елипсе инерције
L_a	размак између бочних придржајних тачака греде
λ_i	виткост елемената
m_v	маса влажног узорка
m_s	маса сувог (очврслог) узорка
m_{ss}	маса суве супстанце
m	маса
P_m	притисак пресе
P_s	специфични притисак пресе
w	влажност дрвета изражена у процентима
G_0	маса влажног дрвета
G	маса лабораторијски сувог дрвета
F	сила
s	параметар утицаја величине узорка при експерименталном испитивању
L	распоне конструкције или елемента

b	ширина елемента
h	статичка висина елемента
$k_{m,corr}$	корекциони коефицијент димензије узорка при испитивању савојне чврстоће
k_{mod}	корекциони коефицијент при димензионисању дрвених структура који зависи од класе и времена трајања оптерећења
k_{def}	корекциони коефицијент крутости при димензионисању дрвених структура који зависи од врсте дрвета и услова изложености

Попис илустрација

- Слика 1. Грађевински производи на бази дрвета. Преведено и допуњено. Преузето из Bodig, J., & Jayne, B. A. *Mechanics of wood and wood composites*. New York: Van Nostradam Reinhold Company Publisher, 1982. цитирано код Barbu, Marius C., Reh, Roman, i Mark Irle, „Wood-Based Composites“ у *Research Developments in Wood Engineering and Technology*, ед. Alfredo Aguilera, J. Paulo Davim (Hershey PA: Engineering Science Reference, 2014), 13.
- Слика 2. Мапа историјског развоја теме истраживања. Ауторска илустрација
- Слика 3. Добијање фурнира техником сечења из пола трупца (горе) и из четврт трупца (доле). Wagenführ André, Steffen Tobisch, Rico Emmler, Beate Buchelt, Tino Schulz, *Furnier im Innenausbau* (Initiative Furnier + Natur e.V. (IFN), Dresden 2011), 10.
http://tudresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/ihp/hft/download/publications/Furnier (доступно 07. Фебруара 2014.)
- Слика 4. Добијање фурнира техником љуштења из целог трупца. Преузето из Николић Михаило. *Фурнири и слојевите плоче*. Београд: Универзитет у Београду, Шумарски факултет, 2004. стр. 100.
- Слика 5. Добијање фурнира техником љуштења из целог трупца (горе) и из пола трупца (доле). Wagenführ André, Steffen Tobisch, Rico Emmler, Beate Buchelt, Tino Schulz, *Furnier im Innenausbau* (Initiative Furnier + Natur e.V. (IFN), Dresden 2011), 10.
http://tudresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/ihp/hft/download/publications/Furnier (доступно 07. Фебруара 2014.)
- Слика 6. Конструкција трослојне и четворослојне фурнирске плоче. Ауторска илустрација
- Слика 7. Напрезања у: а) фурнирској плочи, б) плочи од пуног дрвета. Ауторска илустрација
- Слика 8. Оријентација фурнирске плоче у односу на напрезање управно на раван плоче: а) јача оријентација фурнирске плоче, б) слабија оријентација фурнирске плоче. Ауторска илустрација
- Слика 9. Утицај запреминске масе, дебљине фурнира и врсте адхезива на затезну чврстоћу фурнирске плоче. Преузето из Михаило Николић, *Фурнири и слојевите плоче* (Београд: Универзитет у Београду, Шумарски факултет, 2004), стр. 278.
- Слика 10. Смицање код плоча на бази фурнира: а) у равни плоче, б) управно на раван плоче. Ауторска илустрација
- Слика 11. Савијање у равни плоче и савијање управно на раван фурнирске плоче. Ауторска илустрација
- Слика 12. Савијање у правно на раван фурнирске плоче – а) попречни пресек плоче, б) трансформисани попречни пресек. Ауторска илустрација
- Слика 13. Савијање у равни плоче – а) попречни пресек плоче, б) трансформисани попречни пресек. Ауторска илустрација
- Слика 14. Конструкција ламелиране фурнирске грађе а) са свим слојевима паралелно оријентисаним, б) са одређеним слојевима управно оријентисаним. Ауторска илустрација
- Слика 15. Одређивање геометријских карактеристика попречног пресека ЛВЛ-а: а) хоризонтална и б) вертикална оријентација. Ауторска илустрација
- Слика 16. Поступак одређивања геометрије попречног пресека LVL-а са слојевима управно оријентисаним напрезању
- Слика 17. Дијаграм савојне чврстоће монолитног дрвета и LVL-а формираног из истог трупца. Преузето из Н. Sasaki, и А.А. Abdullahi, „Lumber: Laminated Veneer“, у *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, (Elsevier, 2016).

- Слика 18. Лепљени напрегнути дрвени панели: а) једнострани, б) двострани, в) Т-панели. Ауторска илустрација по узору на *Figure 1. Typical Two-Sided Stressed-Skin Panel* из А–А - The Engineered Wood Association, *Design And Fabrication Of Plywood Stressed-Skin Panels*, (Tacoma, Washington: А–А - The Engineered Wood Association, 1996), 6.
- Слика 19. Прихватање хоризонталног оптерећења вертикалним и хоризонталним дијафрагмама у рамовској дрвеној конструкцији. Преузето из Diekmann, E.F., „Diaphragm and shearwalls.“ погл. 8 у *Wood engineering and construction handbook*, уредник Keith F. Farherty и Thomas G. Williamson, (New York: McGRAW-HILL, INC, 1999.).
- Слика 20. Статичка схема вертикалне дијафрагме. Ауторска илустрација
- Слика 21. Схематских приказ оптерећења хоризонталне и вертикалне дијафрагме. Ауторска илустрација
- Слика 22. Аналогија преношења оптерећења I-носача примењена на дијафрагме у дрвеним конструкцијама. Ауторска илустрација по узору на Diekmann, E.F., „Diaphragm and shearwalls.“ погл. 8 у *Wood engineering and construction handbook*, уредник Keith F. Farherty и Thomas G. Williamson, (New York: McGRAW-HILL, INC, 1999).
- Слика 23. Оптерећење дијафрагме хоризонталним силама по x и y правцу. Ауторска илустрација по узору на Donald E. Breyer, Kenneth J. Fridley, и Kelly E. Cobeen, „Horizontal Diaphragms.“ у *Design of Wood Structures ASD*, поглавље 9, (New York: McGraw-Hill, 1998).
- Слика 24. Прерасподела сила смицања и савијања у дрвеној дијафрагми. Преузето из Donald E. Breyer, Kenneth J. Fridley, и Kelly E. Cobeen, „Horizontal Diaphragms.“ у *Design of Wood Structures ASD*, поглавље 9.2 Diaphragm Flexibility, (New York: McGraw-Hill, 1998).
- Слика 25. Дистрибуција латералних сила у флексибилној и у крутој дијафрагми. Преузето из Donald E. Breyer, Kenneth J. Fridley, и Kelly E. Cobeen, „Horizontal Diaphragms.“ у *Design of Wood Structures ASD*, поглавље 9.11 Diaphragm Flexibility, (New York: McGraw-Hill, 1998).
- Слика 26. Префабриковани гредни елементи сложеног попречног пресека: а) LVL гредни носач, б) LVL у затегнутој зони ЛЛД носача, с) типови I-носача, д) типови сандучастих носача. Ауторска илустрација на основу илустрација из Donald E. Breyer, Kenneth J. Fridley, и Kelly E. Cobeen, „Fabricated wood components.“ у *Design of Wood Structures ASD*, поглавље 6.19, (New York: McGraw-Hill, 1998) и Thomas E. McLain, „Structural Wood Panels.“ у *Wood engineering and construction handbook*, уредник Keith F. Farherty и Thomas G. Williamson, поглавље 7.5.2 (New York: McGRAW-HILL, INC, 1999).
- Слика 27. Папирни модел наборасте конструкције: а) савијање листа папира без отпора, б) пресавијен лист постаје носећи елемент, в) преоптерећени набори доживљавају деформацију, г) дијафрагме на бочним странама учвршћују набор и повећавају његову носивост. Преузето из Curt Siegel, *Strukturformen der modernen architektur* (Munchen: Verlag Georg D.W.Callwey Munchen, 1960), 197.
- Слика 28. Понашање наборасте конструкције: а) у попречном правцу наборасте конструкције равни образују наборасту површине формирану од плоче, које су напрегнуте попут плоче изложене савијању, б) моменти савијања континуалне плоче, в) у подужном смеру површине између грбина и увала делују као ослонци образовани контактом две плоче. Преузето из Curt Siegel, *Strukturformen der modernen architektur* (Munchen: Verlag Georg D.W.Callwey Munchen, 1960), 198.
- Слика 29. Набораста конструкција: понашање и дистрибуција напона: а) набор, б) плоча оптерећена трансверзалним оптерећењем, в) плоча оптерећена аксијалним силама, г) деформација набора, д) прерасподела напона смицања, њ) прерасподела сила у набору, е) укупна вертикална деформација у набору, ж) деформација у набору рашчлањена по плочама. Ауторска илустрација по узору на Ruben A. Gomez, *Design of Folded Plates*, PDHonline Course S275, (Fairfax: PDH Center, 2013).

- Слика 30. Подела наборастих конструкција на основу геометријског облика. Преузето из Nenad Šekularac, Ivanović Šekularac, Jelena, и Jasna Čikić Tovarović, „Folded structures in modern architecture“, *Facta universitatis - series: Architecture and Civil Engineering* 10 (2012): 3.
- Слика 31. Обликовање везе између површинских елемената у наборастим конструкцијама – геометрија везе: а) основни параметри, б) пресечне равни нормалне на праву \vec{pq} , в) 3DOF веза, г) пресечне равни нормалне на \vec{wj} , д) 1DOF веза (зинк веза). С. Robeller, Y. Weinand, „Interlocking Folded Plate – Integral Mechanical Attachment for Structural Wood Panels“, *International Journal of Space Structures* 30 (2), (2015): 113.
- Слика 32. Симулациони приказ прихватања и разлагања момента савијања у вези. С. Robeller, Y. Weinand, „Interlocking Folded Plate – Integral Mechanical Attachment for Structural Wood Panels“, *International Journal of Space Structures* 30 (2), (2015): 114.
- Слика 33. Геометрија набора формирана применом основних модула заснованих на елементима облика: а) ромба, б) троугла, в) трапеза. Преузето из Andrea Stitic и Yves Weinand, „Timber Folded Plate Structures – Topological and Structural Considerations“, *International Journal of Space Structures* 30 (2), (2015): 169-177.
- Слика 34. Двослојни набор са детаљем везе. Преузето из Yves Weinand, „Folded plates made from timber panels“ у *Advanced Timber Structures*, уредник Yves Weinand (Basel: Birkhäuser Verlag GmbH, 2017.), 14-31.
- Слика 35. Обликовање везе у конструкцијама полигоналних љуски: а) сила смицања која делује у равни F_u путем контактне површине преноси се на други елемент, б) физичко испитивање носивости везе на притисак и носивости на смицање у равни. Преузето из Krieg, O., T. Schwinn, A. Menges, J., Knippers Li, Schmitt J., и Schwieger, V. A., „Biomimetic Lightweight Timber Plate Shells: Computational Integration of Robotic Fabrication, Architectural Geometry and Structural Design.“ у *Advances in Architectural Geometry 2014*, уредник P. Block, J. Knippers, N. Mitra и Wang W., (Cham: Springe, 2015.), 109-125.
- Слика 36. Конструктивни систем једног сегмента љуске састављеног из више делова, образујући сегмент сандучастог попречног пресека. Robeller, Christopher, Mina Konaković, Mira Dedijer, Mark Pauly, и Yves Weinand. „Double-layered timber plate shell“, *International Journal of Space Structures* 32 (3-4), (2017): 160–175.
- Слика 37. Хијерархија ћелија и дистрибуција оптерећења између елемената у тривалентном-полиедарском систему. La Magna, Riccardo, Frédéric Waimer, и Jan Knippers. „Nature-inspired generation scheme for shell structures.“ *Proceedings of the International Symposium of the IASS-APCS Symposium 2012: From Spatial Structures to Space Structures*. (Seoul: IASS, 2012.).
- Слика 38. Принцип реципроцитета. Ауторска илустрација
- Слика 39. Примери реципрочних структура над различитим облицима основе. Преузето из Olga Popovic Larsen, *Reciprocal Frame Architecture*, (Oxford: Elsevier Ltd, 2008), 23.
- Слика 40. Поље реципрочне конструкције а) елементи у равни, б) елементи у нагибу. Ауторска илустрација
- Слика 41. Три типа реципрочних конструкција формираних од површинских елемената: а) од танких линијских елемената, б) у виду групе линијских елемената, в) комбиновањем групе линијских елемената. Преузето из Olivier Baverel, Alberto Pugnale, „Reciprocal Systems Based on Planar Elements: Morphology and Design Explorations“, *Nexus Network Journal* 16(2014): 179-189.
- Слика 42. Дијаграм напон-дилатација за чиниоце композитног производа. Преузето од Грбић, Миодраг. „Формирање конструктивних елемената архитектонских објеката употребом полимера ојачаних рециклираним влакнима.“ *Докторска дисертација*. (Београд: Универзитет у Београду, Архитектонски факултет, 2016), 16.

- Слика 43. Конструкција композитне фурнирске плоче: а) ојачане тракама ламинама постављеним у два слоја, б) ојачане тканинама у два правца Преузето из Brezović, Mladen, Vladimir Jambreković, и Stjepan Pervan. "Bending properties of carbon fiber reinforced plywood." *Wood Research* 48(4),(2003):19, и Brezović, Mladen, Jaroslav Kljak, Stjepan Pervan, и Alan Antonović. „Utjecaj kuta orijentacije sintetičkih vlakana na savojna svojstva kompozitne furnirske ploče.“ *Drvna industrija* 61(4),(2010): 240.
- Слика 44. Упоредни приказ дијаграма нормалних и смичућих напрезања у слоју карбонских влакана. Ауторско преклапање дијаграма преузетих из Brezović, Mladen, Jaroslav Kljak, Stjepan Pervan, / Alan Antonović. 2010. „Utjecaj kuta orijentacije sintetičkih vlakana na savojna svojstva kompozitne furnirske ploče.“ *Drvna industrija* 61 (4): 241 i 242.
- Слика 45. Типови плоча ојачаних тканинама у једном правцу. Преузето из Liu, Yuansong, Mingjie Guan, Xianwen Chen, Yuan Zhang, и Mingming Yhou. „Flexural properties evaluation of carbon-fiber fabric reinforced poplar/eucalyptus composite plywood formwork.“ *Composite structures* 224(2019): 111073.
- Слика 46. Схематски приказ попречног пресека тестираних типова плоча. Преузето из Bekir Cihad Bal, İbrahim Bektaş, Fatih Mengeloğlu, Kadir Karakuş, и Н. Ökçeş Demir, „Some technological properties of poplar plywood panels reinforced with glass fiber fabric“, *Construction and Building Materials* 101 (Part 1), (2015): 952-957.
- Слика 47. Узорци за испитивање савијања и смицања: А: Попречни пресек LVL плоче; Б: попречни пресек ојачане LVL плоче; В: узорак за савијање у равни плоче; Г: узорак за савијање управно на раван плоче; Д: узорак за смицање у равни плоче; Ђ: узорак за чврстоћу на затезање код теста цепањем. Преузето из Bekir Cihad Ba,, "Flexural properties, bonding performance and splitting strength of LVL reinforced with woven glass fi"er", *Construction and Building Materials* 51(2014): 9-14.
- Слика 48. Побољшање механичких карактеристика ојачаних плоча у односу на контролне узорке. Jie Wang, Xiaolei Guo, Wei Zhong, Huiyun Wang, и Pingxiang Cao, „Evaluation of Mechanical Properties of Reinforced Poplar Laminated Veneer Lumber“, *BioResources* 10 (4), (2015): 7461.
- Слика 49. Епрувета за испитивање чврстоће на смицање у слоју лепка. Ауторска илустрација.
- Слика 50. Кондиционирање узорака у ексикаторима изнад засићеног раствора NH₄NO₃. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 51. Процес зарезивања епрувета и формирање смичуће равни. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 52. Испитивање чврстоће на смицање у слоју лепка. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 53. Типичан лом дрвених епрувета по супстрату у испитивању смицајне чврстоће у слоју лепка. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 54. Процес одређивања суве супстанце у MUF адхезиву: а) мерење масе на електронској аналитичкој ваги, б) сушење адхезива. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 55. Мерење рН адхезива MUF. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 56. Мерење густине адхезива MUF. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 57. Мерење вискозитета адхезива MUF. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 58. Мерење времена желирања адхезива MUF. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 59. Схематски приказ комбинација ојачаних и неојачаних LVL плоча. Фотографија из личне архиве аутора.

- Слика 60. Карбонска тканина у ролни. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 61. Исечени листови карбонске тканине. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 62. Размеравање компоненте А адхезива. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 63. Процес наношења адхезива на тканину. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 64. Процес наношења адхезива на фурнир. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 65. Облепљена LVL плоча спремна за пресу. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 66. Постављање плоче у пресу. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 67. Пресовање плоче. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 68. Обележавање плоче. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 69. Испресована LVL плоча. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 70. Попречни пресек плоче К1. Ауторска илустрација.
- Слика 71. Попречни пресек плоче К2. Ауторска илустрација.
- Слика 72. Попречни пресек плоче К3. Ауторска илустрација.
- Слика 73. Попречни пресек плоче К4. Ауторска илустрација.
- Слика 74. Схема исецања епрувета из једне плоче. Ауторска илустрација.
- Слика 75. Раслојавање плоче са MUF адхезивом након сечења. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 76. Процес исецања епрувета. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 77. Испитивање смицајне чврстоће у равни плоче. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 78. Испитивање савојне чврстоће у равни плоче и модула еластичности. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 79. Савијање епрувете током испитивања савојне чврстоће у равни плоче и модула еластичности. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 80. Савијање епрувете до лома током испитивања савојне чврстоће у равни плоче и модула еластичности. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 81. Приказ бочних придржајних тачака направљених од фурнирске плоче. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 82. Скица узорка за одређивање чврстоће на смицање управно на равну плочу. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 83. Лом епрувете прекорачењем притисне чврстоће. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 84. Лом епрувете смичућим напрезањима. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 85. Машина и алати за испитивање чврстоће на смицање управно на равну плочу. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 86. Испитивање притисне чврстоће управно влакнима - почетак оптерећења. Фотографија из личне архиве аутора.

- Слика 87. Испитивање притисне чврстоће управно влакнима - максимална сила. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 88. Испитивање затезне чврстоће паралелно влакнима а) фронтални, б) бочни поглед. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 89. ЕК1 типски облик лома епрувета – ТИП1. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 90. ЕК1 лом по другом листу фурнира – ТИП 2. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 91. ЕК1 лом по трећем листу фурнира – ТИП3. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 92. ЕК1 лом по другом листу фурнира – ТИП 4. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 93. ЕК2 лом по средишњем листу фурнира – ТИП 1. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 94. ЕК2 лом по трећем листу фурнира – ТИП 3. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 95. ЕК2 лом по више листова фурнира – ТИП 4. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 96. ЕК2 лом затезањем. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 97. ЕК3 лом у средишњем слоју ТИП 1. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 98. ЕК3 лом у трећем слоју ТИП 3. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 99. ЕК4 лом у средишњем слоју ТИП 1. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 100. ЕК4 лом у трећем слоју фурнира ТИП3. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 101. ЕК4 лом затезањем. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 102. Дијаграм вредности F_{max} и $f_{v,0,flat}$ по комбинацијама ојачања. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 103. МК3 раслојавање између две тканине. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 104. МК1 типски лом по супстрату ТИП 1. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 105. МК4 типски лом по супстрату. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 106. МК4 лом по трећем слоју (ТИП3). Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 107. МК4 лом по дрвету затезањем. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 108. Дијаграм оптерећење-угиб за носаче ЕК1. Ауторска илустрација на основу резултата испитивања.
- Слика 109. ЕК1 типски лом носача на савијање у равни плоче (лом влакана у затегнутој зони). Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 110. ЕК1 типски лом носача на савијање у равни плоче: а) гњечење влакана и раслојавање FRP-дрво, б) пукотина по слоју дрвета, праћена пресецањем влакана. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 111. Лом фурнира по супстрату код узорака ЕК1ОР2-SE3 и ЕК1ОР3-SEC. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 112. Дијаграм оптерећење-угиб за носаче ЕК2. Ауторска илустрација на основу резултата испитивања.

- Слика 113. Оштећења епрувета из плоча ЕК2 приликом испитивања савојне чврстоће у равни плоче а) гужвање влакана у зони притиска, цепање влакана у затегнутој зони; б) лом узорака у затегнутој зони. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 114. Оштећења епрувета ЕК2ОР1-SE3 приликом испитивања савојне чврстоће у равни плоче, цепање другог фурнирског листа. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 115. Оштећења епрувета ЕК2: а) у притисној зони, настало гњечењем; б) пукотина у притисној зони кроз други фурнирски лист. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 116. Дијаграм оптерећење-угиб за носаче ЕК3. Ауторска илустрација на основу резултата испитивања.
- Слика 117. Оштећења епрувета ЕК3: а) у притисној зони, сабијање влакана, лом у затегнутој зони; б) лом кроз слојеве фурнира у затегнутој зони. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 118. Оштећења епрувета ЕК3 у притисној зони, гњечење влакана и раслојавање у слоју FRP-FRP. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 119. Дијаграм оптерећење-угиб за носаче ЕК4. Ауторска илустрација на основу резултата испитивања.
- Слика 120. Карактеристични лом носача ЕК4 при испитивању савијања у равни плоче. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 121. Контролне неојачане епрувете ЕК4: а) лом епрувете, б) гњечење епрувете прекорачењем силе притиска, в) лом у затегнутој зони пресека. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 122. Деламинација у слоју FRP-FRP у епруветама из плоче МК3. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 123. Деламинација у слоју FRP-FRP у епруветама из плоча МК3 након извршеног тестирања. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 124. Дијаграм оптерећење-угиб за носаче МК1. Ауторска илустрација на основу резултата испитивања.
- Слика 125. Дијаграм оптерећење-угиб за носаче МК3. Ауторска илустрација на основу резултата испитивања.
- Слика 126. Дијаграм оптерећење-угиб за носаче МК4. Ауторска илустрација на основу резултата испитивања.
- Слика 127. Дијаграм вредности $f_{m,0,edge}$ и E_{II} по комбинацијама ојачања. Ауторска илустрација на основу резултата испитивања.
- Слика 128. Испитивање чврстоће на смицање управно на раван плоче – карактеристичан лом за епрувете из плоча ЕК1. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 129. Апсолутни лом за епрувете из плоча ЕК1ОР1-S[⊥]3 при испитивању чврстоће на смицање. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 130. Испитивање чврстоће на смицање управно на раван плоче – почетак оптерећења. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 131. Испитивање чврстоће на смицање управно на раван плоче – током оптерећења. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 132. Типски дијаграм оптерећење-деформација-време при испитивању чврстоће на смицање управно на раван плоче Комбинације ЕК1. Ауторска илустрација на основу резултата испитивања.

- Слика 133. Испитивање чврстоће на смицање управно на раван плоче – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК2. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 134. Испитивање чврстоће на смицање управно на раван плоче – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК3. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 135. Оштећење епрувета из плоча ЕК3ОР3-S[⊥]1 при испитивању чврстоће на смицање управно на раван плоче. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 136. Испитивање чврстоће на смицање управно на раван плоче – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК4. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 137. Испитивање чврстоће на смицање управно на раван плоче – прекорачење напона притиска при испитивању епрувета из плоча ЕК4КР1-S[⊥]1. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 138. Дијаграм вредности F_{max} и $f_{v,0,edge}$ по комбинацијама ојачања. Ауторска илустрација на основу резултата испитивања.
- Слика 139. Испитивање притисне чврстоће паралелно влакнима – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК1. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 140. Испитивање притисне чврстоће паралелно влакнима: а) лом кроз средишњи слој; б) епрувета ЕК1ОР2-Р15 лом дужином средишњег фурнирског листа. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 141. Испитивање притисне чврстоће паралелно влакнима – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК2. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 142. Лом епрувета из плоча ЕК2 по средњем фурнирском листу. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 143. Деламинација у слоју FRP – дрво при испитивању епрувета из плоча ЕК2. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 144. Испитивање притисне чврстоће паралелно влакнима – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК3. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 145. Деламинација у слоју FRP-FRP при испитивању притисне чврстоће паралелно влакнима епрувета из плоча ЕК3. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 146. Испитивање притисне чврстоће паралелно влакнима – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК4: а) епрувете са избочавањем, б) епрувете са избочавањем и пуцањем влакана средишњих слојева фурнира. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 147. Дијаграм вредности F_{max} и $f_{v,0,edge}$ за различите комбинације ојачања. Ауторска илустрација на основу резултата испитивања.
- Слика 148. Испитивање притисне чврстоће управно на влакна – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК1. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 149. Испитивање притисне чврстоће управно на влакна – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК2. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 150. Испитивање притисне чврстоће управно на влакна – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК3. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 151. Испитивање притисне чврстоће управно на влакна – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК4. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 152. Дијаграм вредности F_{max} и $f_{t,0,k}$ за различите комбинације ојачања. Ауторска илустрација на основу резултата испитивања.

- Слика 153. Испитивање затезне чврстоће паралелно влакнима – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК1. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 154. Детаљ типског лома. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 155. Детаљ лома у радијусу закривљена. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 156. Испитивање затезне чврстоће паралелно влакнима – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК2. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 157. Испитивање затезне чврстоће паралелно влакнима – апсолутни лом епрувета из плоча ЕК2. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 158. Испитивање затезне чврстоће паралелно влакнима – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК3. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 159. Деламинација у слоју FRP-FRP и FRP - дрво. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 160. Испитивање затезне чврстоће паралелно влакнима – епрувете из плоча ЕК3 са апсолутним ломом. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 161. Испитивање затезне чврстоће паралелно влакнима – карактеристичан лом епрувета из плоча ЕК4. Фотографија из личне архиве аутора.
- Слика 162. Дијаграм вредности F_{max} и $f_{t,0,k}$ за различите комбинације ојачања плоча. Ауторска илустрација на основу резултата испитивања.
- Слика 163. Дијаграм побољшања механичких карактеристика за различите комбинације ојачања плоча (ЕК1, ЕК2, ЕК3) у односу на контролни узорак ЕК4. Ауторска илустрација на основу резултата испитивања.
- Слика 164. Симулациони модел 1 – просторни приказ.
- Слика 165. Симулациони модел 2 – просторни приказ.
- Слика 166. Симулациони модел 1: а) диспозиција елемената у кровној равни, б) 3D приказ структуре.
- Слика 167. Обликовање појединачног штапа у систему реципрочне конструкције.
- Слика 168. Симулациони модел 2: а) диспозиција елемената у кровној равни, б) 3D приказ структуре.
- Слика 169. Обликовање појединачног штапа у систему реципрочне конструкције.
- Слика 170. Моменти савијања у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=15/360-720$ mm.
- Слика 171. Трансверзалне силе у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=15/360-720$ mm.
- Слика 172. Угиби у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=15/360-720$ mm.
- Слика 173. Моменти савијања у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=45/360-720$ mm.
- Слика 174. Трансверзалне силе у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=45/360-720$ mm.
- Слика 175. Угиби у реципрочној конструкцији – штапови $b/d= b/d=45/360-720$ mm.
- Слика 176. Утицаји у индиректним елементима – штапови $b/d= b/d=45/360-720$ mm.
- Слика 177. Моменти савијања у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=45/320$ mm.
- Слика 178. Трансверзалне силе у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=45/320$ mm.

- Слика 179. Угиби у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=45/320$ mm.
- Слика 180. Моменти савијања у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/310-620$ mm.
- Слика 181. Средишњи сегмент дијаграма момената савијања у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/310-620$ mm.
- Слика 182. Трансверзалне силе у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/310-620$ mm.
- Слика 183. Средишњи сегмент дијаграма трансверзалних сила у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/310-620$ mm.
- Слика 184. Угиби у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/310-620$ mm.
- Слика 185. Средишњи сегмент дијаграма угиба у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/310-620$.
- Слика 186. Рам X_40 – утицаји у индиректним елементима.
- Слика 187. Нормалне силе у стубу (сегмент конструкције) – штапови $b/d=30/100$ mm.
- Слика 188. Моменти савијања у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/375-750$ mm.
- Слика 189. Средишњи сегмент дијаграма момената савијања у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/375-750$ mm.
- Слика 190. Трансверзалне силе у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/375-750$ mm.
- Слика 191. Средишњи сегмент дијаграма трансверзалних сила у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/375-750$ mm.
- Слика 192. Угиби у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/375-750$ mm.
- Слика 193. Средишњи сегмент дијаграма угиба у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/375-750$ mm.
- Слика 194. Моменти савијања у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/630-1260$ mm.
- Слика 195. Средишњи сегмент дијаграма момената савијања у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/630-1260$ mm.
- Слика 196. Трансверзалне силе у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/630-1260$ mm.
- Слика 197. Средишњи сегмент дијаграма трансверзалних сила у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/630-1260$ mm.
- Слика 198. Угиби у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/630-1260$ mm.
- Слика 199. Средишњи сегмент дијаграма угиба у реципрочној конструкцији – штапови $b/d=30/630-1260$ mm.
- Слика 200. Рам X_40 – утицаји у индиректним елементима.
- Слика 201. Нормалне силе у стубу (сегмент конструкције) – штапови $b/d=30/100$ mm.

Попис табела

- Табела 1. Класификација фурнирских плоча према вредности чврстоће на савијање. Институт за стандардизацију Србије, „SRPS EN 12369-2:2012 *Плоче на бази дрве–а - Карактеристичне вредности за пројектовање конструкци–а - Део 2: Фурнирске плоче (шперплоче)*“ (Београд:2012).
- Табела 2. Класификација фурнирских плоча према вредности модула еластичности. Институт за стандардизацију Србије, „SRPS EN 12369-2:2012 *Плоче на бази дрве–а - Карактеристичне вредности за пројектовање конструкци–а - Део 2: Фурнирске плоче (шперплоче)*“ (Београд:2012).
- Табела 3. Класификација трајања оптерећења. Преузета, модификована и допуњена табела – Институт за стандардизацију Србије, „SRPS EN 12369-2:2012 *Плоче на бази дрве–а - Карактеристичне вредности за пројектовање конструкци–а - Део 2: Фурнирске плоче (шперплоче)*“ (Београд:2012).
- Табела 4. Основних допуштених напона за грађевинске фурнирске плоче (N/cm²). Институт за стандардизацију Србије, „SRPS U.C9.200/1:1987 *Пројектовање и извођење дрвених конструкци–а - Конструкције од монолитног дрвета и плоча - Измене*“ (Београд:1987, повучен 2012).
- Табела 5. Дозвољени напони за фурнирске плоче у складу са америчким стандардом PS PS-95 за грађевинску и индустријску фурнирску плочу. Напрезања се заснивају на уобичајеном трајању оптерећења и на уобичајеним конструкцијским применама где су плоче ширине 60 cm (24") или веће. Табела преузета и преведена из Judith J. Stalnaker, Ernest C. Harris, „Plywood and Similar Wood Products“ у *Structural design in wood*, (New York: Springer-Verlag New York Inc., 1997), 258.
- Табела 6. Толеранција одступања дебљине плоче према SRPS EN 315:2010. Преузето из Институт за стандардизацију Србије, „SRPS EN 315:20–0 - Фурнирске плоче (шперплоче) — Толеранција димензија“ (Београд: 2010), стр.4.
- Табела 7. Могућа напрезања којима могу бити изложени елементи формиран од LVL-а. Преузета, модификована и допуњена табела из *Laminated veneer lumber (LVL) bulletin: New European strength classes*. Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. and Federation of Finnish Woodworking Industries, 2019.
- Табела 8. Вредности основних допуштених напона напрезања ламелиране фурнирске грађе формиране од свих паралелно оријентисаних слојева фурнира (LVL-P). Преузето из *Laminated veneer lumber (LVL) bulletin: New European strength classes*. Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. and Federation of Finnish Woodworking Industries, 2019.
- Табела 9. Вредности основних допуштених напона напрезања ламелиране фурнирске грађе са одређеним бројем управно оријентисаних слојева (LVL-C). Преузето из *Laminated veneer lumber (LVL) bulletin: New European strength classes*. Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. and Federation of Finnish Woodworking Industries, 2019.
- Табела 10. Наборасте конструкције реализоване применом плоча на бази дрвета. Ауторска табела на основу истраживања. Фотографије и подаци преузети из:
Karen Cilento, *Bamboo Forest and Corinth Hut/RAA* (ArchDaily, 2009): <https://www.archdaily.com/44225/bamboo-forest-and-corinth-hut-raa> (доступно 11.10.2020.)
Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, *Chapel of St.-Loup* (EPFL, 2008): <https://www.epfl.ch/labs/ibois/projects/completed-projects/chapelle-saint-loup/> (доступно 11.10.2020.)
C. Robeller, Weinand, Y., „Interlocking Folded Plate – Integral Mechanical Attachment for Structural Wood Panels.“ *International Journal of Space Structures* 30 (2), (2015): 111-122.
Christopher Robeller, Julien Gamero, и Yves Weinand. „Théâtre Vidy Lausanne – A Double-Layered Timber Folded Plate Structure“, *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* 58 (4), (2017): 295-314.

- Табела 11. Структуре полигоналних љуски реализоване применом плоча на бази дрвета. Ауторска табела на основу истраживања. Фотографије и подаци преузети из:
ICD/ITKE University of Stuttgart, *ICD | ITKE Research Pavilion 2011 / ICD/ITKE University of Stuttgart* (ArchDaily): <https://www.archdaily.com/200685/icditke-research-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart> (доступно 11.10.2020.)
ICD/ITKE/IIGS University of Stuttgart, *Landesgartenschau Exhibition Hall / ICD/ITKE/IIGS University of Stuttgart* (ArchDaily): <https://www.archdaily.com/520897/landesgartenschau-exhibition-hall-icd-itke-iigs-university-of-stuttgart> (доступно 11.10.2020.)
ICD/ITKE University of Stuttgart, *BUGA Wood Pavilion / ICD/ITKE University of Stuttgart* (ArchDaily): <https://www.archdaily.com/916758/buga-wood-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart> (доступно 11.10.2020.)
CodeToProduction, DTC, *HexBox Canopy / DTC + CodeToProduction* (ArchDaily): <https://www.archdaily.com/942876/hexbox-canopy-dtc-plus-codetoproduction> (доступно 11.10.2020.)
- Табела 12. Реципрочне конструкције реализоване применом плоча на бази дрвета – примери објеката. Ауторска табела на основу истраживања. Фотографије и подаци преузети из:
Kate Jerde, *Lon'on's Serpentine Gallery Pavilions, 2005: Alvaro Siza and Eduardo Souto de Moura* (Architectural Digest, 2011): <https://www.architecturaldigest.com/gallery/serpentine-gallery-pavilion-retrospective-slideshow> (доступно 15.10.2020.)
Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, *Modular Timber Structure* (EPFL, 2008-2009): <https://www.epfl.ch/labs/ibois/projects/completed-projects/modular-timber-structure/> (доступно 15.10.2020.)
Parametric House, *Plywood Pavilion*: <https://parametrichouse.com/plywood-pavilion/> (доступно 11.11.2022.)
- Табела 13. Механичке карактеристике матрице на бази термореактивних полимера. Табела преузета из Glišović, Ivan M, „Теоријска и експериментална анализа носача од лепљеног ламелiranог дрвета ојачаних карбонским тракама“, докторска дисертација (Београд: Универзитет у Београду Грађевински факултет, 2013), 29.
- Табела 14. Механичке карактеристике влакана у поређењу са челиком. Табела преузета из Glišović, Ivan M, „Теоријска и експериментална анализа носача од лепљеног ламелiranог дрвета ојачаних карбонским тракама“, докторска дисертација (Београд: Универзитет у Београду Грађевински факултет, 2013), 26.
- Табела 15. Подела синтетичких адхезива. Преузета и модификована табела из А. Н. Conner, „Wood: adhesives.“, у *Encyclopedia of materials: science and technology*, (Amsterdam; New York: Elsevier Science, Ltd., 2001), 9583-9599.
- Табела 16. Класификација адхезива за дрвене конструкције према начину и месту примене. Преузета табела из А. Н. Conner, „Wood: adhesives.“, у *Encyclopedia of materials: science and technology*, (Amsterdam; New York: Elsevier Science, Ltd., 2001), 9583-9599.
- Табела 17. Варијабле које утичу на процес лепљења и квалитет финалног композитног производа. Frihart, Charles R., „Wood adhesion and adhesives“ у *Handbook of wood chemistry and wood composites*, ed. Rowell, Roger M. (Боса: CRC Press, 2005), chap. 9.
- Табела 18. Основна својства испитаних епоксидних адхезива. Ауторска табела, подаци преузети из техничких листова адхезива.
- Табела 19. Чврстоћа на смицање у слоју лепка – Епофикс.
- Табела 20. Чврстоћа на смицање у слоју лепка – LG700.
- Табела 21. Чврстоћа на смицање у слоју лепка – МареWrap 31.
- Табела 22. Чврстоћа на смицање у слоју лепка – MUF1247/2526.
- Табела 23. Чврстоћа на смицање у слоју лепка – MUF1247/2526+пунилац.

- Табела 24. Одређивање садржаја суве супстанце MUF-a.
- Табела 25. Вредности експериментално одређених физичких карактеристика MUF-a.
- Табела 26. Физичка и механичка својства MapeWrap C UNI-AX 300.
- Табела 27. План испитивања композитних LVL плоча.
- Табела 28. Услови пресовања плоче EK1OP1.
- Табела 29. Услови пресовања плоче MK1OP1.
- Табела 30. Услови пресовања плоче EK2OP1.
- Табела 31. Услови пресовања плоче MK2OP1.
- Табела 32. Услови пресовања плоче EK3OP1.
- Табела 33. Услови пресовања плоче MK3OP1.
- Табела 34. Услови пресовања плоче EK4KP1.
- Табела 35. Услови пресовања плоче MK4KP1.
- Табела 36. Евиденција изрезаних плоча.
- Табела 37. Број потребних епрувета за испитана механичка својства.
- Табела 38. Одређивање влажности епрувета пре кондиционарања.
- Табела 39. Одређивање влажности епрувета након кондиционарања.
- Табела 40. Резултати испитивања чврстоће на смицање у равни плоче EK1.
- Табела 41. Резултати испитивања чврстоће на смицање у равни плоче EK2.
- Табела 42. Резултати испитивања чврстоће на смицање у равни плоче EK3.
- Табела 43. Резултати испитивања чврстоће на смицање у равни плоче EK4.
- Табела 44. Резултати испитивања чврстоће на смицање у равни плоче MK1.
- Табела 45. Резултати испитивања чврстоће на смицање у равни плоче MK4.
- Табела 46. Резултати испитивања савојне чврстоће у равни плоче за плоче EK1.
- Табела 47. Резултати испитивања савојне чврстоће у равни плоче за плоче EK2.
- Табела 48. Резултати испитивања савојне чврстоће у равни плоче за плоче EK3.
- Табела 49. Резултати испитивања савојне чврстоће у равни плоче за плоче EK4.
- Табела 50. Резултати испитивања савојне чврстоће у равни плоче за плоче MK4.
- Табела 51. Кориговане вредности савојне чврстоће у равни плоче за плоче EK1.
- Табела 52. Кориговане вредности савојне чврстоће у равни плоче за плоче EK2.
- Табела 53. Кориговане вредности савојне чврстоће у равни плоче за плоче EK3.
- Табела 54. Кориговане вредности савојне чврстоће у равни плоче за плоче EK4.

- Табела 55. Резултати испитивања чврстоће на смицање управно на раван плоче ЕК1.
- Табела 56. Резултати испитивања чврстоће на смицање управно на раван плоче Комбинације ЕК2.
- Табела 57. Резултати испитивања чврстоће на смицање управно на раван плоче ЕК3.
- Табела 58. Резултати испитивања чврстоће на смицање управно на раван плоче ЕК4.
- Табела 59. Резултати испитивања притисне чврстоће у равни плоче паралелно влакнима за плоче ЕК1
- Табела 60. Резултати испитивања притисне чврстоће у равни плоче паралелно влакнима за плоче ЕК2.
- Табела 61. Резултати испитивања притисне чврстоће у равни плоче паралелно влакнима за плоче ЕК3.
- Табела 62. Резултати испитивања притисне чврстоће у равни плоче паралелно влакнима за плоче ЕК4.
- Табела 63. Резултати испитивања притисне чврстоће у равни плоче управно на влакна за плоче.
- Табела 64. Резултати испитивања притисне чврстоће у равни плоче управно на влакна за плоче ЕК2.
- Табела 65. Резултати испитивања притисне чврстоће у равни плоче управно на влакна за плоче ЕК3.
- Табела 66. Резултати испитивања притисне чврстоће у равни плоче управно на влакна за плоче ЕК4.
- Табела 67. Резултати испитивања затезне чврстоће у равни плоче ЕК1.
- Табела 68. Резултати испитивања затезне чврстоће у равни плоче ЕК2.
- Табела 69. Резултати испитивања затезне чврстоће у равни плоче ЕК3.
- Табела 70. Резултати испитивања затезне чврстоће у равни плоче ЕК4.
- Табела 71. Механичке карактеристике ојачаног тополовог LVL-а – вредности добијене експерименталном анализом.
- Табела 72. Механичке карактеристике материјала унапређених конструктивних карактеристика примењене у димензионисању носача– штапови $b/d=15/360-720$ mm.
- Табела 73. Статички утицаји код ослонца, на месту међусобног ослањања штапова– штапови $b/d=15/360-720$ mm.
- Табела 74. Статички утицаји у пољу– штапови $b/d=15/360-720$ mm.
- Табела 75. Угиби целокупне структуре– штапови $b/d=15/360-720$ mm.
- Табела 76. Статички утицаји релевантни за димензионисање – штапови $b/d=15/360-720$ mm.
- Табела 77. Контрола угиба – штапови $b/d=45/360-720$ mm.
- Табела 78. Статички утицаји код ослонца – штапови $b/d=45/320$ mm.
- Табела 79. Контрола угиба – штапови $b/d=45/320$ mm.
- Табела 80. Статички утицаји код ослонца – штапови $b/d=30/310-620$ mm.
- Табела 81. Контрола угиба – штапови $b/d=30/310-620$ mm.
- Табела 82. Статички утицаји у стубу - $b/d=30/100$ mm.
- Табела 83. Механичке карактеристике материјала неојачаног узорка примењене у димензионисању носача.

- Табела 84. Статички утицаји код ослонца – штапови $b/d=30/375-750$ mm.
- Табела 85. Контрола угиба – штапови $b/d=30/375-750$ mm.
- Табела 86. Статички утицаји код ослонца – штапови $b/d=30/630-1260$ mm.
- Табела 87. Статички утицаји у стубу – $b/d=30/100$ mm.
- Табела 88. Упоредне вредности остварених напрезања у носачима за модел 2.

Литература

- Acker, Joris van. 2022. *ProPopulus: The European Poplar Initiative*. PROPOPULUS. Последњи приступ Septembar 15, 2022. https://propopulus.eu/wp-content/uploads/2022/06/ProPopulus_The-European-Poplar-Initiative_poplar-in-a-sustainable-economy.pdf.
- APA, The Engineerd Wood Association. 1995. *Design and Fabrication of All-Plywood Beams*. Tachoma, Washington: APA - The Engineerd Wood Association.
- APA, The Engineered Wood Association. 1996. *Design And Fabrication Of Plywood Stressed-Skin Panels*. Tacoma, Washington: APA - The Engineered Wood Association.
- Bal, Bekir Cihad. 2014. „Flexural properties, bonding performance and splitting strength of LVL reinforced with woven glass fiber.“ *Construction and Building Materials* 51: 9-14.
- Bal, Bekir Cihad. 2014. „Some physical and mechanical properties of reinforced laminated veneer lumber.“ *Construction and Building Materials* 68 (2014): 120-126.
- Bal, Bekir Cihad, İbrahim Bektaş, Fatih Mengeloğlu, Kadir Karakuş, и Н. Ökkeş Demir. 2015. „Some technological properties of poplar plywood panels reinforced with glass fiber fabric.“ *Construction and Building Materials* 101 (Part 1): 952-957. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.152.
- Bal, Bekir Cihad, и İbrahim Bektaş. 2012. „The effects of wood species, load direction, and adhesives on bending properties of laminated veneer lumber.“ *BioResources* 7 (3): 3104-3112.
- Bank, Lawrence C. 2006. *Composites for construction : structural design with FRP materials*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Barbu, Marius C., Roman Reh, и Mark Irle. 2014. „Wood-Based Composites.“ У *Research Developments in Wood Engineering and Technology*, уредник Alfredo Aguilera и Paulo J. Davim, 1-45. Hershey PA: Engineering Science Reference.
- Baverel, Olivier, и Alberto Pugnale. 2013. „Reciprocal systems based on planar elements.“ *Proceedings of the ICSA 2013 "Structures and Architecture"*. Guimaraes, Portugal.
- Baverel, Olivier, и Alberto Pugnale. 2014. „Reciprocal Systems Based on Planar Elements: Morphology and Design Explorations.“ *Nexus Network Journal* 16: 179-189.
- Bechert, Simon, Abel Groenewolt, Oliver David Krieg, Achim Menges, и Jan Knippers. 2018. „Structural Performance of Construction Systems for Segmented Timber Shell Structures.“ *Proceedings of the IASS Symposium 2018: Creativity in Structural Design*. Boston.
- Berglund, Lars, и Roger M. Rowell. 2005. „Wood Composites.“ Погл. 10 у *Handbook of wood chemistry and wood composites*, уредник Roger M. Rowell. Boca, USA: CRC Press.
- Biblis, Evangelios J., и Honorio F. Carino. 2000. „Flexural properties of Southern Pine plywood overlaid with fiberglass-reinforced plastic.“ *Forest Product Journal* 50 (4): 34-36.
- Borch I., Keuning D. 2004. *Skins for Buidings*. Amsterdam: BIS Publishers.
- Breyer, Donald E., Kenneth J. Fridley, и Kelly E. Cobeen. 1998. „Wood Structural Panels.“ Погл. 8 у *Design of Wood Structures ASD*. New York: McGraw-Hill.
- Brezović, Mladen, Jaroslav Kljak, Stjepan Pervan, и Alan Antonović. 2010. „Utjecaj kuta orijentacije sintetičkih vlakana na savojna svojstva kompozitne furnirske ploče.“ *Drvna industrija* 61 (4): 239-243.

- Brezović, Mladen, Vladimir Jambreković, и Jaroslav Kljak. 2002. „Utjecaj karbonskih vlakana na neka relativna svojstva furnirskih ploča.“ *Drvna industrija* 53 (1): 23-31.
- Brezović, Mladen, Vladimir Jambreković, и Stjepan Pervan. 2003. „Bending properties of carbon fiber reinforced plywood.“ *Wood Research* 48(4): 13-24.
- Bulleit, William M. 1984. „Reinforcement of wood materials: A review.“ *Wood and Fiber Science* 391-397.
- Buri, Hans Ulrich. 2010. „Origami - Folded Plate Structures.“ *PhD Thesis*. Lausanne: ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE.
- Choi, S.W., J.W. Rho, D.E. Lee, и W.I. Lee. 2011. „Analysis of buckling load of fiber-reinforced plywood plates.“ *18 th International Conference on composite materials*. Jeju Island, Korea.
- Choi, Sung Woong, Meixian Li, Woo Il Lee, и Han Sang Kim. 2014. „Analysis of buckling load of glass fiber/epoxy-reinforced plywood and its temperature dependence.“ *Journal of Composite Materials* 48 (18): 2191–2206. doi:DOI: 10.1177/0021998313495071.
- Conner, A. H. 2001. „Wood: adhesives.“ У *Encyclopedia of materials: science and technology*, 9583-9599. Amsterdam; New York: Elsevier Science, Ltd.
- Datta, Sudip Kumar, Mitsuo Higuchi, и Mitsuhiro Morita. 1999. „Analysis of phenol-resorcinol-formaldehyde resins.“ *Journal of Wood Science* 45(5): 411-416.
- Davalos, Julio F., Pizhong Qiao, и Brent S. Trimble. 2000. „Fiber-Reinforced Composite and Wood Bonded Interfaces: Part 1. Durability and Shear Strength.“ *Journal of Composites, Technology and Research* 22 (4): 224-231.
- Davalos, Julio F., и Pizhong Qiao. 2003. „Fracture Mechanics Methods for Interface Bond Evaluations of Fiber-Reinforced Plastic/Wood Hybrid Composites.“ У *Handbook of Adhesive Technology: Second Edition, Revised and Expanded*, уредник А. Pizzi и К. L. Mittal. Basel: Marcel Dekker, Inc.
- David, G. 1997. „The performance of adhesive systems for structural timbers.“ *International Journal of Adhesion and Adhesives* 17 (3): 247-255.
- Denny, Mark, и Alan McFadzean. 2011. *Engineering Animals: how life works*. Cambridge, Massachusetts: The Belknap Press of Harvard University Press.
- Diekmann, E.F. 1999. „Diaphragm and shearwalls.“ Погл. 8 у *Wood engineering and construction handbook*, уредник Keith F. Farherty и Thomas G. Williamson. New York: McGRAW-HILL, INC.
- Dunky, Manfred. 2003. „Adhesives in the Wood Industry.“ Погл. 47 у *Handbook of Adhesive Technology*, уредник А. Pizzi и К. L. Mittal. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Engel, Heino. 1997. *Structure Systems*. Hatje Cantz Publishers.
- EWPAА. 2018. *Design Guide: Structural Plywood and LVL*. EWPAА - Engineered Wood Products Association of Australasia.
- EWPAА. 2018. *Structural Plywood and LVL: Design Guide*. 5th. Уредник James MacGregor. Engineered Wood Products Association of Australasia.
- Faherty, Keith K., и Thomas G. Williamson, . 1999. *Wood engineering and construction handbook*. 3rd. New York: McGRAW-HILL, INC.
- Frihart, Charles R. 2005. „Wood Adhesion and Adhesives.“ Погл. 9 у *Handbook of wood chemistry and wood composites*, уредник Roger M. Rowell. Boca, USA: CRC Press.

- Glišović, Ivan M. 2013. „Teorijska i eksperimentalna analiza nosača od lepljenog lameliranog drveta ojačanih karbonskim trakama.“ *Doktorska disertacija*. Beograd: Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet.
- Gojković, Milan. 1983. *Drvene konstrukcije*. Beograd: Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Gojković, Milan, и Dragoslav Stojić. 1996. *Drvene konstrukcije*. Beograd: Građevinski fakultet: Grosknjiga.
- Gollob, Lawrence, и J.D. Wellons. 1990. „Wood Adhesion.“ Погл. 36 у *Handbook of adhesives*, уредник Irving Skeist. New York: Chapman & Hall.
- Gomez, Ruben A. 2013. *Design of Folded Plates*. PDHonline course S275, Fairfax: PDH Center.
- Grbic, Miodrag R., Neda M. Dzombic, и Milan T. Glisic. 2017. „Investigation of the Collapse of a Building in the Final Stage of Its Construction.“ *Structural Engineering International* 27:3: 429-434.
- Н.Е., Desch, и J.M. Dinwoodie. 1996. *Timber, Structure, Properties, Conversion and Use*. 7th. London: Macmillan Press Ltd.
- Irle, Mark, и Marius C. Barbu. 2010. „Wood-Based Panel Technology.“ У *Wood-Based Panels - An Introduction for Specialists*, уредник Н. Thoemen, М. Irle и М. Sernek, 1-94. London: Brunel University Press.
- Keimel, Fred A. 2003. „Historical Development of Adhesives and Adhesive Bonding.“ Погл. 1 у *Handbook of Adhesive Technology*, уредник А. Pizzi и К.Л. Mittal. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Keimel, Fred A. 2003. „Historical Development of Adhesives and Adhesive Bonding.“ Погл. 1 у *Handbook of Adhesive Technology*, уредник А. Pizzi и К.Л. Mittal. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Kermani, Abdy. 1999. „Design of Ply-webbed Beams.“ У *Structural Timber Design*, аутор Abdy Kermani, 123-137. Oxford: Blackwell Science.
- Kljak, Jaroslav, Mladen Brezović, и Alan Antonović. 2009. „Utjecaj varijacije kuta vlakanaca furnirske ploče na savojna svojstva sendvič-ploče.“ *Drvna industrija* 60 (2): 83-88.
- Kljak, Jaroslav, и Mladen Brezović. 2007. „Influence of plywood structure on sandwich panel properties: variability of veneer thickness ratio.“ *Wood research* 52 (2): 77-88.
- Knippers, Jan, Riccardo La Magna, Achim Menges, Steffen Reichert, Tobias Schwinn, и Frédéric Waimer. 2015. „ICD/ITKE Research Pavilion 2012: Coreless Filament Winding Based on the Morphological Principles of an Arthropod Exoskeleton.“ *Architectural Design* 85 (5): 48-53.
- Kollmann, Franz F. P. 1975. „Veneer, plywood and laminates.“ У *Principles of Wood Science and Technology II: Wood Based Materials*, уредник Franz F. P. Kollmann, Edward W. Kuenzi и Alfred J. Stamm, 154-283. Berlin: Springer-Verlag.
- Kreßl, Michael. 2009. *Wood in aircraft construction*. Baccalaureate Thesis, Vienna: University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Department of Material Sciences and Process Engineering, Institute of Wood Science and Technology.
- Krieg, O., T. Schwinn, A. Menges, J., Knippers Li, Schmitt J., и Schwieger, V. A. 2015. „Biomimetic Lightweight Timber Plate Shells: Computational Integration of Robotic Fabrication, Architectural Geometry and Structural Design.“ У *Advances in Architectural Geometry 2014*, уредник Р. Block, J. Knippers, N. Mitra и Wang W., 109-125. Cham: Springer.

- La Magna, Riccardo, Frédéric Waimer, и Jan Knippers. 2012. „Nature-inspired generation scheme for shell structures.“ *Proceedings of the International Symposium of the IASS-APCS Symposium 2012: From Spatial Structures to Space Structures*. Seoul: IASS.
- La Magna, Riccardo, Markus Gabler, Steffen Reichert, Tobias Schwinn, Frédéric Waimer, Achim Menges, и Jan Knippers. 2013. „From Nature to Fabrication: Biomimetic Design Principles for the Production of Complex Spatial Structures.“ *International Journal of Space Structures* 28 (1): 27-39.
2019. *Laminated veneer lumber (LVL) bulletin: New European strength classes*. Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. and Federation of Finnish Woodworking Industries.
- Laufenberg, T.L., R.E. Rowlands, и G.P. Krueger. 1984. „Economic feasibility of synthetic fiber reinforced laminated veneer lumber (LVL).“ *Forest Products Journal* 34 (4): 15-22.
- Li, Jian-Min. 2017. „Timber Shell Structures: Form-finding and structural analysis of actively bent grid shells.“ *PhD Thesis*. Stuttgart: Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen der Universität Stuttgart.
- Li, Jian-Min, и Jan Knippers. 2015. „Pattern and Form - Their Influence on Segmental Plate Shells.“ *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2015, Amsterdam: Future Visions*. Amsterdam.
- Li, Jian-Min, и Jan Knippers. 2015. „Segmental Timber Plate Shell for the Landesgartenschau Exhibition Hall in Schwäbisch Gmünd—the Application of Finger Joints in Plate Structures.“ *International Journal of Space Structures* 30 (2): 123-140.
- Liu, Yuansong, Mingjie Guan, Xianwen Chen, Yuan Zhang, и Mingming Yhou. 2019. „Flexural properties evaluation of carbon-fiber fabric reinforced poplar/eucalyptus composite plywood formwork.“ *Composite structures* 224: 111073.
- Lyons, Jed S., и Ahmed R. Mallik. 2005. „Factors Affecting the Bond Between Polymer Composites and Wood.“ *Journal of reinforced plastics and Composites* 24: 407.
- McLain, Thomas E. 1999. „Structural Wood Panels.“ Погл. 7 у *Wood engineering and construction handbook*, уредник Keith F. Farherty и Thomas G. Williamson. New York: McGRAW-HILL, INC.
- McQuaid, Matilda. 2005. *Shigeru Ban*. London: Phaidon Press Limited.
- Menges, Achim, Tobias Schwinn, и Oliver David Krieg, . 2017. *Advancing Wood Architecture: A Computational Approach*. London: Routledge.
- Menges, Achim, и Jan Knippers. 2015. „Fibrous Tectonics.“ *Architectural Design* 85 (5): 40-47.
- Miller, S. Robert. 1990. „Adhesives for Building Construction.“ Погл. 41 у *Handbook of Adhesives*, уредник Irving Skeist. New York: Chapman & Hall.
- Mongelli, Alessandra. 2006. „A New Wood Roofing System Marac's Barracks and Colonel Armand Rose Emy's Innovation System.“ *Proceedings of the Second International Congress on Construction History*. Exeter, UK: Short Run Press. 2241-2260.
- Moody, Russell C., Roland Hernandez, и Jen Y. Liu. 2002. „Glued Structural Members.“ У *Wood handbook: wood as an engineering material*, уредник U.S. Forest Products Laboratory, 239-262. Almonte, Ontario: Algrove Publishing.
- Ozarska, B. 1999. „A review of the utilisation of hardwoods for LVL.“ *Wood Science and Technology* (33): 341-351.
- Pawlyn, Michael. 2016. *BIOMIMICRY in ARCHITECTURE*. Newcastle: RIBA Enterprises Ltd.
- Popovic Larsen, Olga. 2008. *Reciprocal Frame Architecture*. Oxford: Elsevier Ltd.

- Popovic, Olga. 1996. „Reciprocal frame structures.“ *PhD thesis*. University of Nottingham.
- Preising, Renate. 2006. „Otto Hetzer - Pionier des Holzleimbau. Ein Patent wird 100 Jahre alt.“ *Bauen mit Holz* 108/6: 34-36.
- Purba, Citra Yanto Ciki, Guillaume Pot, Joffrey Viguier, Julien Ruelle, Louis Denaud, и Meriem Fournier. 2018. „MECHANICAL PROPERTIES OF LAMINATED VENEER LUMBER (LVL) MADE OF SECONDARY QUALITY OAK AND BEECH: THE EFFECT OF VENEER THICKNESS.“ *World Conference of Timber Engineering*. Seoul, Republic of Korea.
- Reichert, Steffen, Tobias Schwinn, Riccardo La Magna, Frédéric Waimer, Jan Knippers, и Achim Menges. 2014. „Fibrous structures: An integrative approach to design computation, simulation and fabrication for lightweight, glass and carbon fibre composite structures in architecture based on biomimetic design principles.“ *Computer-Aided Design* 52: 27–39.
- Robeller C., Weinand, Y. 2015. „Interlocking Folded Plate – Integral Mechanical Attachment for Structural Wood Panels.“ *International Journal of Space Structures* 30 (2): 111-122.
- Robeller, Christopher W. M. 2015. „Plate, Integral Mechanical Attachment for Timber Folded.“ *PhD Thesis*. Lausanne: ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE.
- Robeller, Christopher Werner Matthias. 2015. „Integral Mechanical Attachment for Timber Folded Plate Structures.“ *Doctoral Dissertation*. Lausanne, Suisse: ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE.
- Robeller, Christopher, Julien Gamarro, и Yves Weinand. 2017. „Théâtre Vidy Lausanne – A Double-Layered Timber Folded Plate Structure.“ *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* 58 (4): 295-314.
- Robeller, Christopher, Mina Konaković, Mira Dedijer, Mark Pauly, и Yves Weinand. 2017. „Double-layered timber plate shell.“ *International Journal of Space Structures* 32 (3-4): 160–175.
- Rowell, Roger M., ур. 2005. *Hanbook of wood chemistry and wood composites*. Boca, USA: CRC Press.
- Rowlands, R.E., R.P. Van Deweghe, T.L. Laufenberg, и G.P. Krueger. 1986. „Fiber-reinforced wood composites.“ *Wood and fiber Science* 18 (1): 39-57.
- Sasaki, H., и A.A. Abdullahi. 2016. „Lumber: Laminated Veneer.“ *У Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. Elsevier.
- Schwinn, Tobias. 2017. „Landesgartenschau Exhibition Hall.“ *У Advancing Wood Architecture*, уредник Achim Menges, Tobias Schwinn и Oliver David Krieg, 111-124. London: Routledge.
- Scuderi, Giuliana. 2015. „Adaptive building exoskeletons: A biomimetic model for the rehabilitation of social housing.“ *International Journal of Architectural Research* 9 (1): 134-143.
- Šekularac, Nenad, Jelena Ivanović Šekularac, и Jasna Čikić Tovarović. 2012. „Folded structures in modern architecture.“ *Facta universitatis - series: Architecture and Civil Engineering* 10: 1-16.
- Sheldon, Shi, и John Walker. 2006. „Wood-based composites: plywood and veneer-based products.“ Погл. 11 у *Primary wood processing: principles and practice*, уредник J.C.P. Walker. Springer.
- Shukla, S.R., и D. Pascal Kamdem. 2008. „Properties of laminated veneer lumber (LVL) made with lowdensity hardwood species: effect of the pressure duration.“ *Holz Roh Werkst* (66): 119–127. doi:10.1007/s00107-007-0209-1.

- Sidharta Muljadinata, Albertus, и A.M. Subakti Darmawan. 2016. „Redefining folded plate structure as a form-resistant structure.“ *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences* 11 (7): 4782-4792.
- Siegel, Curt. 1960. *Strukturformen der modernen architektur*. Munchen: Verlag Georg D.W.Callwey Munchen.
- Sokolović, Neda M., Milica Petrović, Ana Kontić, Suzana Koprivica, и Nenad Šekularac. 2021. „Inspection and Assessment of Masonry Arch Bridges: Ivanjica Case Study.“ *Sustainability* 13: 13363.
- Šorn, Štefo. 2006. „LVL kao mogućnost supstitucije masivnog drveta.“ *Prerada drveta* (13): 23-28.
- Sretenović, Predrag M. 2015. „Uticaj potražnje kompozitnih proizvoda od drveta u Evropi na tržište drvnih proizvoda u Srbiji.“ *Doktorska disertacija*. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet.
- Stalnaker, Judith J.: Harris, Ernest C. 1997. „Plywood and Similar Wood Products.“ У *Structural design in wood*, 249-268. New York: Springer-Verlag New York Inc.
- Stavric, Milena, Alebert Wiltsche, и Thomas Bogensperger. 2015. „Generative design for folded timber structures.“ Уредник Y. Ikeda, C. M. Herr, D. Holzer, S. Kaijima, M. J. Kim и M. A. Schnabel. *Emerging Experience in Past, Present and Future of Digital Architecture, Proceedings of the 20th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA*. Hong Kong: The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA).
- Stitic, Andrea, и Yves Weinand. 2015. „Timber Folded Plate Structures – Topological and Structural Considerations.“ *International Journal of Space Structures* 30 (2): 169-177.
- Szabo, Anna. 2020. „Design and fabrication of thin folded members with digital concrete processes.“ *PhD thesis*. Zurich: ETH Zurich.
- Team, AP-42. 2002. „Engineered Wood Products Manufacturing.“ Погл. 10.9 у *Compilation of Air Pollutant Emissions Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources*. EPA - United States Environmental Protection Agency.
- Thoemen, Heiko, Mark Irle, и Milan Sernek, . 2010. *Wood-Based Panels - An Introduction for Specialists*. London: Brunel University Press.
- Wagenführ, André, Steffen Tobisch, Rico Emmmler, Beate Buchelt, и Tino Schulz. 2011. *Furnier im Innenausbau, Herausgeber: Initiative Furnier + Natur (IFN)*. Dresden: TU Dresden und des Institutes für Holztechnologie Dresden.
- Walker, J.C.F. 1993. „Wood panels: plywoods.“ Погл. 11 у *Primary wood processing: principles and practice*, аутор J.C.P. Walker, B.G. coauthors: Butterfield, T.A.G. Langrish, J.M. Harris и J.M. Uprichard, 377-416. London: Chapman & Hall.
- Wang, Jie, Xiaolei Guo, Wei Zhong, Huiyun Wang, и Pingxiang Cao. 2015. „Evaluation of Mechanical Properties of Reinforced Poplar Laminated Veneer Lumber.“ *BioResources* 10 (4): 7455-7465.
- Weinand, Yves, ур. 2017. *Advanced Timber Structures: Architectural Designs and Digital Dimensioning*. Basel: Birkhäuser Verlag GmbH.
- Weinand, Yves. 2017. „Folded plates made from timber panels.“ У *Advanced Timber Structures*, уредник Yves Weinand, 14-31. Basel: Birkhäuser Verlag GmbH.
- Winandy, Jerrold E., и Roger M. Rowell. 2005. „Chemistry of Wood Strength.“ Погл. 11 у *Handbook of wood chemistry and wood composites*, уредник Roger M. Rowell. Boca, USA: CRC Press.

- Xu, Heng, Tetsuya Nakao, Chiaki Tanaka, Masahiro Yoshinobu, и Hiroyuki Katayama. 1998. „Effects of fiber length and orientation on elasticity of fiber-reinforced plywood.“ *J. Wood Sci.* (44): 343-347.
- Yeou-Fong, Li, Tsai Ming-Jer, Wei Ting-Fang, и Wang Wei-Chou. 2014. „A study on wood beams strengthened by FRP composite materials.“ *Construction and Building Materials* 62: 118-125.
- Youngquist, John A. 2002. „Wood-Based Composites and Panel Products.“ У *Wood Handbook - Wood as an Engineering Material*, аутор Forest Product Laboratory, 207-238. Ontario: Algrove Publishing.
- Yunis, Leyla, Ondřej Kyjánek, Moritz Dörstelmann, Marshall Prado, Tobias Schwinn, и Achim Menges. 2014. „Bio-inspired and fabrication-informed design strategies for modular fibrous structures in architecture.“ *Fusion, Proceedings of the 32nd International Conference on Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe*. Newcastle upon Tyne, UK: Northumbria University. 423-432.
- Гавриловић-Грмуша, Ивана. 2019. *Познавање материјала. Део 1, Адхезиви у дрвној индустрији*. Београд: Универзитет, Шумарски факултет.
- Грбић, Миодраг. 2016. „Формирање конструктивних елемената архитектонских објеката употребом полимера ојачаних рециклираним влакнима.“ *Докторска дисертација*. Београд: Универзитет у Београду, Архитектонски факултет.
- Ивановић-Шекуларац, Јелена. 2017. *Дрво у савременој архитектури*. Београд: Универзитет у Београду, Архитектонски факултет.
- Николић, Михаило. 2004. *Фурнири и слојевите плоче*. Београд: Универзитет у Београду, Шумарски факултет.
- Шекуларац, Ненад. 2017. *Дрвени решеткасти носачи: пројектовање, прорачун и извођење кровних конструкција*. Београд: Универзитет у Београду, Архитектонски факултет.

- Институт за стандардизацију Србије. 2015. *SRPS EN 636:2015 - Фурнирске плоче (шперплоче) – Спецификације*. Београд: ИСС.
- Институт за стандардизацију Србије. 2010. *SRPS EN 314-1:2010 - Фурнирске плоче (шперплоче) – Квалитет лепљења - Део 1: Методе испитивања*. Београд: ИСС.
- Институт за стандардизацију Србије. 2010. *SRPS EN 315:2010 - Фурнирске плоче (шперплоче) – Толеранција димензија*. Београд: ИСС.
- Институт за стандардизацију Србије. 2010. *SRPS CEN/TS 14966:2010 Плоче на бази дрвета – Индикативне методе малог опсега за испитивање одређених механичких својстава помоћу показивача мале скале*. Београд: ИСС.
- Институт за стандардизацију Србије. 2010. *SRPS EN 315:2010 -Фурнирске плоче (шперплоче) – Толеранција димензија*. Београд: ИСС.
- Институт за стандардизацију Србије. 2010. *SRPS EN 14279:2010 - Ламинирана грађа од фурнира(LVL) - Дефиниције, класификација и спецификације*. Београд: ИСС.
- Институт за стандардизацију Србије. 1987. *SRPS U.D0.001/1:1987- Пројектовање и извођење дрвених конструкција - Материјали за израду дрвених конструкција - Технички услови – Измене*. Београд: ИСС (датум повлачења 30.08.2016).
- Институт за стандардизацију Србије. 2012. *SRPS EN 1995-1-1:2012, Еврокод 5 – Пројектовање дрвених конструкција – Део 1-: Општа правила и правила за зграде*. Београд: ИСС.
- Институт за стандардизацију Србије. 2016. *SRPS EN 1995-1-1:2012/A2:2016 - Еврокод 5 – Пројектовање дрвених конструкција – Део 1-: Општа правила и правила за зграде – Измена 2*. Београд: ИСС.
- Институт за стандардизацију Србије. 2017. *SRPS EN 1995-1-1/NA:2017 Део 1-1: Опште – Заједничка правила и правила за зграде – национални прилог*. Београд: ИСС.
- Институт за стандардизацију Србије. 2012. *SRPS EN 14374:2012- Дрвене конструкције— Конструкцијско ламелирано фурнирско дрво – Захтеви*. Београд: ИСС.
- Институт за стандардизацију Србије. 2014. *SRPS EN 408:2014 Дрвене конструкције – Конструкцијско дрво и лепљено ламелирано дрво – Одређивање физичких и својстава*. Београд: ИСС.
- Институт за стандардизацију Србије. 2017. *SRPS EN 923:2017 Адхезиви – Термини и дефиниције*. Београд: ИСС.
- Институт за стандардизацију Србије. 2017. *SRPS EN 205:2017 - Адхезиви – Адхезиви за дрво који се не примењују за конструкције – Одређивање смицајне чврстоће затезањем преклопних спојева*. Београд: ИСС.
- ASTM. 2009. *ASTM D 3500 – 90 “Standard test methods for structural panels in tension”*.

Неда М. Соколовић је рођена 1991. године у Београду. Основну школу завршава у Старој Пазови, а Гимназију у Инђији. Основне академске студије на Архитектонском факултету у Београду уписује 2010. године, а завршава 2013. године просечном оценом 9,19. Мастер академске студије на истоименом факултету уписује 2013. године и завршава их 2015. године просечном оценом 9,98. Током студија на Мастер академским студијама кандидаткиња је ангажована као студент сарадник у оквиру предмета Студио пројекат у школској 2013/14 и 2014/15 години и активно је учествовала у раду на вежбама. Од 2015. године, као студент Мастер студија ангажована је у својству сарадника у настави на Универзитету у Београду – Архитектонском факултету, Департману за архитектонске технологије, ужој научној, односно уметничкој области Архитектонско конструктерство.

Докторске студије *Архитектуре и урбанизма* на Архитектонском факултету у Београду уписује 2015. године. Од 2016. године до данас запослена је у звању асистента на Универзитету у Београду – Архитектонском факултету, Департману за архитектонске технологије, ужој научној области Архитектонско конструктерство. Ангажована је у настави на предметима из области Архитектонског конструктерства на основним и мастер студијским програмима.

Од 2018. ангажована је у звању асистент, истраживач приправник на научном пројекту: ТР 36038 – Развој методе израде пројектне и извођачке документације инсталационих мрежа у зградама компатибилне са БИМ процесом и релевантним стандардима под руководством др Игора Светела, Иновациони центар Машинског факултета у Београду. Од јануара 2020. године је ангажована као истраживач у оквиру институционалног модела финансирања истраживача МПНТР којим се остварује општи интерес за Републику Србију и учествује у раду Лабораторије за архитектонско инжењерство – Проблеми конструисања архитектонских објеката и Лабораторије архитектонског простора – Форма, функција и материјализација на Универзитету у Београду – Архитектонском факултету.

Од уписа на докторске академске студије објавила је укупно 11 научних доприноса доминантно у конференцијским зборницима, тематским зборницима и часописима међународног и националног значаја, а посебно се издвајају резултати публиковани у научним часописима категорија М20 индексираних у оквиру SCI/SSCI листа (3 рада), од чега је један рад у истакнутом међународном часопису М22 категорије као први аутор.

Активно бави стручном праксом, израдом идејних, главних и извођачких пројеката архитектуре и конструкције, самостално и у оквиру ауторских тимова.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: **Неда М. Соколовић**

Број индекса: Д 4/2015

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом:

ИСПИТИВАЊЕ КОНСТРУКТИВНИХ КАРАКТЕРИСТИКА И МОГУЋНОСТИ ПРИМЕНЕ КОМПОЗИТНИХ ПЛОЧА ОД ДРВЕТА У АРХИТЕКТУРИ ЕГЗОСКЕЛЕТА

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: **Неда М. Соколовић**
Број индекса: Д 4/2015

Студијски програм: Докторске академске студије – Архитектура и урбанизам

Наслов рада: **ИСПИТИВАЊЕ КОНСТРУКТИВНИХ КАРАКТЕРИСТИКА И МОГУЋНОСТИ ПРИМЕНЕ КОМПОЗИТНИХ ПЛОЧА ОД ДРВЕТА У АРХИТЕКТУРИ ЕГЗОСКЕЛЕТА**

Ментор: **др Ненад Шекуларац, редовни професор**

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

ИСПИТИВАЊЕ КОНСТРУКТИВНИХ КАРАКТЕРИСТИКА И МОГУЋНОСТИ ПРИМЕНЕ КОМПОЗИТНИХ ПЛОЧА ОД ДРВЕТА У АРХИТЕКТУРИ ЕГЗОСКЕЛЕТА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

Потпис аутора

У Београду, _____

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.