

Универзитет у Београду
Машински факултет

Шевкет Ћеловић

Нумеричко-експериментална карактеризација чврстоће расклопивих контејнера

докторска дисертација

Београд, 2015.

University of Belgrade
Faculty of Mechanical Engineering

Ševket Čelović

Numerical-experimental characterization of the strenght of foldable container

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2015.

Комисија за преглед, оцену и одбрану:

Ментор:

Проф. др Ташко Манески, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

Чланови Комисије:

Проф. др Милорад Милованчевић, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

Проф. др Весна Милошевић – Митић, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

Проф. др Зоран Голубовић, редовни професор у пензији
Универзитет у Београду, Машински факултет

Проф. др Џемо Туфекчић, редовни професор
Универзитет у Тузла (БИХ), Машински факултет

Датум одбране:

Предговор

Овај рад је настао као резултат вишегодишњег истраживања из области понашања структуре расклопивих контејнера. Основа дисертације представља анализа комплексних геометрија разнородних расклопивих контејнера и утицаја геометрије на чврстоћу контејнера. У циљу сагледавања особина и понашања контејнера издвојени су параметри који их описују и разматрани су њихови утицаји на чврстоћу контејнера.

Глобализација привреде омогућила је настајање глобалног тржишта материјала, производа и услуга као и премештање производње у ниско трошковне регије. Као последица тога логистика и логистички ланци су постали знатно сложенији. Расклопиви контејнери су распрострањени и у употреби су у различитим гранама индустрије.

Развијена је методологија карактеризације чврстоће контејнера. Карактеризацију чврстоће функционалног склопа контејнера обављена је путем нумеричког и експерименталног приступа. Нумерички приступ је изведен кроз примену методе коначних елемената и компјутерског моделирања. Експериментални приступ представља примену метода мерења деформација и чврстоће контејнера. Овим се извршава квалитетна карактеризација расклопивог контејнера, како постојећег тако и при дизајнирању новог модела. Приказане су основне геометријске карактеристике развијеног модуларног дизајна контејнера.

Овај рад свакако не би био потпун без несебичне подршке професора професора Ташка Манеског. Искрену захвалност за подршку приликом израде докторске дисертације дугујем свим члановима Катедре за отпорност констуркција Машинског факултета у Београду.

Београд, 2015.

Мр Шевкет Ћеловић, дипл. маш инж.

Нумеричко-експериментална карактеризација чврстоће расклопивих контејнера

Резиме

Глобализација привреде омогућила је настајање глобалног тржишта материјала, производа и услуга као и премештање производње у ниско трошковне регије. Као последица тога логистика и логистички ланци су постали знатно сложенији. Расклопиви контејнери су тиме нашли велику примену, као и потреба за пројектовањем нових контејнера који требају да испуне све стржије крутеријуме чврстоће.

У овом раду дат је приказ резултата вишегодишњег истраживања у области понашања структуре расклопивих контејнера. Основа дисертације представља анализа комплексних геометрија разнородних расклопивих контејнера и утицају геометрије на чврстоћу контејнера. У циљу сагледавања особина и понашања контејнера издвојени су параметри који их описују и разматрани су њихови утицаји на чврстоћу контејнера.

Развијена је методологија карактеризације чврстоће контејнера. Карактеризацију чврстоће функционалног склопа контејнера обављена је путем нумеричког и експерименталног приступа. Нумерички приступ је изведен кроз примену методе коначних елемената и компјутерског моделирања. Експериментални приступ представља примену метода мерења деформација и чврстоће контејнера. Овим се извршава квалитетна карактеризација расклопивог контејнера, како постојећег тако и при дизајнирању новог модела.

Дефинисани су основни елементи идентификације понашања контејнера кроз одређивање крутости елемената контејнера и самог контејнера.. Идентификовани су основни проблеми повољног понашања контејнера. Они су представљени кроз немогућност преноса оптерећења са једне покретне површине странице на непокретну површину базе (реална грешка дизајна, израде и монтаже) и потребно максимално

растерећење везе страница и базе. Дефинисане су потребне карактеристике расклопивих контејнера које он треба да испуни. Приказане су основне геометријске карактеристике развијеног модуларног дизајна контејнера.

Приказане су основне геометријске карактеристике развијеног модуларног дизајна контејнера.

Кључне речи: расклопиви контејнер, чврстоћа, крутост, извијање, карактеризација, методологија, метода коначних елемената, 3Д оптичко мерење деформације, мерење оптерећења и деформација, модуларни дизајн

Научна област: Машинство

Ужа научна област: Отпорност конструкција

УДК број:

Numerical-experimental characterization of the strength of foldable container

Abstract

The globalization of the economy has enabled the emergence of a global market of materials, products and services, as well as the relocation of production to low-cost regions. As a consequence, logistics and logistics chains have become much more complex. Folding containers are thus broadly used, and the need for the design of new containers that need to comply with increasingly stringent decision criteria strength.

This paper presents the results of years of research in the field of behaviour structure of foldable container. The basis of the thesis is the analysis of complex geometries of various foldable container and the influence of geometry on the strength of the container. In order to observe the characteristics and behavior of container were extracted parameters that describe them and examined their effects on the strength of the container.

Methodology has been developed characterization of the strength of the container. Functional characterization of the strength of the container assembly is performed by numerical and experimental approaches. The numerical approach is implemented through the application of finite element method and computer modeling. The experimental approach is the application of methods of measuring deformation and strength of the container. This executes the quality characterization of the foldable container, as well as existing when designing nobog models.

The basic elements of behaviour identification of containers through the determination of stiffness of the container and the container itself. They identified the main problems of the favorable behavior of the container. They are represented by the inability to transfer loads from one movable surface sites on the surface of the fixed base (real fault of design, fabrication and assembly) and need maximum relief and database links page. Defines required characteristics of extractable container, it should meet. Shows the basic geometric characteristics of the developed modular design of the container.

Shows the basic geometric characteristics of the developed modular design of the container

Key words:

foldable container, strength, stiffness, buckling, characterization, methodology, finite element analysis, 3D optical strain measurement, measurement of load and deformation, modular design

Scientific discipline:

Mechanical engineering

Scientific subdiscipline:

Strength of Structure

UDC:

Садржај

1 Увод	1
1.1 Кратак преглед садржаја рада	3
2 Карактеристике расклопивих контејнера	6
2.1 Дефиниције контејнера.....	6
2.2 Спецификација дизајна контејнера	7
2.3 Материјал	11
2.4 Произвођачи и дистрибутери контејнера.....	16
2.5 Упоредна анализа карактеристика постојећих контејнера.....	24
3 Истражовање у предметној области.....	27
3.1 Истраживачко-развојни центри.....	27
3.2 Изведене прорачуни.....	27
3.3 Изведени експерименти	29
3.4 Дефинисање параметара карактеризације чврстоће контејнера	31
4 Развој методологије карактеризације чврстоће контејнера	33
4.1 Компјутерско моделирање и прорачун	35
4.2 Експерименталне методе	41
5 Теоријске основе прорачуна и дефинисање напрезања контејнера	43
5.1 Теоријске основе прорачуна	43
5.2 Дефинисање напрезања контејнера.....	59
6 Нумеричко одређивање параметара чврстоће контејнера	61
6.1 Прорачун и анализа понашања базе контејнера	61
6.2 Поставке прорачуна и анализе дуже странице контејнера.....	67
6.3 Прорачун и анализа дуже странице контејнера Тонтарелли.....	74
6.4 Прорачун и анализа критичне силе извијања контејнера.....	77
6.5. Дизајн базе и странице контејнера	83

7 Експериментално одређивање параметера чврстоће контејнера.....	87
7.1. Мерно-аквизициони систем Лабораторије за Отпорност конструкција.....	87
7.2. Гом-оптичка техника мерења	90
7.3. Мерење деформације база	97
7.4. Мерење бочне деформације дуже странице.....	99
7.5. Вертикални притисак са извијањем контејнера.....	100
7.6. 3Д оптичко мерење поља деформације.....	105
7.6. Савијање контејнера ослоњеног на три тачки	111
7.7. Сила отварања странице контејнера	112
7.8. Савијање елемената за држање папира	120
7.9. Тест пада.....	121
 8 Дефинисање потребних карактеристика расклопивих контејнера	123
 9 Развој модуларно дизајнираних контејнера	124
 10 Закључне напомене и смернице за будућа истраживања.....	131
10.1 Закључне напомене.....	131
10.2 Смернице за будућа истраживања.....	133
 Литература	134

Номенклатура

a	дужина плоче
A_x, A_y	површина попречног пресека оребрене плоче управног на правац x , односно y
b	ширина плоче
E	модул еластичности материјала
E, E_p, E_k	енергија деформације, потенцијална и кинетичка енергија
e	енергија елемента
f	померање тачке
F	сила
G_{12}	модул клизања материјала
I	момент инерције попречног пресека, момент инерције укрућења са придодатим лимом
k	крутост елеменат у локалном координатном систему
K	крутост елеменат у глобалном координатном систему
L	дужина
l_1, l_2	растојање између тачака на мерном месту
l, m, n	косинуси углова између локалних и глобалних оса
m	маса
M	момент савијања
T	попречна сила, температура, трансформација
t	дебљина плоче
u	подужно померање у равни плоче
v	попречно померање у равни плоче
w	вертикално померање у односу на раван плоче (угиб)
V	запремина
x, y, z	осе локалног координатног система
X, Y, Z	осе глобалног координатног система
α, β	коэффициенти модификације
$\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$	угао клизања у равни $x-y$, $x-z$, $y-z$
ϵ	деформација

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	деформација у правцу x, y, z
δ	померање
ν	Пواسонов коефицијент материјала
σ_x^s, σ_y^s	савојне компоненте нормалних напона у еквивалентној плочи, у правцу x , односно y
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$	напон смицања у равни $x-y, x-z, y-z$
ρ	специфична густина материјала
ω	сопствена фреквенца
μ	сопствени вектор
$[B]$	матрица везе деформације и померања, матрица пригушења
$[C]$	матрица еластичних коефицијената материјала
$[D]$	матрица еластичности материјала
$\{F\}$	матрица оптерећења
$[k]$	матрица савојних деформација
$[k]_e$	матрица крутости коначног елемента у локалном систему
$[K]$	глобална матрица крутости коначних елемената
$[L]$	матрица диференцијалних оператора
$[N]$	матрица функције облика
$\{u\}$	матрица померања
$\{\sigma\}$	матрица напона
$[\varepsilon]$	матрица укупних деформација
1Д	једнодимензионо
2Д	дводимензионо
3Д	тродимензионо
МКЕ	метода коначних елемената
ДИЦ	дигитална оптичка метода

1 Увод

Глобализација привреде омогућила је настајање глобалног тржишта материјала, производа и услуга као и премештање производње у нискотрошковне регије. Као последица тога логистика и логистички ланци су постали знатно сложенији. Логистика је процес превоза робе и материјала од почетка до краја процеса производње, у циљу задовољења корисника и његове пословне способности. Кључни елемент у ланцу снабдевања је транспортни систем који обједињује различите, просторно и временски одвојене активности. Транспорт обухвата највећи део логистичких трошкова и значајно утиче на перформансе логистичког система. Транспортирање се захтева у целокупном процесу производње, од израде производа до доставе крајњем кориснику и до евентуалног поврата производа. Врло важну улогу у процесу транспорта роба и материјала имају склопиви транспортни и складишни контејнери.

Склопиви транспортни и складишни контејнери су распрострањени и у употреби су у различитим гранама индустрије (аутомобилској, прехранбеној,...). Особина да се контејнери склапају је пожељна јер се смањује простор који контејнери заузимају када нису напуњени, па се простор користи на најбољи могући начин. Склопивост контејнера побољшава складиштење и транспорт, а такође смањује и трошкове транспорта. Контејнери омогућавају мањи утрошак енергије, ефикасни транспорт производа врши уз велику поузданост. Такође, контејнери могу поново да се користе након оштећења рециклирањем старих и прављењем нових.

Склопиви контејнери састоје се од склопивих бочних или крајњих зидова, базе и крова који је опциони. У поређењу са дрвеним кутијама, пластични контејнери за складиштење и одлагање производа су лакши, лепшег дизајна, чврсти, отпорни на киселине и базе, имају дужи век трајања, лако је руковати са њима.

Предмет истраживања ове дисертације је нумеричко-експериментална категоризација чврстоће расклопивих контејнера. Основа дисертације огледа се у анализи комплексних геометрија разматраних разнородних расклопивих контејнера и утицају геометрије на чврстоћу контејнера. У циљу сагледавања особина и понашања контејнера издвојени су параметри који их описују и разматрани су њихови утицаји на чврстоћу контејнера. Такође, формиран су различити модели прорачуна којима се описује физички модел расклопивих контејнера. Нумеричка анализа коришћена у дисертацији подразумевала је примену нумеричке методе коначних елемената (МКЕ). Током прорачуна, развијен је физичко-математички модел прорачуна чврстоће контејнера.

Експериментална анализа обухватала је мерење деформација и напона на конструкцији разнородних контејнера различитим мерним принципима, а циљ је био верификовање прорачунских резултата и прецизније дефинисање чврстоће контејнера.

Да би се почело са одређивањем параметара који утичу на чврстоћу контејнера, потребно је дефинисати методологију карактеризације чврстоће. Основни елементи карактеризације чврстоће контејнера и његових елемената су:

- одређивање деформације контејнера при сложенем напрезању
- одређивање крутости елемената контејнера и самог контејнера
- одређивање параметара категоризације контејнера.

Основни проблем дијагностике понашања контејнера представља немогућност доследног рачунарског моделирања веза. Свака веза не носи оптерећење на исти начин у оба смера истог правца. Проблем, такође, представља немогућност преноса оптерећења са једне површине на површине два покретна елемента (реална грешка израде и монтаже). Све везе је неопходно максимално растеретити. Категоризација чврстоће контејнера се у првом реду односи на сваки елемент контејнера посебно, па затим и на цео контејнер. Најбитнији, а у овој дисертацији разматрани, елементи контејнера су странице, база и везе.

Основна напрезања за која треба дефинисати чврстоћу контејнера су:

- притисак са извијањем
- савијање страница око дуже и краће ивице
- увијање страница и базе
- савијање са увијањем страница и базе
- сила отварања страница.

Чврстоћу контејнера је потребно одредити у различитим радним условима.

Основни научни циљ дисертације је дефинисање методологије за карактеризацију чврстоће расклопивих контејнера нумеричко-експерименталним методама. Оваквим приступом су дефинисани елементи за побољшање карактеристика чврстоће расклопивих контејнера, као елементи који утичу на побољшање експлоатације контејнера. Научни допринос ове докторске дисертације је:

- поуздано дефинисање параметара карактеризације чврстоће контејнера
- предлог допуне методологије прорачуна и испитивања са којима се долази до побољшаног производа
- дефинисање потребних карактеристика чврстоће контејнера који обезбеђују његову поуздану експлоатацију
- развој фамилије модуларно дизајнираних контејнера.

1.1 Кратак преглед садржаја рада

У уводном поглављу дисертације укратко су описани предмет, циљ и допринос истраживања. Предмет истраживања ове дисертације је нумеричко-експериментална категоризација чврстоће расклопивих контејнера. Основни научни циљ дисертације је дефинисање методологије за карактеризацију чврстоће расклопивих контејнера нумеричко-експерименталним методама. Допринос ове докторске дисертације представља поуздано дефинисање параметара карактеризације чврстоће контејнера.

У наставку су анализирани и дефинисане карактеристике расклопивих контејнера кроз. Такође, наведени су патенти расклопивих контејнера.

Развијена методологија карактеризације чврстоће контејнера је приказана у поглављу 4. Карактеризацију чврстоће функционалног склопа контејнера потребно је обавити путем нумеричког и експерименталног приступа. Нумерички приступ је изведен кроз примену методе коначних елемената и компјутерског моделирања. Експериментални приступ представља примену метода мерења деформација и чврстоће контејнера. Валидација резултата прорачуна и експеримента као веома битан фактор изведен је кроз циклус „учења“ прорачун-мерење-прорачун.

Теоријска основа прорачуна кроз опис примењене методе коначних елемената, теорија еластичности и коначни елемент плоче су укратко приказане и описане.

Нумеричко одређивање параметара чврстоће контејнера изведено је применом методе коначних елемената. Наведено је да главни исход прорачуна и анализе чврстоће контејнера представља дефинисање граничних вредности параметара чврстоће. Код базе и дуже странице контејнера анализиран је утицај густине растера ребара базе, као и дебљина плоче базе и ребара на њихово статичко и динамичко понашање. Одређивање критичне силе извијања странице и дали она настаје пре или након појаве пластичне деформације странице представља веома битан елемент. Резултат прорачуна и анализе дат је кроз опис потребног дизајна базе и странице контејнера који задовољава постављене критеријуме.

Мерења у оквиру овог истраживања изведена су у Лабораторији за Отпорност конструкција Машинског факултета у Београду на мерно-аквизационом систему лабораторије и у лабораторији за испитивање материјала на Технолошко-металуршком факултет у Београду. Мерења су обухватила мерење угиба базе, мерење угиба дуже стране при бочном савијању исте, извијање контејнера при дејству вертикалног притисног оптерећења, оптичко 3Д мерење статичке и

динамичке деформације (GOM-Немачка), мерење силе отварања странице контејнера, дроп тест, деформација елемента за папир и др.

У наставку су дефинисани основни елементи идентификације понашања контејнера кроз одређивање крутости елемената контејнера и самог контејнера. Идентификовани су основни проблеми повољног понашања контејнера. Дефинисане су потребне карактеристике расклопивих контејнера које он треба да испуни. Приказане су основне геометријске карактеристике фамилије развијених контејнера модуларног дизајна.

2 Карактеристике расклопивих контејнера

2.1 Дефиниције контејнера

По дефиницији међународне организације за стандардизацију – ИСО контејнер је суд правоугаоног пресека, непромочив, који се примењује за транспорт и складиштење извесног броја јединица пошиљки или робе у расутом стању, штити његову садржину од кварења и губитака, може се одвојити од транспортног средства, којим се може манипулисати као једном јединицом товарења и може се претоварити без истовременог истовара робе.

У зависности од карактеристика које се посматрају, контејнери се могу поделити према:

- намени
- врсти робе која се у њима превози
- носивости
- врсти материјала од којег су изграђени
- врсти конструкције
- месту кориштења
- начину превоза
- подобностима и могућностима претовара и слично.

Према врсти материјала од којих су изграђени, контејнери могу бити: дрвени, метални, гумени, пластични, од разних легура, смеса и сл. У погледу конструктивних карактеристика постоје: несклопиви, склопиви, као и контејнери који се стављају једни у друге. Према месту кориштења контејнери се деле на

контејнере који се употребљавају само за превозе у једној земљи (национални превози) и у превозима између земаља, па и између континената.

Према начину превозења контејери се могу поделити на оне који се употребљавају у директним и комбинованим превозима.

Комбинована превозења се одвијају између различитих грана транспорта као што су:

- друмско-железнички,
- копнено-водени,
- копнено-ваздушни.

Међународна организација за стандардизацију (ИСО) прописала је услове које морају да испуне контејнери, и то:

- минималан отпор целокупне конструкције код пропорционалног оптерећења основе контејнера
- отпорност од удара за време транспорта
- отпорност контејнера код слагања
- отпорност контејнера против напрезања код манипулисања и унутрашња непропустљивост контејнера.

2.2 Спецификација дизајна контејнера

Постоје три типа дизајна пластичих контејнера. Први тип је несклопив, што значи да празан контејнер заузима исту запремину, као и пун . Овај тип дизајна утиче на повећање трошкова при повратку празних контејнера, па су због тога коришћени у оквиру једне фирме и сезонски.

Други тип је направљен тако да контејнери могу да се стављају један у други када су празни (слике 2.1), а трећи тип може да се склопи када је контејнер празан

(расклопиви) (слике 2.2). Ова два дизајна омогућавају смањење трошкова транспорта празних контејнера.



Слика 2.1. Уклопиви контејнери



Слика 2.2. Расклопиви контејнери

Контејнери које могу да се стављају једни у друге су прављени у различитим димензијама и облицима, стране су им под благим нагибом и уже ка дну, како би могле да се стављају једни у друге када су празни. Такође, постоје и контејнери који се стављају један у други са покретним, металним ручкама, где када су ручке у горњем положају контејнери могу да стоје један на другом, а када су у доњем положају могу да се стављају један у други (слика 2.1).

Расклопиви контејнери заузимају много мање места када су празни и спаковани (отприлике 1/5 простора несклопљених контејнера).

Без обзира на тип и величину контејнера који се користи, мора бити обезбеђено адекватно вентилирање (5% је оптимално јер омогућава адекватан проток ваздуха), а квалитет пластике мора да буде довољно добар да би контејнери издржали оптерећења. Унутрашњост контејнера треба да буде глатка како би се избегло оштећење било каквог упакованог свежег производа.

Контејнери су функционално састављени од следећих функционалних делова: дно са стопама контејнера, две кратке бочне стране, две дуге бочне стране и везе бочних страна између себе и са сном. Бочне стране су повезане са базом путем шарнирне везе. Страна има следеће елементе:

- основну површину стране
- везе са суседним странама
- веза са базом
- контакти са суседним странама и базом.

Спецификација параметара дизајна контејнера обухвата следеће:

- Примена
- Стандарди и директиве
- Температура амбијента
- КоМРтибилност
- Материјал
- Боја
- Тежина
- Димензије
- Перформансе
- Оптерећење
- Идентификација
- Лого, натписи
- отпорност на хемијске, температурне и УВ утицаје.

Димензије расклопивих контејнера које су предмет истраживања дате су у табели 2.1.

Табела 2.1. Спољашње димензије контејнера

	Краћа страна-А [мм]	Дужа страна-Б [мм]	X(A/2) [мм]
Контејнер РК1	200	300	100
Контејнер РК2	300	400	150
Контејнер РК3	400	600	200
Контејнер РК4	600	800	300
Контејнер РК5	800	1200	400
Контејнер РК6	500	1200	250

Техничке карактеристике контејнера:

- Димензије палета на које се смештају контејнери су: 800x1200 и 1000x1200 мм.
- Материјал: ПП-полипропилен (минимални модул елатичности 1000 МПа)
- Температура амбијента: -30 до +50 °Ц.
- Носивост базе контејнера: 15-25 кг
- Максимална деформација базе: 8-10 мм.
- Максимална бочна деформација дуже странице: 10 мм.
- Носивост страница монтираног контенера: $20 \times (15 \div 25) = 300 \div 500$ кг.
- Фактор сигурности: 3.
- Однос висине монтираног и склопљеног контејнера: 3 до 6.
- Дебљине материјала: минимална 1,5 , максимална 3 мм.
- Радијуси (минимални 0,5 мм, максимални 2,5 мм, посебни - на ивици базе 6 мм).
- Тежина 0,5 – 2 кг.
- Време експлоатације: 5 год до сервиса.
- Број отварања-затварања до 1000.

Конструктивне и функционалне карактеристике:

- Рукохвати на краћој страници.
- Начин слагања склопљених и расклопљених контејнера (уздужни и попречни).
- Прање и одржавање контејнера.
- BarCod.
- Лого, димензије и позиције.
- Натписи на страницама контејнера.
- Натписи на бази контејнера.
- КоМРартибилност са постојећим контејнерима.
- Боја.
- Отпорност на хемијске, температурне и УВ утицаје.
- Тестови валидације.

Захтеви које контејнер треба да испуни да би карактеризација била повољна:

- Минимални зазор између равних површина страница и базе монтираног контејнера.
- Повећана крутост ивица страница и базе, као и стубова.
- Пренос вертикалног оптерећења по ивицама контејнера (континуално), односно по целој контактної површини страница и базе а не по везама.
- Вертикални стубови треба да имају значајну крутост на извијање.
- Максимална крутост странице и базе.
- Елементи за манипулацију контејнера.

2.3 Материјал

Карактеристике неких материјала од којих се производе разматрани контејнери [1,2,3,4,5,6,7,8] дате су у наредним табелама и сликама.

Карактеристике материјала Atofina Polipropilen PPC 5752 дате су у табели 2.2.

Tabela 2.2. Материјал Atofina

	Метод	Вредност
Реолошке карактеристике		
Индекс брзине течења (MFI)	ISO 1133	5,5 g/10 min
Механичке карактеристике		
Граница течења	ISO 572-2	27 МПа
Елонгација на граници течења	ISO 572-2	6 %
Модул еластичности на истезања	ISO 572-2	1350 МПа
Модул еластичности на савијање	ISO 178	1250 МПа
Термичке карактеристике		
Тачка топљења	ISO 3146	165°C
50Н - 50°C по сату		68
10Н - 50°C по сату		138
Температура дефлекције	ISO 75-2	
1,80 МПа - 120°C по сату		53
0,45 МПа - 120°C по сату		95
Друге физичке карактеристике		
Густина	ISO 1183	0,905 g/cm ³

Овај материјал има високу отпорност на удар и одличне антистатичке особине. Овај полипропилен је развијен посебно за израду контејнера убризгавањем.

Карактеристике материјала Morlen EP331L дате су у табели 2.3.

Табела 2.3. Материјал Morlen EP331L

	Вредност	Метод тестирања
Физичке карактеристике		
Густина	0,902 g/cm ³	ASTM D792
Механичке карактеристике		
Граница течења при 50 мм/мин	25 МПа	ASTM D638
Модул еластичности на савијање	1150 МПа	ASTM D790A
Елонгација на граници развлачења	8,0 %	ASTM D638

Овај материјал има врло добру UV стабилност. Стандардна примена је за прављење кутија за батерије, контејнера и канти.

Карактеристике материјала Dow T710-25 ES Polipropilen смола дате су у табели 2.4.

Табела 2.4. Материјал Dow T710-25 EC

	Метод тестирања	Вредност
Физичке карактеристике		
Густина	ASTM D 792	0,897 g/cm ³
Механичке карактеристике		
Граница течења при 50 мм/мин	ISO R527	19,6 МПа
Модул еластичности на савијање	ISO 178	966 МПа
Жилавост	ASTM D3763	
23°C, 6,6 m/s, еластичан		30 J
-29°C, 6,6 m/s, еластичан		46 J
Температура дефлекције		
1,80 МПа - 120°C по сату	ISO 75	48°
0,45 МПа - 120°C по сату	ISO 75	77°

Овај материјал представља термопластични полипропилен који има побољшане функције при ливењу, гребању и оштећењу, као и одличне површинске естетске карактеристике потребне у аутомобилској индустрији.

Карактеристике материјала Inspire TF 7005 природна полипропилен смола дате су у табели 2.5.

Табела 2.5. Материјал Inspire TF 7005 Polipropilen смола

	Метод тестирања	SI
Физичке карактеристике		
Брзина топљења, 230°C/2,16 kg.g/10мин	ASTM D 1238	23
Густина	ASTM D 792	1,01 g/cm ³
Механичке карактеристике		
Тврдоћа, Роцквелл (D)	ISO 868	
Граница течења	ISO R527	21 MPa
Модули еластичности на савијање	ISO 178	1900 MPa
Жилавост	ISO 180/1A	
23°C		30
Запаљивост, mm/min	ISO 3795	40

Главне карактеристике овог материјала су висока способност течења и високи модули. Карактеристике материјала Inspire TF 7005 природна полипропилен смола дате су у табели 2.6.

Табела 2.6. Материјал Inspire TF 7005 Polipropilen смола

Физичке карактеристике	Метод тестирања	Вредности
Osobine smole		
Brzina topljenja 230°C/2,16 kg.g/10min	ASTM D 1238	2,1
Густина	ACTM Д 792	0,9 г/цм ³
Особине моделираних делова		
Граница течења	ACTM Д 638	34 MPa
Елонгација на граници течења	ACTM Д 638	5 %
Модули еластичности на савијање	ACTM Д 790A	1724 MPa

Карактеристике материјала Borealis дате су у табели 2.7.

Табела 2.7. Материјал Бореалис

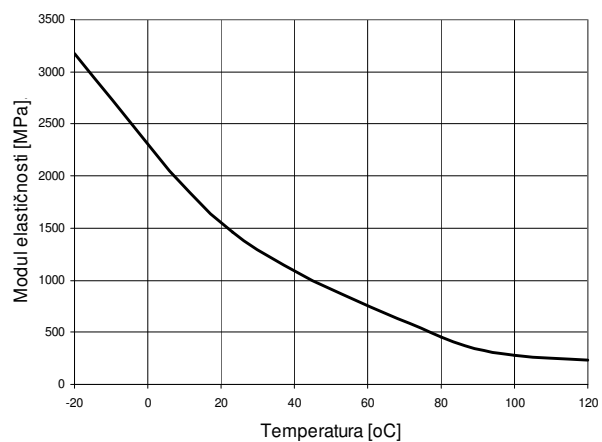
	Вредност	Метод тестирања
Густина	0,905 g/cm ³	ISO 1183
Брзина течења (230°C/2,16 kg)	20 g/10 min	ISO 1133
Граница течења (50 mm/min)	27 MPa	ISO 527-2
Елонгација на граници течења (50 mm/min)	5 %	ISO 527-2
Модули еластичности на истезања	1500 MPa	ISO 527-2

Основне карактеристике материјала које су неопходне за истраживање дате су у табели 2.8.

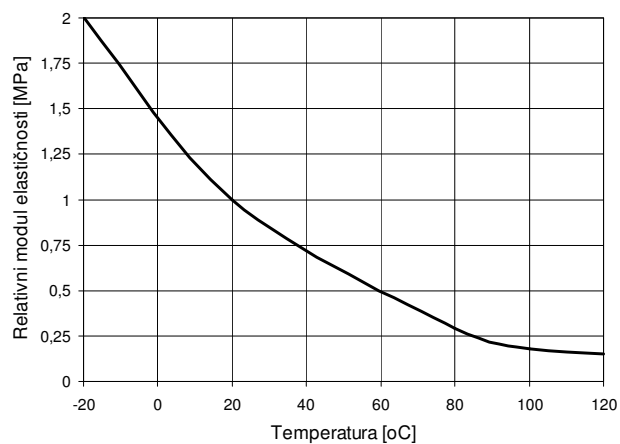
Табела 2.8. Основне карактеристике материјала

Карактеристика		PPC5752	EP331L	T710-25	TF7005	117	Borealis
Граница течења	MPa	27	25	19,6	21	34	27
Елонгација	%	6	8	-	-	5	5
Модул еластичности на истезања	MPa	1350	-	-	-	-	1500
Модул еластичности на савијања	MPa	1250	1150	966	1900	1724	-

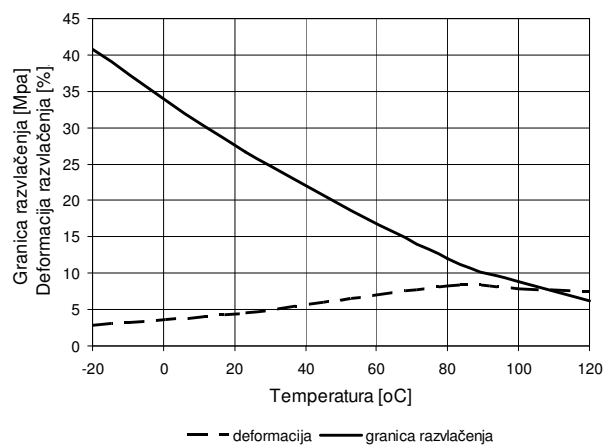
Утицај температуре на модул еластичности за материјал ЕП331Л дат је на слици 2.3. Утицај температуре сведен на реалтивни модул еластичности за материјал ЕП331Л дат је на слици 2.4. Утицај температуре на границу и деформацију течења за материјал ЕП331Л дат је на слици 2.5.



Слика 2.3. Утицај температуре на модул еластичности за материјал ЕП331Л



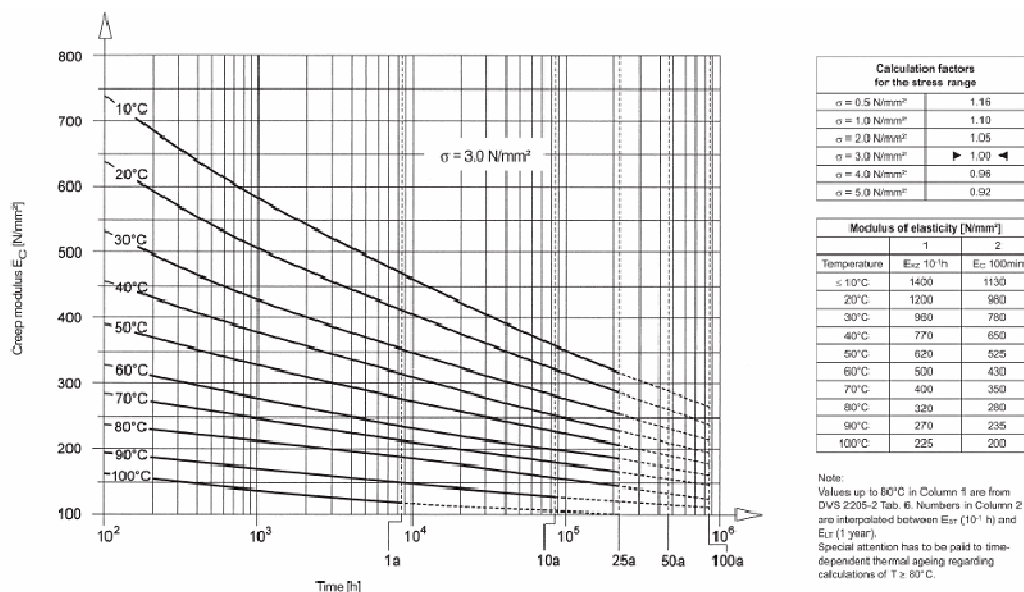
Слика 2.4. Утицај температуре на релативни модул еластичности за материјал ЕП331Л



Слика 2.5. Утицај температуре на границу и деформацију течења за материјал ЕП331Л

Утицај температуре на релативну границу течења материјала идентичан је као код модула еластичности.

Пример промене модула еластичности једног материјала при замору материјала и утицају темепературе дат је на слици 2.6.



Слика 2.6. Пример промене модула еластичности једног материјала при замору материјала и утицају темепературе

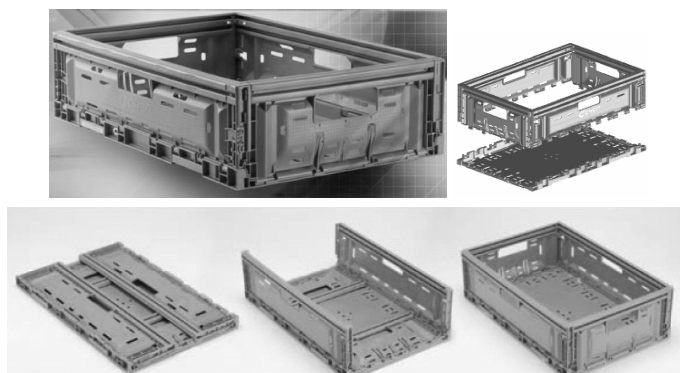
Карактер промене је исти и за границу течења материјала полипропилена.

2.4 Произвођачи и дистрибутери контејнера

Разматрани произвођачи и дистрибутери контејнера:

- Cher
- Tontarelli
- Arca
- Linpack
- KLT
- Prelog
- Патенти УСА
- Кинески произвођачи: EverWell, Da Sen, Zhong Yi.

На слици 2.7 дат је изглед типичног контејнера фирме Cher модел Tontarelli, док је у табели 2.9 дата спецификација свих модела контејнера.



Слика 2.7. Sher-Tontarelli контејнери [9]

Табела 2.9. Sher-Tontarelli контејнери – спецификација карактеристика [9]

	Назив	Спољашња дужина x ширина (мм)	Унутрашња висина (мм)	Висина склопљеног контејнера (мм)	Тежина амбалаже (кг)	Максимална тежина садржаја (кг)
Номиналне димензије	3415	300 x 400	150	33	0,92	12
	6410	600 x 400	103	33	1,2	8
	6410	600 x 400	156	33	1,51	12
	6418	600 x 400	180	33	1,59	15
	6422	600 x 400	222	33	1,85	20
Боја	Зелена					
Материјал	Термоотпорни полимер полипропилен					

Фирма СHER (USA) развила је нову генерацију расклопивих пластичних контејнера специјално је дизајнирана како би све активности укључене у ланац испоруке биле интегрисане, а да се при том смањују трошкови и утицај на околину. Комбиновањем карактеристика различитих контејнера у један, коМРанија СHER нуди уникатан дизајн обезбеђујући одличну ефикасност корисницима. По дизајну су модуларни, могу се склапати и слагати на различите начине, имају максималну носивост, добру заштиту производа и безбедан и ефикасан транспорт. Особине и карактеристике развијених контејнера су:

- Модуларни дизајн, могућност различитих начина позиционирања.
- Јака, робусана конструкција и могућност великог оптерећења.
- Склопив дизајн и мала висина склопљеног контејнера.

- Ергономски дизајн, једноставан за склапање.
- Израђени од материјала који могу да се рециклирају.
- Дизајнирани у складу са потребама контејнера за прекоморски транспорт.
- Безбедано закључавање.
- Омогућава постављање контејнера различитих величина на палете.
- Знатно смањени трошкови при повратку празних контејнера.
- Смањена могућност оштећења.
- Повећана стабилност.
- Редукован отпадни материјал.
- Повећана унутрашња запремина, побољшана густина паковања.

Следи приказ нових СНЕР контејнера модела К1 до К7 у табелама 2.10 до 2.16.

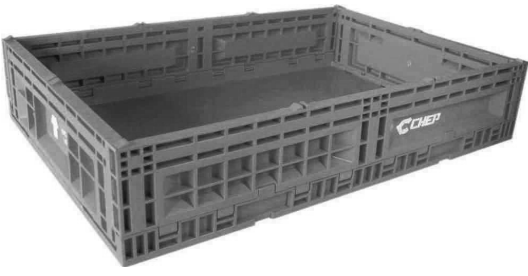
Табела 2.10. СНЕР контејнер модел К1 [10]

СНЕР контејнер модел К1 код 14400			
	Димензије у мм	Дужина	Ширина
Спољашња	297	198	116
Унутрашња	267	172	111
Склопљена	297	198	33
Максимални капацитет	5,1 L		
Максимална тежина оптерећења базе	18 kg		
Тежина контејнера	0,75 kg		
Број контејнера у реду на палети	20		
Број редова у висину на палети	8		
Температурни минимум / максимум	-20°C / 40°C		
Дозвољена температура у траснпортном прекоморском контејнеру	60°C		

Табела 2.11. СНЕР контејнер модел К2 [11]

СНЕР контејнер модел К2 код 14401			
Димензије у мм	Дужина	Ширина	Висина
Спољашња	396	297	116
Унутрашња	366	271	111
Склопљена	396	297	33
Максимални капацитет	11 L		
Максимална тежина оптерећења	18 kg		
Тежина контејнера	1,13 kg		
Број контејнера у реду на палети	10		
Број редова у висину на палети	8		
Температурни минимум / максимум	-20°C / 40°C		
Дозвољена температура у транспортном прекоморском контејнеру	60°C		

Табела 2.12. СНЕР контејнер модел К3 [12]

СНЕР контејнер модел К3 код 14402			
Димензије у мм	Дужина	Ширина	Висина
Спољашња	594	396	116
Унутрашња	564	370	111
Склопљена	594	396	33
Максимални капацитет	23,2 L		
Максимална тежина оптерећења базе	18 kg		
Тежина контејнера	1,79 kg		
Број контејнера у реду на палети	5		
Број редова у висину на палети	8		
Температурни минимум / максимум	-20°C / 40°C		

Дозвољена температура у транспортном прекоморском контејнеру	60°C
--	------

Табела 2.13. СНЕР контејнер модел К4 [13]

СНЕР контејнер модел К4 код 14403			
Димензије у мм	Дужина	Ширина	Висина
Спољашња	594	396	232
Унутрашња	564	370	227
Склопљена	594	396	46
Максимални капацитет	47,4 L		
Максимална тежина оптерећења базе	18 kg		
Тежина контејнера	2,64 kg		
Број контејнера у реду на палети	5		
Број редова у висину на палети	4		
Температурни минимум / максимум	-20°C/ 40°C		
Дозвољена температура у транспортном прекоморском контејнеру	60°C		

Табела 2.14. СНЕР контејнер модел К5 [14]

СНЕР контејнер модел К5 код 14405			
Димензије у мм	Дужина	Ширина	Висина
Спољашња	396	297	232
Унутрашња	366	271	227
Склопљена	396	297	61

Максимални капацитет	23,2 L
Максимална тежина оптерећења базе	18 kg
Тежина контејнера	1,65 kg
Број контејнера у реду на палети	10
Број редова у висину на палети	4
Температурни минимум / максимум	-20°C / 40°C
Дозвољена температура у траспортном прекоморском контејнеру	60°C

Табела 2.15. СНЕР контејнер модел К6 [15]

СНЕР контејнер модел К6 код 14406			
Димензије у мм	Дужина	Ширина	Висина
Спољашња	594	396	174
Унутрашња	564	370	169
Склопљена	594	396	33
Максимални капацитет	23,2 L		
Максимална тежина оптерећења базе	18 kg		
Тежина контејнера	2,02 kg		
Број контејнера у реду на палети	5		
Број редова у висину на палети	8		
Температурни минимум / максимум	-20°C / 40°C		
Дозвољена температура у траспортном прекоморском контејнеру	60°C		

Табела 2.16. СНЕР контејнер модел К7 [16]

СНЕР контејнер модел К7 код 14408			
Димензије у мм	Дужина	Ширина	Висина
Спољашња	594	396	348
Унутрашња	564	370	343

Склопљена	594	396	61
Максимални капацитет	23,2 L		
Максимална тежина оптерећења базе	18 kg		
Тежина контејнера	3,2 kg		
Број контејнера у реду на палети	5		
Број редова у висину на палети	8		
Температурни минимум / максимум	-20°C / 40°C		
Дозвољена температура у транспортном прекоморском контејнеру	60°C		

На слици 2.8 дат је контејнер фирме ZhongYi.

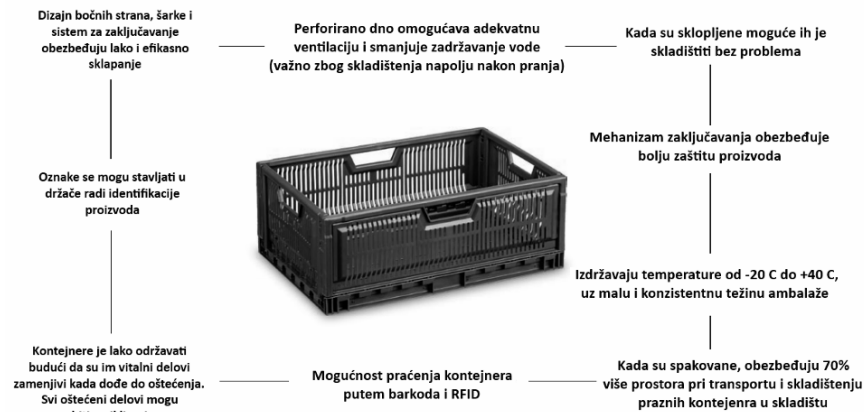


Слика 2.8. ZhongYi–Платични склопиви мрежасти контејнери за складиштење [7]

У табели 2.17 дати су контејнери произвођача Scholeller Arca – PreLog контејнера, док је на слици 2.9 дат опис овог контејнера.

Табела 2.17. Scholeller Arca – PreLog контејнери [18,19,20,21]

			
	PreLog 64165	PreLog 64190	PreLog 64235
Спољашње дим.(мм)	600 x 400 x 165	600 x 400 x 190	600 x 400 x 235
Унутрашње дим.(мм)	566 x 366 x 151	566 x 366 x 176	566 x 366 x 221
Запремина (Л)	30	36	47
Боја	Зелена	Зелена	Зелена
Брок контејнера на палети	100	100	100



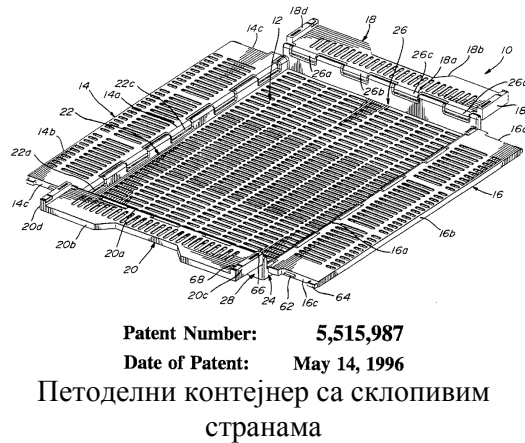
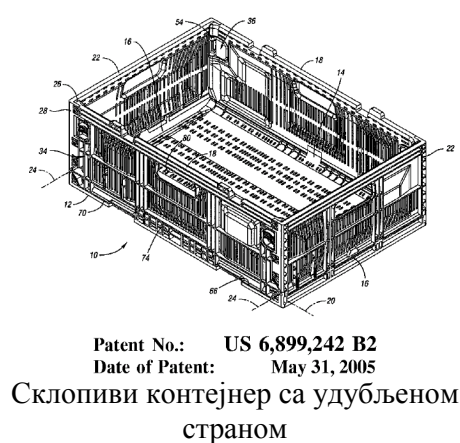
Слика 2.9. Опис Schoeller Arca – PreLog контејнера

У табели 2.18 дати коонтејнери фирме Linpac.

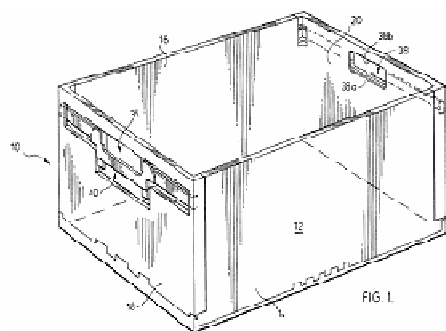
Табела 2.18. Linpac -KLT контејнери [22]

Sklopivi KLT	Baza	Unutrašnja visina	Spoljašnja visina	Kom. po paleti	Težina ambalaže	Visina sklopljivog kontejnera	Odnos nesklopljen-sклопљен контејнер	Max opterećenje na 1 kontejneru*	Max. opterećenje u 1 kontejneru	Unutrašnja zapremina **
	mm	mm	mm		Kg	mm		Kg	Kg	L.
1	296x197	82	90	44	tbd	25	3,60	330	15	17,7
2	395x296	116	124	32	tbd	28	4,43	320	20	25,0
3	594x394	163	171	24	tbd	30	5,70	300	25	35,1
4	594x394	186	194	20	tbd	30	6,47	250	25	40,0

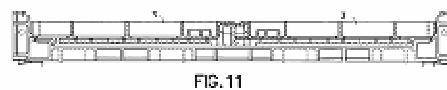
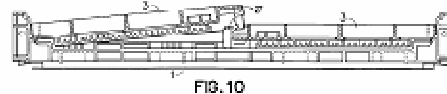
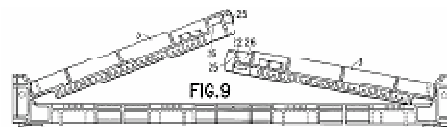
На слици 2.10 и 2.11 дат је приказ неколико USA патената за расклопиве контејнере.



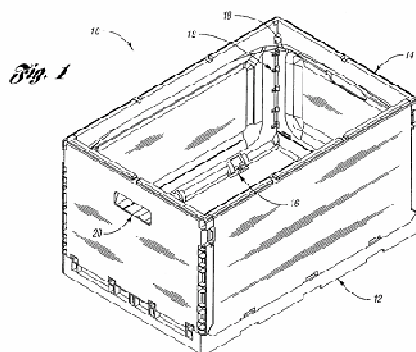
Слика 2.10. Патенти USA -1 [23]



Patent No.: US 6,290,081 B1
Date of Patent: Sep. 18, 2001
Склопиви контејнер



Patent Number: 5,975,324
Date of Patent: Nov. 2, 1999
Склопиви контејнер



Patent No.: US 6,460,717 B1
Date of Patent: Oct. 8, 2002

Контејнер склопив ка унутра

Слика 2.11. Патенти USA -2 [23]

2.5 Упоредна анализа карактеристика постојећих контејнера

У следећим табелама и сликама дате су упоредне карактеристике различитих произвођача контејнера [24,25,26].

Табела 2.19. Поређење контејнера 600x400

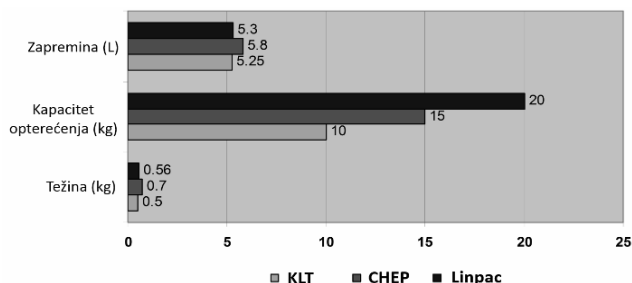
	KLT	СНЕР	ZhongYi	Linpac
Спољашње дим.(мм)	600x400x280	600x400x280	600x400x295	594x396x280
Унутрашње	545x355x270	540x365x270	540x365x270	544x364x242
Тежина (kg)	2,384	2,8	2,45	3
Носивост (kg)	30	40	40	20
Запремина (L)	52,23	53,2	53,2	48
UV заштита	Стандардна	Стандардна	Опциона	Стандардна
Материјал	PP & PE	PP & PE	HDPE	PP

Табела 2.20. Поређење контејнера 400х300

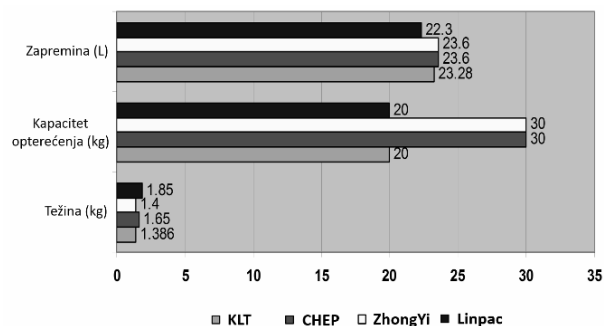
	KLT	CHEP	ZhongYi	Linpac
Спољашње дим.(мм)	400х300х280	400х300х280	400х300х295	396х297х280
Унутрашње дим.(мм)	345х250х270	350х255х270	350х225х270	346х265х242
Тежина (kg)	1,386	1,65	1,4	1,85
Носивост (kg)	20	30	30	20
Запремина (L)	23,28	23,6	23,6	22,3
UV заштита	Стандардна	Стандардна	Опциона	Стандардна
Материјал	PP & PE	PP & PE	HDPE	PP

Табела 2.21. Поређење контејнера 300х200

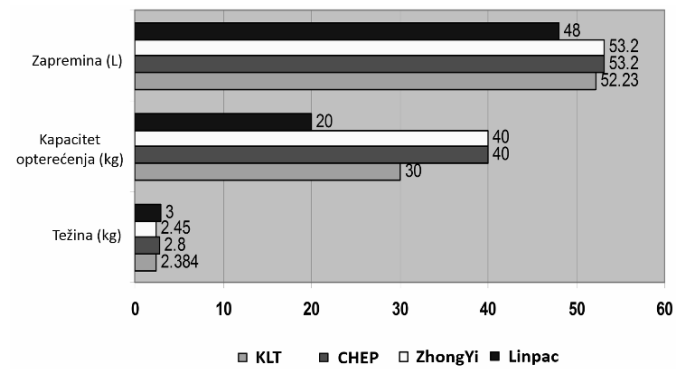
	KLT	CHEP	Linpac
Спољашње димензије (мм)	300х200х148	300х200х150	297х198х147,5
Унутрашње димензије	250х150х140	245х165х145	243х162х129,5
Тежина (kg)	0,5	0,7	0,56
Носивост (kg)	10	15	20
Запремина (L)	5,25	5,8	5,3
UV заштита	Standardna	Standardna	Standardna
Материјал	PP & PE	PP & PE	PP



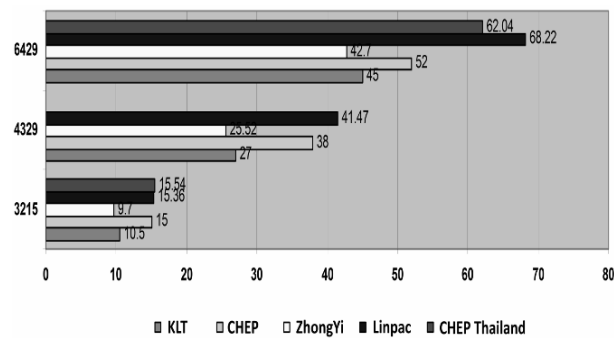
Слика 2.12. Поређење контејнера малог оптерећења димензија 300х200



Слика 2.13. Поређење контејнера малог оптерећења димензија 400х300



Слика 2.14. Поређење контејнера малог оптерећења димензија 600x400



Слика 2.15. Поређење цена контејнера малог оптерећења

3 Истраживање у предметној области

3.1 Истраживачко-развојни центри

Чињеница је да су експериментална истраживања у овој обећавајућој области технике јос увек малобројна и тешко доступна због разлога пословне тајне. Још увек нису разрађене и усавршене конструкције склопљивих контејнера и поред великих могућности и несумњивих предности, као што су:

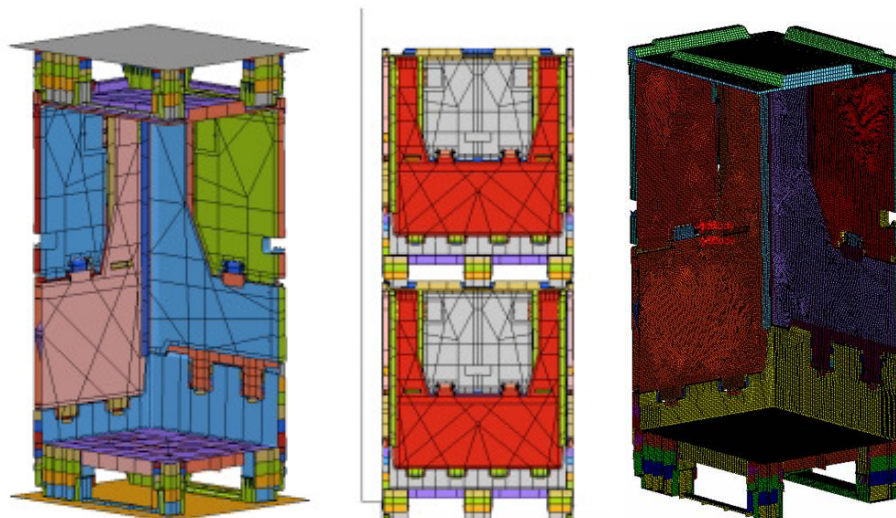
- нижи трошкови транспорта,
- уштеда у енергији,
- могућност кориштења већ постојеће инфраструктуре и средстава,
- боља заштита човекове околине.

Најважнији истраживачко-развојни центри у области расколпивих контерјнера су:

- Cher, Orlanod, USA,
- Altari Engineering, Engleska,
- Structura, Engleska,
- Tontarelli, Italia.

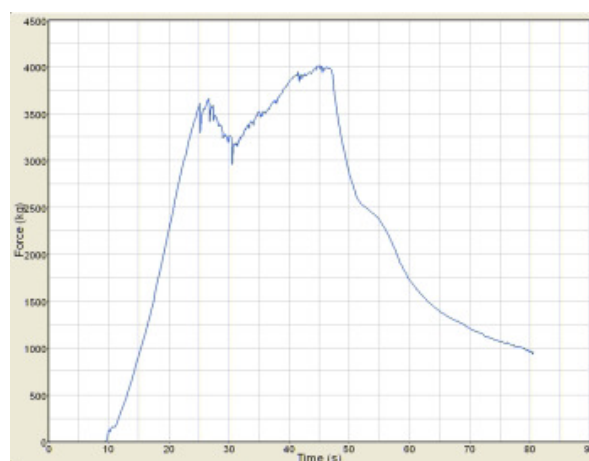
3.2 Изведени прорачуни

Први приказ истраживања обухвата линеаран о нелонеаран прорачун изведени на контејнеру Цхеп ДИБЦ 1210. Модели коначних елемената развијени су коришћењем Алтаир ХуперМесх [27]. Типични модел коначних елемената за јачину лома показан је на слици 3.1. Нелинеарна анализа спроведена је коришћењем LS-DYNA [28] у складу са стандардима за тестирање великих контејнера [29].



Слика 3.1. Нелинеарни модели МКЕ: лево – модел лома, средина – модел удара са препреком на 100мм, десно – модел са 195.000 чворова и 205.000 елемената

У случају оптерећења које доводи до лома контејнера без поклопца, крива сила-извијање дата је на слици 3.2.



Слика 3.2. Сила извијања за оптерећење које води до лома са поклопцем

Овим истраживањем је обухваћено понашање напрезања за материјале ВРС и Атафина. Показано је инерција садржаја и константни притисак оптерећења дефинишу најгори случај оптерећења у случају удара. При оптерећењу чији

интензитет доводи до лома, напрезања почињу да премашују 3% око 5 Те, ипак крајњи интензитет лома је значајно виши.

DIBC 1210 контејнер има добре перформансе у случају већине нелинеарних оптерећења. Потребан је редизајн основе (базе) због виљушкара. Изведене су различите студије којима је испитивано шта може бити урађено у циљу побољшања перформанси и закључено је да би могло да:

- повећати дебљину базе и ребара базе
- повећати густину ребара базе
- додати „држећа ребра“ на доњим зглобовима.

3.3 Изведени експерименти

Уведени фактор сигурности (вредност 3) представља однос интензитета компресије максималног могућег и радног оптерећења по одређеном контејнеру.

У наставку следи приказ изведених експеримената на контејнерима ЦХЕП Тонтарелли.

Оптерећење на притисак два отворена (расклопљена) контејнера и једног отвореног и затвореног контејнера (слика 3.3.) се изводи са троструко већом силом од максимално могучег радног оптерећења (носивост контејнера x број сложених отворених контејнера по висини). На пример интензитет компресије од 990 кг (3 x 330 кг) се добија за 22 контејнера сложена по висини са носивошћу од 15 кг. Контејнер мора да издржи ово оптерећење без видљивих оштећења.



Слика 3.3. Оптерећење на притисак отвореног контејнера

Оптерећење на притисак сложених склопљених контејнера се изазива на одређеном броју контејнера који формирају висину од 2100 мм. Одређује се издржљивост сложених контејнера до почетка пластичне деформације контејнера (слика 3.4). На пример интезитет компресије од 150 кг (3 x 50 кг) базиран је на претпоставки да ће склопљени контејнери бити сложени до 32:1 висине и да ће тежина по контејнеру бити 1,5 кг. Максимално оптерећење по дну сложеног контејнера је 50 кг (32x1,5 кг).



Слика 3.4. Оптерећење на притисак сложених контејнера

Испитивање деформације базе једног расклопљеног контејнера под максималним дефинисаним радним оптерећење треба да докаже да максимална деформација не прелази 10 мм. Изглед једног начина испитивања дат је на слици 3.5.



Слика 3.5. Испитивање деформације базе контејнера

Приказ испитивање деформација дуже стране под максималним дефинисаном носивошћу и под углом контејнера од 45° дат је на слици 3.6. Максимална деформација врха средине дуже стране треба да износи 10 мм.



Слика 3.6. Испитивање деформације дуже странице

3.4 Дефинисање параметара карактеризације чврстоће контејнера

Параметри карактеризације који се односе на материјал су:

- граница развлачења
- деформација развлачења
- модул еластичности на истезање и савијање (минимално 1000 МПа)
- утицај температуре (опсег -20 до +120 °Ц) на наведене карактеристике
- карактеристика материјала на пузање
- карактеристика материјала на замор.

Параметри карактеризације који се односе на геометрију страница (дужа, краћа) и базе контејнера, као и њихових веза су:

- утицај геометрије елемената контејнера на крутост и израду контејнера
- дебљине материјала (минимална – 1,5 , максимална – 3 мм)
- радијуси (миним. – 0,5 мм, максимални – 2,5 мм, посебни – на ивици базе 6 мм)

Параметри карактеризације који се односе на напрезање контејнера су:

- притисак на један и два мотнирана контејнера под троструко већом вредношћу оптерећења од максималног радног оптерећења
- притисак на склопљене контејнере
- максимална деформација базе при њеном савијању треба да износи 10 мм после 24х оптерећења

- максимална деформација савијања дуже странице при оптерећењу под нагибом контејнера од 45° треба да износи 10 мм после 24х оптерећења
- савијање са увијањем (ослонци на три краја базе, четврти крај слободан) под теретом унутар контејнера - спуштање слободног краја базе оптерећеног контејнера
- увијање контејнера око подужне дуже осе
- тест на пад контејнера
- замор контејнера оптерећеног промењивом притисном силом
- замор елемената контејнера
- сила отварања краће странице
- број циклуса монтаже-демонтаже (отварање-затварање краће стране).

Функционали елементи контејнера су:

- отвори на страницама и бази
- рукохвати
- вођење контејнера и манипулацијај
- одржавање
- барцоде
- RFD
- лого
- натписи.

Функционалност контејнера подразумева:

- период експлоатације
- боју
- отпорност на хемијске, температурне и УВ утицаје.

4 Развој методологије карактеризације чврстоће контејнера

Карактеризацију чврстоће контејнера потребно је обавити нумеричким и експерименталним приступом.

Карактеризацију чврстоће контејнера је у првом реду потребно извршити за сваки елемент контејнера посебно, па затим за цео контејнер.

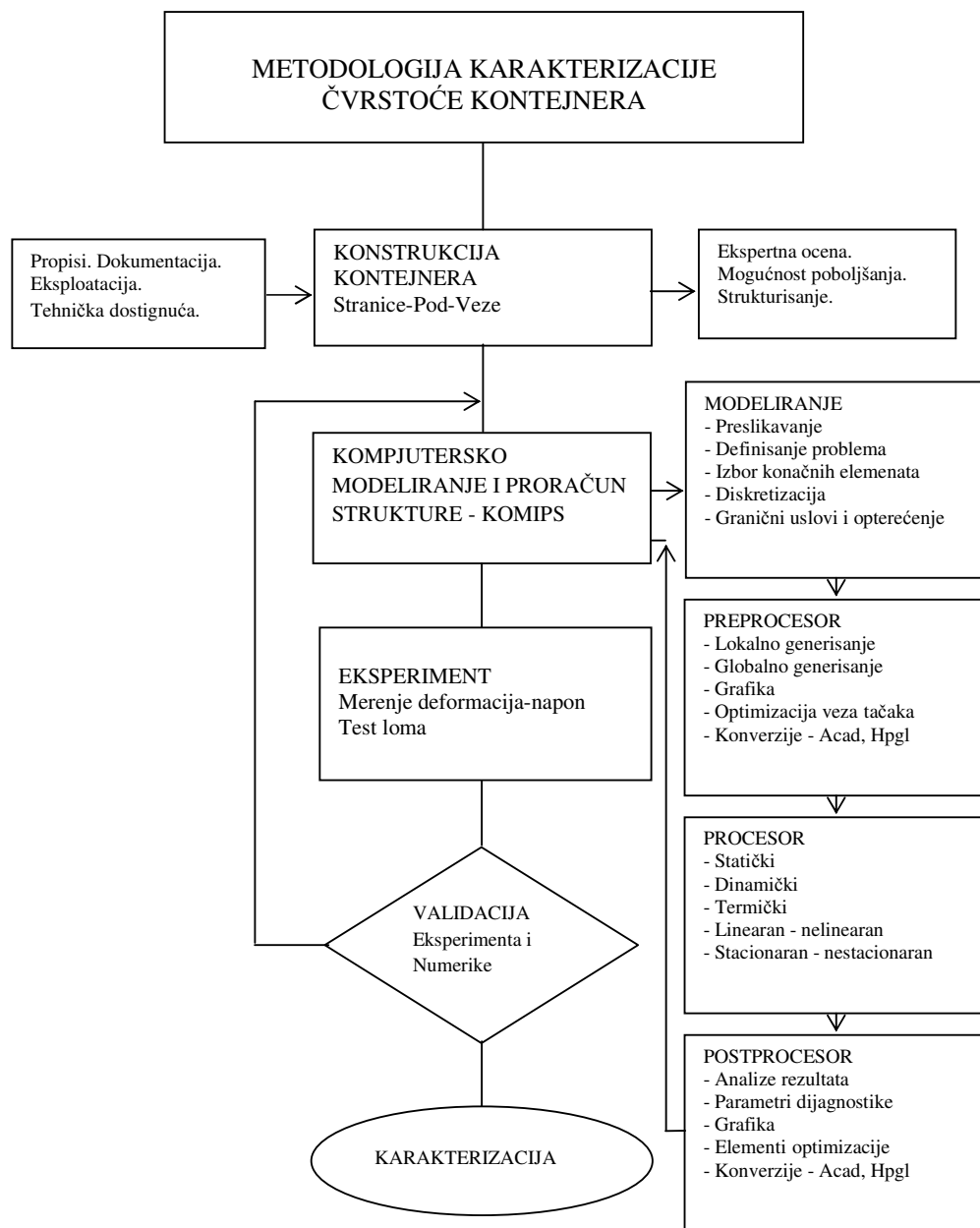
Контејнер представља функционални склоп који се састоји из следећег:

- странице (дуже и краће)
- база (под)
- везе страница и базе и страница међусобно.

Основни проблем карактеризације чврстоће контејнера представља разноликост димензија (посебно веза) израђених елемената контејнера које утиче њихову монтажу и пренос оптерећења са страница на базу. Свака веза не носи оптерећење на исти начин у оба смера истог правца и исте је потребно што више растеретити. Следећи проблем представља немогућност пуног преноса оптерећења са једне површине на површине два покретна елемента (реална грешка израде и монтаже).

На слици 4.1 приказана је развијена методологија карактеризације чврстоће контејнера. Она у основи представља примену нумеричко-експерименталног приступа одређивања карактеристика чврстоће контејнера.

Нумерички приступ представља примену методе коначних елемената кроз примену компјутерског моделарања и прорачун структура (KOMIPS) [44].



Слика 4.1. Развијена методологија карактеризације чврстоће контејнера

Експериментални приступ представља примену метода мерења деформација и чврстоће контејнера која су дефинисана стандардима, прописима и директивама, као и специфична мерења за ближе дефинисање карактеристика контејнера. Овај приступ је неопходан и незаобилазан због већ напред дефинисаног проблема геометрије контејнера.

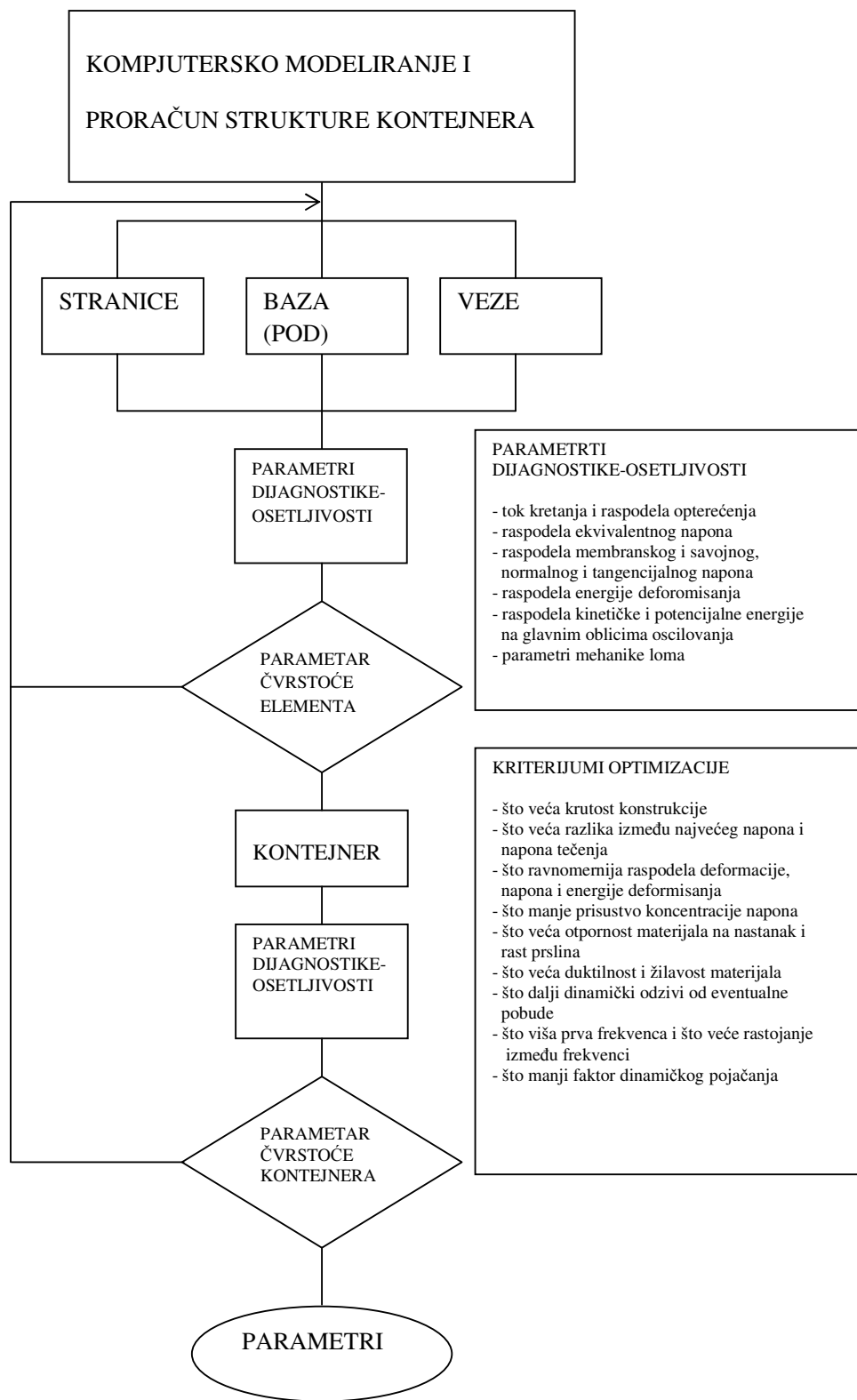
Веома битан елемент методологије представља валидација резултата прорачуна и експеримента. Циклус „учења“ прорачун-мерење-прорачун представља основ валидације. То значи да „прорачун учи експеримент“ и „експеримент учи прорачун“. Успешна валидација нам омогућава да у наставку одређену карактеристику чврстоће контејнера можемо ефикасно одредити применом само нумеричког или експерименталног приступа.

4.1 Компјутерско моделирање и прорачун

Компјутерско моделирање и прорачун за одређивање параметара контејнера приказано је на слици 4.2.

Прорачун структура применом компјутера представља комплексан поступак који захтева познавање “класичног” прорачуна уз примену прорачуна помоћу коначних елемената. Компјутерски прорачун омогућава квалитетно одређивање карактеристика конструкције.

Развијене методе и технике стандардне (универзалне) анализе и прорачуна структура, које су предмет разматрања, односе се на примену методе коначних елемената (МКЕ). Метод коначних елемената представља савремену нумеричку методу која дискретизацијом структуре на већи број коначних елемената (линијски, површински, запремински) правилног геометријског облика, чије се понашање релативно једноставно описује, омогућава моделирање и прорачун комплексних конструкција и проблема. Компјутерско моделирање и прорачун применом методе коначних елемената омогућава: моделирање и прорачун комплексних конструкција и проблема, одређивање стварне слике померања и напона, изналажење стварног понашања конструкције и њених елемената, поуздану прогнозу реаговања конструкције у експлоатацији, добијање елемената за одлучивање, одређивање узрока лошег понашања или попуштања конструкције, процену експлоатационог века и времена поузданог рада конструкције [44].

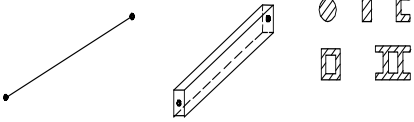
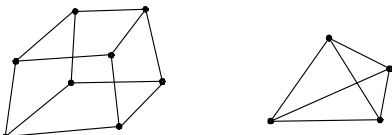
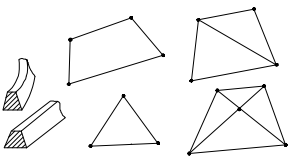


Слика 4.2. Примена КОМИПС-а за одређивање параметара контејнера

Оправдање за овакав приступ налази се у чињеници да напонско стање у конструкцији зависи од геометрије носеће структуре (распоред и димензије носећих елемената), оптерећења и начина осланања, а не зависи од врсте материјала (линеарна анализа). Свако евентуално незнатно смањење напона и његове концентрације, које се може постићи оваквим приступом, омогућава велико продужење експлоатационог века конструкције и велико повећање њене поузданости.

Моделирање представља комплексан процес пресликавања физичког модела у рачунарски применом идеализације. Физички модел са својом геометријом и граничним условима (ослонци и оптерећења) и претпостављена врста и распоред померања, деформације и напона по моделу чине полазну основу процеса моделирања. Моделирање остварујемо кроз избор типа, броја и величине коначних елемената за дискретизацију, степене слободе чворова и граничних услова, као и увођење идеализација и упрошћења. Степени слободе чвора коначног елемента дефинишу могућа (претпостављена) померања и деформације у координатном систему елемента (локални) и модела (глобални). Основни (најпростији) облици коначних елемената подељени по врстама проблема дати су у табели 4.1.

Табела 4.1. Основни коначни елементи

1Д Проблем 	3Д Проблем 
2Д Проблем 	

На основу односа димензија носећег елемента између његовог ослањања или везивања са другим елементима (a -ширина, $b(x)$ -висина, l -дужина) вршимо следећу класификацију:

- дугачка греда - штап $a \ll l$ (нпр. $a/l < 100$), $a \approx b(x)$ - подужно напрезање и увијање; моделирање линијским елементом,
- греда $a(b) < l$ (нпр. $(8 \div 10) < a/l < 100$) - сва напрезања, ако је $a < b$ треба укључити смицање при савијању попречном силом по пресеку; моделирање линијским елементом,
- кратка греда $a(b) \approx l$ (нпр. $a/l < (8 \div 10)$) - сва напрезања, пожељно је да се моделира плочама или запреминама
- веома танка плоча и љуска $a(b) \gg x$ (нпр. $a/x > 100$), може да се моделира и мембранским елементом (без савијања),
- танка плоча и љуска $a(b) > x$ (нпр. $(8 \div 10) < a/x < 100$), треба да се моделира елементом плоче са мембранским и савојним напрезањем и без утицаја смицања,
- дебела плоча $a(b) > x$ (нпр. $a/x < (8 \div 10)$), треба да се моделира елементом дебеле плоче (утицај смицања се мора узети) или запреминским елементом,
- тело треба моделирати запреминским елементима или редуковати на наведене носеће елементе.

То значи да сама конструкција и њено напрезање указују на примену потребног елемента за исправно моделирање. Такође, морамо познавати карактер промене унутрашњег оптерећења (напона) у носећем елементу, односно по којој димензији имамо промену оптерећења а по којој немамо или је можемо занемарити.

Редуковане крутости носача (нпр. потребних за динамички прорачун) добијамо изједначавањем понашања финог модела (најчешће плоче и/или запремине) и редукованог (грубог- најчешће греде).

Оребрење (укрућење, ојачање) је потребно моделирати коначним елементима плоче и запремине и ако оно најчешће представља гредни елемент. Овај проблем

проистиче из разлике средње равни плоче или неког другог основног елемента и елемента оребрења. Он се може решити на следећи начин:

- сегмент носећег елемента са оребрењем се моделира и прорачунава елементима плоче и/или запремине,
- само оребрење се моделира елементом греде,
- изједначавањем понашања првог и другог модела добијамо редуковану карактеристику греде која са њом обавља улогу.

Треба бити обазрив да ли је оребрење слободно ослоњено на крајевима или је уклештено.

Препроцесор представља фазу у којој корисник пуно времена проводи уз рачунар. За већину прорачуна обављених помоћу МКЕ карактеристичан је велики број улазних података везаних за дефинисање (генерисање) координата чворних тачака, коначних елемената, оптерећења, граничних услова и др.

Основна статичка једначина прорачуна у матричном облику и глобалном координатном систему гласи:

$$[K]\{\delta\} = \{F\}, \text{ где су} \quad (4.1)$$

$[K] = \sum_{e=1}^m [\overline{k}_{rs}]_e$ - глобална матрица крутости ; $\{\delta\} = \{\{\delta_1\}\{\delta_2\}...\{\delta_s\}...\{\delta_n\}\}^T$ - глобални вектор померања ; $\{\delta_s\}, \{F_s\}$ - вектор померања и оптерећења чвора s ; $\{F\} = \{\{F_1\}^T \{F_2\}^T ... \{F_s\}^T ... \{F_n\}^T\}^T$ - глобални вектор оптерећења ; чвор $r, s=1,2,3 \dots n$; $e=1,2,3 \dots m$; n, m - укупан број тачака и коначних елемената модела ; e - коначни елемент ; $[\overline{k}_{rs}]_e = [T]^T [k_{rs}]_e [T]$ - матрица крутости КЕ-а у глобалном систему ; $[T]$ - матрица трансформација локалног у глобални систем ; $[k_{rs}]_e = \int_V [B]^T [D] [B] dV$ - матрица крутости КЕ-а у локалном систему ; $[D]$ - матрица еластичности материјала - проблема ; $[B] = [L][N]$ - матрица веза деформације и померања ; $[L], [N]$ - матрица диференцијалних оператора проблема и функције

облика коначног елемента; $\{\sigma\} = [D](\{\epsilon\}_e - \{\epsilon_0\}_e)$ - вектор напона коначног елемента; $\{\epsilon\}_e = [B]\{\delta\}_e$ - вектор деформације елемента.

Основна динамичка једначина прорачуна принудних пригушених осцилација у матричном облику и глобалном систему гласи:

$$[M]\{\ddot{\delta}(t)\} + [B]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{F(t, \omega)\}, \text{ где су} \quad (4.2)$$

$[M], [B], [K]$ - глобална матрица маса, пригушења и крутости; $\{\ddot{\delta}(t)\}, \{\dot{\delta}(t)\}, \{\delta(t)\}$ - глобални вектор убрзања, брзине и померања у функцији времена; $\{F(t, \omega)\}$ - принудни вектор сила у временском или фреквентном домену.

Статички прорачун структуре и подструктура обухвата одређивање: поља померања и максималног померања, крутости, поља напона и максимални напон, расподела енергија деформација и расподела напона плоча и греда. Динамички прорачун обухвата одређивање: слободне осцилације, принудне осцилације и расподела кинетичке и потенцијалне енергије.

Најпростија функција постпроцесора представља помоћ при обради резултата прорачуна. Ручна обрада се своди на најмању могућу меру применом кондезоване штампе, анализе једног и више модела за једно и више оптерећења. Присуство специфичних прорачуна омогућава ближе упознавање понашања конструкције. Елементи оптимизације (расподела мембранских и савојних напона, енергија деформације и кинетичких и потенцијалних енергија по структури) омогућавају веома ефикасну идентификацију понашања конструкције. Графичка презентација резултата прорачуна, такође даје ближу слику понашања конструкције. Присутно је цртање деформисане структуре (статика, динамика и термика) и изопотенцијалне линије (померања, температуре, напони и др.). Све наведене функције постпроцесора дефинишу потребне модификације на конструкцији које треба да доведу до бољег понашања конструкције у експлоатацији.

Расподела свих елемената оптимизације се изражава у процентима и по изабраној групи коначних елемената. Прва расподела се односи на мембранске и савојне

напоне и нормалне и смицуће напоне. Енергија деформације коначног елемента e_d гласи:

$$e_d = \{\delta_{sr}\}_e^T [k_{rs}]_e \{\delta_{sr}\}_e, \quad (4.3)$$

где је $\{\delta_{sr}\}_e$ - припадајући глобални вектор померања елемента.

Кинетичка e_k^r и потенцијална e_p^r енергија коначног елемента и целе структуре E^p на p -том главном облику гласи:

$$e_k^r = \omega_r^2 \{\mu_{sr}\}_e^T [m]_e \{\mu_{sr}\}_e, \quad e_p^r = \{\mu_{sr}\}_e^T [k_{rs}]_e \{\mu_{sr}\}_e, \\ E^r = E_k^r = E_p^r = \omega_r^2 \{\mu_r\}^T [M] \{\mu_r\} = \{\mu_r\}^T [K] \{\mu_r\}, \quad \text{где су} \quad (4.4)$$

ω_r - r -та сопствена фреквенца, $\{\mu_r\}$ r -ти сопствени вектор и $\{\mu_{sr}\}_e$ - припадајући r -ти сопствени вектор елемента.

Промена квадрата сопствене r -те фреквенце (реанализа-без поновног прорачуна) гласи:

$$\frac{\Delta \omega_r^2}{\omega_r^2} = \frac{\alpha_e \cdot e_p^r - \beta_e \cdot e_k^r}{E^r}, \quad (4.5)$$

где су α_e, β_e величине које дефинишу модификацију e -тог коначног елемента.

4.2 Експерименталне методе

Основна експериментална анализа контејнера односи се на одређивање његове деформације и носивости, односно његове крутости. При томе је потребно осмислити експеримент, увести оптерећење и ослањање, измерити оптерећење, измерити деформације.

Примењени начини увођења оптерећења су механички, хидраулички и пнеуматски.

Примењени начин мерења оптерећења је путем динамометара. Они су били механички и електрични (отпорничке мерне траке), стандардни и специјално развијени.

Мерење деформације је извођено механичким, електричним и оптичким методама.

Потребна мерења за дефинисање карактеризације контејнера биће изабрана из детаљних програма испитивања контејнера која су дефинисана у стандардима земаља која користе контејнере.

5 Теоријске основе прорачуна и дефинисање напрезања контејнера

5.1 Теоријске основе прорачуна

У методи коначних елемената основа структуре је коначни елемент. Ови елементи су између себе повезани специфицираним тачкама који се називају „чворови” или „чворне тачке”. Поље променљивих унутар структуре је непознато. Поље променљивих унутар коначног елемента се описује апроксимативним простим функцијама. Чланови апроксимативне (интерполационе) функције дефинисани су на основу вредности променљивих у чворовима елемента. Поље померања чворова добија се из матричне једначине равнотеже. На основу поља померања одређује се деформација и напон коначних елемената, као и деформације и напони у тачки структуре.

Метода коначних елемената описана процедуром корак-по-корак у статичкој анализи је преузета из литературе [31]. Следи њен кратак опис. Поред ове основне литературе овде се, поред веома обимне литературе, наводе још коришћене две прве базне литературе [32,33].

У првом кораку се врши моделирање, идеализација и дискретизација структуре. Најважније функције моделирања проблема представља избор типа, броја, величине и расподела елемената.

Други корак чини избор правог интерполационог модела за поље померања. Модели треба да обезбеде претпостављени модел померања, деформације и напона коначног елемента и углавном се дају у облику полинома.

У трећем кораку се формира матрица крутости и вектора оптерећења коначних елемената. Све величине коначног елемента се израчунавају у координатном систему елемента и глобалном координатном систему структуре.

Четврти корак се састоји од састављања укупне (глобалне) матрице крутости, вектора оптерећења и граничних услова структуре. Матрица крутости, вектор оптерећења коначног елемента, као и гранични (контурни) услови додају се на местима дефинисаним глобалним редним бројем чворова елемента.

У петом кораку се налазе непозната померања чворова система линеарних алгебарских једначина из једначина статичке равнотеже.

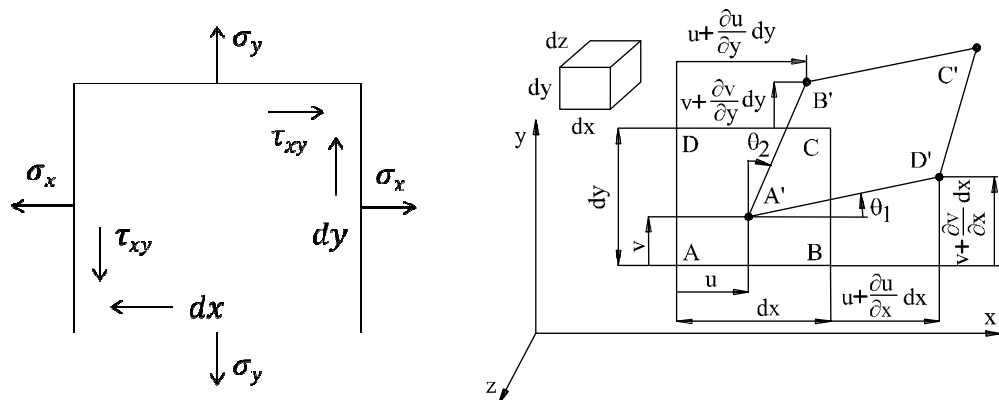
У наредном шестом кораку се израчунавају деформације и напони коначних елемената. Седми корак чини израчунавање напона тачака структуре. Основу анализе представља одређивање поља померања, деформација и напона оптерећеног и ослобођеног тела.

Непознате величине померања f , деформације E и напона σ било које тачке тела у случају равнот стања напона (2Д проблема) дате су у табели 5.1.

Табела 5.1. 2Д проблем

Померање	Деформација	Напон
$\{f\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{Bmatrix}$	$\{\epsilon\} = \{\epsilon_x \quad \epsilon_y \quad \gamma_{xy}\}^T$ $\gamma_{xy} = \gamma_{yx}$	$\{\sigma\} = \{\sigma_x \quad \sigma_y \quad \tau_{xy}\}^T$ $\tau_{xy} = \tau_{yx}$

Деформације које настају у телу могу се изразити преко померања u , v и w . Уводи се претпоставка да су деформације мале и да линеарно зависе од померања. Вектор напона и дефиниција деформације малог елемента за 2Д проблеме дати су на слици 5.1.



Слика 5.1. Вектори напона и деформација малог елемента 2Д проблема

Једначина деформација-померање у матричном облику гласи: $\{\epsilon\} = [L]\{f\}$, (5.1)
 где је $[L]$ - матрица диференцијалних оператора.

Матрица диференцијалних оператора и вектор деформације 2Д проблема дати су у табели 5.2.

Табела 5.2. Матрица диференцијалних оператора и вектор деформације 2Д проблема

$[L] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}$	$\{\epsilon\} = [L]\{f\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix}$
---	---

За линеарно еластично изотропно тело релација деформација-напон (Хоок-ов закон) у матричном облику гласи:

$$\{\epsilon\} = [C]\{\sigma\} + \{\epsilon_0\}, \quad (5.2)$$

где је:

$[C]$ - матрица еластичних коефицијената материјала и

$\{\epsilon_0\}$ - вектор иницијалне деформације (нпр. термичка деформација).

Напон изражен преко деформације, а на основу претходне једначине гласи:

$$\{\sigma\} = [C]^{-1} (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) = [D] \{\varepsilon\} - \{\sigma_0\}, \text{ где је} \quad (5.3)$$

$[D]$ - матрица еластичности материјала, $\{\sigma_0\}$ - иницијални вектор напона.

Поассон-ов коефицијент ν описује везу подужне и попречне дилатације. За 1Д подужни проблем матрица еластичности представља модул еластичности материјала (E), док је за 1Д проблем увијања модул клизања материјала (G). Модул клизања материјала G изражен преко модула еластичности и Поиссон-овог коефицијента гласи: $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$.

Релација напон-деформација за линеарно еластично тело и 2Д проблем равнот стања напона дати су у табели 5.3 и 5.4.

Табела 5.3. 2Д проблем – равно стање напона

$\sigma_z = \tau_{zx} = \tau_{zy} = 0, \quad \varepsilon \neq 0$ $u \neq 0, \quad \nu \neq, \quad \text{a) } w = 0, \quad \text{b) } w \neq 0$ $\varepsilon_z = \frac{\nu}{E(\sigma_x + \sigma_y)} + \alpha \Delta T = -\nu \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{1-\nu} + (1+\nu) \frac{\alpha \Delta T}{1-\nu}$
$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z\}^T = \{[C]\{\sigma\} + \{\varepsilon_0\}_t\}^T$ $[C] = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix}$ $\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z\}^T = \{[D]\{\varepsilon\} - \{\sigma_0\}_t\}^T$ $[D] = \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix}$ $D_{11} = D_{22} = 1, \quad D_{12} = D_{21} = \nu, \quad D_{33} = \frac{1-\nu}{2}$
$\{\varepsilon_0\}_t = \alpha \Delta T \{110\}^T$ $\{\sigma_0\}_t = \frac{E \alpha \Delta T}{1-\nu} \{110\}^T$

Матрица еластичности материјала линеарно еластичног анизотропно-ортотропног материјала 2Д проблема дата је у табели 5.4.

Табела 5.4. 2Д случај (равно стање напона) линеарно еластичног анизотропно-ортотропног материјала

$$[D] = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{21} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix}, D_{11} = \frac{E}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, D_{66} = 2G_{12}$$

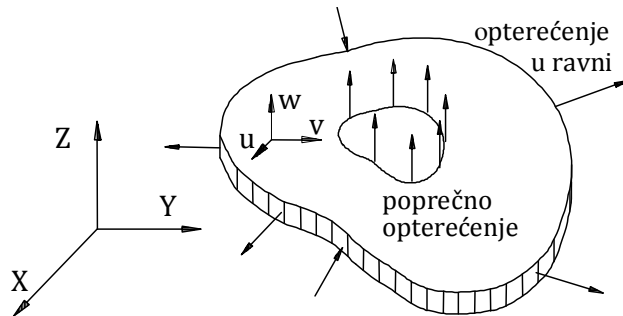
$$D_{12} = D_{21} = \frac{\nu_{21}E}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{12}E}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, D_{22} = \frac{E}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

Израчунавање еквивалентног напона изводи се применом хипотеза о сломену конструкције. Најчешће коришћена је хипотеза највећег специфичног деформацијског рада промене облика (Мизес-Хубер-Хенку). Израчунавање еквивалентног напона овом хипотезом за 2Д проблем гласи

$$\sigma_{ek} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}. \quad (5.5)$$

Коначни елемент танке плоче са равним стањем напона који ће бити примењен у овом раду има следеће врсте напрезања елемента плоче са равним стањем напона (слика 5.2):

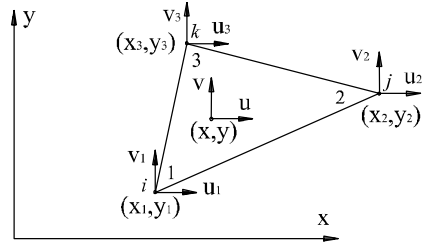
- напрезање у равни плоче - мембранско напрезање
- напрезање управно на раван плоче - савијање плоче.



Слика 5.2. Напрезања плоче

У линеарној теорији танке плоче, напрезање у равни плоче није у спрези са напрезањем управно на раван плоче.

Троугаони мембрански елемент приказан је на слици 5.3 у локалном координатном систему са назначеним степенима слободe.



Слика 5.3. Троугаони мембрански елемент

Степени слободe померања тачке унутар елемента претпостављени су линеарном функцијом координата тачке:

$$\{f\} = \{u(x, y) : v(x, y)\}^T = \{a_1 + a_2x + a_3y : a_4 + a_5x + a_6y\}^T. \quad (5.6)$$

Вектори деформације, напона, померања и сила и координате тачке елемента и матрице диференцијалних оператора, веза и еластичности материјала овог проблема су:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \end{Bmatrix} = [L]\{f\} = [L] [N]\{\delta\}_e = [B]\{\delta\}_e, \quad (5.7)$$

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [D]\{\varepsilon\} = [D] [B]\{\delta\}_e, \quad [L] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix},$$

$$\{\delta\}_e = \{u_1 \quad v_1 \quad u_2 \quad v_2 \quad u_3 \quad v_3\}_e^T, \quad \{F\}_e = \{F_{x1} \quad F_{y1} \quad F_{x2} \quad F_{y2} \quad F_{x3} \quad F_{y3}\}_e^T,$$

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 \end{bmatrix}, N_i = \frac{1}{2A}(a_i + b_i x + c_i y),$$

$$[B] = \begin{bmatrix} [B_1] & [B_2] & [B_3] \end{bmatrix}, [B_i] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} b_i & 0 \\ 0 & c_i \\ c_i & b_i \end{bmatrix}, A = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix},$$

$$a_i = x_j y_k - x_k y_j, \quad b_i = y_j - y_k, \quad c_i = x_k - x_j$$

za $i=1,2,3, j=2,3,1, k=3,1,2$, respektivno,

$$\text{ortotropan materijal } [D] = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 \\ d_{21} & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix}$$

ravno stanje napona:

$$d_{11} = d_{22} = \frac{E}{1-\nu^2}, \quad d_{12} = d_{21} = \nu d_{11}, \quad d_{33} = \frac{E}{2(1+\nu)} = G$$

Матрица крутости троугла константне дебљине „ t ” гласи:

$$[k]_e = \int_V [B]^T [D] [B] dV = t \int_A [B]^T [D] [B] dA = tA [B]^T [D] [B]. \quad (5.8)$$

Декомпонована матрица крутости гласи:

$$[k]_e = \begin{bmatrix} [k_{11}]_e & [k_{12}]_e & [k_{13}]_e \\ [k_{21}]_e & [k_{22}]_e & [k_{23}]_e \\ [k_{31}]_e & [k_{32}]_e & [k_{33}]_e \end{bmatrix}, \quad [k_{ij}]_e = [k_{ji}]_e^T \text{ za } i \neq j, \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (5.9)$$

Декомпоновани блок матрице крутости се на основу правила матричног рачуна гласи:

$$\begin{aligned} [k_{ij}]_e &= tA [B_i]^T [D] [B_j] = \\ &= \frac{t}{4A} \begin{bmatrix} b_i d_{11} b_j + c_i d_{33} c_j & b_i d_{12} c_j + c_i d_{33} b_j \\ c_i d_{21} b_j + b_i d_{33} c_j & c_i d_{22} c_j + b_i d_{33} b_j \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5.10)$$

Вектор спољашњег оптерећења елемента услед иницијалне деформације, запреминског и површинског оптерећења гласи:

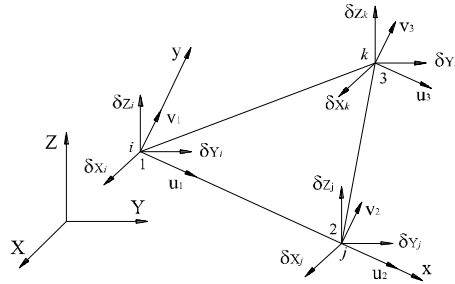
$$\{F\}_e = \{F\}_e^i + \{F\}_e^V + \{F\}_e^A = \int_V [B]^T [D] \{\varepsilon\}_0 dV + \int_V [N]^T \{F\} dV + \int_A [N]^T \{\sigma\} dA. \quad (5.11)$$

Вектор концентрисаних маса елемента гласи:

$$\{m\}_e = \frac{m}{3} \{1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1\}^T, \quad (5.12)$$

где је $m = \rho A t$ - маса елемента.

При коришћењу 2Д елемента за 3Д структуру неопходно је дефинисати локални и глобални координатни систем и међусобну трансформацију. Код оваквог елемента локална x оса се обично поставља дуж странице елемента обележеног са тачкама 1-2, док је y оса постављена у равни елемента и нормална на x осу и z оса нормална на x и y . Локални и глобални координатни систем мембранског елемента смештеног у простору дат је на слици 5.4.



Слика 5.4. Локалне и глобалне координате

Матрица трансформације реда $[6 \times 9]$ има следећи облик:

$$[T] = \begin{bmatrix} l_{ij} & m_{ij} & n_{ij} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ l_{pk} & m_{pk} & n_{pk} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l_{ij} & m_{ij} & n_{ij} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l_{pk} & m_{pk} & n_{pk} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_{ij} & m_{ij} & n_{ij} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_{pk} & m_{pk} & n_{pk} \end{bmatrix}, \text{ где је} \quad (5.13)$$

$$l_{ij} = \frac{X_j - X_i}{L_{ij}}, \quad m_{ij} = \frac{Y_j - Y_i}{L_{ij}}, \quad n_{ij} = \frac{Z_j - Z_i}{L_{ij}},$$

$$L_{ij} = [(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2]^{1/2},$$

$$L_{pk} = [(X_k - X_p)^2 + (Y_k - Y_p)^2 + (Z_k - Z_p)^2]^{1/2}.$$

$$l_{pk} = \frac{X_k - X_p}{L_{pk}}, \quad m_{pk} = \frac{Y_k - Y_p}{L_{pk}}, \quad n_{pk} = \frac{Z_k - Z_p}{L_{pk}},$$

Крутости и оптерећење елемента у глобалном систему су:

$$[\bar{k}]_e = [T]^T [k]_e [T], \quad \{\bar{F}\}_e = [T]^T \{F\}_e. \quad (5.14)$$

Вектор концентрисаних маса се не трансформише већ се по свим глобалним степенима слободе трансляције поставља вредност $m/3$.

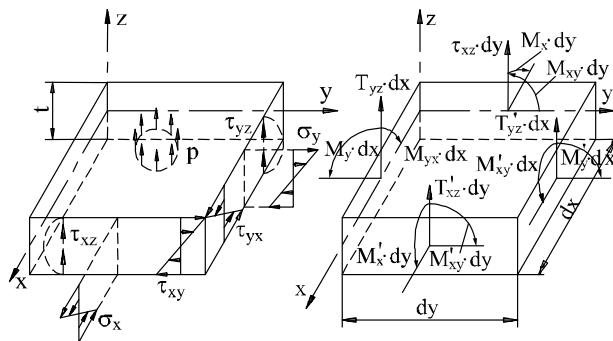
Следи приказ савијања танке плоче. Подела плоче преко односа краће стране и дебљине гласи:

1. $b/t < 5(8)$ - веома дебела плоча
2. $b/t = 5(8) \div 8(10)$ - дебела плоча
3. $b/t = 8(10) \div 100$ - танка плоча
4. $b/t > 100$ - веома танка плоча (љуска).

Претпоставке класичне теорије танке плоче и љуске су:

- деформације су мале,
- средња раван плоче остаје недеформисана у равни.

За диференцијално мали елемент оптерећен на савијање, индуковани напони, попречна сила и моменти савијања приказани су на слици 5.5.



Слика 5.5. Напони, силе и моменти у плочи

Прираштаји сила и момената гласе:

$$\begin{aligned}
M'_x &= M_x + \frac{\partial M_x}{\partial x} dx, \quad M'_y = M_y + \frac{\partial M_y}{\partial y} dy, \\
M'_{xy} &= M_{xy} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} dx, \quad M'_{yx} = M_{yx} + \frac{\partial M_{yx}}{\partial y} dy, \\
T'_{xz} &= T_{xz} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial x} dx, \quad T'_{yz} = T_{yz} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial y} dy.
\end{aligned} \tag{5.17}$$

Силе и моменти у пресеку дефинисани преко напона по јединици дужине пресека су: (5.18)

$$M_x = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma_x z dz, \quad M_y = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma_y z dz, \quad M_{xy} = M_{yx} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \tau_{xy} z dz, \quad T_{xz} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \tau_{xz} dz, \quad T_{yz} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \tau_{yz} dz.$$

Услови равнотеже диференцијално малог елемента гласе:

$$(T'_{xz} - T_{xz}) dy + (T'_{yz} - T_{yz}) dx + p dx dy = 0, \tag{5.19}$$

односно

$$\begin{aligned}
\frac{\partial T_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial y} + p &= 0, \quad (M'_x - M_x) dy + (M'_{yx} - M_{yx}) dx - T_{xz} dx dy = 0, \quad \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{yx}}{\partial y} - T_{xz} = 0, \\
(M'_y - M_y) dx + (M'_{xy} - M_{xy}) dy - T_{yz} dx dy &= 0,
\end{aligned}$$

Претпоставке теорије танке плоче дефинишу деформације $\varepsilon_z = 0$, $\gamma_{xz} = 0$ и $\gamma_{yz} = 0$

и померања $w = w(x, y)$, $u = -z \cdot \theta_y = -z \cdot \frac{\partial w}{\partial x}$ и $v = -z \cdot \theta_x = -z \cdot \frac{\partial w}{\partial y}$. Непознате

деформације гласе:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \tag{5.20}$$

Релација напон-деформација за равно стање напона гласи:

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1-\nu)^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}. \tag{5.21}$$

Заменом једначина деформације у релације напон-деформација, а затим тих релација у једначине момента у пресеку добија се:

$$\begin{aligned} M_x &= -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \quad M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right), \\ M_{xy} &= M_{yx} = -(1-\nu)D \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = -\frac{Gt^3}{6} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}, \end{aligned} \quad (5.22)$$

где је D крутост плоче на савијање одређена са: $D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$.

Крутост плоче на савијање аналогна је крутости греде на савијање (EI), односно ако је $\nu=0$, тада је:

$$D = EI = E \frac{bt^3}{12},$$

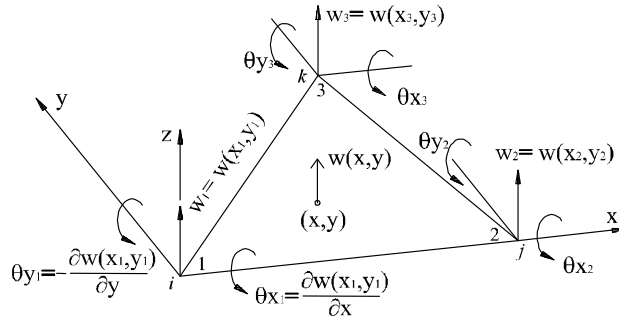
односно за $b=1$ је $D = E \frac{t^3}{12}$.

Попречне силе у пресеку могу се сада изразити као:

$$T_{xz} = -D \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \quad T_{yz} = -D \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right). \quad (5.23)$$

Велики број различитих коначних елемената савијања плоче је развијен и примењен у комерцијално доступним програмима. Основна разлика међу њима представља усвајање интерполационог модела померања $w(x, y)$, јер он највише утиче на тачност рада. Нема универзалног модела интерполације који покрива широк спектар примене, већ је за сваку групу проблема потребно пронаћи најповољнији модел.

Најпростији елементи су троугао и четвороугао. Троугаони елемент се врло често користи код проблема савијања плоча. Најједноставнији елемент је троугао са 9 степени слободе, по 3 у свакој тачки (попречно померање и ротације око оса које леже у равни плоче – w , θ_x и θ_y) (слика 5.6).



Слика 5.6. Степени слободe троугаоне плоче при савијању

Померања тачке елемента изражава се у следећем облику:

$$\{f(x, y)\} = \begin{Bmatrix} w(x, y) \\ \theta_x(x, y) \\ \theta_y(x, y) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} w(x, y) \\ \frac{\partial w(x, y)}{\partial y} \\ -\frac{\partial w(x, y)}{\partial x} \end{Bmatrix} = [n] \cdot \{a\}, \quad \text{где је:} \quad (5.24)$$

$$[n] = \begin{bmatrix} 1 & x & y & x^2 & xy & y^2 & x^3 & (x^2y + xy^2) & y^3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & x & 2y & 0 & (x^2 + 2xy) & 3y^2 \\ 0 & -1 & 0 & -2x & -y & 0 & -3x^2 & -(2xy + y^2) & 0 \end{bmatrix},$$

функција облика

$$\{a\} = \{a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6 \ a_7 \ a_8 \ a_9\}^T.$$

Након дефинисања вектора деформације и померања тачке може се извести матрица диференцијалних оператора у облику:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} = [L] \cdot \{f\} = -z \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x} & -\frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w \\ \frac{\partial w}{\partial y} \\ -\frac{\partial w}{\partial x} \end{Bmatrix}. \quad (5.25)$$

Вредности померања тачака троугла у локалном систему гласе:

$$\{\delta\}_e = \begin{Bmatrix} w_1 \\ \theta_{x1} \\ \theta_{y1} \\ w_2 \\ \theta_{x2} \\ \theta_{y2} \\ w_3 \\ \theta_{x3} \\ \theta_{y3} \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} w(x_1=0, y_1=0) \\ \frac{\partial w(x_1=0, y_1=0)}{\partial y} \\ -\frac{\partial w(x_1=0, y_1=0)}{\partial x} \\ w(x_2, y_2=0) \\ \frac{\partial w(x_2, y_2=0)}{\partial y} \\ -\frac{\partial w(x_2, y_2=0)}{\partial x} \\ w(x_3, y_3) \\ \frac{\partial w(x_3, y_3)}{\partial y} \\ -\frac{\partial w(x_3, y_3)}{\partial x} \end{Bmatrix}_e = [N]\{a\} \quad , \quad (5.26)$$

Матрице веза потребне за дефинисање матрице еластичности су:

$$[\underline{B}] = [L] \cdot [n] = -z \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 6x & 2y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 2x & 6y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 4(x+y) & 0 \end{bmatrix} .$$

$$[B] = [\underline{B}] \cdot [\underline{N}]^{-1} , \quad [N] = [n] [\underline{N}]^{-1} .$$

На крају матрица крутости елемента гласи:

$$[k]_e = \int_V [\underline{B}]^T [D] \cdot [\underline{B}] dV = ([\underline{N}]^{-1})^T \left\{ \int_A dA \left(\int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} [\underline{B}]^T [D] \cdot [\underline{B}] dz \right) \right\} [\underline{N}]^{-1} . \quad (5.27)$$

Пошто матрица веза $[N]$ не зависи само од координата тачака у претходној релацији се интеграција врши по површини и дебљини елемента:

$$\int_A dA \int_{-t/2}^{t/2} [\underline{B}]^T [D] [\underline{B}] \cdot dz = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \int_A dx \cdot dy \cdot$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & & & & & & \text{simetrično} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1-\nu) & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 4\nu & 0 & 4 & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 12x & 0 & 12\nu x & 36x^2 & & & \\ 0 & 0 & 0 & 4 \cdot & 4(1-\nu) \cdot & 4 \cdot & 12x \cdot & (12-8\nu) \cdot & & \\ & & & (\nu x + y) & (x + y) & (x + \nu y) & (\nu x + y) & (x + y)^2 - & & \\ & & & & & & & 8xy(1-\nu) & & \\ 0 & 0 & 0 & 12\nu & 0 & 12y & 36\nu xy & 12y(x + \nu y) & 36y^2 \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

Решавањем појединих површинских интеграла добија се површина елемента и његови статички и аксијални инерциони моменти површини.

Вектор оптерећења елемента гласи:

$$\{F\}_e = \{F_{z1} \quad M_{x1} \quad M_{y1} \quad F_{z2} \quad M_{x2} \quad M_{y2} \quad F_{z3} \quad M_{x3} \quad M_{y3}\}^T. \quad (5.29)$$

За коначни елемент који је само савијен, ако су глобална XU и локална xu раван паралелне, матрица трансформације гласи:

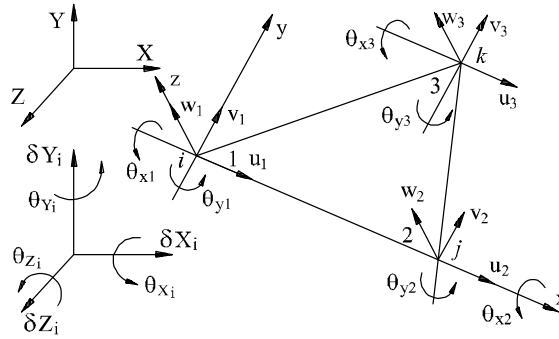
$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_{ox} & m_{ox} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_{oy} & m_{oy} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & l_{ox} & m_{ox} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & l_{oy} & m_{oy} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_{ox} & m_{ox} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_{oy} & m_{oy} \end{bmatrix}. \quad (5.30)$$

Матрица је реда 9×9 због три тачке са по три степена слободe. Величине (l_{ox}, m_{ox}) и (l_{oy}, m_{oy}) су косинуси праваца линија ox и oy .

Матрица крутости реда 9×9 и вектор оптерећења реда 9×1 у глобалном координатном.

У линеарној области са малим деформацијама мембранско и савојно напрезање су раздвојени. Чворна тачка услед мембранског напрезања има два степена слободе translације у равни плоче (v , e), док при утицају савојног напрезања има једну translацију попречно на плочу (w) и две ротације око оса које су у равни плоче (θ_x и θ_y). Шести степен слободе кретања θ_z (ротација око осе управне на плочу) не постоји за овај елемент танке плоче. Чвор овог елемента има пет степени слободе у локалном систему.

Пошто се све величине коначног елемента трансформишу из локалног у глобални систем, локални степени слободе чвора се при томе премештају по глобалним зависно од положаја елемента у простору (слика 5.7). Такође, при томе се у једном чвору могу се сусрести и/или сабрати делимично или у потпуности оба напрезања.



Слика 5.7. Троугаони елемент

Једначине равнотеже за оба напрезања посебно гласе:

$$\begin{bmatrix} [k_{11}]_m & [k_{12}]_m & [k_{13}]_m \\ [k_{21}]_m & [k_{22}]_m & [k_{23}]_m \\ [k_{31}]_m & [k_{32}]_m & [k_{33}]_m \end{bmatrix}_e^m \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e, \quad (5.31)$$

где је $[k_{ij}]_m$ реда 2×2 , $\{\delta_i\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix}$, $\{F_i\} = \begin{Bmatrix} F_{xi} \\ F_{yi} \end{Bmatrix}$, $i, j = 1, 2, 3$,

ОДНОСНО

$$\begin{bmatrix} [k_{11}]_s & [k_{12}]_s & [k_{13}]_s \\ [k_{21}]_s & [k_{22}]_s & [k_{23}]_s \\ [k_{31}]_s & [k_{32}]_s & [k_{33}]_s \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e ,$$

где је $[k_{ij}]_s$ реда 3x3 , $\{\delta_i\} = \begin{Bmatrix} w_i \\ \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \end{Bmatrix}$, $\{F_i\} = \begin{Bmatrix} F_{zi} \\ M_{xi} \\ M_{yi} \end{Bmatrix}$, $i, j = 1, 2, 3$.

Једначина равнотеже елемента са оба напрезања гласи:

$$\begin{bmatrix} [k_{11}] & [k_{12}] & [k_{13}] \\ [k_{21}] & [k_{22}] & [k_{23}] \\ [k_{31}] & [k_{32}] & [k_{33}] \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e \quad (5.32)$$

где је

$$[k_{ij}] = \begin{bmatrix} & & \vdots & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 \\ & [k_{ij}]_m & \vdots & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ 0 & 0 & \vdots & & & & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & & [k_{ij}]_s & & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & & & & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 \end{bmatrix} , \{\delta_i\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \\ \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \\ 0 \end{Bmatrix} , \{F_i\} = \begin{Bmatrix} F_{xi} \\ F_{yi} \\ F_{zi} \\ M_{xi} \\ M_{yi} \\ 0 \end{Bmatrix} , \quad i, j = 1, 2, 3.$$

Матрица крутости, вектор оптерећења и померања у глобалном систему гласе:

$$[\bar{k}]_e = [T]^T [k]_e [T] , \quad \{\bar{\delta}\}_e = [T]^T \{\delta\}_e , \quad \{\bar{F}\}_e = [T]^T \{F\}_e ,$$

$$[T] = \begin{bmatrix} [\underline{T}] & [0] & [0] \\ [0] & [\underline{T}] & [0] \\ [0] & [0] & [\underline{T}] \end{bmatrix} , \quad [\underline{T}] = \begin{bmatrix} [\bar{T}] & [0] \\ [0] & [\bar{T}] \end{bmatrix} , \quad [\bar{T}] = \begin{bmatrix} l_{ox} & m_{ox} & n_{ox} \\ l_{oy} & m_{oy} & n_{oy} \\ l_{oz} & m_{oz} & n_{oz} \end{bmatrix} , \quad (5.33)$$

где су l , m и n косинуси праваца x , y и z осе.

Матрица трансформације мора бити квадратна (број тачака елемента x број глобалних степени слободe чворне тачке).

5.2 Дефинисање напрезања контејнера

Постојећи стандарди дефинишу веома широк спектар начина и метода испитивања контејнера. У раду биће издвојена она испитивања која ће у најбољој мери дефинисати карактеризацију контејнера. Неопходност тих испитивања захтева дефинисање напрезања која се при томе морају увести да би се она реализовала.

Основна напрезања за која треба одредити карактеризацију чврстоће елемената контејнера су:

- притисак са извијањем страница
- савијање страница око дуже и краће ивице
- увијање страница и базе
- савијање базе
- савијање са увијањем страница и базе.

Основна напрезања за која треба одредити карактеризацију контејнера у склопу су:

- притисак са извијањем
- савијање страница услед попречне хоризонталне силе у два смера по врху странице
- увијање
- савијање са увијањем (ослонци у три угла базе и оптерећење у четвртом, подизање-спуштање једног чошка базе оптерећеног контејнера)
- замор контејнера оптерећеног промењивом притисном силом.

Остале анализе карактеризације су:

- сила отварања странице
- утицај температуре
- замор елемента контејнера
- динамика и вибрације контејнера.

Основни елементи карактеризације чврстоће контејнера и његових елемената су:

- одређивање крутости елемената контејнера и самог контејнера
- одређивање појаве извијања и пластичне деформације
- одређивање деформације и напона.

Најбитнији елементи контејнера су: везе, странице и база.

Испитивање контејнера је потребно извршити у различитим температурним амбијенталним условима о на довољном броју узорака.

Посебна пажња је дата напрезању извијања страница контејнера и контејнера у склопу. Доступна литература која обрађује проблем извијања је веома обимна. Такође, напомиње се да доступне литературе која обрађује извијање контејнера нема. Анализирана литература дата у референцама [34,35,36,37,38,39,40] биле су довољне да се дефинише, одреди и анализира извијање контејнера.

За потребе моделирања, поред осталог, коришћене су две докторске дисертације ([41,42]).

Основни резултати овор рада дати су у референци [43] у којој сам ја први аутор.

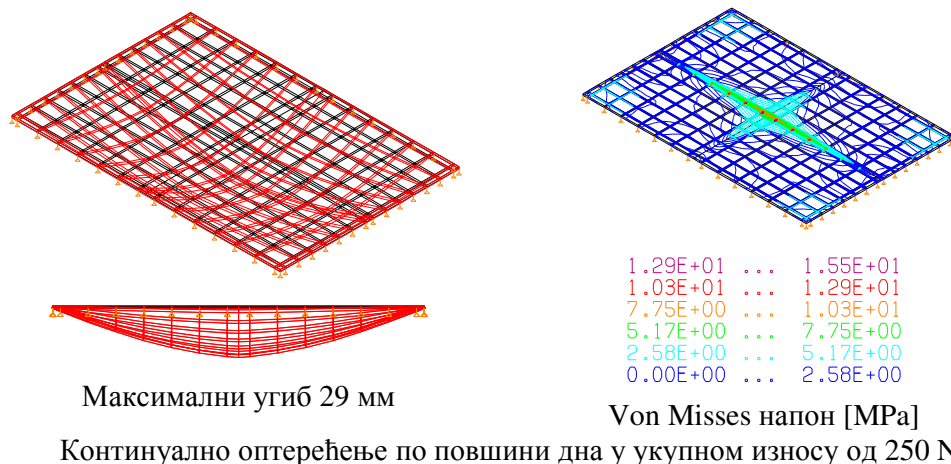
6 Нумеричко одређивање параметера чврстоће контејнера

Нумеричко одређивање параметара чврстоће контејнера врши се применом методе коначних елемената са софтвером КОМПИС [44]. При прорачуну коначних елемената највећа пажња посвећена је бази и дужој страници контејнера. Главни исход прорачуна и анализе чврстоће контејнера представља дефинисање граничних вредности параметара чврстоће. Основни модул еластичности материјала који се користи за израду контејнера – полипропилена, а на ком су изведени сви прорачуни има вредност 1200 МПа на 20 °Ц.

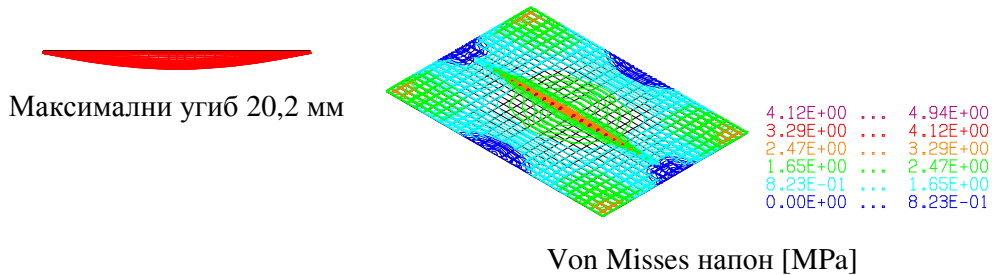
6.1 Прорачун и анализа понашања базе контејнера

Изведен је прорачун и анализа понашања базе различитих типова контејнера.

Први тип контејнера представља контејнер за складиштење и транспорт намирница (посебно залеђеног меса). Дно представља оребљену плочу само са једне стране. Димензија дна је 600х400 мм. Разматране су две густине мрежа (растера) ребара. На слици 6.1. и 6.2 приказани су тезултати прорачуна базе са две врста растера ребара.



Слика 6.1. Рачунски модел и прораћун контејнера за месо–груби растер 45х30 мм



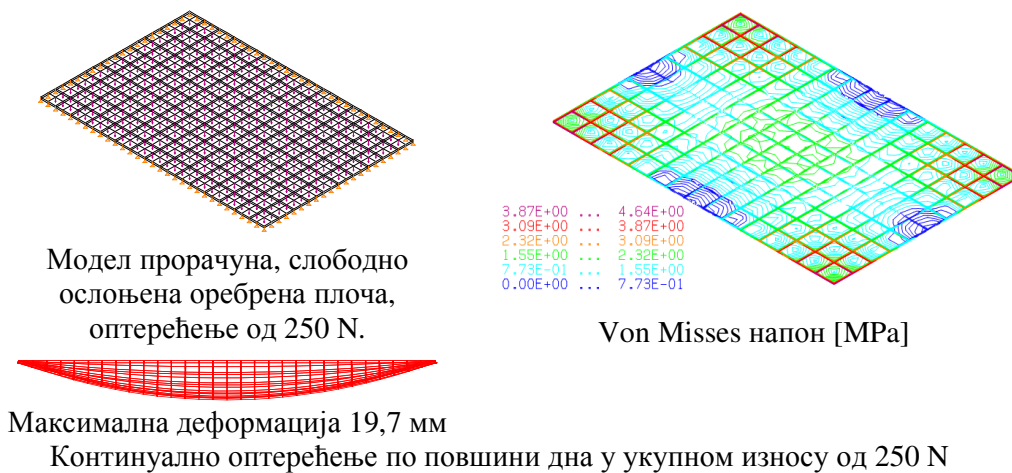
Континуално оптерећење по повшини дна у укупном износу од 250 N

Слика 6.2. Рачунски модел и прораћун контејнера за месо–фини растер 22,5x15мм.

Закључује се да фини растер обезбеђује задовољавајуће понашање базе. Из овога следи да се за ову димензију контејнера и ребара при оптерећењу од 250 N дефинише потреба за максималном деформацијом од 20 мм.

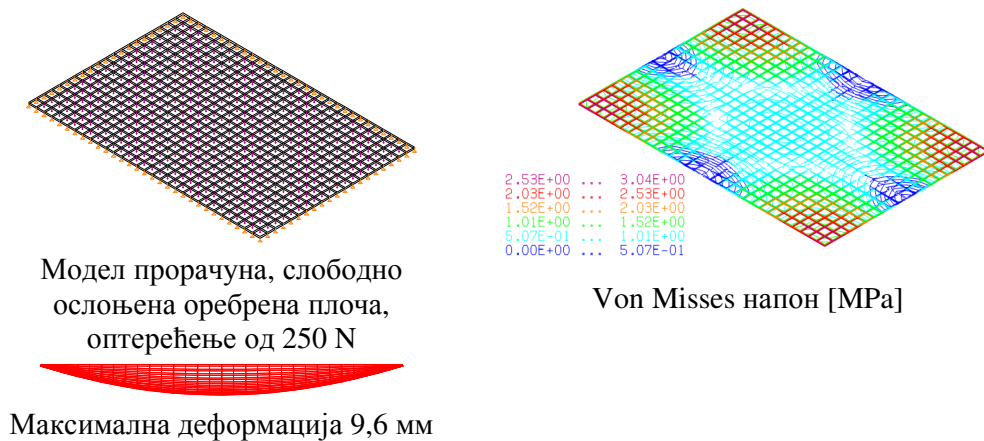
Следе прораћун једне базе контејнера 600x400 мм са више типа растера, дебљине базе, дебљине и висине ребара.

Модел и резултати прорачуна базе димензија 600x400 мм са грубим растером ребара 40x40 мм, дебљином базе 2 мм и висином ребра од 4 мм дати су на сл. 6.3.



Слика 6.3. Модел и резултат прорачуна базе са грубим растером ребара 40x40 мм, дебљине базе 2 мм и висине ребра 4 мм

Модел и резултати прорачуна базе димензија 600x400 мм са финим растером ребара 20x20 мм, дебљином базе 2 мм и висином ребра од 4 мм дати су на сл. 6.4.



Континуално оптерећење по повшини дна у укупном износу од 250 N

Слика 6.4. Модел и резултат прорачуна базе са финим растером ребара 20x20 мм, дебљине базе 2 мм и висине ребра 4 мм

У табелама 6.1, 6.2 и 6.3 дати су прикази утицаја дебљине базе, растера ребара и димезије ребара на максималну деформацију и напон дна од континуалног оптерећења од 250 N.

Табела 6.1. Растер: подужних попречни-максимална деформација [мм] за
 $E=1200\text{MPa}$

Пуна плоча дебљине 5 мм	9,2
Плоча дебљине 1 мм, ребра дебљине 4 мм и висине 4 мм, растер 10x10 мм	4,8
Плоча дебљине 1 мм, ребра дебљине 4 мм и висине 4 мм, растер 15x13,33 мм	7,7
Плоча дебљине 1 мм, ребра дебљине 4 мм и висине 4 мм, растер 20x10 мм	8,3
Плоча дебљине 2 мм, ребра дебљине 4 мм и висине 3 мм, растер 20x20 мм	12
Плоча дебљине 1 мм, ребра дебљине 4 мм и висине 4 мм, растер 20x20 мм	13

Табела 6.2. Ребро $t = 4\text{ мм}$, растер $15 \times 15\text{ мм}$, $E = 1200\text{ МПа}$

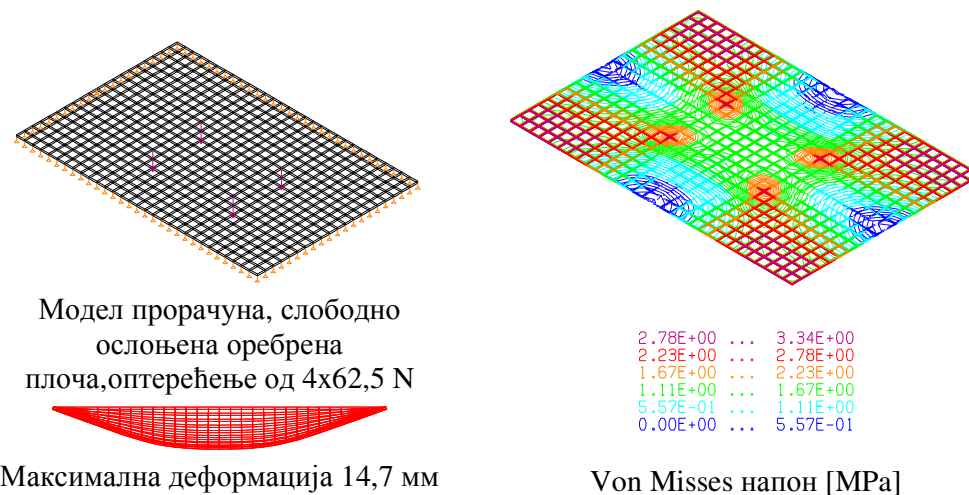
Висина [мм]	Угиб [мм]	Напон [МПа]
3	7,7	27,6
4	6,76	23
5	5,72	18,6
6	5,7	17,6
7	4,7	14,4
8	4,3	13
9	4	11,8
10	3	9

Табела 6.3. Ребро $t = 3\text{ мм}$, растер $15 \times 15\text{ мм}$, $E = 1200\text{ МПа}$

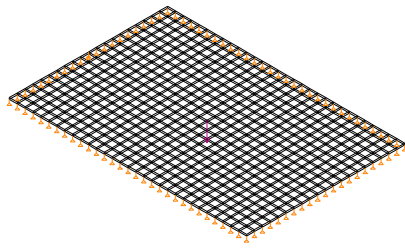
Висина [мм]	Угиб [мм]	Напон [МПа]
5	9,2	22

Овај тип базе и контејнера дефинише потребу за максималним угибом од 10 мм.

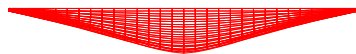
У наставку утврђује се утицај концентрисаног оптерећења базе за овај тип базе са финим растером, дебљином базе 2 мм и висином ребра 4 мм. Приказ је дат на сликама 6.5 и 6.6.



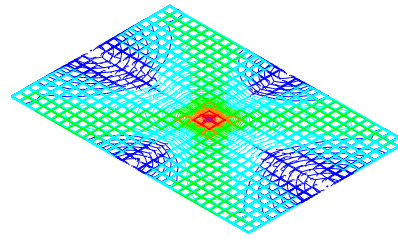
Слика 6.5. Утицај четири концентрисана оптерећења базе на деформацију и напон



Модел прорачуна, слободно
ослоњена оребрена плоча,
оптерећење од 250 N



Максимална деформација 24,1 мм

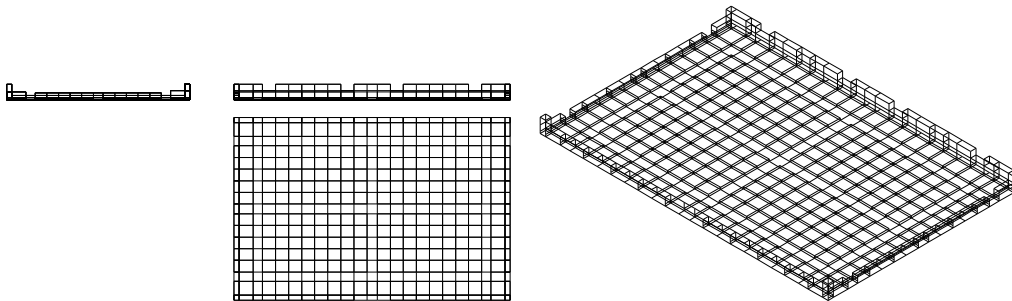


7.47E+00	...	8.96E+00
5.97E+00	...	7.47E+00
4.48E+00	...	5.97E+00
2.99E+00	...	4.48E+00
1.49E+00	...	2.99E+00
0.00E+00	...	1.49E+00

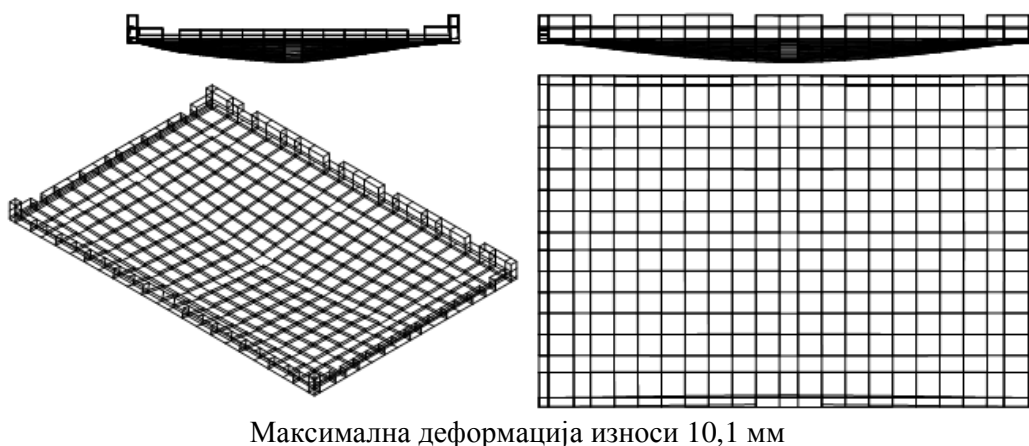
Von Misses напон [MPa]

Слика 6.6. Утицај концентрисаног оптерећења базе на деформацију и напон

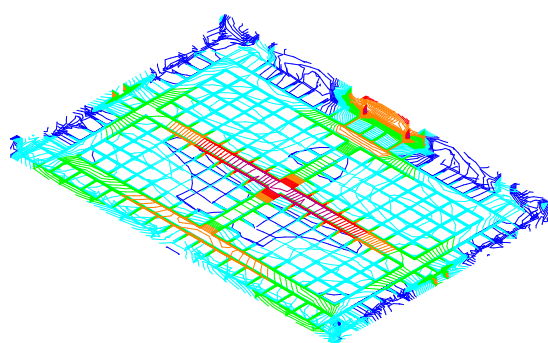
Следи приказ једне дизајниране базе контејнера димензија 600x400 мм која представља један од излаза овог рада. Модел и резултат прорачун дат је на слици 6.7. Ова база задовољава постављене услове деформације и напона.



Модел прорачуна. Континуално површинско оптерећење од 250 N



Максимална деформација износи 10,1 мм

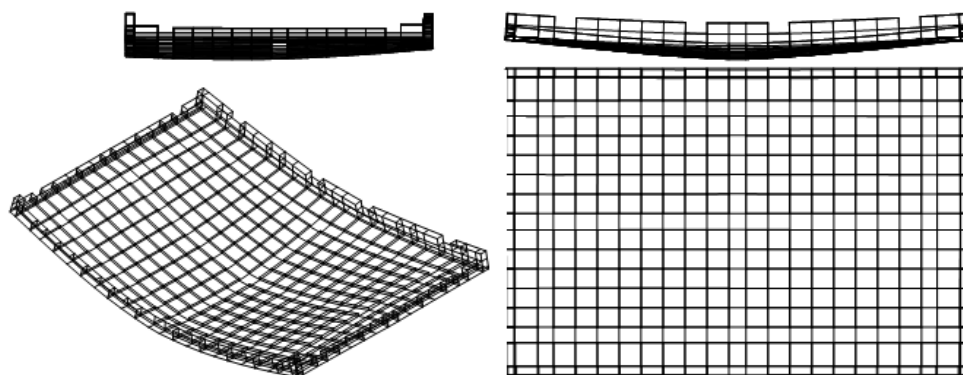


4.01E+00	...	4.81E+00
3.21E+00	...	4.01E+00
2.40E+00	...	3.21E+00
1.60E+00	...	2.40E+00
8.02E-01	...	1.60E+00
0.00E+00	...	8.02E-01

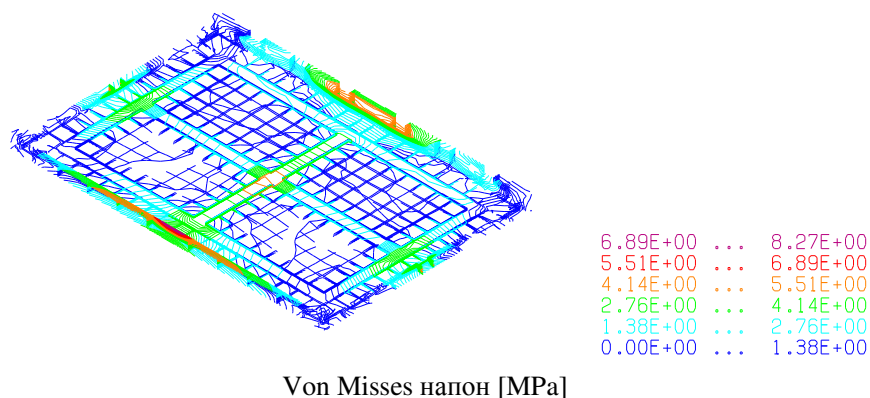
Von Misses напон [MPa]

Слика 6.7. Модел и резултат прорачуна дизајниране базе

Утицај ослањања контејнера само на краћим странама базе за предходни тип дат је на слици 6.7.



Максимална деформација 19,1 мм



Слика 6.8. Ослонци само на краћој страни дизајниране базе, оптерећење 250 N

Ова ситуација није дозвољена.

6.2 Поставке прорачуна и анализе дуже стране контејнера

У првом реду анализиран је утицај оребрене и сендвич плоче са различитим начином ослањања на њено понашање.

Геометрија оребрене и сендвич плоче:

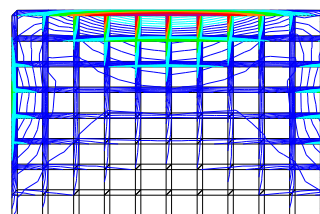
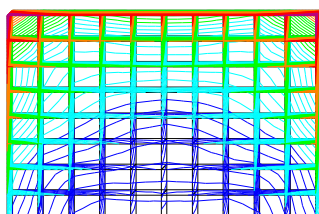
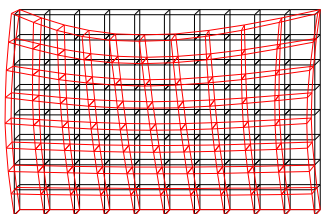
- димензија плоче 1200x800x3 мм
- број подједнако распоређених вертикалних ребара 11
- број подједнако распоређених хоризонталних ребара 9
- висина и дебљине ребара 30x3 мм.

Резултати статичког и динамичког прорачуна свих модела дати су на слици 6.9 и 6.10 без вредности деформација, напона и фреквенци јер се жели само анализа релативног утицаја врсте модела (табела 6.4).

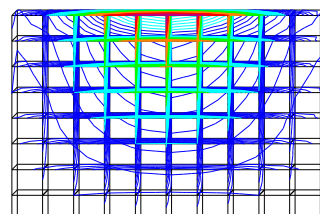
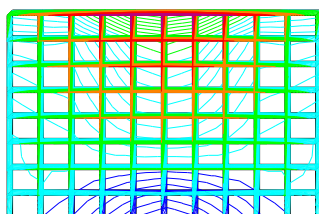
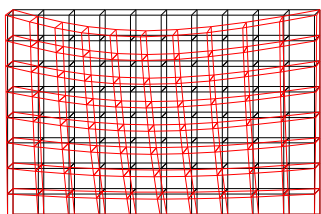
Деформација

Еквивалентни напон

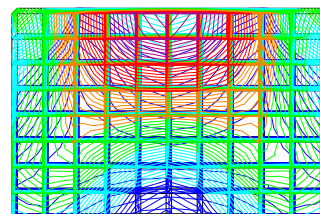
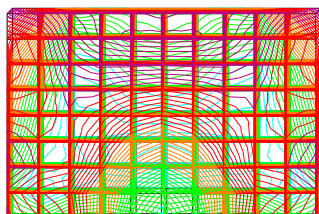
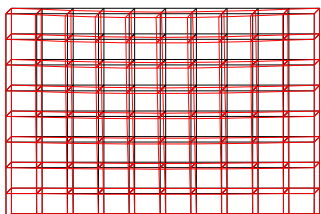
Енергија деформисања



C1 - Управно савијање слободно ослоњене оребрене плоче на једној страни и два слободна темена

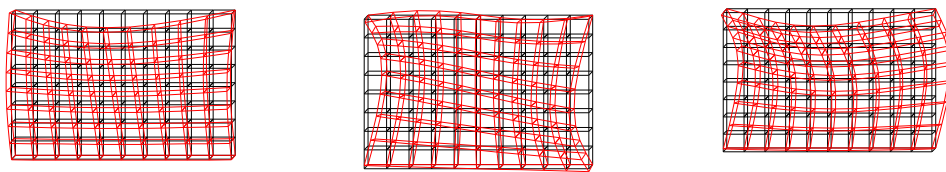


C2 - Управно савијање слободно ослоњене оребрене плоче на три странице

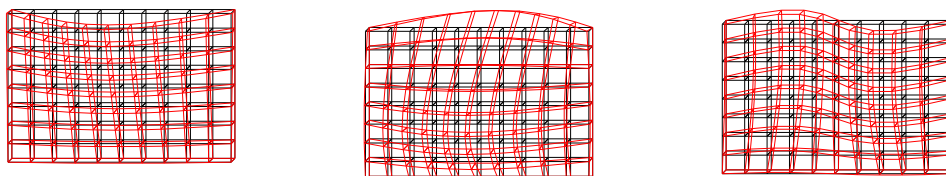


C3 - Управно савијање слободно ослоњене сендвич плоче на три странице

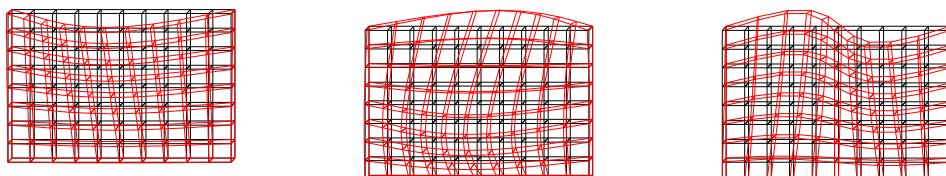
Слика 6.10. Статички прорачун оребљене и сендвич плоче



Д1 - Прва три мода осциловања слободно ослоњене оребрене плоче на једној страни и два слободна темена



Д2 - Прва три мода осциловања слободно ослоњене оребрене плоче на три стране



Д3 - Прва три мода осциловања слободно ослоњене сендвич плоче на три стране

Слика 6.11. Динамички прорачун

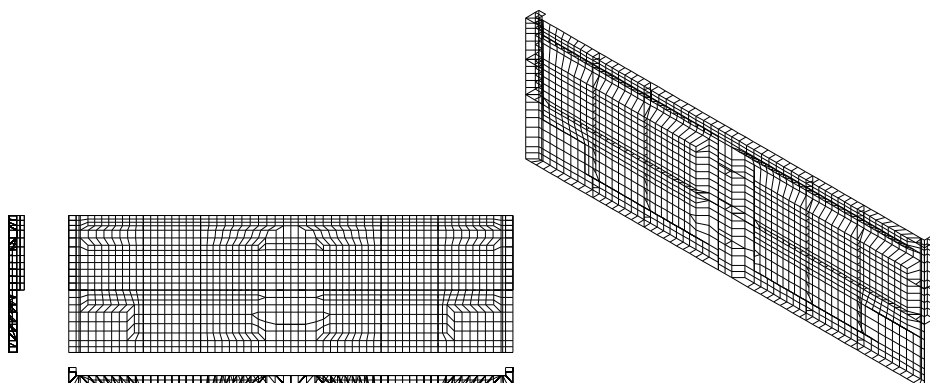
Репер релативне анализе је усвојени модел сендвич плоче која засигурно има најбоље понашање. Потребно је утврдити колико је пута понашање сендвич плоче боље од оребрене плоче (табела 6.4).

Табела 6.4. Анализа релативног понашања

Статика	C1	C2	C3
Деформација	6,57	4,65	1
Напон	4,55	2,75	1
Енергија деформисања	22,13	12,76	1

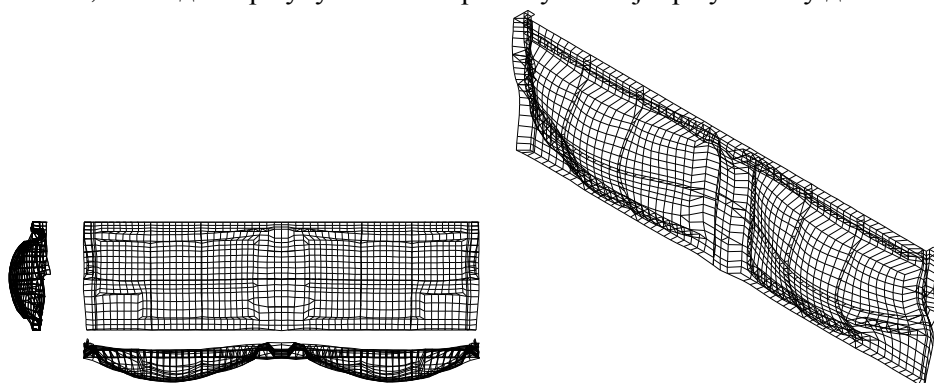
Динамика	Д1	Д2	Д3
1. мод	0,493	0,578	1
2. мод	0,387	0,591	1
3. мод	0,523	0,802	1

Прорачун дуже затворене странице контејнера за транспорт намирница димензија 600x200x12 мм приказан је на слици 6.12.



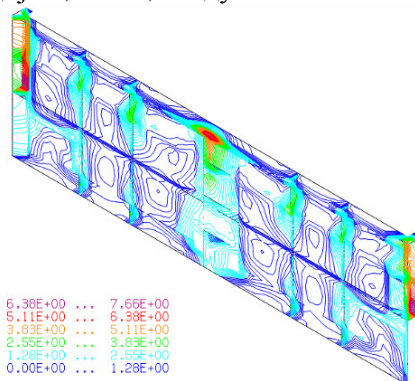
Рачунски модел дуже странице без отвора

Оптерећење: укупно вертикално континуално оптерећење на доле у износу од 1000 N, што одговара укупном оптерећењу контејнера у износу до 3000 N



Поље деформације

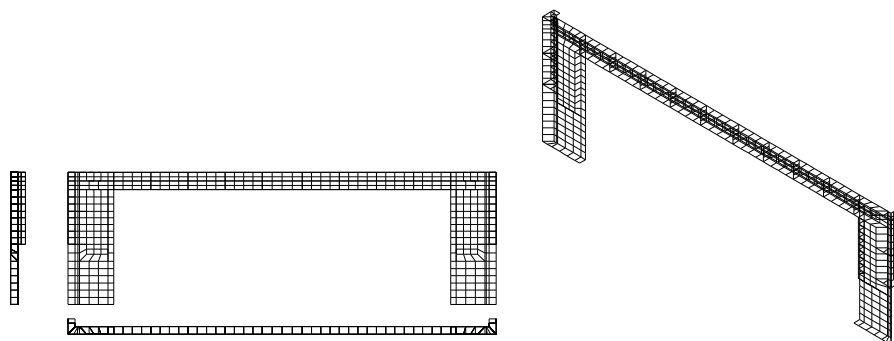
Верикално паралелно померање горње ивице странице на доле износи 0,32 мм
Максимална деформација 0,55 мм, Модул еластичности - $E=1500$ МПа



Von Mises напон [МПа]

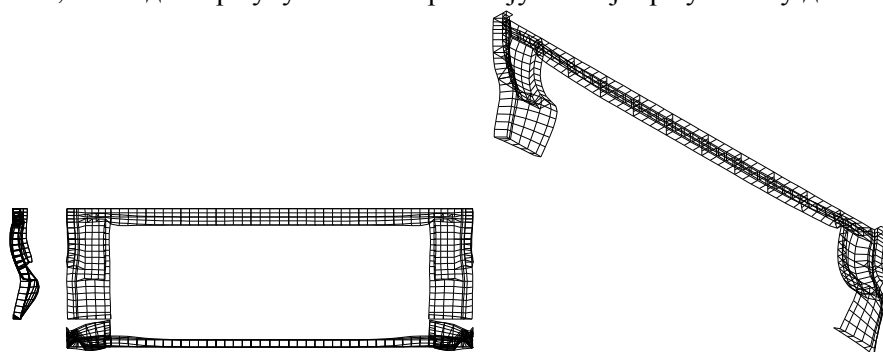
Слика 6.12. Прорачун дуже затворене странице контејнера за транспорт намирница

Прорачун дуже стране контејнера за транспорт намирница са отвором
 димензија 600x200x12 мм дат је на слици 6.13.



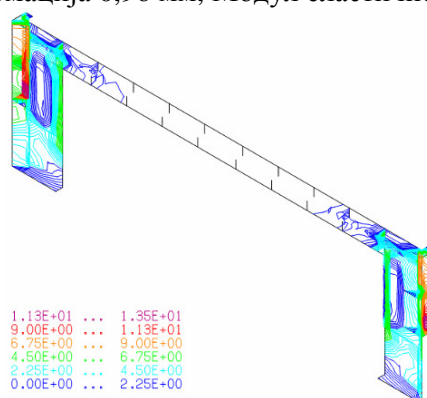
Рачунски модел дуже стране са отвором.

Оптерећење: укупно вертикално континуално оптерећење на доле у износу од
 1000 N, што одговара укупном оптерећен ју контејнера у износу до 3000 N



Поље деформације

Верикална паралелно померање горње ивице стране на доле износи 0,577 мм
 Максимална деформација 0,96 мм, Модул еластичности – $E=1500$ МПа



Von Misses напон [MPa]

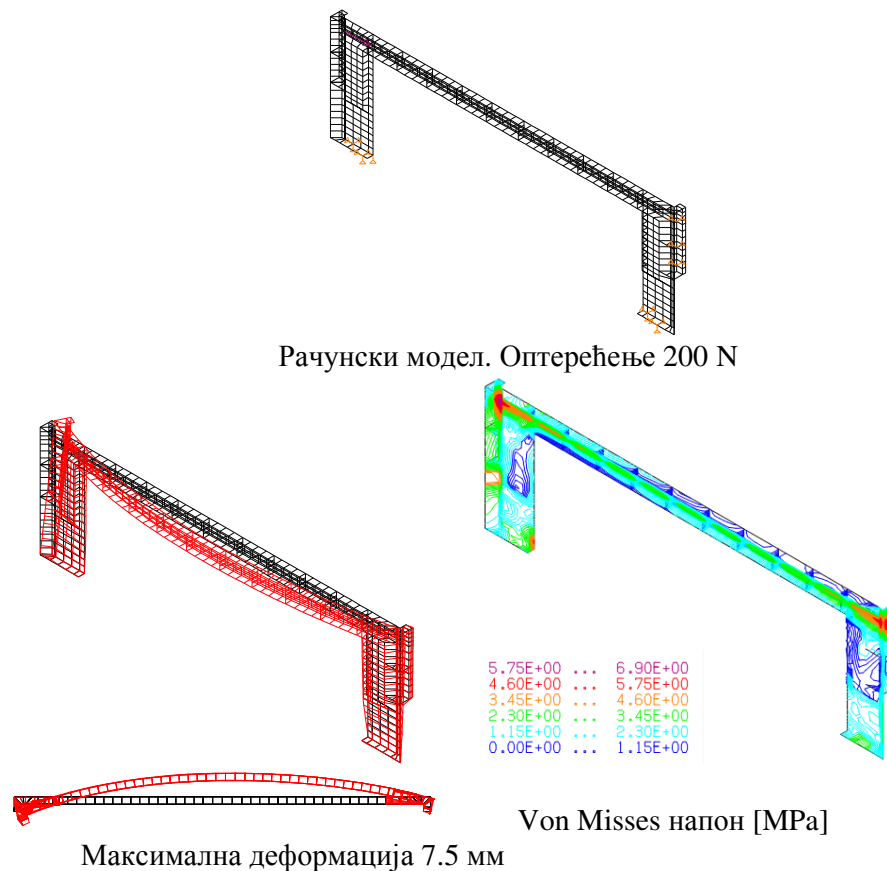
Слика 6.13. Прорачун дуже затворене стране контејнера за транспорт
 намирница

Реално, вредности деформације и напона су мање јер није узет утицај краћих страница на ову дужу страницу. Усвојена претпоставка да ће ова страница примити исто оптерећење по јединици дужине горње ивице је престога, односно оно ће засигурно бити мање.

Укупно оптерећење је узето да је двоструко веће од максималног радног оптерећења.

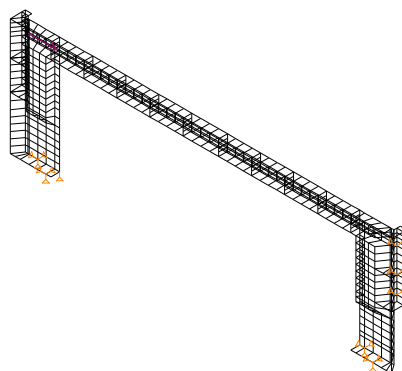
Краћа страница има слично понашање као ова дужа страница. Она прима исто оптерећење по јединици дужине горње ивице као и дужа страница. Њено укупно оптерећење ће бити мање него код дуже странице.

Следи приказ утицаја бочног оптерећења на дужу страницу контејнера са отвором за случаје странице дебљине 12 и 16 мм. Анализа утицаја бочног оптерећења на страницу контејнера са отвором дебљине 12 мм приказана је на слици 6.14.

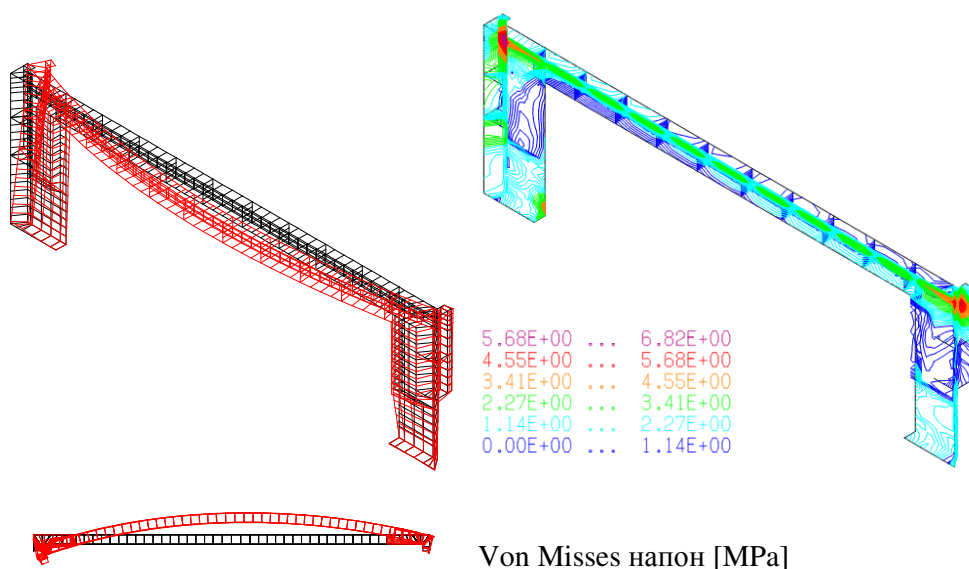


Слика 6.14. Утицај бочног оптерећења на страницу дебљине 12 мм контејнера са отвором

Анализа утицаја бочног оптерећења на страницу контејнера са отвором дебљине 16 мм приказана је на слици 6.15.



Рачунски модел. Оптерећење 200 N

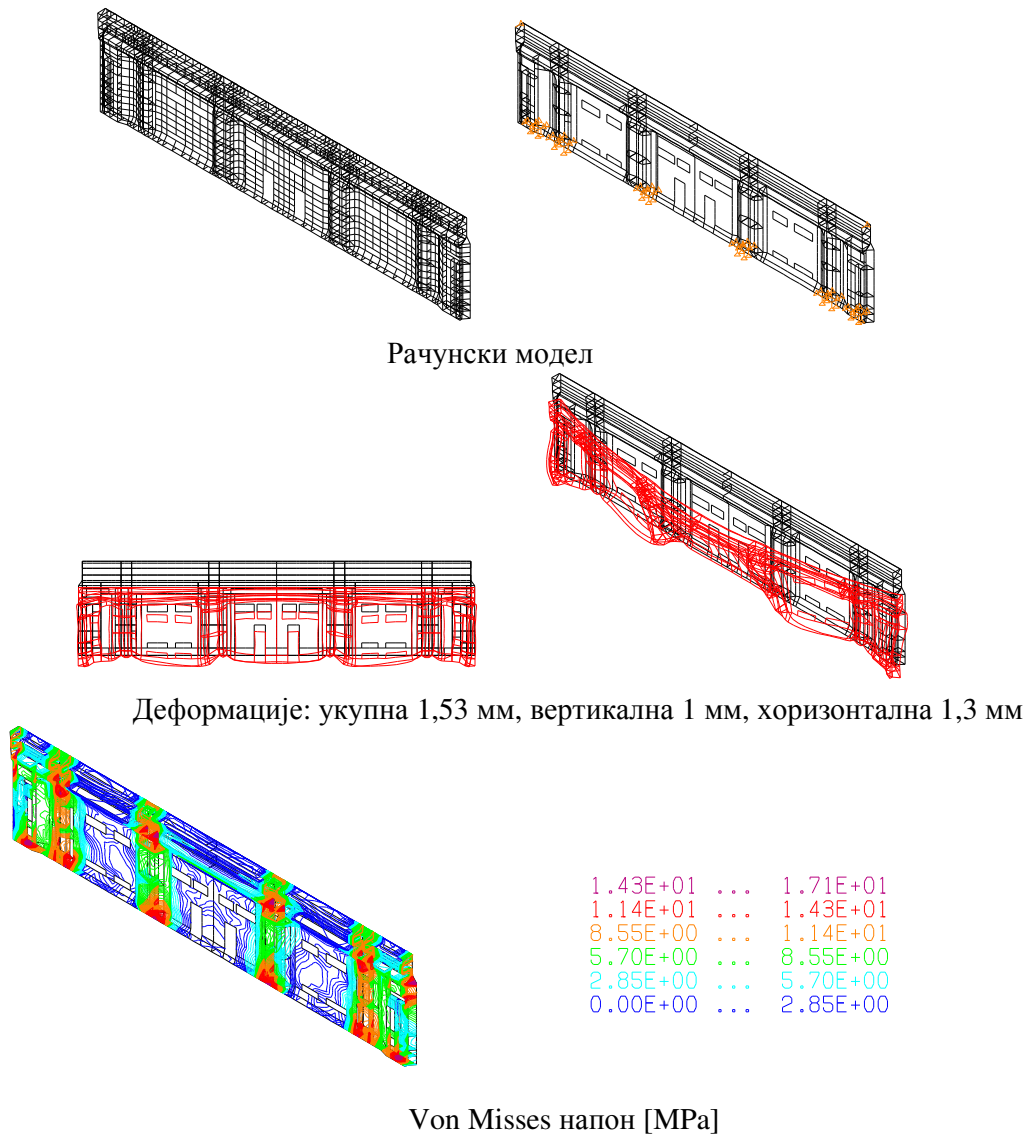


Слика 6.15. Утицај бочног оптерећења на страницу дебљине 16 мм контејнера са отвором

Као што се види подебљана страница од 16 мм не доноси пуно, односно дебљина 12 мм задовољава.

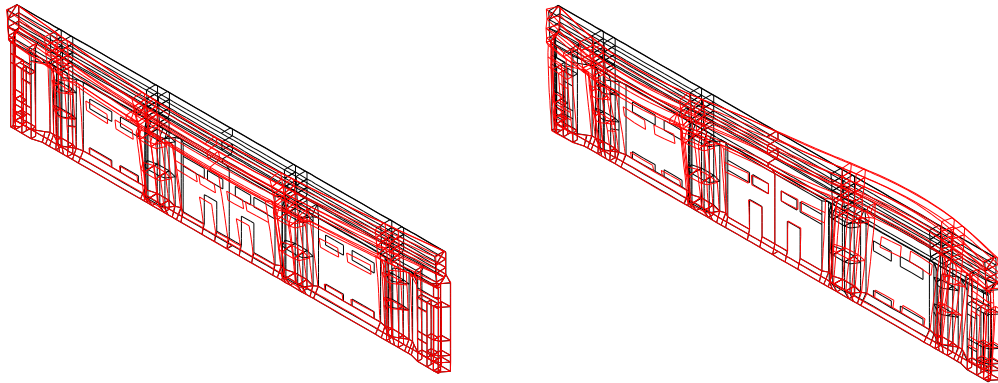
6.3 Прорачун и анализа дуже странице контејнера Tontarelli

Изведен је прорачун и анализа дуже странице ($L=600$ мм) реално изведеног контејнера фирме Tontarelli са циљем да одреде и дефинишу ограничења оптерећења, деформације и напона. На слици 6.16 дат је приказ почетног прорачуна и анализе. Задато оптерећење износи вертикално паралелно спуштање горње хоризонталне ивице странице за 1 мм.



Слика 6.16. Рачунски модел и резултати прорачуна дуже странице једног типа контејнера Tontarelli

Динамички прорачун дуже стране (прва два главна облика осциловања) дат је на слици 6.17.



$$\phi_{01}=67,9 \text{ X3} \quad A=4,2 \text{ мм (хоризонтално 4 мм)}$$

$$\phi_{02}=200 \text{ X3} \quad A=4,05 \text{ мм}$$

Слика 6.17. Прва два главна облика осциловања дуже стране

Реакција ослоња при вертикалној деформацији горње ивице од 1 мм је 6900 N.

Граница развлачења материјала контејнера износи 27 МПа.

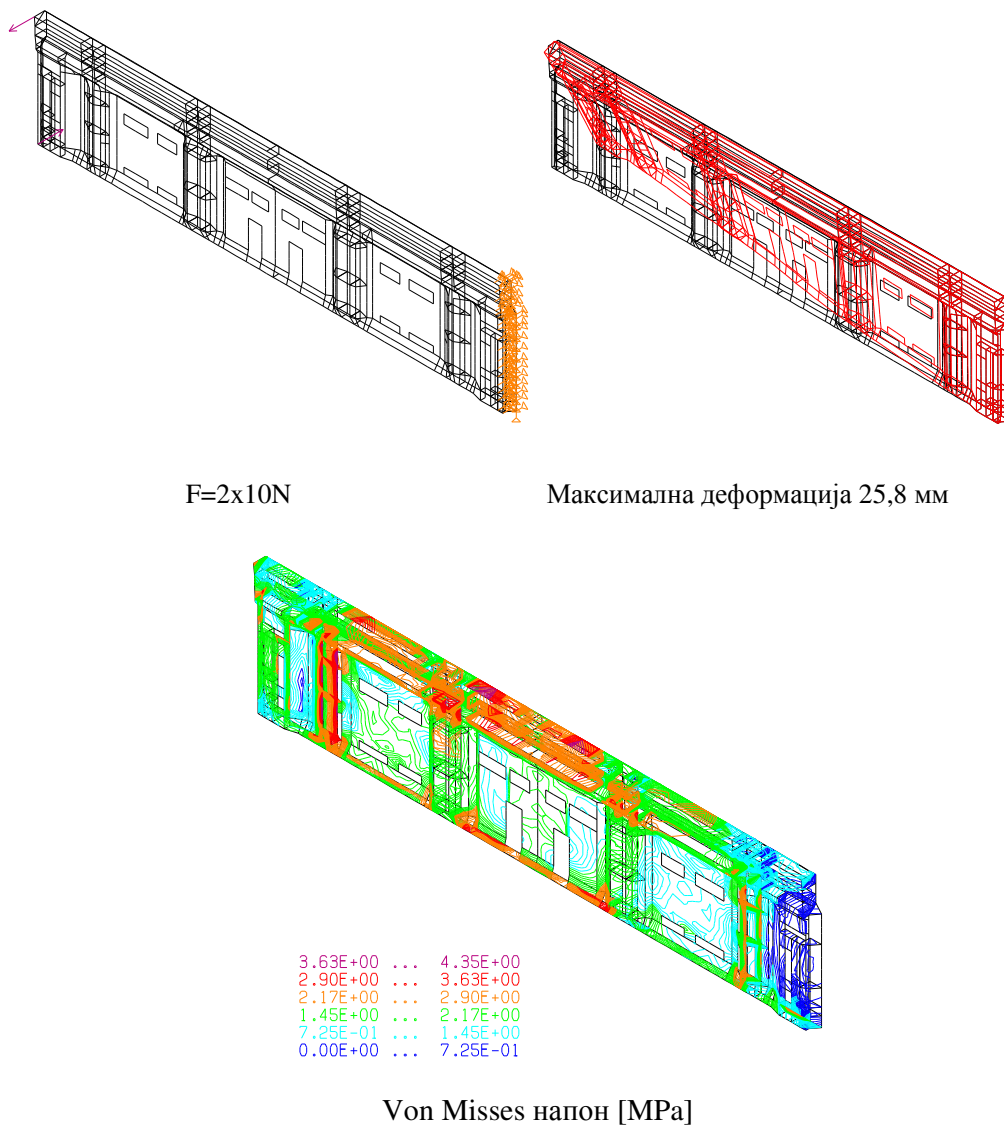
Фактор достизања границе развлачења материјала при статичком прорачуну износи: $27/17,1 = 1,58$. Фактор односа динамичке хоризонталне амплитуде средине врха стране у односу на статичку износи $4/1,3 = 3,03$.

Пошто је статички фактор достизања границе развлачења материјала мања од динамичког фактора ($1,58 < 3,03$) пластична деформација стране би настала пре извијања. Ово је повољно али је статички фактор много мањи од динамичког. Највећа носивост стране се постиже када су оба фактора блиска вредности 3.

Процењена укупне силе пластичне деформације целог контејнера (две дуже и краће стране) износи: $6900 \text{ N} * 1,58 * (2 + 2 * 2/3) = 14400 \text{ N}$.

Измерена носивост истог модела контејнера само са вишом страницом износи око 11000 N. Види се да је нумерички одређена носивост контејнера сагласна са измереном носивошћу. Реално, носивост контејнера је нешто већа пошто је у питању више контејнера, односно овде није узет (веома тешко га је моделирати) међусобни утицај монтираних контејнера који засигурно повећава носивост.

Увијање дуже стране контејнера око подужне осе приказано је на слици 6.18.



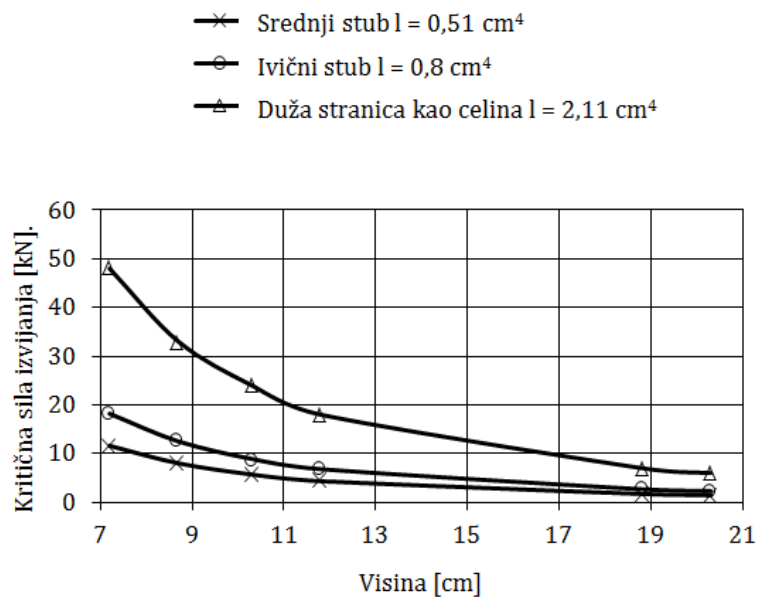
Слика 6.18. Рачунски модел и резултати прорачуна увијања дуже

Можемо констатовати да ово напрезање и поред велике деформације не доводи до пластичне деформације.

6.4 Прорачун и анализа критичне силе извијања контејнера

Прорачун критичне силе извијања путем класичне Ојлерове формуле је изведен за независни ивични и средњи стуб, као и целе дуже странице контејнера K7 фирме Чер.

Утицај висине странице на силу извијања приказан је на слици 6.18. Моменти инерције стубова израчунати су за стубове постојећих контејнера.

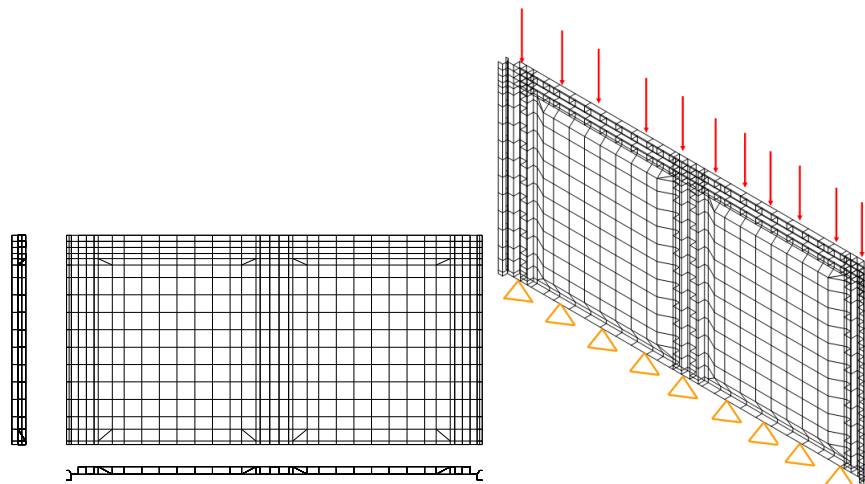


$$\text{Ојлерова критична сила } F_{kr} = \pi^2 \frac{E \cdot I}{H^2}, \quad E = 1200 \text{ МПа}$$

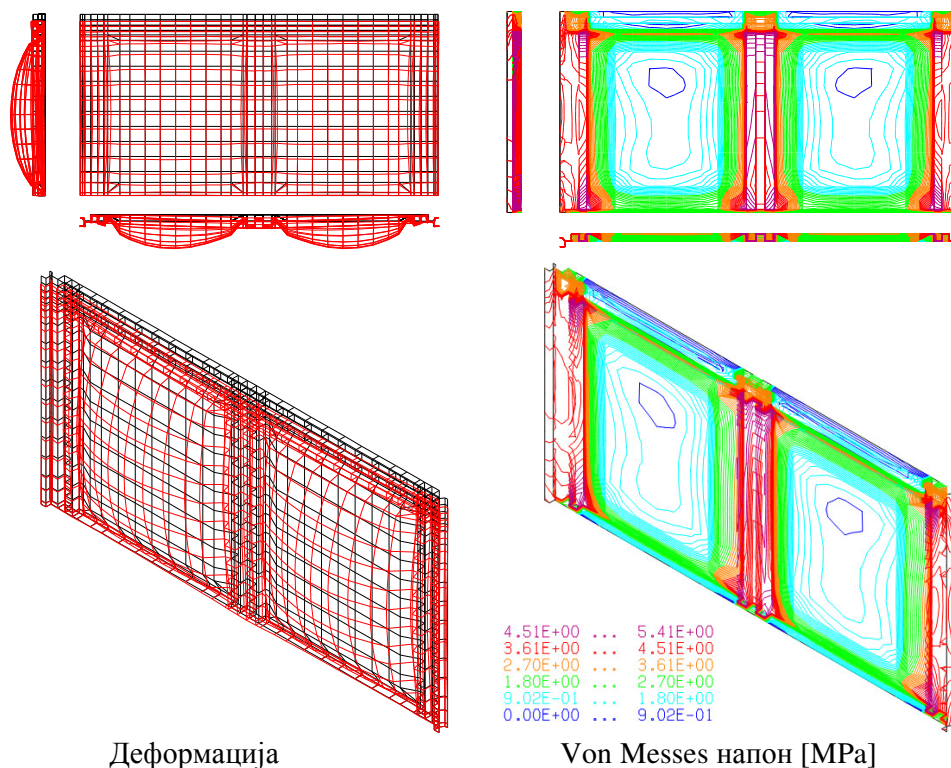
Слика 6.18. Критична сила извијања [kN]

Прорачун и анализа критичне силе извијања применом методе коначних елемената у статичком и динамичком прорачуну изведен је на контејнеру K7 фирме Чер. Контејнер K7 има димензије базе 600x400 мм и висину 348 мм. Методологија има за циљ да се дође до процене силе извијања која ће мерењем бити доказана.

Рачунски модел и резултат статичког прорачуна дуже стране контејнера К7 дати су на слици 6.19. Уведено вертикално оптерећење ће произвести вертикалну деформацију хоризонталне горње ивице стране за 1 мм.

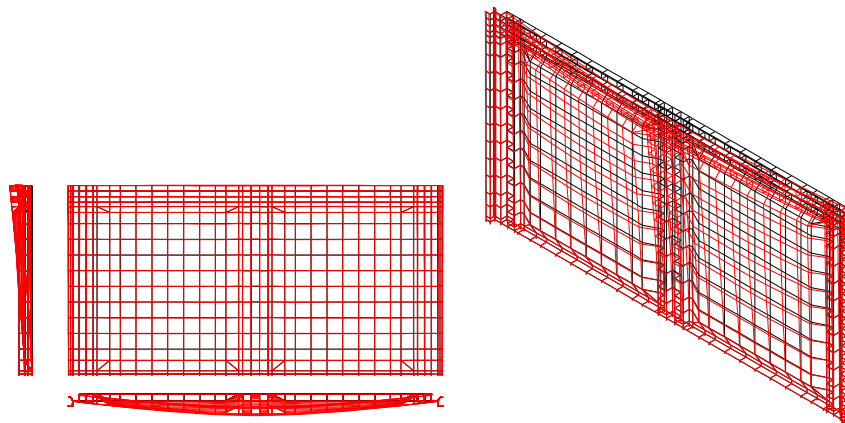


Рачунски модел дуже стране. Модул еластичности 1200 МПа. Укупно вертикално оптерећење дуже стране износи 4023 N. Укупно оптерећење контејнера износи $4023 \cdot (2 + 2 \cdot 4/6) = 13410$ N

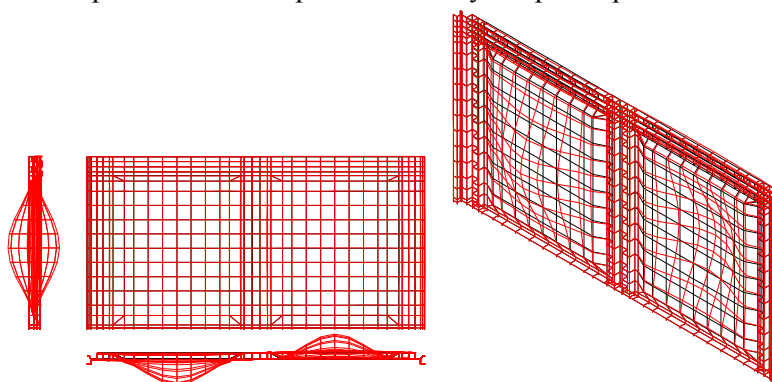


Слика 6.19. Рачунски модел и резултати статичког прорачуна дуже стране контејнера К7 (Сер)

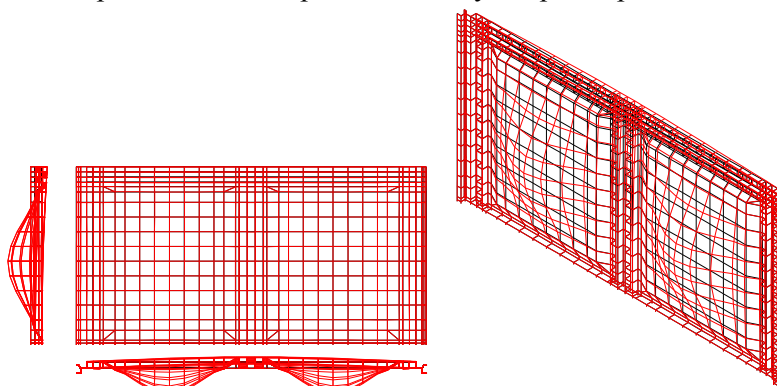
Приказ прорачуна најбитнијих главних облика осциловања дуже странице контејнера К7 дат је на слици 6.20. Модул еластичности материјала је усвојен 1200 МПа.



Први облик осциловања. Сопствена фреквенца 32,4 Hz.
Максимална хоризонтално-попечна амплитуда врха странице износи 3,3 мм



Други облик осциловања. Сопствена фреквенца 61,7 Hz.
Максимална хоризонтално-попечна амплитуда врха странице износи 6,3 мм



Трећи облик осциловања. Сопствена фреквенца 65,9 Hz.
Максимална хоризонтално-попечна амплитуда врха странице износи 6,5 мм

Слика 6.20. Динамички прорачун дуже странице контејнера К7 (Сер)

Носивост дуже странице на основу статичког прорачуна за вредности границе развлачења материјала у износу од 27 МПа износи: $4023 \text{ N} \cdot \frac{27 \text{ МПа}}{5,4 \text{ МПа}} = 20.115 \text{ N}.$

Ако се усвоји да све странице подједнако носе, носивост целог контејнера ће при томе износити $20115 \cdot \frac{600 + 600 + 400 + 400}{600} = 67.050 \text{ N}.$

Следи процена силе извијања на основу статичког и динамичког прорачуна. Статички прорачун: однос границе развлачења материјала и максималног Вон Мессес напона износи $\frac{27 \text{ МПа}}{5,4 \text{ МПа}} = 5.$ Динамички прорачун: однос максималне амплитуде осциловања првог главног мода и максималне деформације статичког прорачуна износи $\frac{3,3 \text{ mm}}{0,92 \text{ mm}} = 3,59.$

Пошто је однос динамичких амплитуда (3,59) мањи од односа статичког напона (5) закључује се да ће прво наступити извијање, па пластична деформација материјала.

Процењена сила извијања целог контејнера при томе би износила:

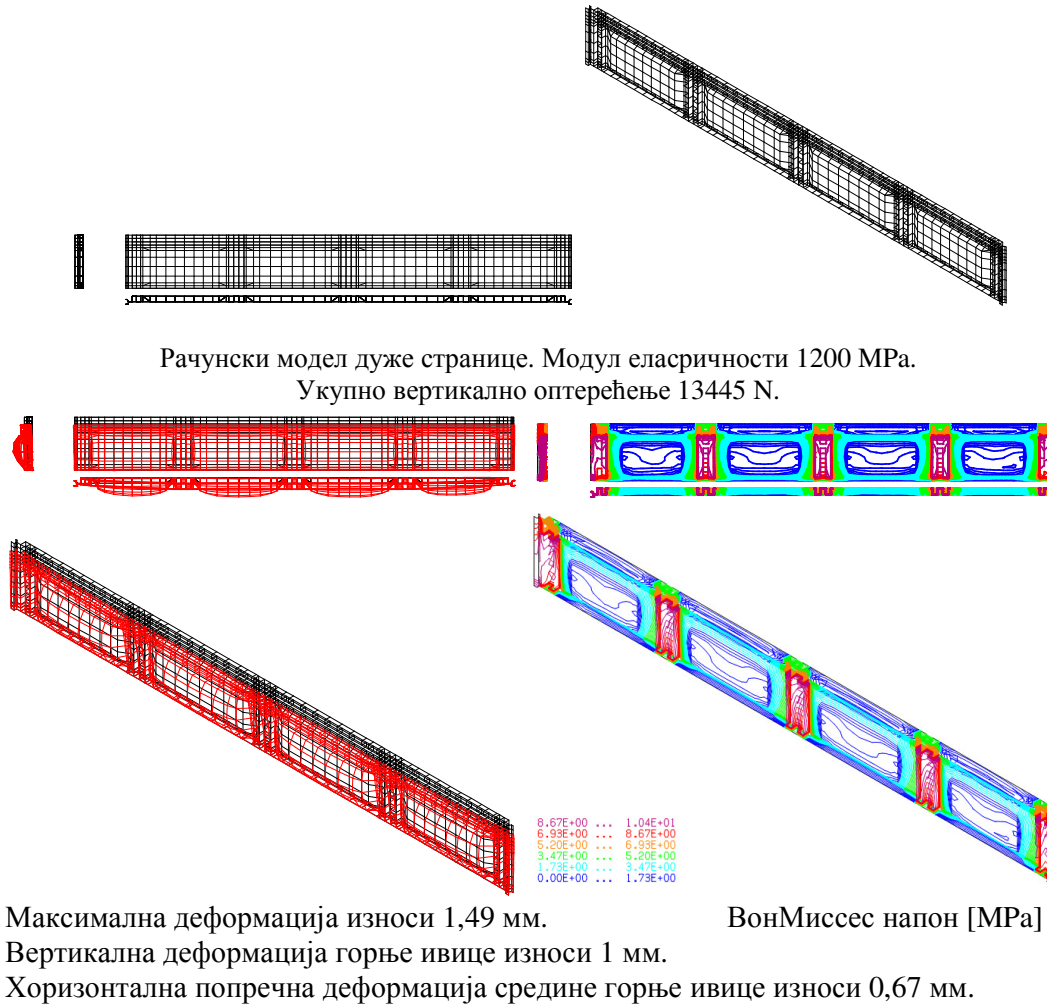
$$F_{izv} = 67.050 \text{ N} \cdot \frac{3,59}{5} = 48.142 \text{ N}.$$

Ово је уједно и максимална носивост целог контејнера.

Процењена сила извијања је експериментално потврђена.

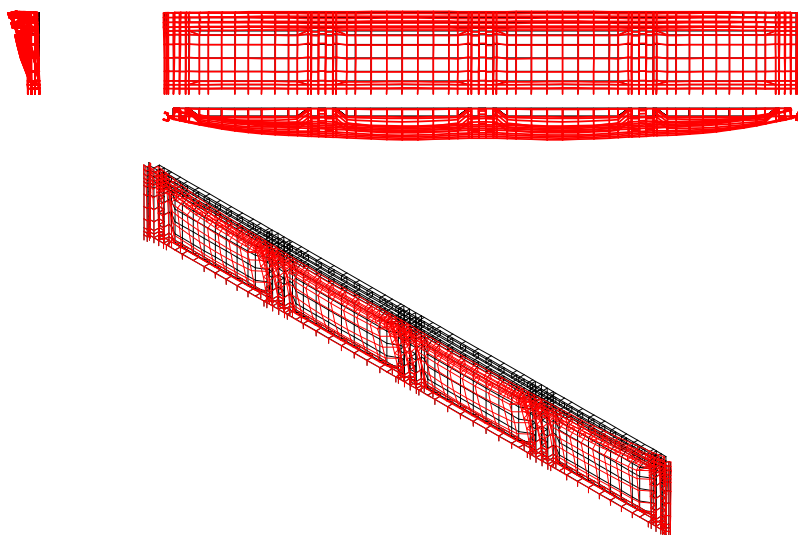
На основу изведене анализе констатујемо да ова дужа страница има повољно понашање јер су статички и динамички фактори већи до 3. Још боље понашање би имали када би оба наведена фактора имали приближно исту вредност.

Следећи пример процене критичне силе извијања изведен је на једној дугачкој страници (L=1200 мм) Цхеп контејнера. Рачунски модел и резултат статичког прорачуна дат је на слици 6.21.



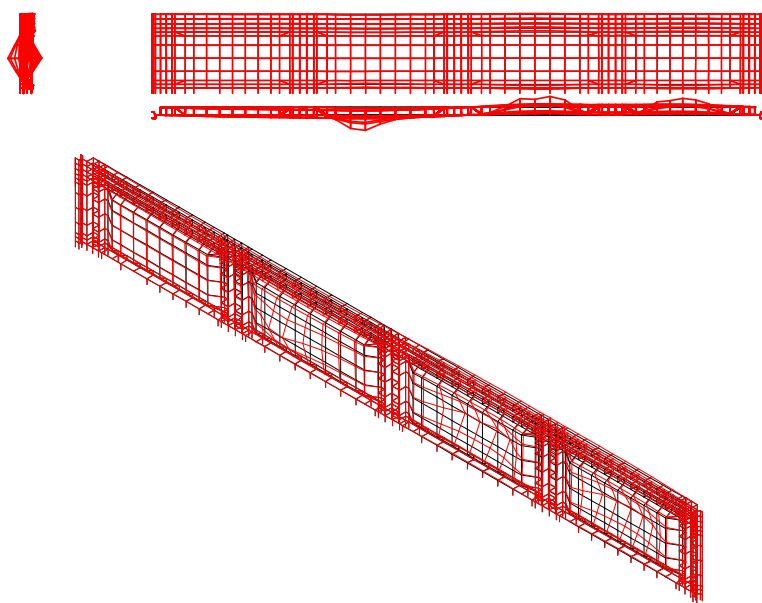
Слика 6.21. Модел и резултат статичког прорачуна дугачке стране Чер контејнера

Приказ прорачуна прва два главна облика осциловања. дат је на слици 6.22. Модул еластичности материјала је усвојен 1200 МПа.



Први облик осциловања. Сопствена фреквенца 2,5 Hz.

Максимална хоризонтално-попечна амплитуда врха странице износи 2,41 мм



Други облик осциловања. Сопствена фреквенца 5,8 Hz.

Максимална хоризонтално-попечна амплитуда врха странице износи 7,8 мм

Слика 6.22. Прва два главна облика осциловања дугачке странице

Носивост дуже странице контејнера на основу статичког прорачуна за вредности чија је граница развлачења материјала од 27 МПа износи

$$13.445 \text{ N} \cdot \frac{27 \text{ МПа}}{10,4 \text{ МПа}} = 34.905 \text{ N}.$$

Ако се усвоји да све странице подједнако носе, носивост целог контејнера ће при томе износити

$$34.905 \cdot \frac{1.200 + 1.200 + 600 + 600}{1.200} = 104.715 \text{ N}.$$

Следи процена силе извијања на основу статичког и динамичког прорачуна. Статички прорачун: однос границе развлачења материјала и максималног Вон

Мессес напона износи $\frac{27 \text{ МПа}}{10,4 \text{ МПа}} = 2,6$. Динамички прорачун: однос максималне

амплитуде осциловања првог главног мода и максималне деформације статичког

прорачуна износи $\frac{2,41 \text{ mm}}{0,67 \text{ mm}} = 6,2$.

Пошто је однос амплитуда 6,2 већи од односа напона 2,6 закључује се да ће прво наступити пластично деформисање па извијање материјала. Процена силе извијање овде није потребна. Усваја се носивост целог контејнера на основу прорачуна напона.

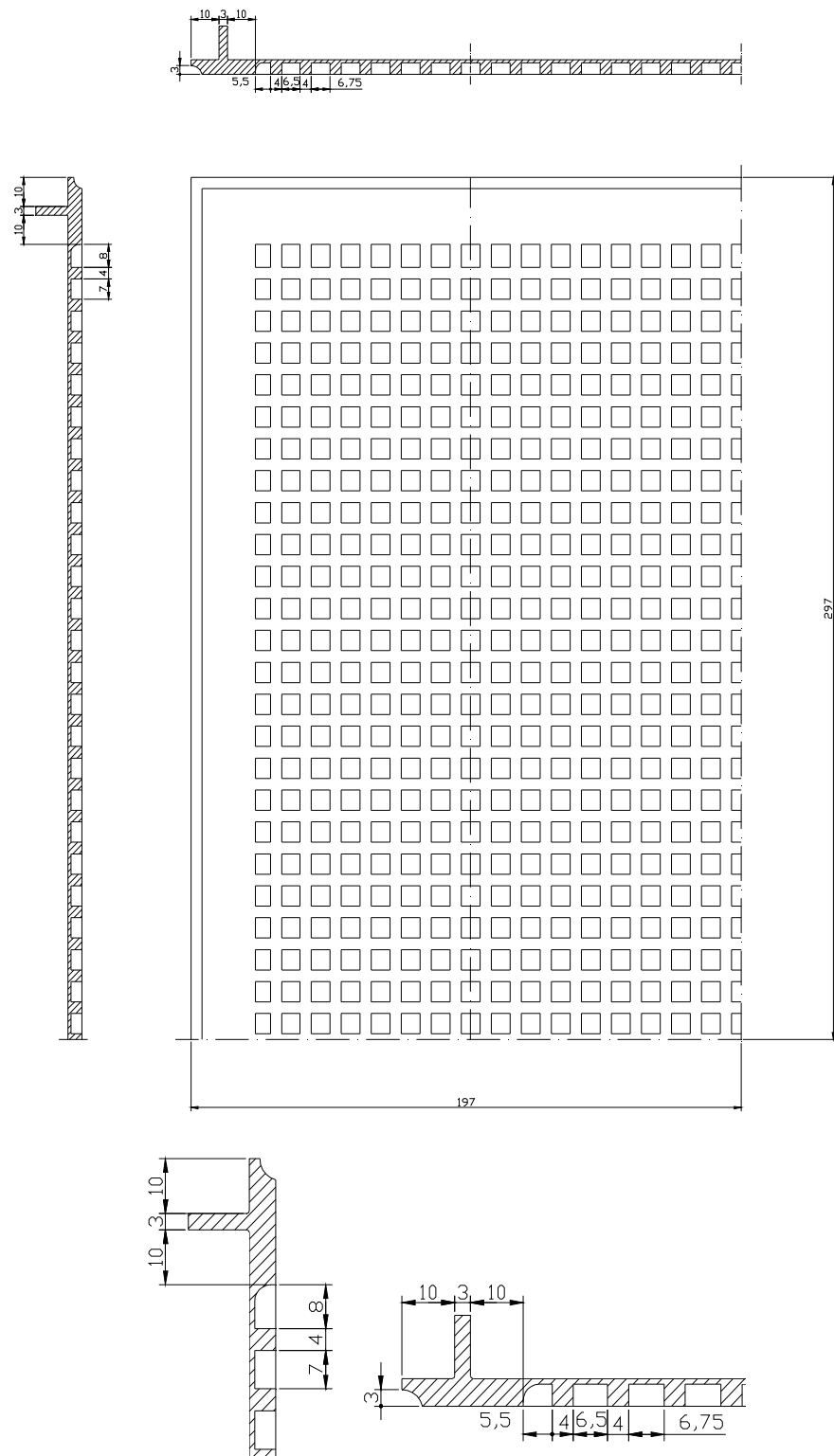
6.5 Дизајн базе и странице контејнера

Дизајн базе и дуже странице контејнера је сада могуће дефинисати на основу изведених прорачун и анализа.

Дизајн базе контејнера дат на слици 6.23 задовољава дефинисана оптерећења и има следеће битне димензије:

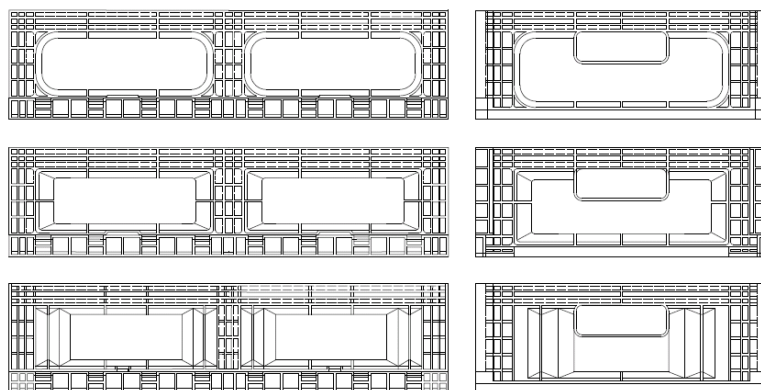
- растер 11x11 мм
- дебљина базе 1 мм

- дебелина и висина ребра 4 мм.

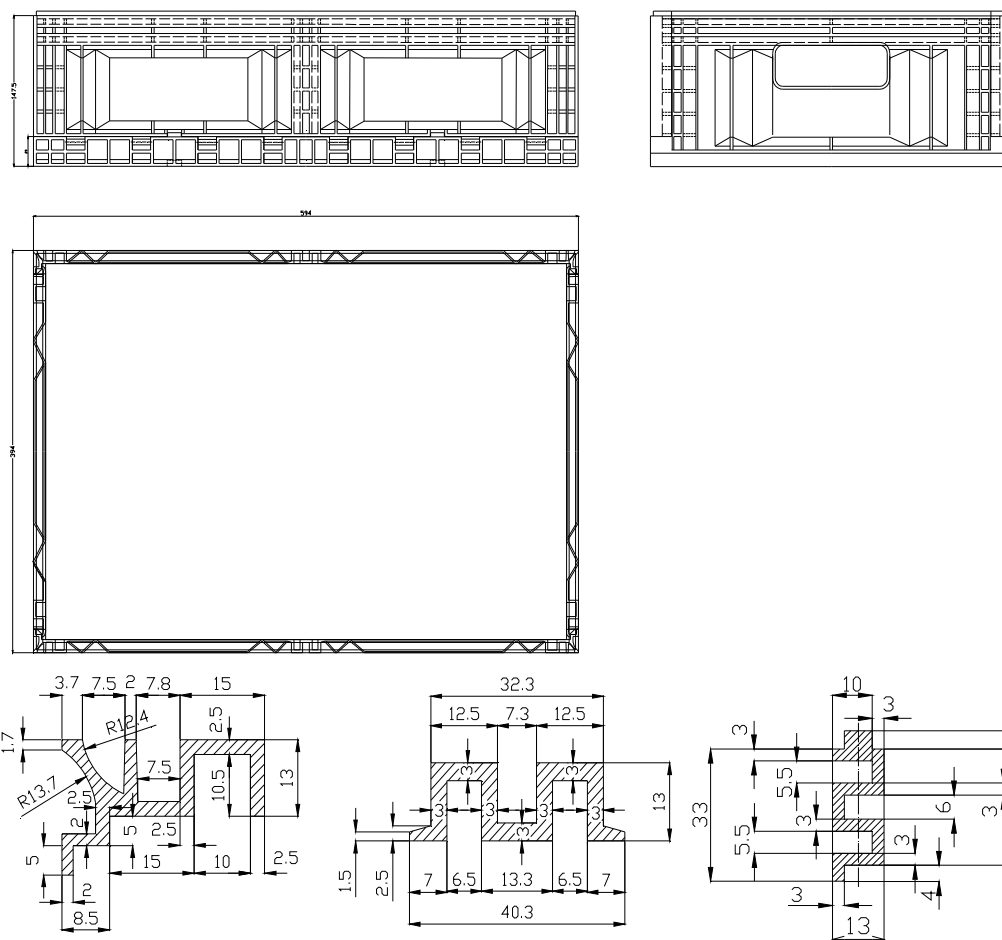


Слика 6.23. База контејнера 600x400

Варијанте дизајна дуже и краће стране контејнера димезија 600х400 мм и димезије једне варијанте дате су на сликама 6.24 до 6.26.



Слика 6.24. Варијанте дизајна дуже и краће стране контејнера 600х400



Ивични вертикални стуб

Вертикални стуб у пољу

Хоризонтална греда на
врху

The technical drawings for the roof structure of the 'Kuća' house are as follows:

- Горња хоризонтална греда (Top horizontal beam):** A plan view showing the layout of the roof beams. Dimensions include a total width of 297, a central section width of 147.5, and a side section width of 197. The height of the side section is 147.5.
- Ивични стуб дуже стране (Eave post on the long side):** A cross-section showing the profile of the eave post. It features a central vertical section with a width of 13 and a total height of 147.5. The side section has a width of 197 and a height of 147.5.
- Ивични стуб краће стране (Eave post on the short side):** A cross-section showing the profile of the eave post. It features a central vertical section with a width of 13 and a total height of 147.5. The side section has a width of 197 and a height of 147.5.

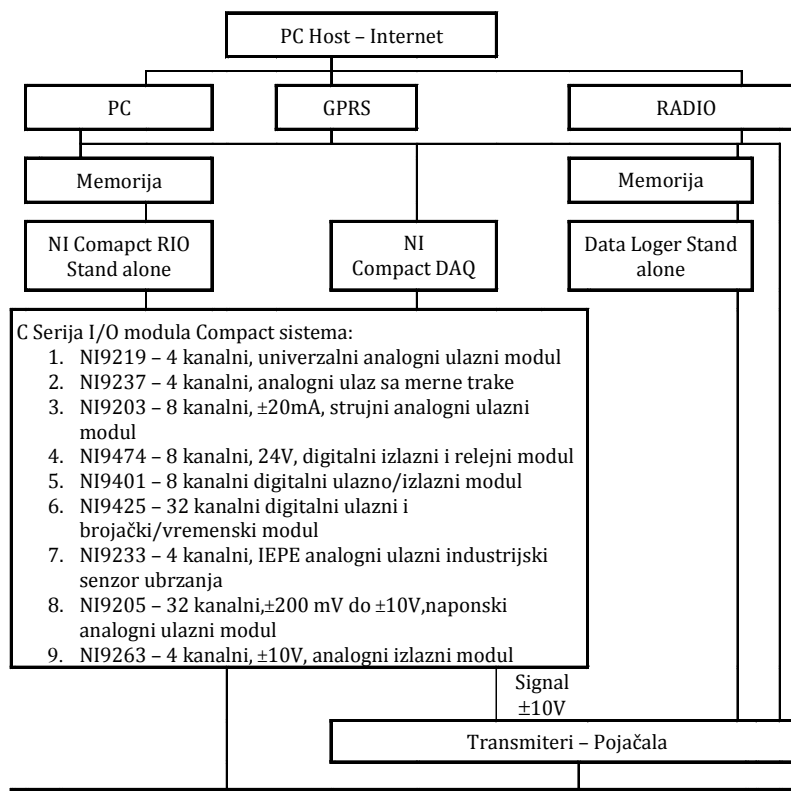
Слика 6.26. Контејнер 400x200x150, стубови и греде дуже странице

7 Експериментално одређивање параметара чврстоће контејнера

Мерења у оквиру овог истраживања спроведена су изведена у Лабораторији за Отпорност конструкција Машинског факултета у Београду на мерно-аквизиционом систему лабораторије и на Технолошко-металуршком факултету у Београду (лабораторија за испитивање материјала).

7.1 Мерно-аквизициони систем Лабораторије за Отпорност конструкција

Мерно-аквизициони систем Лабораторије за мерење напона и деформације Катедре за Отпорност конструкција Машинског факултета у Београд [45] дат је на сликама 7.1 и 7.2.



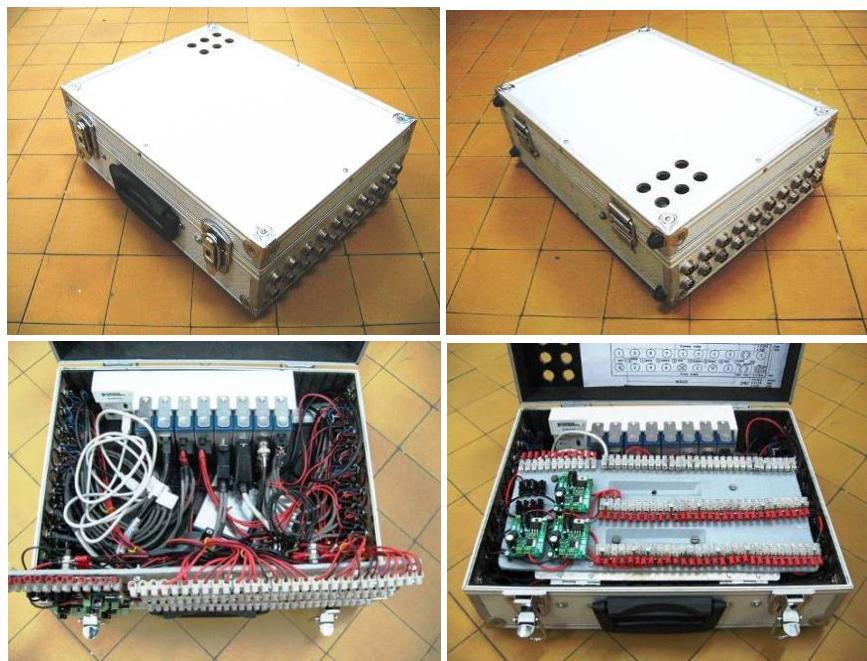
Слика 7.1. Мерно-аквизициони систем лабораторије за мерење напона и деформације [45]

Senzori:

- dinamometri do 400 kN, 2 kom, HBM Nemačka
- dinamometri do 1, 5 i 10 kN, Tiedemann, Austrija
- dinamometar od 50 kN, SHJ, Kina
- dinamometri od 20 i 10 kN, laboratorija OK, Mašinski fakultet Beograd
- senzor temperatura (PT100-200°C i PT1000-600°C), IHTM, Srbija
- laserski senzor-merač temperature
- senzor pritiska fluida (60,120 i 200 bar-a), IHTM, Srbija
- ubrzanje, piezoelektrični 50g, 0,3 Hz do 10 kHz, 4kom, IMI sensors, USA
- ubrzanje, 3g, 1500 Hz, 10 kom, OK, MikroElektronika, Srbija, Analog Device, USA
- induktivni senzor napona, izlaz 0 do 5V, S-DVRT- MAG, MicroStrain, USA
- linearni digitalni senzor dužine od 220, 660 i 1020 mm, SINO, Kina
- ekstenziometrijsko merenje deformacije mernim trakama
- linerani induktivni senzori pomeranja, 6 kom, Micro-epsilon, USA
- magnetni merač rastojanja, 3 kom, Micro-epsilon, USA, Kina
- senzor struje pogona i410, i400 i multimer 87V, Fluke, Nemačka
- senzor struje pogona firme DECODE, Srbija

Слика 7.2. Сензори лабораторије за мерење напона и деформације [45]

Систем аквизиције података Лабораторије за мерење напона и деформације Катедре за Отпорност конструкција приказан је на сликама 7.3 до 7.5.



Слика 7.3. Изглед система аквизиције података [45]



Слика 7.4. NI ComactRIO [46]

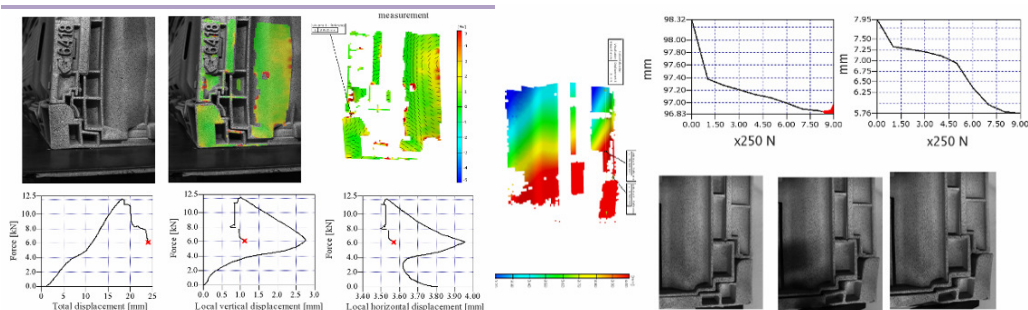


Слика 7.5. Универзални Data Logger, Measurement Computing, MC, LG5326 [47]

Оптичко 3Д мерење статичке и динамичке деформације вршно је коришћењем GOM хардвера и софтвера Aramis, Немачка [48] приказано је на сликама 7.6 и 7.7.



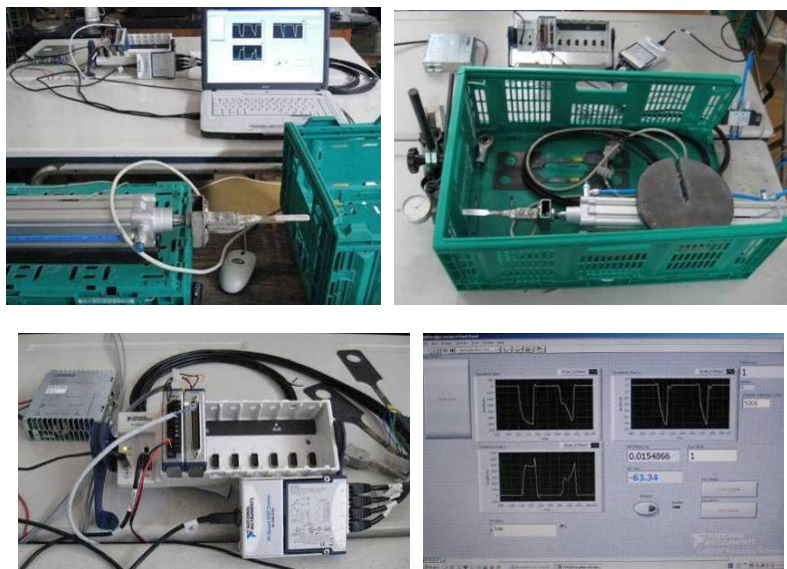
Слика 7.6. ГОМ хардвер и софтвере АРАМИС [48]



Слика 7.7. Пример мерења 3Д оптичког мернеја деформације на контејнерима

Хидрауличку опрему чини: хидраулички цилиндар од 300 kN (700 бар-а) са ходом од 210 мм, хидраулички агрегат, управљачки систем, Enerpack, USA.

Пнеуматску опрему коришћену за мерење силе отварања странице чини: пнеуматски цилиндар $\phi 40 \times 320$ мм (мах. сила 1 kN), регулација, FESTO, Austrija и компресор MAC610 (макита) (слика 7.8).



Слика 7.8. Пример примене: Мерење силе отварања странице и носач папира контејнера

За испитивање тестова притиска коришћена је хидрауличка кидалица приказана на слици 7.9.

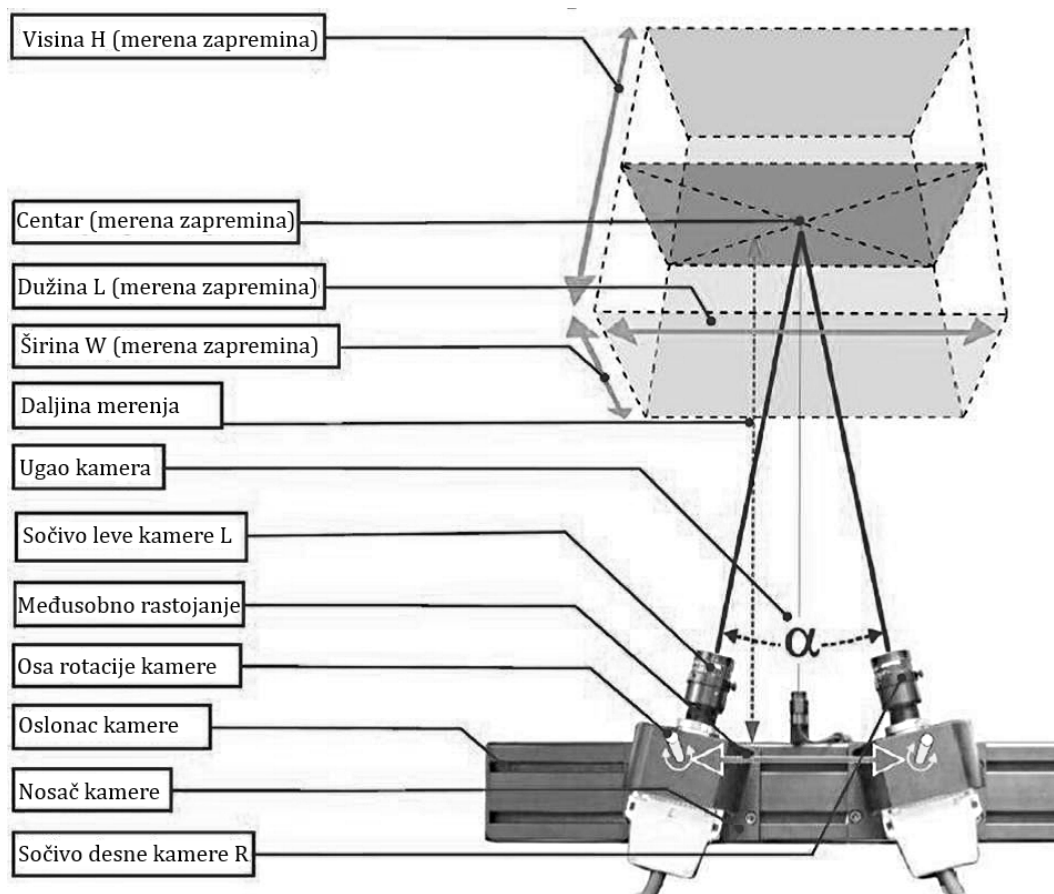


Слика 7.9. Хидрауличка кидалица од 10т ИНСТРОН (Технолошко-металуршки факултет, Београд).

7.2 Gom – Оптичка техника мерења [48]

Пре почетка мерења потребно је изабрати одговарајућу запремину мерења (у даљем тексту мерна запремина) која зависи од димензија мерног објекта, односно од димензија мерне површине. Мерна површина представља површину на којој се

анализира поље померања и деформација и мора да се налази унутар мерне запремине у сваком тренутку снимања. У зависности од величине мерне површине и расположивих сочива, одговарајућа мерна запремина се може изабрати из таблица по упутству произвођача опреме [48]. Изабраном мерном запремином одређује се растојање између сензорске јединице и мерног узорка (слика 7.10). За различите димензије мерних површина потребно је обезбедити одговарајућа сочива за сензорску јединицу.



Слика 7.10. Сензорска јединица и запремина мерења [48]

Калибрација је процес обезбеђивања димензионе конзистенције система за мерење. Калибрација се врши уз помоћ калибрационог тела, које у зависности од димензија мерне запремине може бити плоча или крст. Калибрационе плоче се користе за мале, а калибрациони крстови за велике мерне запремине [48].

Исправна калибрација подразумева одговарајуће подешавање сензора, удаљеност камера од мерног узорка и њихову међусобну оријентисаност. На основу ових подешавања, програм прорачунава њихове 3Д координате на основу референтних тачака калибрационог тела на сликама. Израчунате 3Д координате се затим поново додељују 2Д сликама са камера. Овакав приступ доводи до такозваног одступања референтних тачака и приказивања грешки преклапања, односно позиције референтних тачака. Укупно одступање калибрације се израчунава на основу просечног одступања свих референтних тачака које су снимане током процесa калибрације.

Структура површине је веома важна при припреми мерне површине и реализације мерења. Површина узорка мора да задовољи следеће захтеве:

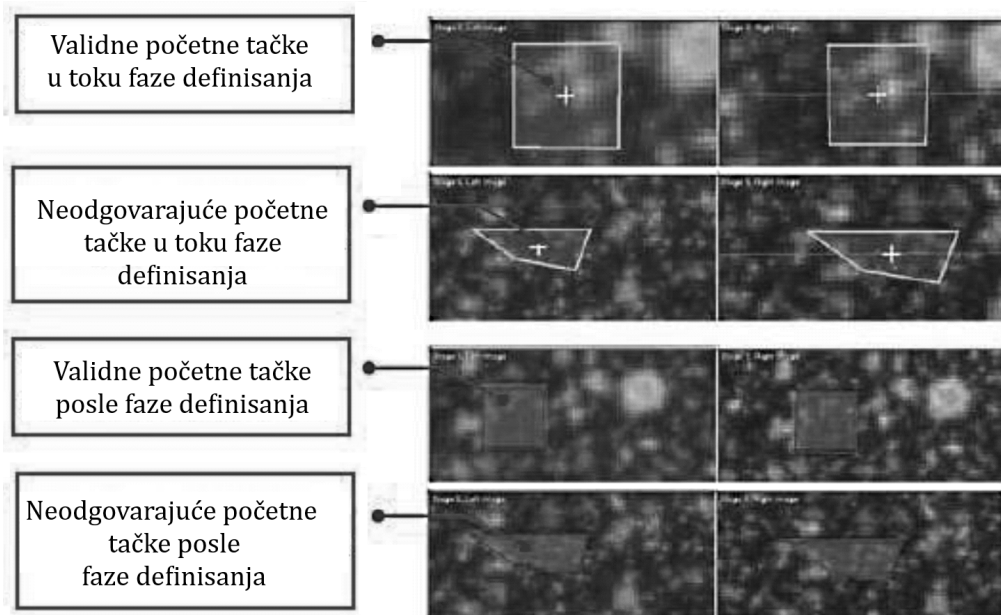
- Површина мерног објекта мора имати нанету фино дисперговану боју, како би се јасно дефинисали пиксели на сликама снимљеним камерама. Из тог разлога, област пиксела на референтној слици може бити додељена одговарајућој области пиксела на наредној слици.
- Нанета диспергована боја мора пратити контуру мерне површине, не сме се разливати и ломити.
- Оптимална површина је релативно равна. Изразито храпаве површине могу направити проблем при одређивању малих површина и прорачуна 3Д тачака.
- Нанета диспергована боја на узорку мора да има добар контраст, јер у супротном додељивање пиксела неће бити успешно.
- Нанета диспергована боја на површини мора бити мат, како би се елиминисала појава рефлексije. Рефлектована светлост изазива лош контраст и разлику у осветљењу између леве и десне камере, која није пожељна и даје лоше резултате при прорачуну малих површина у областима где се она јавља.

Мање мерне запремине захтевају финију шару од великих. Да би се проверило да ли је постигнута одговарајућа шара за одређену контролну запремину, потребно је добијене упоредити са референтним шарама препоручених од стране произвођача. Прихватљивост припремљене мерне површине се може одредити помоћу компјутерског екрана.

Димензије малих површина коришћених у овом истраживању су 15x13 пиксела за све узорке и та димензија представља оптималан однос између времена и тачности прорачуна.

Прорачунски оквир омогућава програму да изведе прорачун малих површина у областима дефинисаних 2Д слика са камера. Са прорачунским оквиром је омогућено да само области које су релевантне за деформацију буду прорачунате. Тачан 3Д прорачун и одређивање деформација није могуће за ивице узорка и нагле скокове у контури, јер се 3Д прорачун мерних тачака заснива на малим површинама које морају да се виде и на левој и на десној камери са својим одговарајућим шарама.

За прорачун малих површина у свим корацима дефинисане су почетне тачке. У општем случају, почетна тачка се односи на исту малу површину у свим корацима. Почетна тачка је израчуната мала површина. На слици 7.11, на основу произвођача, приказан је пример добро и лоше дефинисане почетне тачке у пројекту [48].



Слика 7.11. Пример одговарајуће и неодговарајуће дефинисане почетне тачке[48]

При одабиру почетних тачака посебна пажња је посвећена томе да унутар мале површине буде оговарајућа шара. Такође, да позиција почетних тачака не улази у поље највећих померања, како оне не би напустиле видно поље једне од камера у свим корацима снимања.

Прорачун малих површина захтева координате почетних тачака у свим корацима. Величина мале површине одређена је при дефинисању поља малих површина при започињању сваког новог пројекта.

Прорачун почиње у нултом кораку. При дефинисању почетне тачке, програм препознаје позицију почетне тачке и њених суседних почетних тачака на 2Д сликама. Идентификацијом појединачних шара малих површина на левој и на десној слици са камера, квадратна област је оптимизирана. Из резултујућих координата почетне тачке са 2Д слика леве и десне камере, израчуната је 3Д позиција почетне тачке.

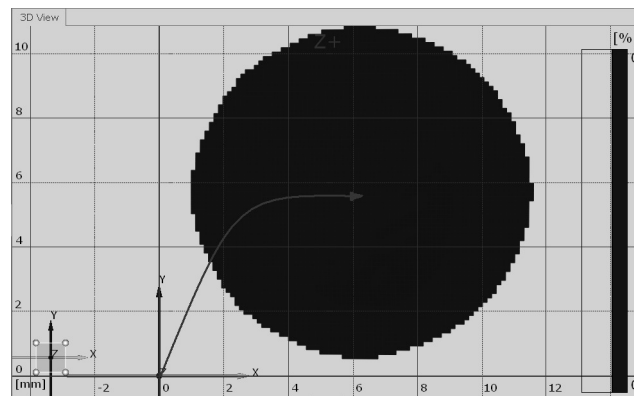
После прорачуна 3Д позиције у једном кораку, програм аутоматски прелази на други корак. Овде је такође позната почетна позиција мале површине због дефинисане почетне тачке. Прорачун 3Д позиције мале површине урађен је поново. Резултати прорачуна деформације произилазе из померања 3Д тачака.

После покретања новог пројекта и дефинисања његових параметара, *Aramis* аутоматски прелази у *Projektni mod.* У овом моду је калибрисан систем и снимане су слике. После снимања, слике су припремане за прорачун. За ову сврху, дефинисан је оквир на левој слици нултог корака за недеформисано стање при чему је одређена мерна област (зелена област) узорка која ће бити узета у обзир за прорачун. Након дефинисања мерне области, ручно и аутоматски су дефинисане почетне тачке. Након прорачуна узорка, мод за израчунавање (*Evaluation mode*) се аутоматски активира. У овом моду, сви добијени резултати деформација/померања су визуелно приказани по целој мерној површини узорка. Да би се разумело понашање испитиваног узорка, у овој дисертацији коришћене су разне алатке као што су пресеци (*section*), карактеристичне тачке (*поинт*),

мерења растојања (*point-point distance*). У овом моду, резултати за репрезентативне узорке су представљени у извештајима типа *Aramis report*.

ARAMIS систем је у могућности да уклони нежељено кретање 3Д тачака крутих тела у узорку. Корекција померања (*movement correction*) представља трансформацију оба корака пројекта без утицаја на глобални координатни систем. Ово је веома корисна алатка за анализу померања материјала у узорку [48].

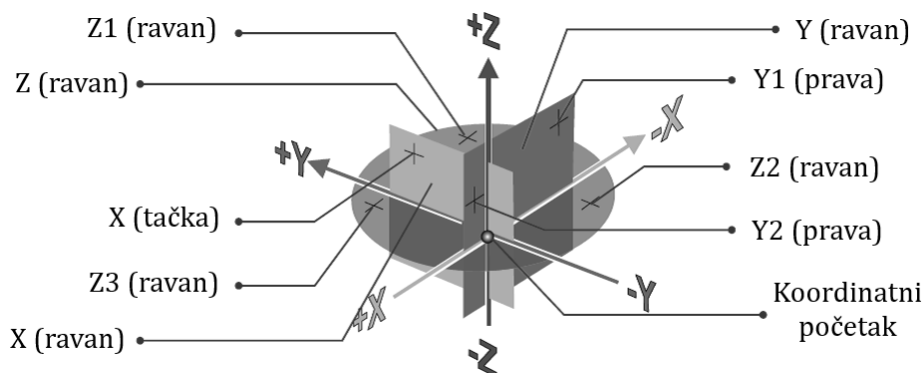
Позиција координатног система при обради резултата у програму *Арамис* често је дефинисана калибрацијом система и нема логичку везу са мерним узорком. Резултати визуализовани на тај начин често могу да доведу у забуну кориснике резултата, па је на основу тога, у овој анализи извршена трансформација координатног система 3-2-1. Пошто су вредности свих тачака дате у аутоматски креираном локалном координатном систему, неопходно је извршити трансформацију координата и превести их у глобални координатни систем (слика 7.12). Како су локални и глобални систем ортогонални, трансформација координата је релативно једноставна.



Слика 7.12. Трансформација координатног система

Ознака 3-2-1 значи да три 3Д тачке (31, 32, 33, које се налазе што даље једна од друге и нису на истој линији) дефинишу раван, две додатне 3Д тачке (Y1, Y2, које се налазе што даље једна од друге по X правцу) описују праву и дефинишу Y раван, и тачка X1 дефинише X раван (X-зелена раван). У пресеку све три равни је координатни почетак дефинисаног система. Слика 7.13, илуструје везе између

тачака, правих и равни. Могуће су и варијације за одређивање координатног система као што је на пример XXX-YY-3.



Слика 7.13. Позиционирање координатног система трансформацијом 3-2-1.

Смер 3 осе (позитиван или негативан) зависи од редоследа којим су дефинисане три референтне тачке. Правац проистиче из редоследа тачака и последичног „осећаја ротације“ дефинисане равни. Независно од овога, смер 3 осе (позитиван или негативан) може се дефинисати независно од редоследа избора референтних тачака. Смер Y осе (позитиван или негативан) такође зависи од редоследа којим се дефинишу две Y референтне тачке и добија се дефинисањем обе тачке праве. Смер Y осе може такође бити одређен независно од редоследа избора тачака. Преостала X оса се дефинише тако што изабрана тачка треба да формира правоугли Декартов координатни систем.

После прорачуна, добијени подаци су доступни у 2Д и 3Д облику у сваком кораку. Пре сређивања резултата, потребно је одабрати одговарајући начин представљања 3Д резултата. За приказивање резултата у дијаграмима и 3Д моделу могу се направити тачке корака, секције (секције равни, кружне секције, параметарске секције) и примитиви. Програм омогућава издвајање прорачунатих 3Д података.

7.3 Мерење деформације база

Прво испитивање деформације база вршене је применом оловних тегова тежине $2 \times 17 \text{ daN} = 34 \text{ daN}$ (слика 7.14). Деформација је мерења механичким компаратерима.

Контејнери који су испитивани и настале деформације наведене су у табели 7.1.



Слика 7.14. Мерење деформације база са оловним теговима

Табела 7.1. Мереје деформације база

	Контејнер	Деформација [мм]
1	10934 - цео контејнер на 2 дуже ивице	23
2	Арца Цлассиц - цео контејнер на 2 дуже ивице	15
3	6422 - само база на 4 ивице	20
4	10934 - цео контејнер на 4 ивице	18
5	Контејнер за месо - само база на 4 ивице	15
6	Тонтарели олд 110 - цео контејнер на 4 ивице	15
7	Цхеп К4 - цео контејнер на 4 ивице	8

Наредно мерење деформације база вршено је са теретом од четири кесе са песком тежине по 5 кг. На слици 7.15 приказано је мерење деформације базе. Деформација је мерења механичким компаратерима.

Резултати мерења дати су у табели 7.2. Мерење деформације базе је неопходно да се изводи у дужем временском периоду оптерећене базе.



Слика 7.15. Мерење деформације база

Табела 7.2. Деформација база за 24h

Деформације базе [мм]	Време			
	0 мин	10 мин	12 h	24 h
Узорак 1	9,5	10,55	13,15	-
Узорак 2	9,5	10,5	13,2	-
Узорак 3	10	11,1	13,1	14,6
Узорак 4	10,1	11,6	13,5	15,75

7.4 Мерење бочне деформације дуже странице

Мерење бочне деформације је преузето директно од произвођача контејнера [9] (Тонтарелли 6418). Приказ мерења дат је на слици 7.16 и у табели 7.3.



Слика 7.16. Мерење бочне деформације странице

Табела 7.3. Тонтарелли 6418

Опис теста	Број понављања	Резултати	Циљ
Оптерећење: 18 кг; Трајање: 24 h	3	10,8 мм	10 мм

7.5 Вертикални притисак са извијањем контејнера

Циљ овог теста је добијање одговора на следећа основна питања:

- колика је сила потребна за појаву пластичних деформација
- колика је сила потребна за појаву извијања
- до које промене прво долази, пластичне деформације или извијања.

Оптималан дизајн контејнера обезбеђује да се прво појави пластична деформација елемената контејнера.

Овај тест је изведен на кидалици Инстрон користећи две методе и то:

- конвенционалном методом мерења силе и деформације
- 3Д оптичко мерење поља деформације.

Након првог метода добија се дијаграм сила-деформација за цео контејнер. Други метод омогућава добијање 3Д поља деформације дела контејнера. На наредној слици дат је приказ опреме на којој су изведени сви тестови притиска контејнера.

За овај тест узет је исти модел Tontarelli контејнера чије су димензије 600x400x189 мм. Изабране су две групе од по 5 контејнера за два пута по четири теста и то:

- прва група – контејнер 2, контејнер 4, контејнер 3, контејнер 1+3 (слика 7.17)
- друга група – контејнер 1, контејнер 2, контејнер 3, контејнер 4+5 (сл. 7.18).

Анализом резултата мерења долази се до следећих закључака:

- функција сила-деформација има нелинеаран карактер
- нелинеарност наведене функције потиче од постојања зазора између страница и базе и промене начина преноса оптерећења
- извијање контејнера почиње да се јавља много пре појаве пластичне деформације, односно носивост контејнера је смањена за скоро 50%
- све функције се међусобно знатно разликују тако да је за овај тип контејнера потребно извршити више тестова.

Контејнер број 2



Контејнер 4



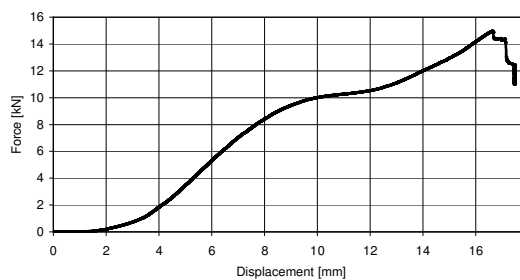
Контејнер број 5



Контејнер 1+3

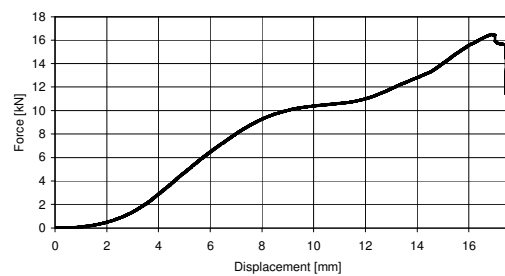


Контејнер број 2

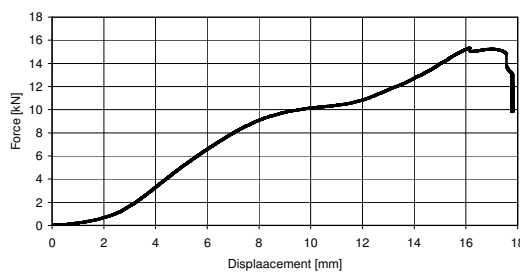


Коментар: извијање наступа на око 10 kN
Контејнер број 5

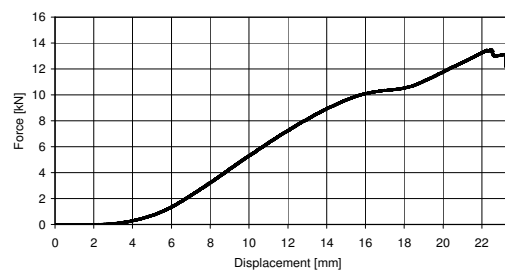
Контејнер 4



Коментар: извијање настаје око 10,5 kN
Контејнер 1+3



Коментар: извијање наступа на око 10,2 kN



Коментар: извијање наступа на око 10,4kN

Слика 7.17. Сlike и резултати мерења прве групе Tontarelli контејнера

Контејнер 1



Контејнер 2



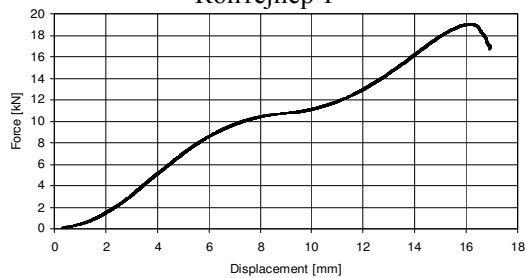
Контејнер 3



Контејнер 4 и 5

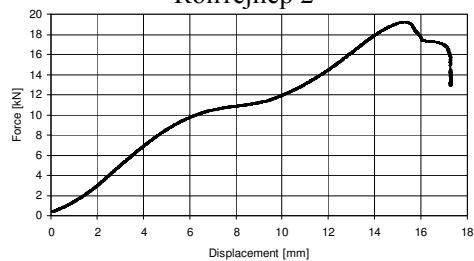


Контејнер 1



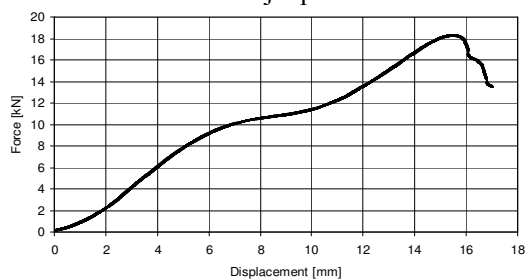
Коментар: извијање наступа на око 11 kN

Контејнер 2



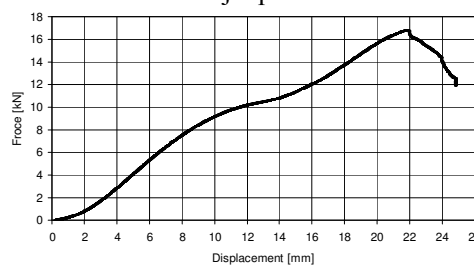
Коментар: извијање наступа на око 11 kN

Контејнер 3



Коментар: извијање наступа на око 11 kN

Контејнер 4 и 5

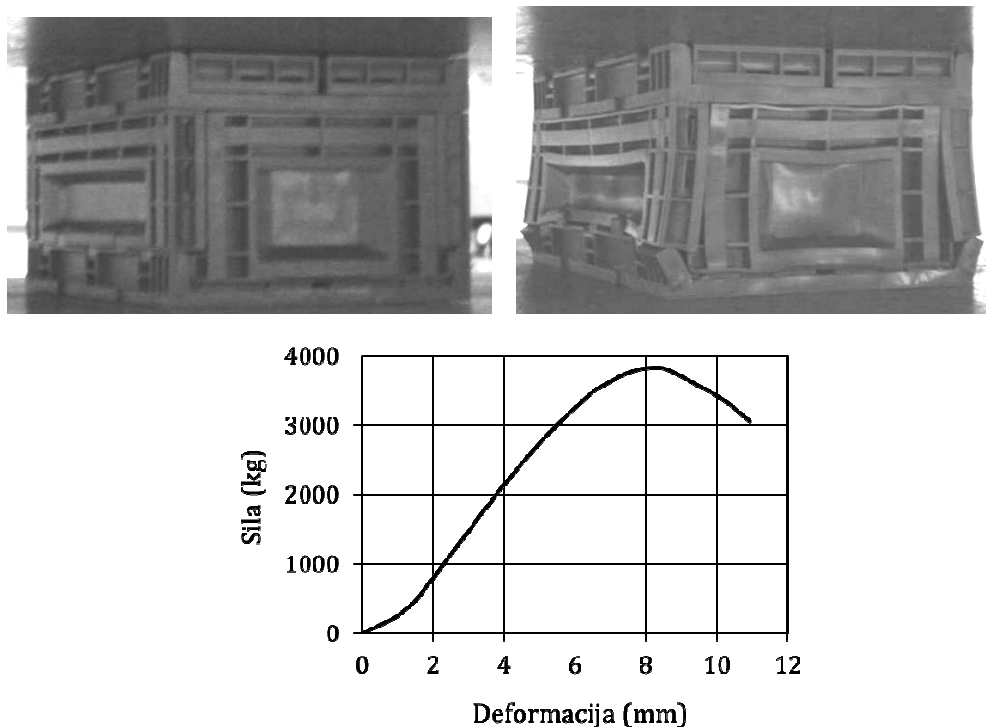


Коментар: извијање наступа на око 10,5 kN

Слика 7.18. Сlike и резултати мерења друге групе Tontarelli контејнера

Следи приказ мерења притисне силе и деформације Cher контејнера модел K1 (димензије 300x200x116 мм) и модел K4 (димензије 600x400x232 мм).

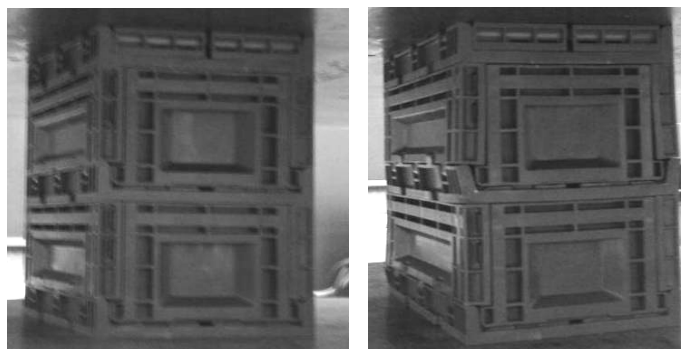
Слике и резултат мерења притиска Cher контејнера K1 за један склопљен и један расклопљен дати су на слици 7.19.



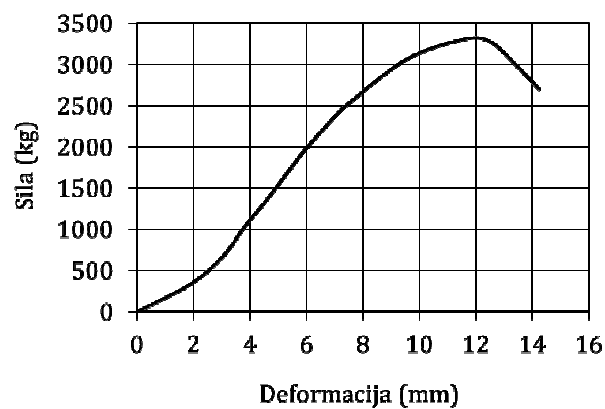
Максимална сила = 3825 кг, деформација = 8,38 мм

Слика 7.19. Слике и резултат мерења притиска Cher контејнера K1

Слике и резултат мерења притиска Cher контејнера K1 за два расклопљена дати су на слици 7.20.



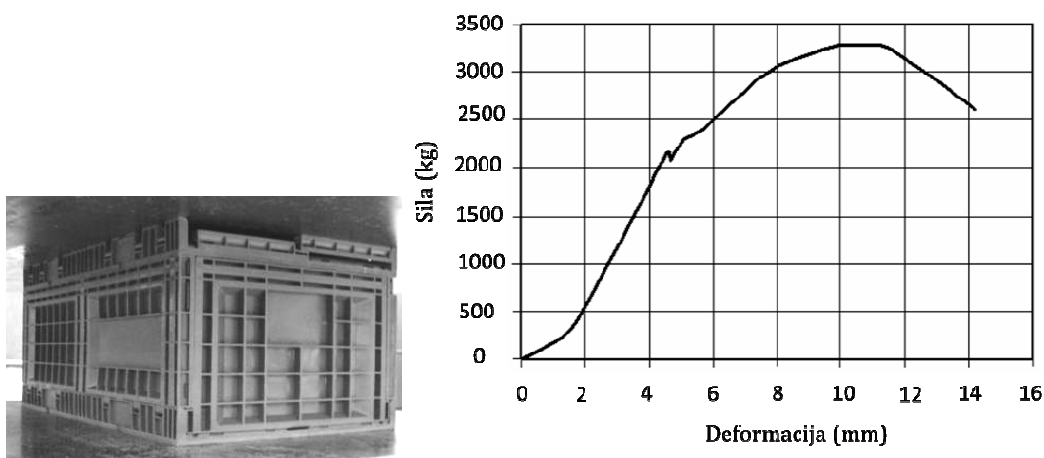
Слика 7.20а.



Максимална сила = 3294 кг, деформација = 11,43 мм

Слика 7.20. Слика и резултат мерења притиска два расклопљена Чер контејнера К1

Слика и резултат мерења притиска Цхеп контејнера К4 за један склопљен и један расклопљен дати су на слици 7.21.



Максимална сила = 3262 кг, деформација = 11,43 мм

Слика 7.21. Слика и резултат мерења притиска Чер контејнера К4

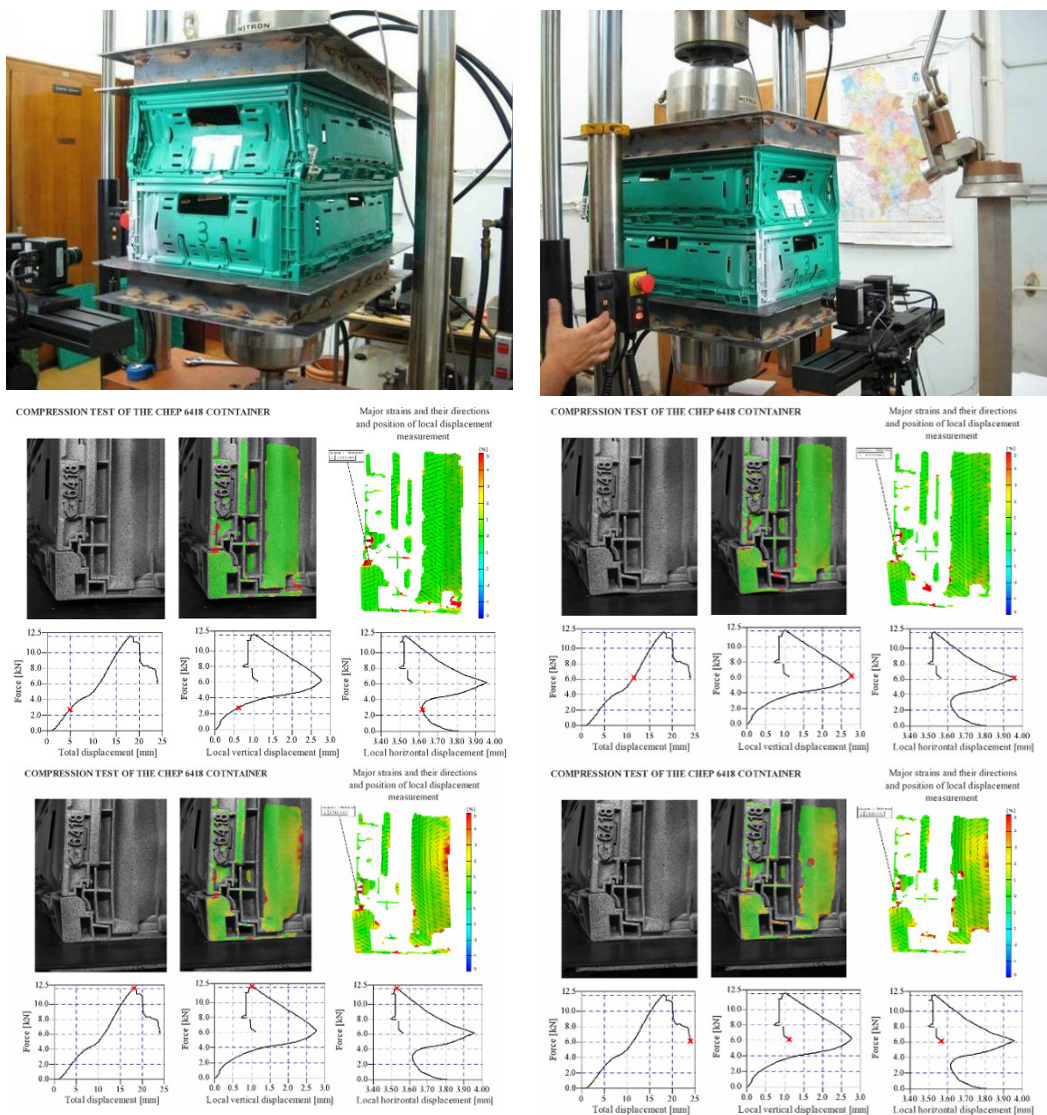
Можемо констатовати веома добро понашање оба контејнера. Извијање засигурно настаје после појаве пластичне деформација која је изазвана веома великом притисним оптерећењем. Максимална притисна сила са фактором сигурности 3 за ове контејнере износи 10 кН.

7.6 3Д оптичко мерење поља деформације

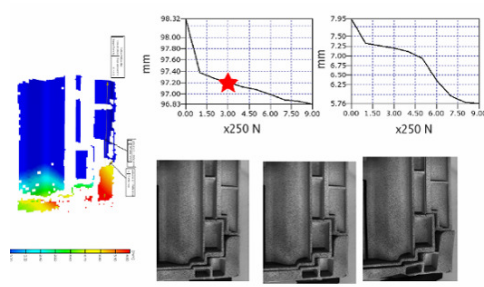
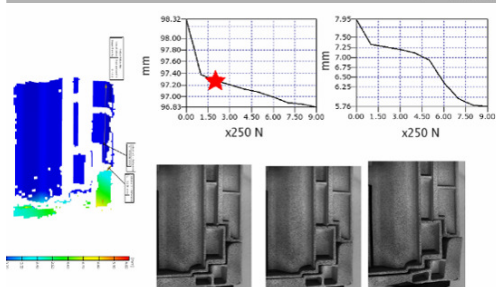
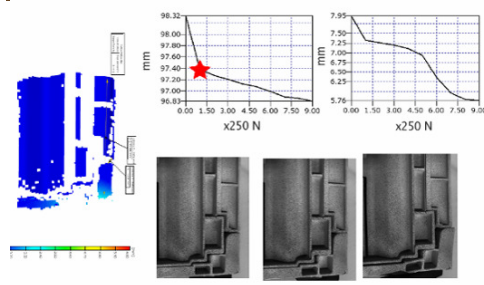
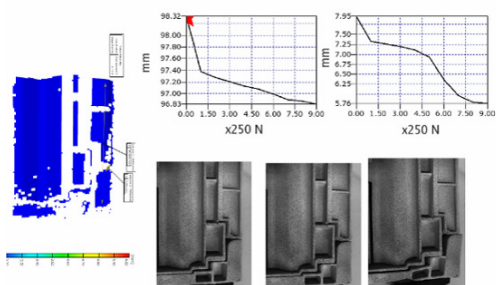
За овај тест узети су модели контејнера димензија 600x400x180 мм. Модели су:

- први модел Tontarelli 6418
- други модел Tontarelli 110
- трећи модел – контејнер КЗ Чер.

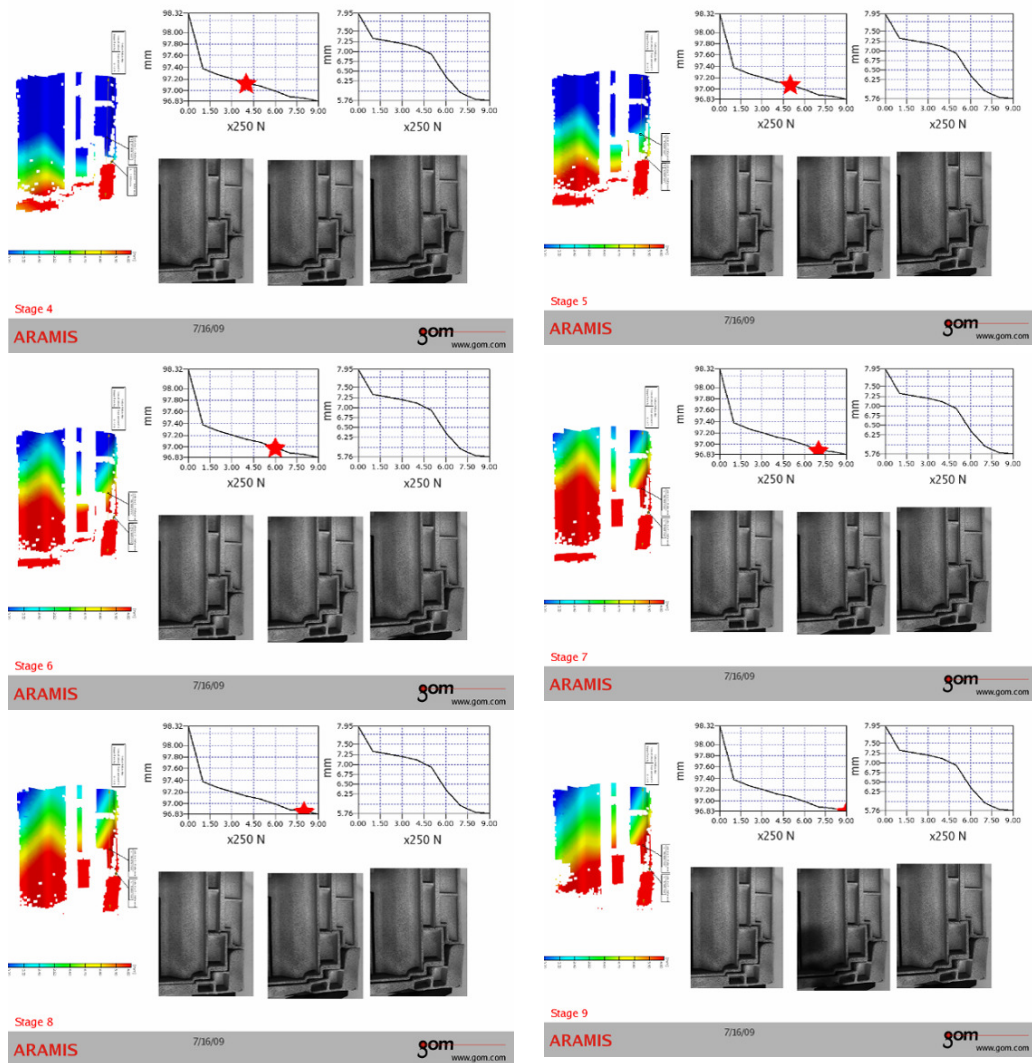
На наредним сликама дати су изгледи и резултати тестова.



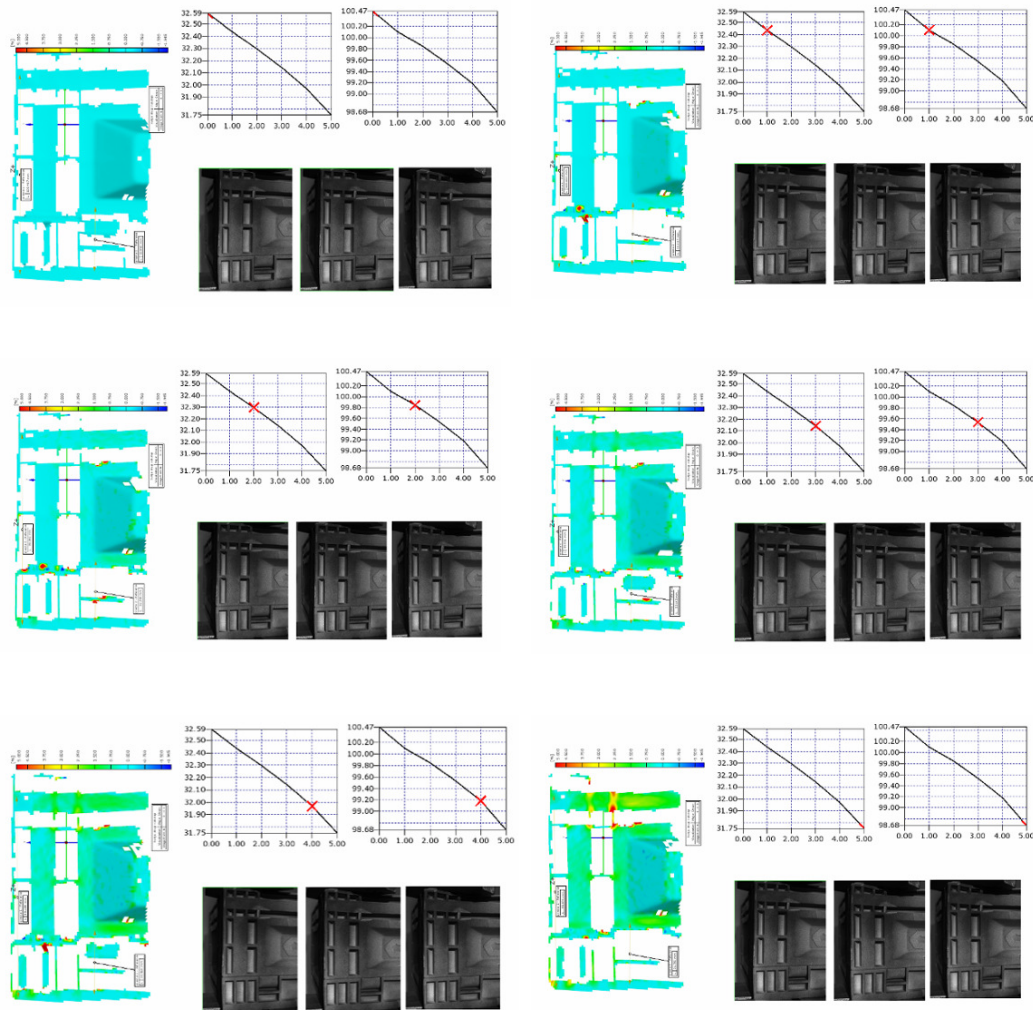
Слика 7.22. Сlike мерења и резултати мерења првог модела Tontarelli 6418 контејнера



Слика 7.23а.



Слика 7.23. Сlike мерења и резултати мерења другог модела Tontarelli 110 контејнера



Слика 7.24. Резултати мерења тречег Шер модела К3

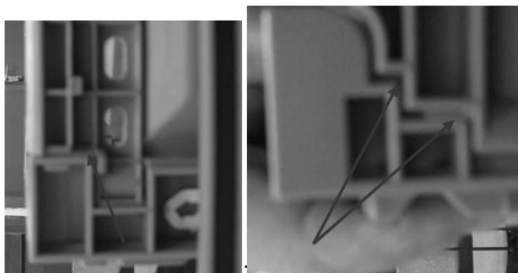
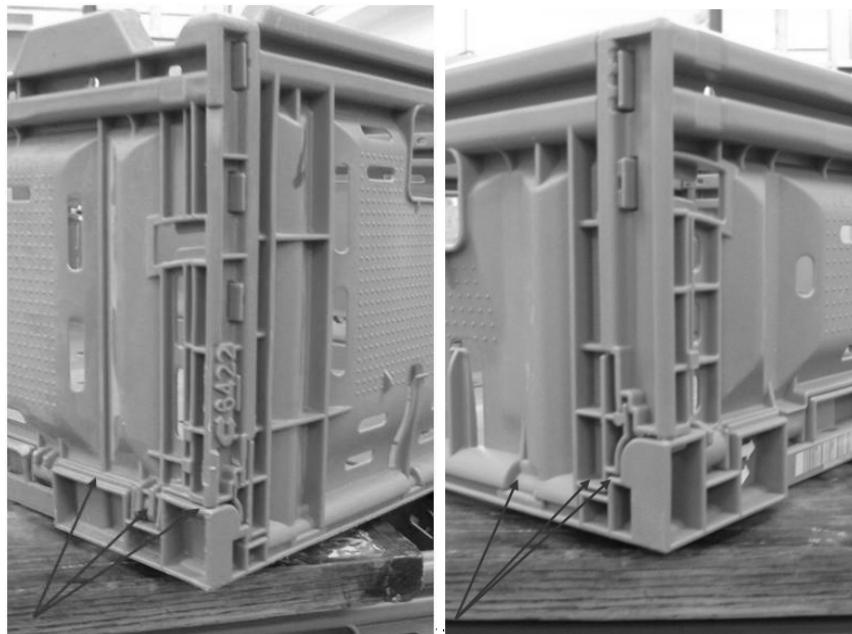
Анализа резултата мерења даје следеће закључке:

- функција сила-деформација има нелинеаран карактер код прва два модела док је код трећег линеарна
- нелинеарност наведене функције потиче од постојања зазора између страница и базе и промене начина преноса оптерећења
- извијање контејнера код прва два модела почиње да се јавља много пре појаве пластичне деформације (за други модел потврђени резултати из претходног поглавља)

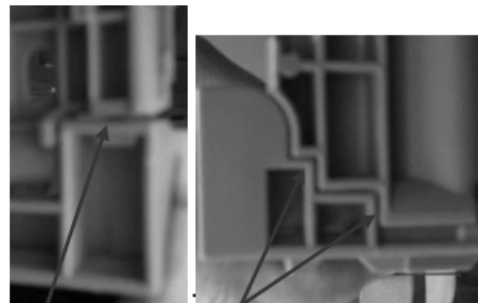
- код трећег модела може се констатовати да ће се извијање и пластична деформација појавити истовремено, односно дизајн контејнера је добар.

Овај тест је потребно обавезно увек изводити када имамо нелинеарну функцију сила-деформација. За контејнере који имају линеарну функцију потребан је само један тест за валидацију са прорачуном.

На основу теста са прва два контејнера можемо закључити да они имају проблем преноса оптерећења са страница на базу. Опис тих проблема дати су на слици 7.25.



Места где се проблеми јављају на дужој страници



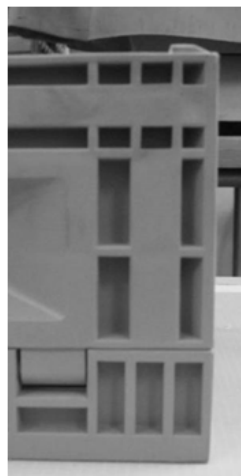
Места где се проблеми јављају на краћој страници

Слика 7.25. Опис проблема.

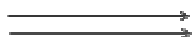
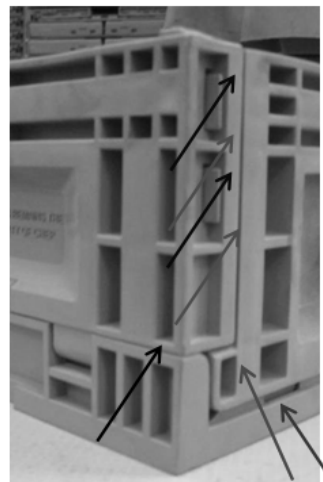
Добре особине трећег модела контејнера (Сher К3) приказане су на слици 7.26.



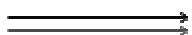
Краћа страница



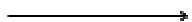
Дужа страница



Ослањање краће странице са дужом и базом. Шарке нису укључене.



Постоји зазор са горње стране зуба, док са доње не постоји. Ово је добро јер при дизању дуже и спуштању краће странице (проСес одбрављивања) нема релативног кретања између дуже и краће странице. Такође нема зазора између краће странице и базе.



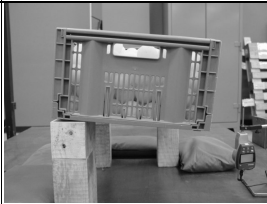
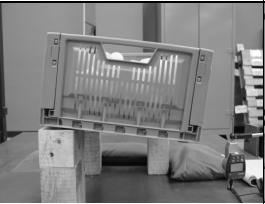
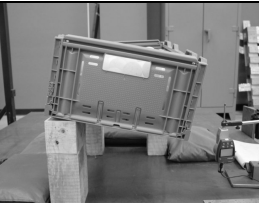
Ослањање дуже странице са базом. Шарке нису укључене.

Слика 7.26. Добре особине Сher контејнера К3

7.6 Савијање контејнера ослоњеног на три тачке

Опис теста: склопиви пластични контејнер напуњен са 20 пластичних сфера и ослоњен на 3 угла. Мерење савијања врши се на неослоњеном ћошку. Мерење се врши 10 секунди након постављања контејнера на ослонце (табела 7.4).

Табела 7.4. Тест торзионе крутости контејнера

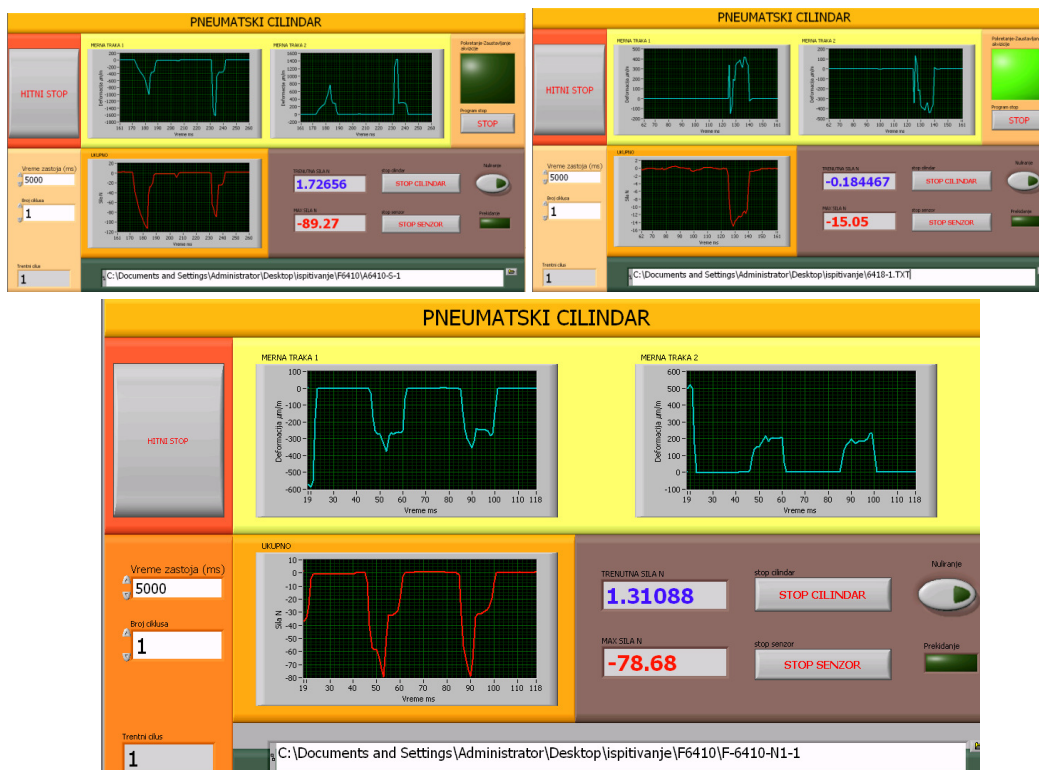
Деформација (мм)	Tontarelli 110	Arca 110	Tontarelli 6422
1	34	44	61
2	34	41	57
3	35	44	58
Средња вредност	34	43	59
			

7.7 Сила отварања странице контејнера

Развој и реализација мерења силе отварања странице контејнера изведена је у Лабораторији за Отпорност конструкција на Машинском факултету Универзитета у Београду.

Опрема и софтвер приказани на наредним сликама су:

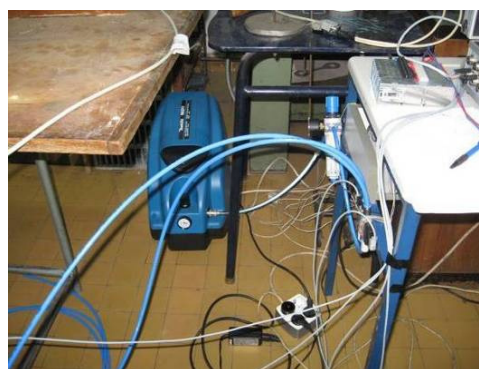
- NI hardware CompactDAQ – аналогни улази, аналогни излази, дигитални улази, дигитални излази, кондиционери за мерне траке
- Пнеуматски цилиндар са силом до 80 daN, електромагнетни вентили, електромагнетни граничници, компрсор ваздуха Makita
- Развијени софтвер у LabView окружењу (слика 7.29), управљање цилиндром, мерење силе на обе мерне траке и израчунавање силе отварања контејнера
- Развијени динамометар са две мерне траке за силе до 80 daN (слика 7.30)
- Радни сто и опрема за стежање контејнера (слика 7.31)
- Мерење се обавља са контејнерима чија је температура 0°C и 20°C.



Слика 7.29. Изглед екрана софтвера за време мерења



Слика 7.30. Развијени динамометар за мерење силе отварања страница



Слика 7.31. Развијени систем за мерење силе отварања страница

Сила отварања странице контејнера се добија тако што се резултати мерења горње и доње траке динамометра саберу и поделе са два. Ово је неопходно јер се елемент динамометра на коме су постављене мерне траке савија током отварања странице контејнера. На овај начин меримо само притисну силу, односно елиминишемо утицај савијања елемента динамометра.

Мерење силе отварања странице контејнера је изведено на великом броју различитих контејнера и на великом броју контејнера у оквиру једног модела. Мерење на једном контејнеру у једном углу понављано је више пута да би се утврдио карактер смањења силе отварања странице контејнера. Мерење је обављено са две различите температуре контејнера и то:

- собна температура 20 до 25°C
- расхлађени контејнери на температури 0 до 5°C.

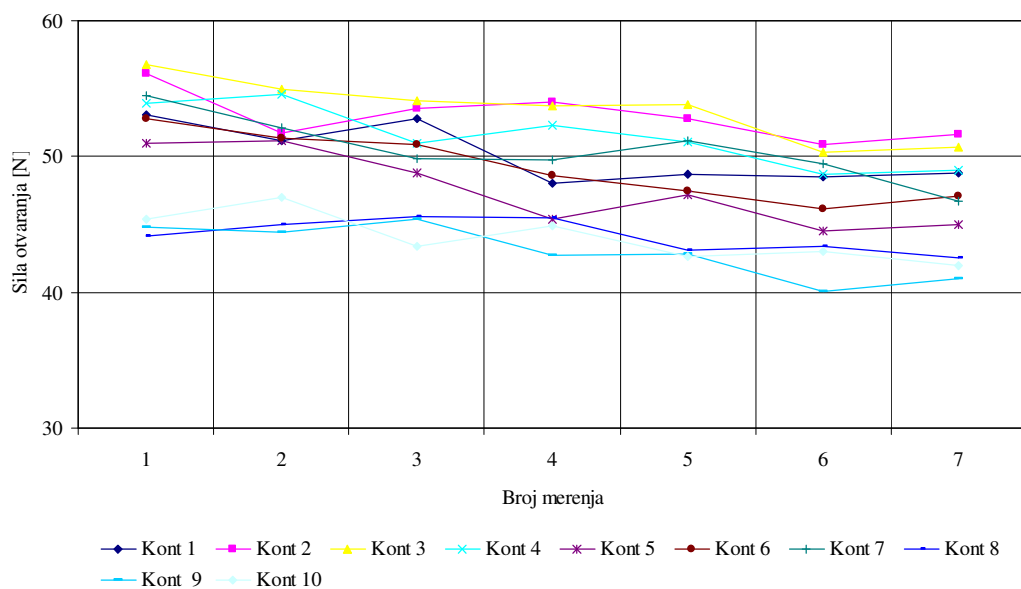
Постављање контејнера у позицију за испитивање и затварање странице контејнера извођено је ручно. Циклуси мерења су извођени аутоматски, а време застоја између два мерења се пре почетка мерења уносио у програм.

За манипулацију са контејнером сила отварања странице контејнера је веома битна у свом износу код новог контејнера и њена промена за време експлоатације. Износ силе отварања странице контејнера зависи од великог броја параметара и због тога она се мора статистички анализирати. Овде се дај приказ резултата мерења само за мали део опсежног мерења са циљем да види износ силе отварања и карактер њене промена са бројем циклићног отварања-затварања странице контејнера.

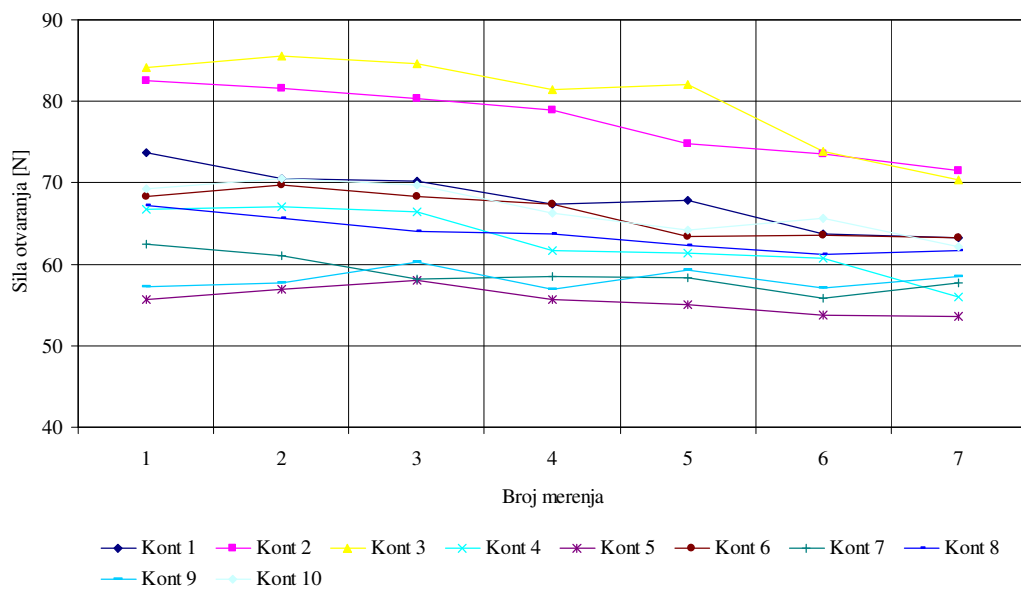
Приказани резултати мерења дати на следећим сликама и у следећим табалема су:

- сила отварања 10 контејнера Тонтарелли 6422 на 25°C и 0°C са 7 мерења (слика 7.32)
- сила отварања 10 контејнера Тонтарелли 6422 на 25°C и 0°C са 7 мерења (слика 7.32)
- сила отварања 10 контејнера Тонтарелли 6416 на 0°C са 6 мерења на 4 угла (сл. 7.33)

- сила отварања 12 контејнера Тонтарелли 110 на 0°C са 7 мерења (сл.7.34 и табела 7.5)
- сила отварања 5 контејнера Арца 110 на 0°C са 7 мерења (табела 7.6)
- сила отварања 4 контејнера Тонтарелли на 25°C и 0°C са 3 мерења на 4 угла (слика 7.35 и табела 7.7).

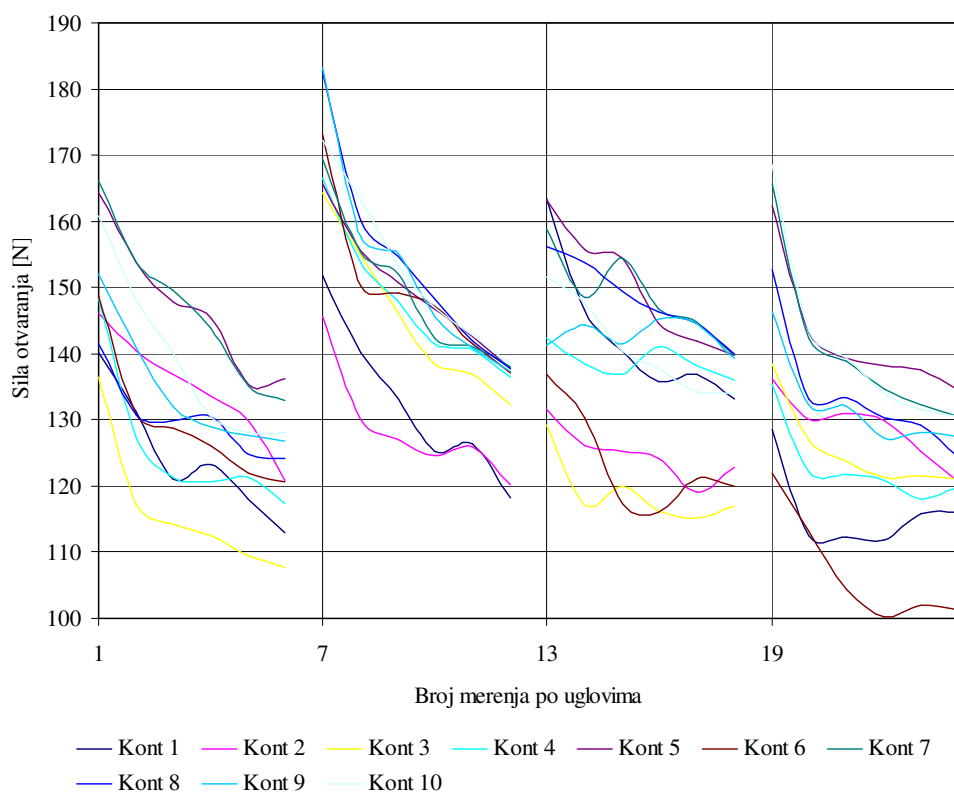


Тонтарелли 6422 на 25°C



Тонтарели 6422 на 0°C

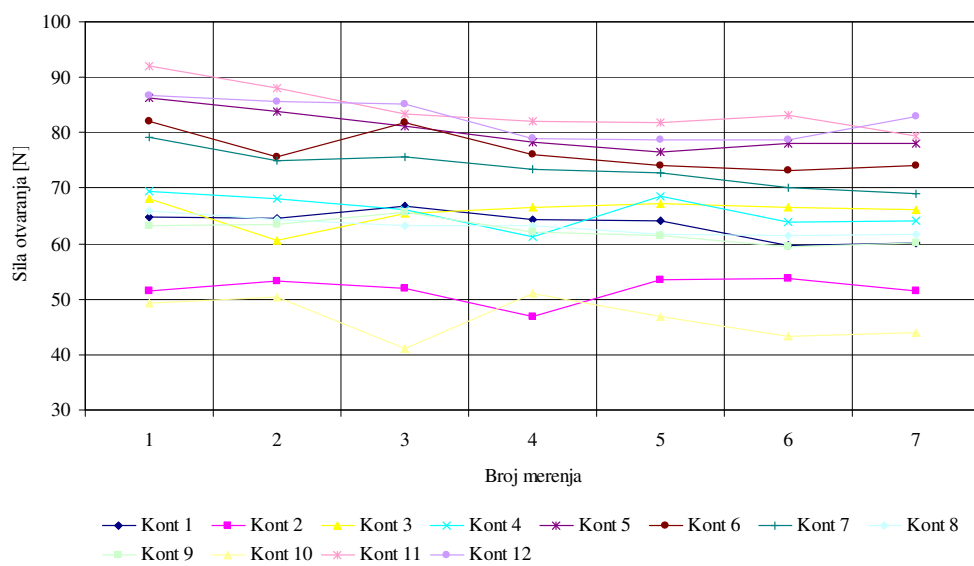
Слика 7.32. Сила отварања контејнера Тонтарелли на 25°C и 0°C



Тон

Тонтарелли 6416 на 0°C

Слика 7.33. Сила отварања 10 контејнера Тонтарелли на 0°C са 6 мерења на 4 угла



Тонтарелли 110 на 0°C

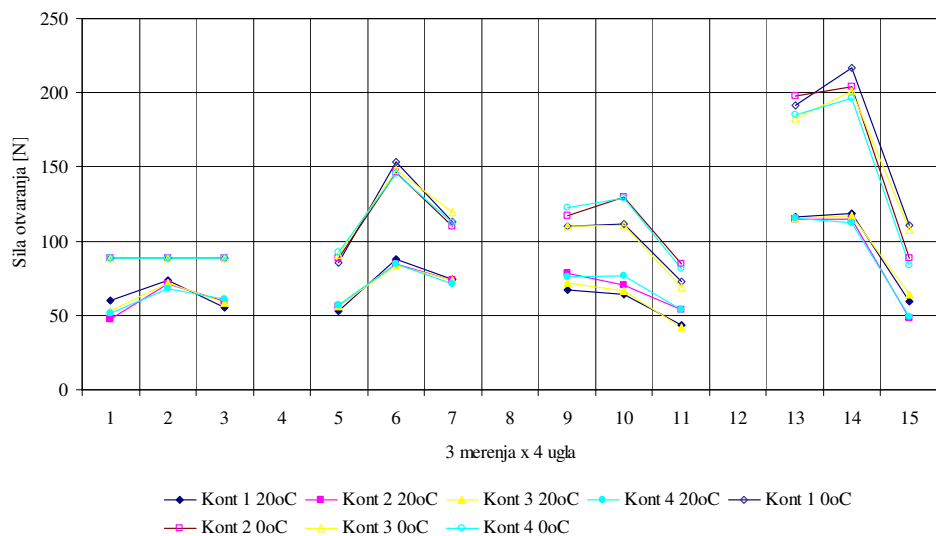
Слика 7.34. Сила отварања 12 контејнера Тонтарелли 110 на 0°C са 7 мерења

Табела 7.5. Сила отварања 12 контејнера Tontarelli 110 на 0°C са 7 мерења

110 Tontarelli на 0°C - Сила отварања [N]												
Бр. мер.	Број контејнера											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	64,8	51,4	68,2	69,5	86,2	82	79,2	65,8	63,3	49,3	92	86,8
2	64,5	53,3	60,6	68	83,9	75,6	75	64,3	63,5	50,3	88,1	85,5
3	66,7	52	65,4	66,2	81,2	81,8	75,6	63,3	65,7	41,1	83,4	85,2
4	64,4	46,8	66,5	61,3	78,3	76	73,4	63,2	62,2	51	82,1	78,9
5	64,2	53,4	67,2	68,5	76,6	74	72,7	61,7	61,5	46,9	81,8	78,8
6	59,6	53,6	66,6	63,8	78	73,1	70	61,4	59,4	43,4	83,1	78,7
7	60,2	51,5	66	64,1	78	74,1	69	61,7	60,2	43,9	79,4	83

Табела 7.6. Сила отварања 5 контејнера Арса 110 на 0°C са 7 мерења

110 Арца на 0°C - Сила отварања [N]					
Бр. мер.	Број контејнера				
	1	2	3	4	5
1	106,6	55,7	103,1	99,7	79,3
2	93,5	53,7	88,6	104,9	75,4
3	96,9	51,1	94,7	99,9	85,5
4	98,8	51,9	96,7	108,4	85,1
5	88,3	62,9	95,2	104,6	82,2
6	91,6	52,3	97	102,5	78,8
7	99,9	50,2	85,2	92,6	75,1

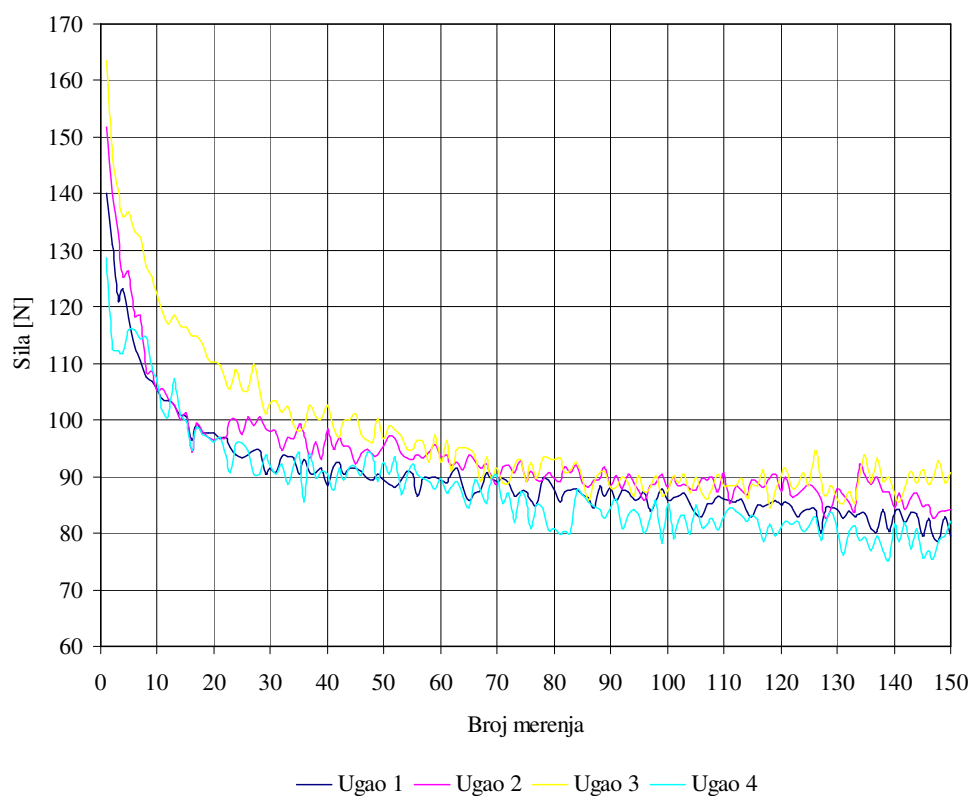


Слика 7.35. Сила отварања 4 контејнера Tontarelli на 23°C и 0°C са 3 мерења на 4 угла

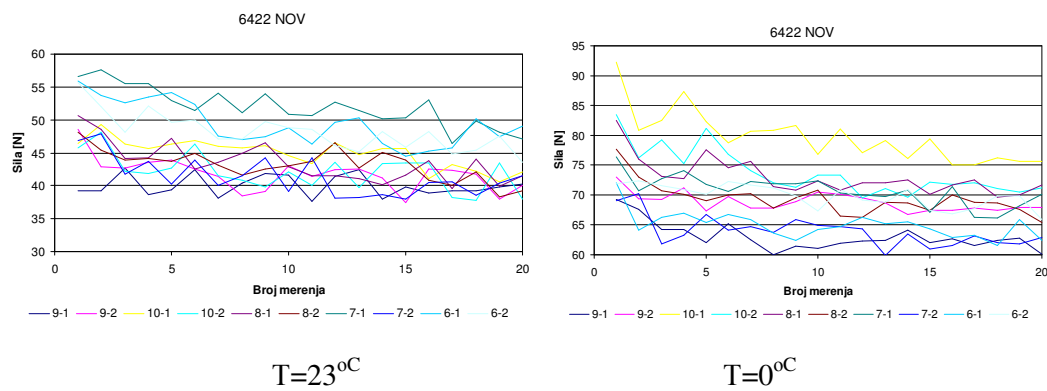
Табела 7.7. Сила отварања 4 контејнера Тонтарелли на 23^{оС} и 0^{оС} са 3 мерења на 4 угла

Сила отварања [Н]					
T[^{оС}]	Тип Тонтарелли контејнера	Угао 1	Угао 2	Угао 3	Угао 4
23	6418	60,1	47,4	52,7	51,4
23	6418	73,3	70,9	72,2	67,7
23	6418	55,3	59	58,6	60,7
0	6418	88,5	88,5	88,5	88,5
0	6418	88,5	88,5	88,5	88,5
0	6418	88,5	88,5	88,5	88,5
23	6416	53	56,4	56,4	57
23	6416	88,1	84,8	83,6	84,6
23	6416	74,1	73,6	73,5	71,2
0	6416	85,8	88,5	91,3	92,2
0	6416	153,5	146,4	148	145,8
0	6416	113	110,1	119,1	112,5
23	6410	67,3	78,3	72,1	76,1
23	6410	63,8	70,2	66,2	76,6
23	6410	43,5	53,9	41,9	53,8
0	6410	109,7	116,7	109,7	122,8
0	6410	111,3	129,5	110,4	129
0	6410	72,4	84,5	69,2	81,7
23	3415	116,3	115,1	115,8	115,4
23	3415	118,7	114,6	117,1	112,4
23	3415	59,7	48	64	48,7
0	3415	191,7	197,8	182,5	184,8
0	3415	216,6	204,2	201,2	196,2
0	3415	111	89	107,8	83,9

Утицал великог броја извођења циклуса отварање-затварање приказ је на слици 7.36 за Тонтарелли контејнере модела 6416 и 6422. Можемо запасити да пад силе отварања престаје већ после 30-40 циклуса отварања-затварања и тај подаатак дефинише ову карактеристику контејнера. Такође је битна промена ове силе по угловима контејнера и утицај температуре на силу отварања.



Tontarelli 6416



Tontarelli 6422

Слика 7.36. Утицај броја циклуса отварања-затварања странице на силу отварања

Ова веома битна функција је на приказан начин у потпуности расветљена и разјашњена.

7.8 Савијање елемената за држање папира

Утврђивање савијања елемената за држање папира је такође веома битна функција контејнера. Поред савијања тих елемената веома је битан тренутак настанка пластичне деформације елемената, односно тренутак губитка функције држања папира. Мерење је изведено са истом опремом као за мерење силе отварања странице контејнера (слика 7.37). Овде је још уведен механички компаратер за мерење износа пластичне деформације.



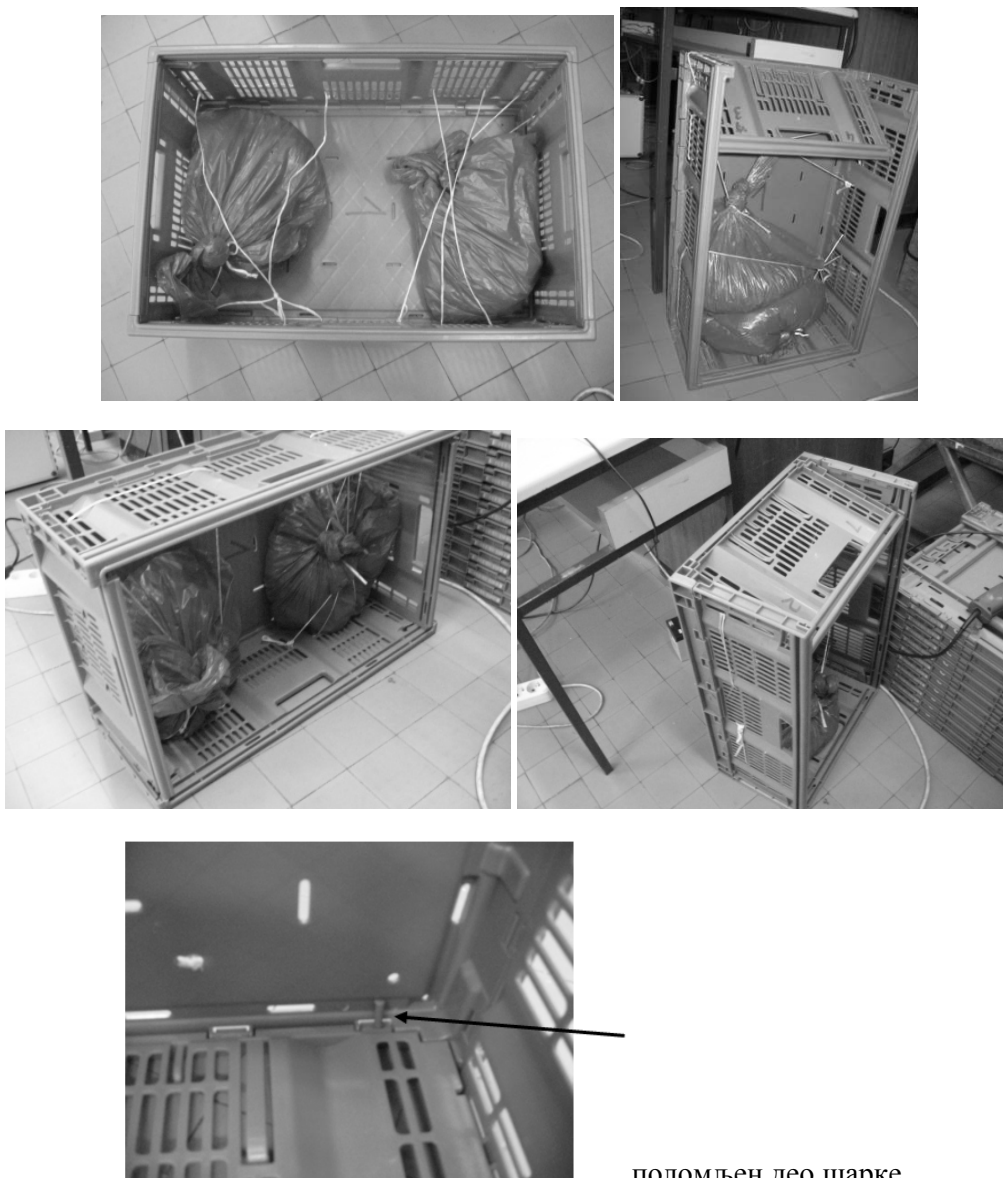
Слика 7.37. Опрема и приказ мерења савијања елемената за држање папира

Овде нису наведени резултати мерења.

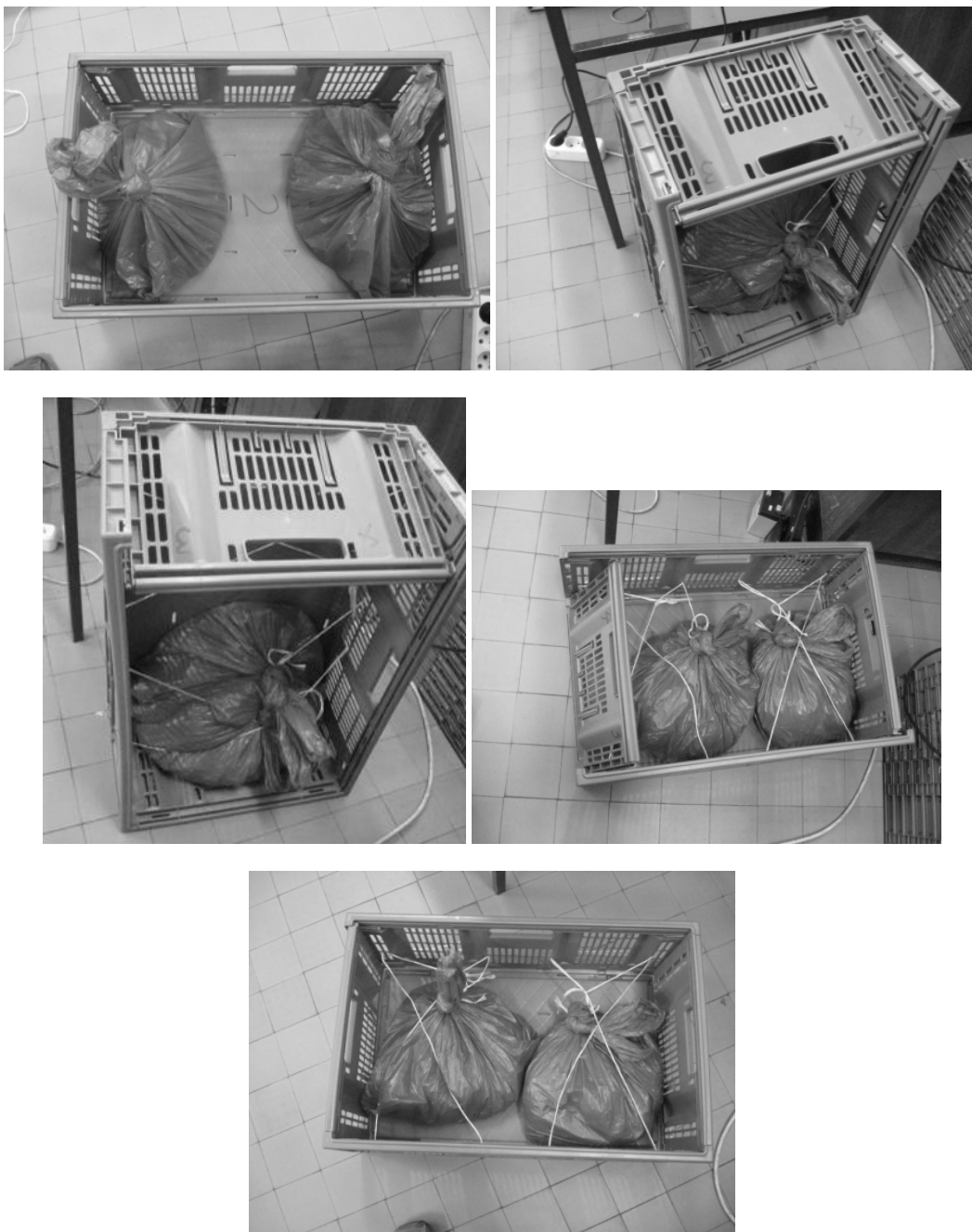
7.9 Тест пада

Тест пада контејнера се изводи тако што се у контејнер унесе одређена тежина и исти пусти да слободне падне са одређене висине. Јасно да овај тест мора да доведе до пластичне деформације и лома одређених елемената контејнера.

Тест пада два контејнера модела Tontarelli 110 приказан је на сликама 7.38 и 7.39.



Слика 7.38. Тест пада контејнера 1 модела Tontarelli 110



Слика 7.39. Тест пада контејнера 2 модела Tontarelli 110

Овде се процењује релативни однос нивоа оштећења међу различитим контејнерима и различитим моделима.

8 Дефинисање потребних карактеристика расклопивих контејнера

Основни елементи идентификације понашања контејнера су: одређивање крутости елемената контејнера и самог контејнера. Најбитнији елементи контејнера су: везе, странице и под.

Основни проблем понашања контејнера представља немогућност преноса оптерећења са једне покретне површине странице на непокретну површину базе (реална грешка дизајна, израде и монтаже). Такође, потребан је дизајн који све везе максимално растерећује.

Испуњење потребних параметара карактеризације чврстоће расклопивих контејнера је могуће уколико су обезбеђени следећи предуслови:

- крутости елемената контејнера довољно велика
- посебно се наглашава крутост веза и ослањања
- доње везе треба дизајнирати тако да могу примити минимално оптерећење
- вертикално оптерећење треба да путује само кроз вертикалне стубове
- центричност ослањања и преноса оптерећења
- оптерећење је потребно континуално прихватити по горњим ивицама контејнера и центрично преко вертикалних стубова пренети на доње ивице контејнера.

Центричност ослањања и преноса оптерећење се ефикасно обезбеђује уколико по горњим ивицама страница контејнера постоје зуби у потребном растеру и постоје отвори у бази контејнера у истом растеру.

Правац тренутног и даљег рада на проблему контејнера је:

- повећање крутости елемената контејнера путем редизајнирања геометрије
- посебно се наглашава повећање крутости веза
- увођење јачих материјала у елементе везе
- претварање покретне везе у привремену монтажну непокретну везу.

9 Развој модуларно дизајнираних контејнера

На основу свега анализираног пришло се дефинисању дизајна контејнера који испуњавају задате карактеристике и функције контејнера за цео спектар примене. То остварења захтева развој модуларно дизајнираног контејнера.

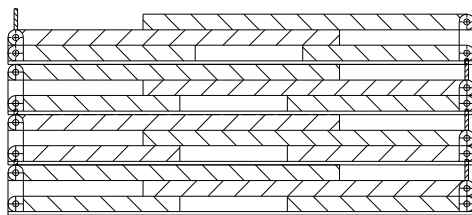
Основне геометријске карактеристике и потребна носивост развијеног модуларног дизајна контејнера приказане су у табели 9.1. Прве основне димензије модуларног дизајна су:

- димензије базе $n \cdot K \times 1,5 \cdot n \cdot K$, где је $K=100$ мм и $n=2, 3, 4, 5, 6, 8$ осим за $RK4,5$
- дебљина страница 13 и 15 мм
- дебљина базе 1 мм и ребара 4×4 мм, односно укупна дебљина базе 5 мм.

Tabela 9.1. Modularno dizajnirani kontejneri

	Димензије [мм]	Дељине (странице+под)	Однос висина	Носивост [кг]
RK1a	200 x 300 x 100	2 x 13 мм + 5 = 31 мм	3,22	1000
RK1b	200 x 300 x 150	3 x 13 мм + 5 = 44 мм	3,4	1000
RK2	300 x 400 x 150	2 x 13 мм + 5 = 31 мм	4,84	1000
RK2a	300 x 400 x 200	2 x 13 мм + 5 = 31 мм	6,45	1000
RK3a	400 x 600 x 200	2 x 13 мм + 5 = 31 мм	6,45	1000
RK3b	400 x 600 x 230	3 x 13 мм + 5 = 44 мм	5,23	1000
RK3c	400 x 600 x 270	3 x 15 мм + 5 = 50 мм	5,4	1000
RK4	600 x 800 x 350	2 x 13 мм + 5 = 31 мм	11,29	1000
RK5	800 x 1200 x 450	2 x 13 мм + 5 = 31 мм	14,52	1000
RK6	500 x 1200x300	2 x 13 мм + 5 = 31 мм	9,68	1000

Склапање контејнера RK1b, RK3b i RK3c модела приказана је на слици 8.1. Ово је изведено јер је висина контејнера веча од половине димензије краће ивице.



Слика 9.1. Слагање високих контејнера

Дефинисање димензије $K=100$ мм представља веома најбитнију карактеристику модуларног дизајна. На основу ове димензије дефинишу се следеће веома битне карактеристике и особине модуларног дизајна (табела 9.2):

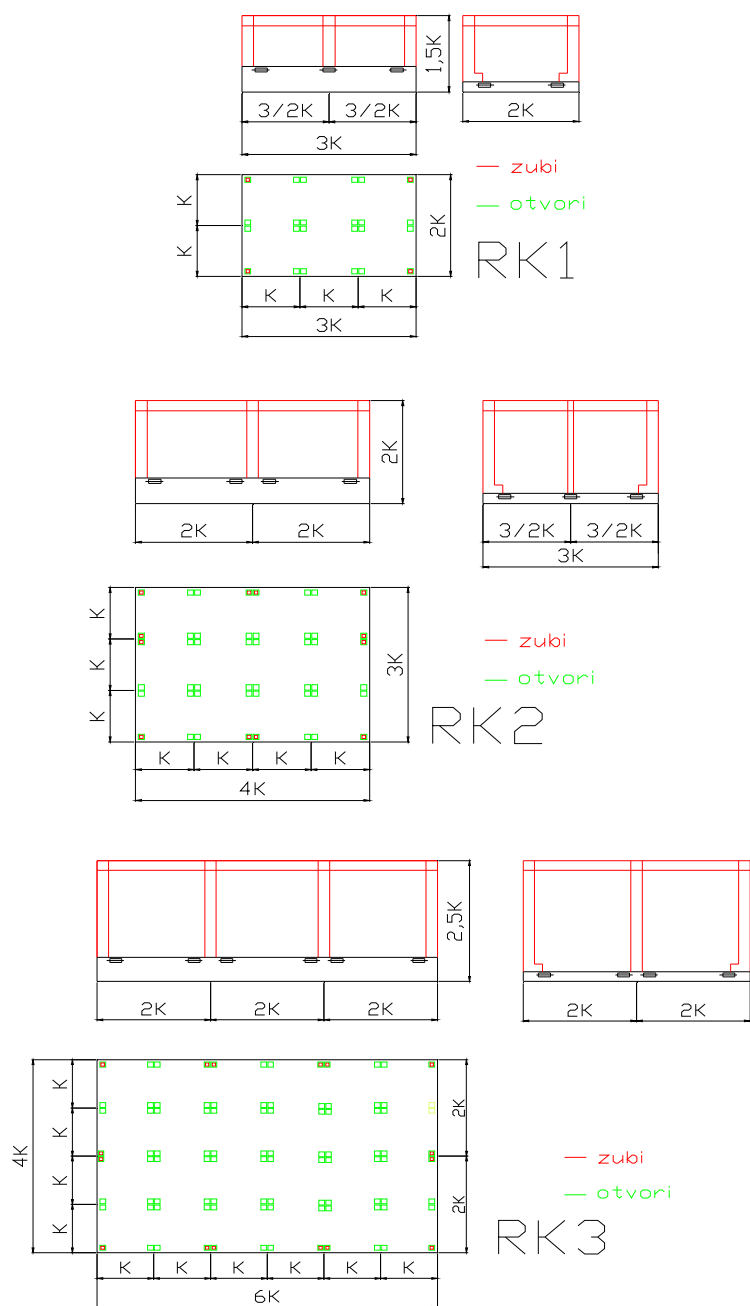
- постизање носивост контејнера захтева дефинисање броја стубова по страницама (растер стубова)
- растер отвора у бази и зуба по страницама обезбеђује модуларно слагање контејнера.

Стандардне димензије палета и могућност смештаја контејнера RKi :Палета 800×1200 мм = RK1, RK2, RK3, RK4, RK5; Палета 1000×1200 мм= RK1, RK2, RK3, RK4, RK6.

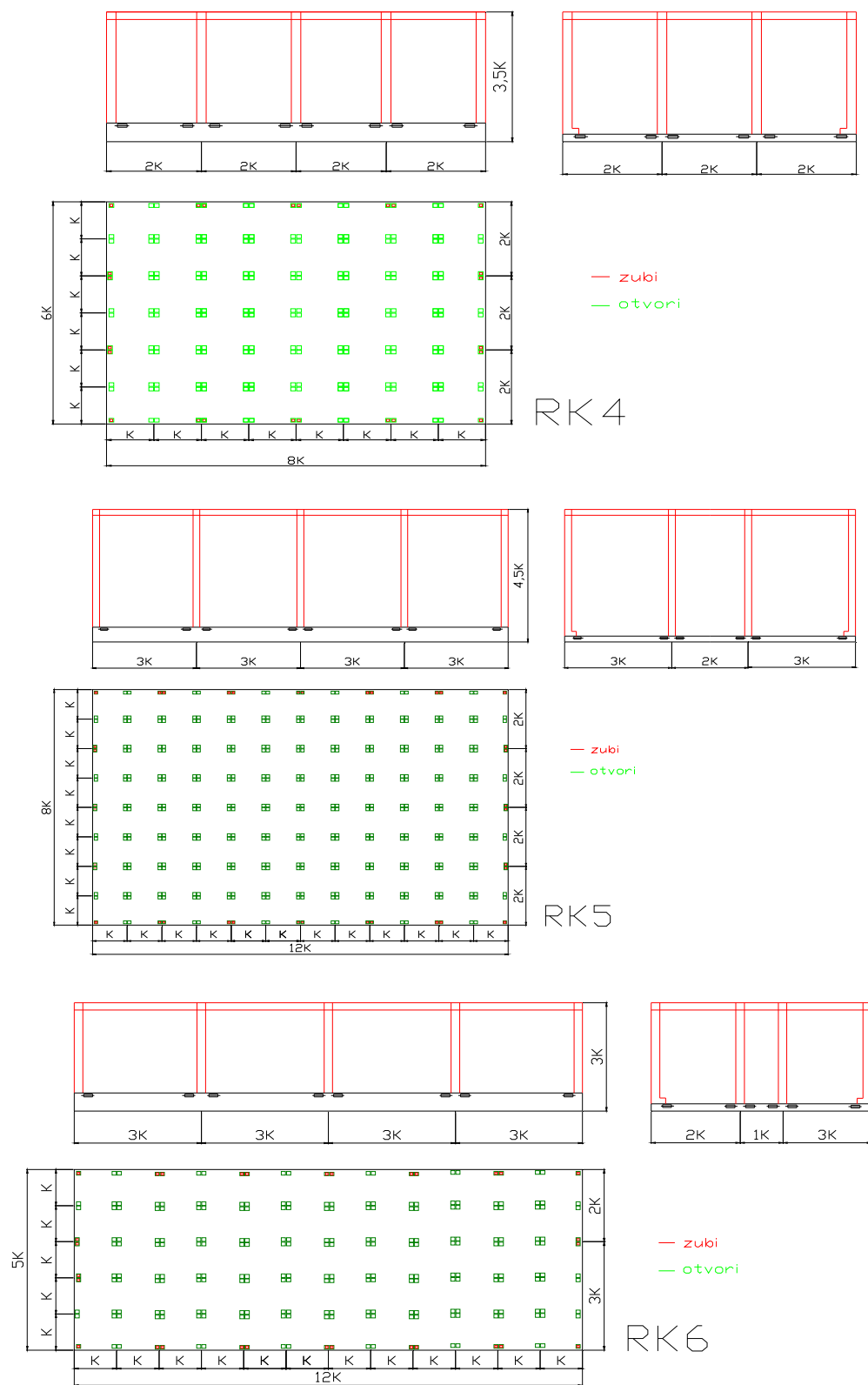
Табела 9.2. Растер стубова, отвора и зуба модуларног дизајна

$K=100$ мм	Димензија базе (мм)	Основна висина (мм)	Растер отвора у бази	Растер зуба по страницама (краћа+дужа)	Растер стубова (краћа+дужа)
RK1	200 x 300	1,5 K	2K x 3K	2K + 3K	2K + 2x3/2K
RK2	300 x 400	2 K	3K x 4K	2K+1K + 2x2K	2x3/2K + 2x2K
RK3	400 x 600	2,5 K	4K x 6K	2x2K + 3x2K	2x2K + 3x2K
RK4	600 x 800	3,5 K	6K x 8K	3x2K + 4x2K	3x2K + 4x2K
RK5	800 x 1200	4,5 K	8K x 12K	4x2K + 6x2K	3K+2K+3K + 4x3K
RK6	500 x 1200	3 K	5K x 12K	2K+1K+2K + 6x2K	2K+1K+2K + 4x3K

Основни изглед, димензије и растери стубова, отвора у зуба развијених модуларних дизајна контејнера у функцији димензијерастера $K=100$ мм дати су на сликама 9.2 и 9.3.



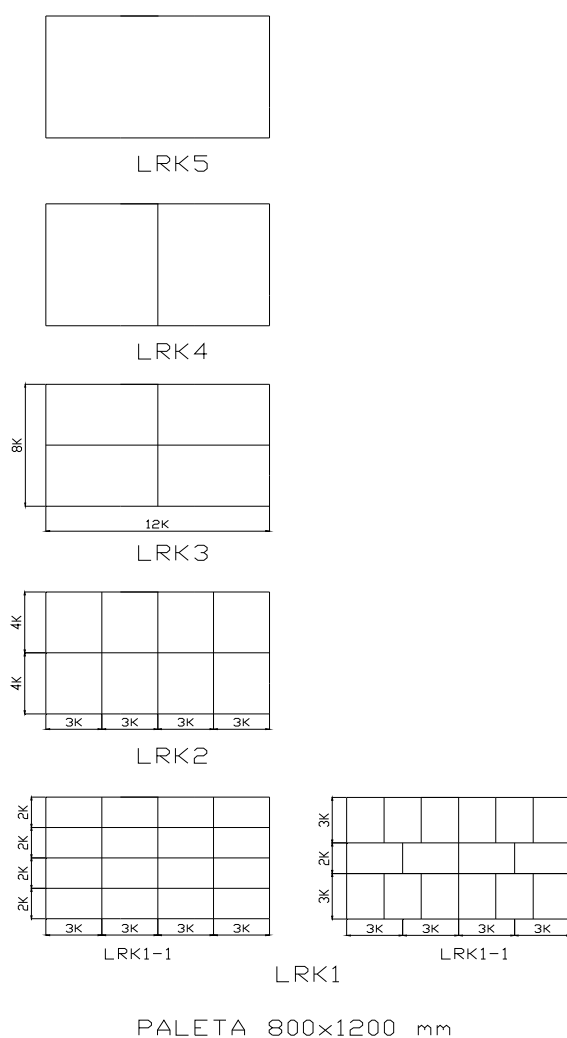
Слика 9.2. Модуларни дизајн контејнера RK1, RK2 и RK3



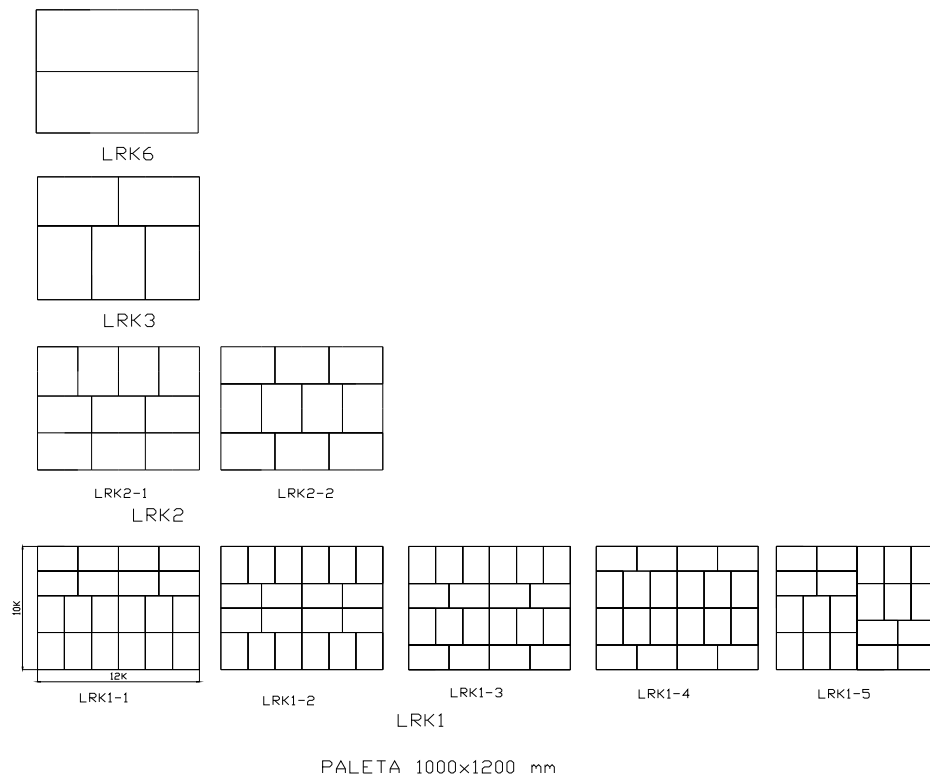
Слика 9.3. Модуларни дизајн контејнера RK4, RK5 i RK6

Растер стубова и димезије попречног пресека стубова (поглавље 6.5) представљају најбитнији елементи за чврстоћу контејнера.

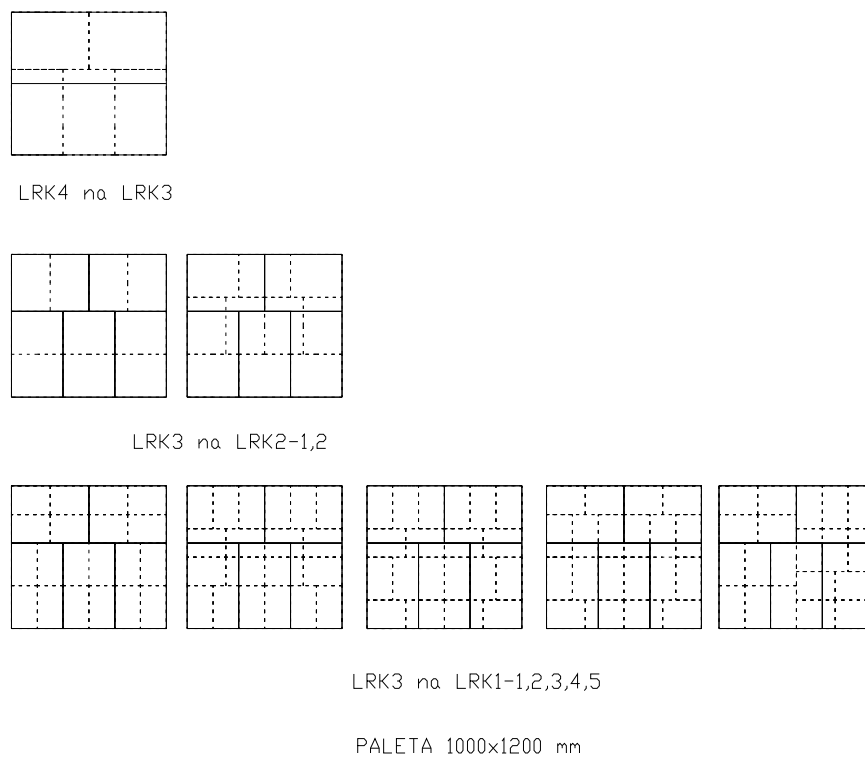
Све могуће комбинације слагања (уздужно и попречно, мањи и велики) монтираних контејнера које су омогућене развојем модуларног дизајна контејнера дате су на наредним сликама..



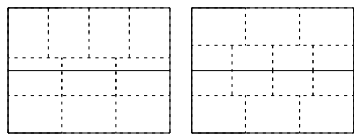
Слика 9.4. Слагање контејнера RK1, RK2, RK3, RK4 и RK5 на палету 800x1200мм



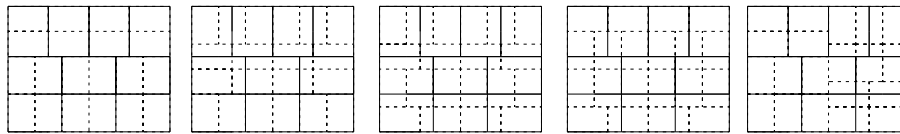
Слика 9.5. Слагање контејнера RK1, RK2, RK3 і RK6 на палету 1000x1200мм



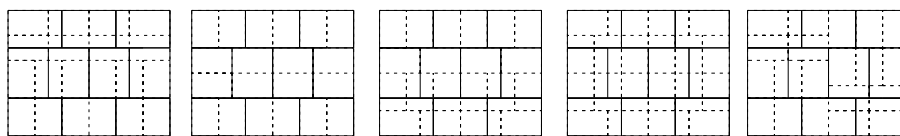
Слика 9.4 Комбиновано слагање различитих лејера на палету 1000x1200мм



LRK4 na LRK2-1,2



LRK2-1 na LRK1-1,2,3,4,5



LRK2-2 na LRK1-1,2,3,4,5

PALETA 1000x1200 mm

Слика 9.4 Комбиновано слагање различитих лејера на палету 1000x1200мм

10 Закључне напомене и смернице за будућа истраживања

10.1 Закључне напомене

Докторске дисертација је проистекла као резултат вишегодишњег истраживања из области чврстоће структура, а пре свега расклопивих контејнера. Рад је подељен у девет поглавља, од којих прва три представљају преглед постојећих истраживања из области расклопивих контејнера. У општем случају, проблем чврстоће расклопивих контејнера аналитички је нерешив за практичну примену. Стога, примена нумеричке и експерименталне методе категоризација чврстоће расклопивих контејнера представља основу изведених истраживања.

Нумеричка метода подразумева примену методе коначних елемената као свеобухватни алат за анализу структурног понашања ових конструкција. Током прорачуна, развијен је физичко-математички модел прорачуна чврстоће контејнера. Главни исход прорачуна и анализе чврстоће контејнера представља дефинисање граничних вредности параметара чврстоће.

Експериментална анализа обухватала је мерење деформација и напона на конструкцији разнородних контејнера различитим мерним принципима, а циљ је био верификовање прорачунских резултата и прецизније дефинисање чврстоће контејнера. За мерење деформације контејнера је, поред осталог, коришћена савремена оптичка метода мерења деформације (дигиталне стерео камере)..

У раду је објашњена процедура методологије карактеризације чврстоће контејнера. Она у основи представља примену нумеричко-експерименталног приступа одређивања карактеристика чврстоће контејнера. Валидација резултата прорачуна и експеримента као веома битан фактор изведен је кроз циклус „учења“ прорачун-мерење-прорачун.

Оваквим приступом обезбедиће се поуздан и ефикасан метод анализе чврстоће контејнера, како изведених тако и у прелиминарној фази формирања дизајна контејнера. Развијена метода упростиће анализу чврстоће контејнера у раним фазама пројектовања.

Оваквим приступом су дефинисани елементи за побољшање карактеристика чврстоће расклопивих контејнера, као елементи који утичу на побољшање експлоатације контејнера.

Научни допринос ове докторске дисертације је:

- поуздано дефинисање параметара карактеризације чврстоће контејнера
- предлог допуне методологије прорачуна и испитивања са којима се долази до побољшаног производа
- дефинисање потребних карактеристика чврстоће контејнера који обезбеђују његову поуздану експлоатацију
- развој фамилије модуларно дизајнираних контејнера.

Дакле, резултати истраживања описани у овој докторској дисертацији могу се сумирати у следећем:

- дефинисана је нова методологија карактеризације чврстоће контејнера,
- описана је минимизација потребе за извођењем детаљног експеримента,
- дефинисана је потребна геометрија контејнера која обезбеђује максималну носивост,
- развијена је фамилија модуларно дизајнираних контејнера.

Развијена методологија може имати примену при пројектовању и анализи чврстоће сродних конструкција контејнера, транспортних средстава и др..

10.2 Смернице за будућа истраживања

Истраживање описано у докторској дисертацији отворило је доста питања, већ начетих у оквиру закључних напомена, а проистеклих из мањкавости моделирања, а пре свега везаних за начин моделирања повезаности страница и базе контејнера.

Даље истраживање свакако подразумева примену резултата истраживања на сродним конструкцијама.

Најбитнија примена подразумева примену резултата истраживања на уклопиве контејнере, чврсте контејнере и расклопиве контејнере великих димензија (нпр. 800x1000x1000 мм).

Такође следећа могућа примена представљају контејнери који су израђених од других материјала (ојачан пластика, дрво, комбинација пластика-метал и др.)

Литература

- [1] <http://www.atofina.com>
- [2] <http://www.moplen.com>
- [3] <http://www.inspire.com>
- [4] <http://www.borealis.com>
- [5] Ersoy MS, Onder E, Mechanical and Thermal Behaviors of Polypropylene - Multi-Walled Carbon Nanotube Nanocomposite Monofilaments, Department of Textile Engineering, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, FibreS & TextileS in Eastern Europe, pp22-27, issue no 2 (98)/2013, <http://fibtex.lodz.pl/article889.html>
- [6] Yuanxin Zhou, P. K. Mallick, Effects of Temperature and Strain Rate on the Tensile Behavior of Unfilled and Talc-Filled Polypropylene. Part I: Experiments, Polymer engineering and science, 2002, Vol. 42, No. 72, pp2449-2460, http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/34545/11131_ftp.pdf
- [7] Simona, Katalog, http://www.simona.de/static/sites/default/de/assets/Informationsmaterial/englisch/flyer_e/Productfolder-COPLAST-english.pdf
- [8] Basic of plastic, Katalog, <http://www.ensinger-online.com/en/technical-information/properties-of-plastics/mechanical-properties/modulus-of-elasticity/>
- [9] Chep-Tontarelli kontejneri <http://www.chep.com/rpcs/crates/>
- [10] <http://www.chep.com/rpcs/foldable-plastic-crate-k1-5-litres-14400/>
- [11] <http://www.chep.com/rpcs/foldable-plastic-crate-k2-11-litres-14401/>
- [12] <http://www.chep.com/rpcs/foldable-plastic-crate-k3-23-litres-14402/>
- [13] <http://www.chep.com/rpcs/foldable-plastic-crate-k4-47-litres-14403/>
- [14] <http://www.chep.com/rpcs/foldable-plastic-crate-k5-23-litres-14405/>
- [15] <http://www.chep.com/rpcs/foldable-plastic-crate-k6-23-litres-14406/>
- [16] <http://www.chep.com/rpcs/foldable-plastic-crate-k7-23-litres-14408/>
- [17] <http://zjnbzy.com/>
- [18] http://www.storagedesign-catalogue.com/Arca_CatPDF/foldable_Small_Containers.pdf
- [19] <http://www.schoellerallibert.com/products/foldable-small-containers>
- [20] <http://www.madaboutboxes.co.uk/foldable-boxes/box3211.750.html>
- [21] <http://www.satmhs.com/products-foldablesmall-prelog.html>

- [22] <http://www.linpacpackaging.com/>
- [23] USA patenti
- [24] <http://www.ttnet.net/ttnet/gotopr/PK320/010/0/94841303236343336363.htm>
- [25] <http://cnguanyu.en.made-in-china.com/product/LexEspgoXNrZ/China-Plastic-Foldable-Container-Pks-602.html>
- [26] <http://www.copacksales.co.nz/index.php?mact=Products,cntnt01,details,0&cntnt01category=Foldable%20Crates&cntnt01productid=207&cntnt01returnid=284>
- [27] Altair HyperMesh 8.0", Beta Version, Altair Engineering Inc, 2006
- [29] LS-DYNA v971, LSTC, 2006
- [30] Large Container Test Standard', Rev 12, CHEP, 22 September 2006
- [31] Манески Т., *Компјутерско моделирање и прорачун структура*, 1998, Машински факултет, Београд, 1998.
- [32] Bathe K.J., Wilson E.L., *Numerical methods in finite element analysis*, Prentice-Hall, 1976.
- [33] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., *The finite element method: Basic formulation and linear problems*, Mcgraw-Hill, New York, 1987.
- [34] Zdeněk P Bažant, *Structural stability*, International Journal of Solids and Structures, Volume 37, Issues 1–2, pp 55-67, (2000), http://www.unt.edu/LAPOM/publications/pdf%20articles/Time_temperature.pdf
- [35] Mehmed Čaušević, Mladen Bulić, *Steel plate elements loaded in their plane –buckling factors and critical stresses*, Građevinar 2/2012, Časopis Hrvatskog saveza građevinskih inženjera, ISSN 1333-9095, pp115-125, Zagreb (2912), <http://www.casopis-gradjevinar.hr/arhiva/article/640>
- [36] Michael P. Nemeth, *Buckling Behavior of Long Anisotropic Plates Subjected to Combined Loads*, NASA Technical Paper 3568, Langley Research Center, Hampton, Virginia, 1995, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.44.9982&rep=rep1&type=pdf>
- [37] Mattias Clarin, *Plate Buckling Resistance*, PhD, Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering - Steel Structures, (2007), <http://epubl.ltu.se/1402-1544/2007/31/LTU-DT-0731-SE.pdf>
- [38] Samikshya Meher, Nishant Nayak, *Experimental and numerical study on vibration and buckling characteristics of laminated composite plates*, Department of Civil Engineering

- National Institute of Technology Rourkela, India, (2013), http://search.conduit.com/Results.aspx?q=etd.lsu.edu_docs_available_etd-0710102-172554_unrestricted_Kidane_thesis&SearchSource=49&CUI=UN18253781365192129&ctid=CT3300850&UM=1
- [39] Leissa, A. W., “*An Interpretive Study of Plate and Shell Buckling*”, Ohio State University Research Foundation, Columbus, 10 June 1983, Accession Number : ADA140487, Handle / proxy Url : <http://handle.dtic.mil/100.2/ADA140487>
- [40] Ghavamia K., Khedmati M.R., *Numerical and experimental investigations on the compression behavior of stiffened plates*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 62, No.11, 1087–1100, 2006.
- [41] Момчиловић Н., *Моделирање чврстоће ортотропних панела бродске конструкције еквивалентним неоребреним плочама*, докторска дисертација, Машински факултет, Београд, 2014.
- [42] Гаћеша Б., *Нумеричко – експериментална анализа чврстоће котловских конструкција*, докторска дисертација, Машински факултет, Београд, 2011.
- [43] Celović Š., Tipsarević M., Maneski T., Vuherer T., Kozak D., „*Numerical-experimental analysis of the foldable containers strength*“, Tehnical Gazette, Acceptance of Article, Article No. TV-20150112100813, (2015), ISSN 1330-3651 (Print), ISSN 1848-6339 (Online), IF = 0,615
- [44] Манески Т., *КОМИПС (компјутерско моделирање и прорачун структура)*, софтверски пакет за прорачун структура, Машински факултет, Београд, 1997. – 1999.
- [45] xxx, *Merno-akvizicioni sistem Laboratorije za merenje napona i defrmacije Katedre za Otpornost konstrukcija*, Mašinski fakultet, Beograd, 2012
- [46] xxx, *Aramis – 3D Deformation Analysis*, систем за оптичко мерење, GOM, Немачка, <http://www.gom.com/metrology-systems/system-overview/aramis.html>.

БИОГРАФИЈА

Шевкет Ћеловић је рођен 26.11.1967 у Прибоју, Србија. Основну школу је похађао од 1974. до 1982. у Прибоју и завршио са одличним успехом. Средњу Машинску школу је похађао у Прибоју од 1982. до 1985. и завршио са одличним успехом. У временском периоду од 1986. до 1992. студира на Машинском факултету у Сарајеву.

У априлу 1998. брани дипломски рад са темом: “Управљање индустријским роботом” на Машинском факултету у Сарајеву и стиче право стручног назива дипломирани инжењер машинства.

Од јуна 1998. до децембра 1998. ради на Институту за механику, Универзитета у Hannoverу, као стручни сарадник из области Мехатронике.

Од 1999. ради као CAD-конструктор у фирми Volke, на развоју Отто мотора за VW AG у Wolfsburgу, на пројектима развоја MPI и FSI мотора радне запремине до 1,6 л.

Од почетка 2009. ради у Volkswagenу као главни технички координатор на развоју производа у VW AG у Wolfsburgу.

Постдипломски магистарски студиј "Индустријски инжењеринг" на Машинском факултету, Универзитета у Тузли похађа у школској 2000.-2001. години, те успјешно положи све испите предвиђене наставним планом и програмом.

У јулу 2009. године брани магистарски рад под називом "РАЗВОЈ НОВОГ ПРОИЗВОДА НА ОСНОВУ ВИШЕКРИТЕРИЈАЛНИХ ЗАХТЈЕВА", те стиче право стручног назива магистра техничких наука из области машинства.

Шевкет Ћеловић има више научно-истраживачких радова, апсолвирао је седам специјализацијских усавршавања из области машинства, те је сарадник на више стручних пројеката.

Шевкет Ћеловић је ожењен, отац троје деце и течно говори немачки језик.

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Нумеричко-експериментална карактеризација
чврстоће расклопивих контејнера

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

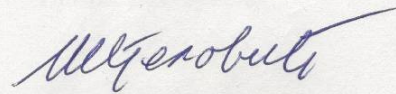
Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 06.03.2015



мр. Шевкет Ћеловић, дипл.инж.маш.

Прилог 2.

**Изјава о истоветности штампане и електронске
верзије докторског рада**

Име и презиме аутора Шевкет Ћеловић

Број индекса _____

Студијски програм _____

Наслов рада Нумеричко-експериментална карактеризација чврстоће
расклопивих контејнера

Ментор проф.др Ташко Манески, дипл.инж.маш.

Потписани мр. Шевкет Ћеловић, дипл.инж.маш.

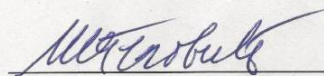
Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања 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 докторанда

У Београду, 06.03.2015.г.



Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани мр. Шевкет Ћеловић, дипл.инж.маш.

број индекса _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Нумеричко-експериментална карактеризација
чврстоће расклопивих контејнера

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 06.03.2015.г.

