

UNIVERZITET U BEOGRADU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Aljoša V. Filipović

**NOSIVOST RAZLIČITIH TIPOVA RAVNOKRAKIH
UGAONIKA OD NERĐAJUĆEG ČELIKA PRI DEJSTVU
CENTRIČNOG PRITISKA**

doktorska disertacija

Beograd, 2021

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Aljoša V. Filipović

**RESISTANCE OF DIFFERENT TYPES OF STAINLESS
STEEL EQUAL ANGLES UNDER AXIAL COMPRESSION**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2021

Univerzitet u Beogradu
Građevinski fakultet

Aljoša V. Filipović, mast. inž. građ.

NOSIVOST RAZLIČITIH TIPOVA RAVNOKRAKIH UGAONIKA OD NERĐAJUĆEG
ČELIKA PRI DEJSTVU CENTRIČNOG PRITISKA
doktorska disertacija

Mentor:

V. prof. dr Jelena Dobrić, dipl. građ. inž.

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

Komisija:

1. Prof. emeritus dr Dragan Buđevac, dipl. građ. inž.
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu
2. Prof. dr Zlatko Marković, dipl. građ. inž.
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu
3. V. prof. dr Jelena Dobrić, dipl. građ. inž.
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu
4. Doc. dr Marko Pavlović, dipl. građ. inž.
Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and
Geosciences, Department of Engineering Structures, The Netherlands
5. Doc. dr Mileva Samardžić-Petrović, dipl. geod. inž.
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

Datum odbrane: _____

Zahvalnice

Za uspešnu izradu doktorske disertacije, pre svega, ogromnu zahvalnost dugujem mentoru v. prof. dr Jeleni Dobrić na nesebično uloženom trudu, vremenu i znanju u istraživanje iz koga je proistekla ova disertacija.

Prof. dr Draganu Buđevcu i prof. dr Zlatku Markoviću zahvalan sam na podršci u izradi doktorske disertacije, kao i za sve što sam od njih naučio tokom osnovnih, master i doktorskih studija.

Za pomoć u realizaciji eksperimentalnog ispitivanja posebnu zahvalnost dugujem dragom kolegi doc. dr Nenadu Fricu. Zahvalnost upućujem doc. dr Milanu Spremiću i kolegicama doc. dr Nini Gluhović i Isidori Jakovljević za svu podršku u toku izrade doktorske disertacije. Zahvalnost upućujem i kolegici doc. dr Mariji Todorović.

Za pomoć u realizaciji merenja početnih geometrijskih imperfekcija i obradi rezultata veliku zahvalnost dugujem prof. dr Draganu Blagojeviću i doc. dr Milevi Samardžić-Petrović.

Veliku zahvalnost dugujem evropskoj radnoj grupi za nerđajući čelik CEN/TC 250/SC 3/WG 4, posebno Nancy Baddoo, za podršku u istraživanju.

Za nesebičnu materijalno – finansijsku pomoć u realizaciji istraživanja zahvaljujem se sledećim kompanijama: Montanstahl ag Switzerland, Vetroelektrane Balkana Beograd, Armont SP Beograd, Institutu IMS, Institutu za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, ConPro Novi Sad, Energoprojekt Industrija AD Beograd, Vekom Geo Beograd, CO-Designing, Peri Oplate Beograd, North Engineering Subotica, Amiga Kraljevo, Mašinoprojekt koprang AD Beograd, Sika Beograd, DvaD Solutions Beograd i Soko Inžinjeri Beograd.

Za moralnu podršku tokom izrade doktorske disertacije zahvalnost dugujem članovima svoje porodice, a posebno svojoj supruzi Nataši.

NOSIVOST RAZLIČITIH TIPOVA RAVNOKRAKIH UGAONIKA OD NERĐAJUĆEG ČELIKA PRI DEJSTVU CENTRIČNOG PRITISKA

Rezime

Primena nerđajućeg čelika u savremenom građevinarstvu vezuje se za period inovacija i tehnološkog napretka u industriji čelika tokom poslednjih decenija prošlog i početkom ovog veka. Iako se u osnovi klasifikuje kao legirani čelik, strukturne performanse ovog materijala bitno se razlikuju od onih kod ugljeničnih čelika. Atraktivan površinski izgled koji ne zahteva primenu zaštitnih premaza, visoka otpornost na koroziju, značajan kapacitet plastifikacije, izrazita duktilnost i visoke vrednosti granice razvlačenja i čvrstoće pri zatezanju daju prednost u primeni nerđajućeg čelika u nosećim konstrukcijama ofšor platformi, industrijskih objekata u agresivnim sredinama i mostogradnji. Nerđajući čelik spada u grupu čistih materijala pa se često koristi u nosećim konstrukcijama rezervoara i silosa za skladištenje hrane, tečnosti i medicinskih preparata. Preduslov za širu primenu nerđajućeg čelika u građevinarstvu predstavlja razvoj nove i poboljšanje postojeće tehničke regulative za projektovanje konstrukcija od ove vrste čelika. U tom kontekstu, potreba za stalnim istraživanjima i analizama ponašanja elemenata od nerđajućeg čelika je imperativ.

Štapasti čelični proizvodi izrađeni od ugaonika imaju široku primenu u nosećim elementima koji su dominantno opterećeni aksijalnim naprezanjima kao što su: elementi ispune rešetkastih nosača, horizontalnih i vertikalnih spregova objekata u zgradarstvu, pojasni štapovi i štapovi ispune telekomunikacionih stubova i stubova dalekovoda.

Važeći međunarodni standardi za projektovanje konstrukcija od nerđajućeg čelika ne daju eksplicitna pravila za dimenzionisanje centrično pritisnutih štapova izrađenih od ugaonika. Razlozi za ovo leže u nedovoljnom broju relevantnih istraživanja koja bi trebalo da pruže činjenice neophodne za dobijanje odgovora na brojne nepoznanice u pogledu graničnih nosivosti i oblika loma ovog tipa konstruktivnog elementa u zavisnosti od niza uticajnih parametara. U kontekstu navedenog, ova doktorska disertacija prikazuje naučno istraživanje na centrično pritisnutim, obostrano zglobno oslonjenim, ugaonicima koje je sprovedeno na Univerzitetu u Beogradu, Građevinskom fakultetu. Da bi se utvrdio uticaj tehnologije proizvodnje na početne strukturne imperfekcije elementa, istraživanjem su obuhvaćeni elementi proizvedeni hladnim oblikovanjem, vrućim valjanjem i laserskim zavarivanjem. Razmatrane su dve legure nerđajućeg čelika, nisko legirani dupleks čelik EN 1.4162 i austenitni nerđajući čelik EN 1.4301. Osnovni cilj istraživanja je da se kroz niz eksperimentalnih i numeričkih analiza dobiju relevantni i pouzdani podaci koji će omogućiti definisanje smernica i pravila za proračun centrično pritisnutih štapova izrađenih od ugaonika, sagledavajući njihove različitosti u kontekstu načina proizvodnje. Eksperimentalnim programom su obuhvaćeni svi ključni testovi sa ciljem utvrđivanja mehaničkih svojstava osnovnog materijala, kapaciteta nosivosti poprečnog preseka, početnih geometrijskih imperfekcija, intenziteta i raspodele zaostalih napona i utvrđivanja globalnih oblika nestabilnosti i graničnih nosivosti na fleksiono i torziono-fleksiono izvijanje. Simulacija eksperimenata kroz razvoj numeričkih modela, njihova kalibracija i validacija sprovedena je primenom metode konačnih elemenata u programskom paketu Abaqus na osnovu dobijenih eksperimentalnih rezultata. Ovako kalibrisani numerički modeli obezbedili su osnovu za sprovođenje opsežnih parametarskih numeričkih studija u okviru kojih su sagledavani i analizirani uticaji globalne vitkosti i vitkosti poprečnog preseka na odgovor razmatranog elementa u stanju granične nosivosti. Na ovaj način formirana je opsežna i pouzdana baza podataka koja je omogućila (1) proveru tačnosti međunarodnih standardizovanih metoda za dimenzionisanje centrično pritisnutih elemenata od nerđajućeg čelika i (2) osnovu za matematičku interpretaciju nosivosti elemenata i definisanje odgovarajućih preporuka za njihovo dimenzionisanje sledeći implementirane procedure evropskih standarda za čelične noseće konstrukcije u zgradarstvu. Dobijeni rezultati omogućili su razvoj novih krivih izvijanja za svaki tip profila – hladnooblikovanih, vrućevaljanih i laserski zavarenih za niskolegiranu dupleks leguru i austenitnu leguru nerđajućeg čelika.

Ključne reči: Nerđajući čelik, Ugaonik, Hladnooblikovani proizvodi, Vrućevaljani proizvodi, Laserski zavareni proizvodi, Pritisak, Geometrijske imperfekcije, Zaostali naponi, Fleksiono izvijanje, Torziono-fleksiono izvijanje.

Naučna oblast: Građevinarstvo

Uža naučna oblast: Metalne konstrukcije

RESISTANCE OF DIFFERENT TYPES OF STAINLESS STEEL EQUAL ANGLES UNDER AXIAL COMPRESSION

Abstract

Application of stainless steel in modern structural engineering is related to innovation period and technological progress in steel industry during the last decades of previous century and at the beginning of this century. Although it is classified as alloy steel, structural behaviour of this material differs significantly from that of carbon steels. Attractive surface appearance that does not require protective coatings, high corrosion resistance, significant plastification capacity, pronounced ductility and high values of yield and tensile strength give advantage to stainless steel application in offshore platforms, industrial facilities in aggressive environments and bridge structures. Since stainless steel belongs to a group of clean materials, it is often used for load-bearing structures of tanks and silos for food, liquids and medical remedies storage. Requirements for a wider application of stainless steel are development of new and improvement of existing technical regulations for the design of stainless steel structures. Therefore, constant research and analysis of stainless steel elements behaviour is of outmost importance.

Steel angle bars have a wide application in structural members that are predominantly loaded by axial forces such as: webs of trusses, elements of horizontal or vertical bracings in buildings and as members of telecommunication towers and transmission line poles.

Current international standards for the design of stainless steel structures do not provide explicit rules for axially compressed angles. Explanation for this is insufficient number of relevant studies that should provide knowledge necessary for obtaining the answers to numerous unknowns regarding ultimate bearing capacity and fracture modes of this type of structural elements, depending on a number of parameters. In the context of the above, this thesis presents a scientific research on axially compressed pinned angle columns conducted at University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering. In order to determine influences of production technology on initial structural imperfections of elements, this research included angles produced by cold forming, hot rolling and laser welding. Two stainless steel alloys, low alloy duplex steel EN 1.4162 and austenitic stainless steel EN 1.4301 were considered. The main goal was to obtain relevant and reliable data through experiments and numerical analyses that will define guidelines and rules for the design of axially compressed angle columns, considering differences caused by production methods. The experimental program included all key tests with the aim of determining mechanical properties, bearing capacity, initial geometric imperfections, values and distribution of residual stresses and determining global forms of instability and flexural and flexural-torsional buckling capacity. Simulation of the experiments through development of numerical models, their calibration and validation were performed using finite element method in Abaqus software package based on the obtained experimental results. Calibrated numerical models provided a basis for extensive parametric numerical studies in which effects of global slenderness and cross-sectional slenderness on the response of the considered element in a state of ultimate bearing capacity were considered and analysed. In this way, a comprehensive and reliable database was formed which enabled (1) verification of international standardized methods for the design of axially compressed stainless steel elements and (2) basis for mathematical interpretation of the elements load-bearing capacity and defining appropriate recommendations for their design in accordance with the implemented procedures of European standards for steel load-bearing structures. The obtained results enabled a development of new buckling curves for each type of angles – cold-formed, hot-rolled and laser-welded for lean-duplex alloy and austenitic stainless steel alloy.

Keywords: Stainless steel, Angle, Cold-formed, Hot-rolled, Laser-welded, Compression, Geometrical imperfection, Residual stress, Flexural buckling, Torsional-flexural buckling.

Scientific field: Structural engineering

Scientific subfield: Steel structures

Sadržaj

Zahvalnice.....	i
Rezime	iii
Abstract	v
Sadržaj.....	vii
Popis slika	xi
Popis tabela	xix
Oznake	xxi
1 Uvod.....	1
1.1 Opšte.....	1
1.2 Predmet i cilj istraživanja.....	3
1.3 Sadržaj doktorske disertacije.....	4
2 Pregled i analiza literature.....	7
2.1 Opšte.....	7
2.2 Mehanička svojstva materijala	7
2.3 Strukturne imperfekcije.....	10
2.3.1 Zaostali naponi	10
2.3.2 Početne geometrijske imperfekcije	12
2.4 Teorijska analiza nosivosti ravnokrakih ugaonika pri dejstvu centričnog pritiska	13
2.4.1 Nosivost poprečnog preseka na pritisak i nosivost poprečnog preseka pri izbočavanju.....	14
2.4.2 Nosivost elementa na izvijanje.....	15
2.5 Pregled dosadašnjih eksperimentalnih i numeričkih istraživanja	17
2.5.1 Eksperimentalna i numerička istraživanja ugaonika od ugljeničnog čelika	17
2.5.2 Eksperimentalna i numerička istraživanja ugaonika od nerđajućeg čelika.....	19
2.6 Nosivost centrično pritisnutih elemenata prema EN 1993-1-4	24
2.7 Nosivost centrično pritisnutih elemenata prema AS/NZS 4673 i SEI/ASCE 8-02.....	26
2.8 Nosivost centrično pritisnutih elemenata prema AISC <i>Design Guide 27</i>	28
3 Eksperimentalna ispitivanja	31
3.1 Sadržaj eksperimentalnog ispitivanja.....	31
3.2 Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala	32
3.2.1 Rezultati standardnih testova pri zatezanju za materijal EN 1.4162.....	34
3.2.2 Rezultati standardnih testova pri zatezanju za materijal EN 1.4301	38
3.3 Merenje početnih geometrijskih imperfekcija.....	40
3.4 Merenje zaostalih napona.....	48

3.5	Ispitivanje kratkih stubova na pritisak	51
3.5.1	Rezultati ispitivanja kratkih stubova na pritisak	54
3.5.2	Analiza rezultata ispitivanja	56
3.6	Ispitivanje nosivosti elemenata na izvijanje	57
3.6.1	Opis ispitanih uzoraka	57
3.6.2	Dispozicija i postupak ispitivanja	61
3.6.3	Prikaz rezultata ispitivanja i diskusija	65
4	Numerička analiza metodom konačnih elemenata	91
4.1	Uvod	91
4.2	Opis numeričke analize	91
4.2.1	Mreža konačnih elemenata i granični uslovi u modelima	92
4.2.2	Materijalni modeli	93
4.2.3	Početne geometrijske imperfekcije	94
4.2.4	Zaostali naponi	95
4.2.5	Uticaj početnog ekscentriciteta delovanja opterećenja	97
4.3	Rezultati numeričke simulacije i validacije	97
4.3.1	Numerička simulacija i validacija kratkih stubova	97
4.3.2	Numerička simulacija i validacija testa nosivosti na izvijanje	99
5	Parametarska analiza	105
5.1	Uvod	105
5.2	Studija osetljivosti na imperfekcije	105
5.2.1	Studija osetljivosti za hladnooblikovane ugaonike	105
5.2.2	Studija osetljivosti za vrućevaljane ugaonike	107
5.2.3	Studija osetljivosti za laserski zavarene ugaonike	108
5.3	Numerička parametarska analiza	109
5.3.1	Parametarska analiza za hladnooblikovane ugaonike	110
5.3.2	Parametarska analiza za vrućevaljane ugaonike	113
5.3.3	Parametarska analiza za laserski zavarene ugaonike	115
6	Preporuke za proračun	117
6.1	Uvod	117
6.2	Preporuke za proračun hladnooblikovanih ugaonika	117
6.3	Preporuke za proračun vrućevaljanih ugaonika	119
6.4	Preporuke za proračun laserski zavarenih ugaonika	121
7	Zaključci i preporuke za buduća istraživanja	125
	Literatura	127

Prilog A – početne geometrijske imperfekcije uzoraka	131
Prilog B – rezultati testa nosivosti elemenata na izvijanje.....	153
Biografija autora	169
Изјава о ауторству	171
Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада	173
Изјава о коришћењу	175

Popis slika

Slika 1.1– Hemijski sastav u zavisnosti od grupe nerđajućeg čelika.....	1
Slika 1.2– Različiti tipovi ravnokrakih ugaonika.....	4
Slika 2.1– Specifičnosti naponsko – deformacijske krive za nerđajući čelik	7
Slika 2.2– Ilustracija Mirambell – Real-ovog analitičkog modela materijala	9
Slika 2.3– Modeli zaostalih napona sa membranskom komponentom i komponentom savijanja [11]	11
Slika 2.4– Predloženi modeli zaostalih napona savijanja za hladnooblikovane i vrućevaljane ugaonike [11]	12
Slika 2.5– Položaj centra smicanja i glavnih osa inercije kod ravnokrakih ugaonika	15
Slika 2.6– Poređenje efektivne i nominalne vitkosti poprečnih preseka ispitanih ugaonika [40]	19
Slika 2.7– Poređenje rezultata studije [41] sa proračunskim vrednosti i predloženo krivom izvijanja	20
Slika 2.8– Prikaz rezultata eksperimentalnog ispitivanja i numeričke analize studije [42].....	20
Slika 2.9– Prikaz rezultata eksperimentalnog ispitivanja i numeričke analize studije [44].....	21
Slika 2.10– Prikaz rezultata eksperimentalnog ispitivanja i numeričke studije [45].....	21
Slika 2.11–Poređenje rezultata eksperimentalnog ispitivanja i numeričke studije sa predloženim modelima proračuna [46].....	22
Slika 2.12–Poređenje rezultata eksperimentalnog ispitivanja sa proračunskim vrednostima [47]....	22
Slika 2.13–Poređenje rezultata eksperimentalnog ispitivanja i numeričke studije sa proračunskim vrednostima i predloženim postupkom proračuna [49]	23
Slika 3.1 - Uzorci korišćeni u eksperimentu	32
Slika 3.2 – Epruveta iz prevoja hladnooblikovanog ugaonika.....	33
Slika 3.3 – Epruveta iz gotovog proizvoda vrućevaljanog ugaonika.....	34
Slika 3.4 – Ispitivanje epruvete testom na zatezanje	34
Slika 3.5 – Epruveta od nerđajućeg čelika pre i nakon ispitivanja	34
Slika 3.6 – Krive napon - dilatacija dobijene ispitivanjem LFC epruveta.....	35
Slika 3.7 – Krive napon - dilatacija dobijene ispitivanjem TFC epruveta.....	35
Slika 3.8 – Krive napon - dilatacija dobijene ispitivanjem ravnih epruveta iz kraka L profila	36
Slika 3.9 – Krive napon - dilatacija dobijene ispitivanjem ugaonih epruveta iz prevoja L profila ...	36
Slika 3.10 – Krive napon - dilatacija dobijene ispitivanjem epruveta pri zatezanju za materijal EN 1.4162.....	37
Slika 3.11 – Krive napon - dilatacija dobijene ispitivanjem epruveta iz vrućevaljanog ugaonika	38

Slika 3.12 – Krive napon - dilatacija dobijene ispitivanjem epruveta iz laserski zavarenog ugaonika	39
Slika 3.13 – Ilustracija merenja mernim sistemom Leica Absolute Tracker AT960.....	41
Slika 3.14 – Prikaz rezultata merenja korišćenog mernog sistema, Leica Absolute Tracker AT960	41
Slika 3.15 – Raspored odstupanja na 3D modelu za uzorak ACF $80 \times 80 \times 4 - 1000 - 1$	42
Slika 3.16 – Raspored odstupanja na 3D modelu za uzorak AHR $60 \times 60 \times 6 - 2000 - 4$	42
Slika 3.17 – Raspored odstupanja na 3D modelu za uzorak ALW $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 3$	43
Slika 3.18 – Podela konture uzorka na konačne elemente u cilju određivanja imperfekcija.....	43
Slika 3.19 – Definicija parametara imperfekcije: (a) otklon; (b) imperfekcija u pravcu ose u; (c) imperfekcija u pravcu ose v; (d) rotacija	44
Slika 3.20 – Distribucija izmerenih početnih geometrijskih imperfekcija za uzorak ACF $80 \times 80 \times 4 - 1000 - 4$	44
Slika 3.21 – Distribucija izmerenih početnih geometrijskih imperfekcija za uzorak AHR $60 \times 60 \times 6 - 2000 - 3$	45
Slika 3.22 – Distribucija izmerenih početnih geometrijskih imperfekcija za uzorak AHR $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 2$	45
Slika 3.23 – Distribucija izmerenih početnih geometrijskih imperfekcija za uzorak ALW $60 \times 60 \times 6 - 800 - 1$	46
Slika 3.24 – Distribucija izmerenih početnih geometrijskih imperfekcija za uzorak ALW $100 \times 100 \times 10 - 2500 - 4$	46
Slika 3.25 – Dimenzije uzorka AHR $100 \times 100 \times 10$, raspored mernih traka i položaj rezova	49
Slika 3.26 – Dimenzije uzorka ALW $100 \times 100 \times 10$, raspored mernih traka i položaj rezova.....	49
Slika 3.27 – Poprečno sečenje uzorka za ispitivanje zaostalih napona.....	49
Slika 3.28 – Uzorci za ispitivanje zaostalih napona nakon sečenja	50
Slika 3.29 – Raspored zaostalih napona u funkciji širine kraka kod uzorka AHR $100 \times 100 \times 10$..	50
Slika 3.30 – Raspored zaostalih napona u funkciji širine kraka kod uzorka ALW $100 \times 100 \times 10$..	51
Slika 3.31 – Oznake geometrijskih karakteristika poprečnih preseka	53
Slika 3.32 – Dispozicija ispitivanja kratkog stuba na pritisak	53
Slika 3.33 – Ispitivanje kratkog stuba pri pritisku	54
Slika 3.34 – Deformisani oblik kratkih stubova nakon ispitivanja	54
Slika 3.35 – Dijagrami sila - skraćenje uzorka	55
Slika 3.36 – Zglobna ležišta na gornjem i donjem kraju uzorka.....	61
Slika 3.37 – Postavljanje uzorka u centričan položaj.....	62
Slika 3.38 – Postavka eksperimenta i raspored uređaja za merenje.....	63
Slika 3.39 – Raspored ugibomera pri vrhu elementa (presek A-A slika 3.38)	63

Slika 3.40 – Raspored ugibomera neposredno iznad polovine visine elementa	64
Slika 3.41 – Raspored mernih uređaja u polovini visine elementa (presek C-C slika 3.38).....	64
Slika 3.42 – Raspored ugibomera pri dnu elementa (presek D-D slika 3.38).....	64
Slika 3.43 – Raspored ugibomera na donjoj oslonačkoj ploči (presek E-E slika 3.38).....	65
Slika 3.44 – Detalji rasporeda merne opreme pri ispitivanju nosivosti elemenata na izvijanje	65
Slika 3.45 – Ilustracija položaja deformisanog poprečnog preseka u odnosu na nedeformisani.....	66
Slika 3.46 – Tipični oblici deformacije uzoraka serije ACF 80 × 80 × 4 – 1000	67
Slika 3.47 – Tipični oblici deformacije uzoraka serije ACF 80 × 80 × 4 – 1000	67
Slika 3.48 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ACF 80 × 80 × 4 – 1000 – 3.....	68
Slika 3.49 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ACF 80 × 80 × 4 – 1000 – 2.....	68
Slika 3.50 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ACF 80 × 80 × 4 – 2000 – 1.....	69
Slika 3.51 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ACF 80 × 80 × 4 – 2000 – 4.....	69
Slika 3.52 – Tipični oblici deformacije vrućevaljanih uzoraka u oblasti male vitkosti.....	72
Slika 3.53 – Tipični oblici deformacije vrućevaljanih uzoraka u oblasti srednje vitkosti.....	73
Slika 3.54 – Tipični oblici deformacije vrućevaljanih uzoraka u oblasti visoke vitkosti.....	73
Slika 3.55 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR 100 × 100 × 10 – 500 – 2.....	74
Slika 3.56 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR 100 × 100 × 10 – 500 – 3.....	74
Slika 3.57 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR 60 × 60 × 6 – 800 – 1.....	75
Slika 3.58 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR 100 × 100 × 10 – 1500 – 2.....	75
Slika 3.59 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR 100 × 100 × 10 – 1500 – 3.....	76
Slika 3.60 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR 60 × 60 × 6 – 2000 – 2.....	76
Slika 3.61 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR 60 × 60 × 6 – 2000 – 3.....	77
Slika 3.62 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR 100 × 100 × 10 – 2500 – 3.....	77
Slika 3.63 – Tipični oblici deformacije vrućevaljanih uzoraka u oblasti male vitkosti.....	82
Slika 3.64 – Tipični oblici deformacije vrućevaljanih uzoraka u oblasti srednje vitkosti.....	82
Slika 3.65 – Tipični oblici deformacije vrućevaljanih uzoraka u oblasti visoke vitkosti.....	83
Slika 3.66 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 100 × 100 × 10 – 500 – 4.....	83
Slika 3.67 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 60 × 60 × 6 – 800 – 3.....	84
Slika 3.68 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 100 × 100 × 10 – 1500 – 2.....	84
Slika 3.69 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 60 × 60 × 6 – 2000 – 2.....	85
Slika 3.70 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 60 × 60 × 6 – 2000 – 3.....	85
Slika 3.71 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 100 × 100 × 10 – 2500 – 3.....	86
Slika 4.1 – Geometrija, granični uslovi i mreža modela za simulaciju eksperimenta za ACF.....	92
Slika 4.2 – Geometrija, granični uslovi i mreža modela za simulaciju eksperimenta za AHR i ALW	93

Slika 4.3 – Dijagrami stvarnih veza napon-dilatacija	94
Slika 4.4 – Sopstveni oblici izvijanja uzoraka u LBA	95
Slika 4.5 – Poređenje izmerene raspodele imperfekcija sa zadatim u numeričkoj simulaciji	95
Slika 4.6 – Raspodela modeliranih zaostalih napona u vrućevaljanim ugaonicima	96
Slika 4.7 – Raspodela modeliranih zaostalih napona u laserski zavarenim ugaonicima	96
Slika 4.8 – Početni ekscentricitet delovanja opterećenja na krajevima uzoraka.....	97
Slika 4.9 – Poređenje deformisanog oblika numeričke analize i eksperimentalnog ispitivanja za kratke stubove	98
Slika 4.10 – Poređenje deformisanog oblika numeričke analize i eksperimentalnog ispitivanja za kratke stubove AHR i ALW.....	98
Slika 4.11 – Poređenje deformisanog oblika numeričke analize i eksperimentalnog ispitivanja za kratke stubove ACF	98
Slika 4.12 – Poređenje deformisanog oblika numeričke analize i eksperimentalnog ispitivanja nosivosti na izvijanje za ACF uzorke	99
Slika 4.13 – Poređenje deformisanog oblika numeričke analize i eksperimentalnog ispitivanja nosivosti na izvijanje za AHR uzorke.....	100
Slika 4.14 – Poređenje deformisanog oblika numeričke analize i eksperimentalnog ispitivanja nosivosti na izvijanje za ALW uzorke	100
Slika 4.15 – Poređenje ključnih rezultata eksperimenta i numeričke simulacije ispitivanja nosivosti na izvijanje za ACF uzorke.....	101
Slika 4.16 – Poređenje ključnih rezultata eksperimenta i numeričke simulacije ispitivanja nosivosti na izvijanje za AHR uzorke	102
Slika 4.17 – Poređenje ključnih rezultata eksperimenta i numeričke simulacije ispitivanja nosivosti na izvijanje za ALW uzorke.....	103
Slika 5.1 – Procena dužine platoa krive izvijanja za ACF uzorke.....	112
Slika 5.2 – Krive izvijanja sa raspodelom rezultata numeričke analize za fleksiono izvijanje za ACF	112
Slika 5.3 – Kriva izvijanja sa raspodelom rezultata numeričke analize za torziono-fleksiono izvijanje za ACF.....	113
Slika 5.4 – Krive izvijanja sa raspodelom rezultata numeričke analize za fleksiono izvijanje za AHR	114
Slika 5.5 – Krive izvijanja sa raspodelom rezultata numeričke analize za torziono-fleksiono izvijanje za AHR.....	115
Slika 5.6 – Krive izvijanja sa raspodelom rezultata numeričke analize za fleksiono izvijanje za ALW.....	116

Slika 5.7 – Krive izvijanja sa raspodelom rezultata numeričke analize za torziono-fleksiono izvijanje za ALW	116
Slika 6.1 – Poređenje numeričkih i eksperimentalnih istraživanja sa predloženom krivom izvijanja za hladnooblikovane ugaonike za fleksiono izvijanje.....	117
Slika 6.2 – Poređenje numeričkih i eksperimentalnih istraživanja sa predloženom krivom izvijanja za hladnooblikovane ugaonike za torziono-fleksiono izvijanje.....	118
Slika 6.3 – Poređenje numeričkih i eksperimentalnih istraživanja sa proračunskim vrednostima nosivosti prema EN 1993-1-4 sa predloženom krivom izvijanja za ACF	119
Slika 6.4 – Poređenje numeričkih i eksperimentalnih istraživanja sa predloženom krivom izvijanja za vrućevaljane ugaonike za fleksiono izvijanje.....	120
Slika 6.5 – Poređenje numeričkih i eksperimentalnih istraživanja sa predloženom krivom izvijanja za vrućevaljane ugaonike za torziono-fleksiono izvijanje	120
Slika 6.6 – Poređenje numeričkih i eksperimentalnih istraživanja sa proračunskim vrednostima nosivosti prema EN 1993-1-4 sa predloženom krivom izvijanja za AHR.....	121
Slika 6.7 – Poređenje numeričkih i eksperimentalnih istraživanja sa predloženom krivom izvijanja za laserski zavarene ugaonike za fleksiono izvijanje.....	122
Slika 6.8 – Poređenje numeričkih i eksperimentalnih istraživanja sa predloženom krivom izvijanja za laserski zavarene ugaonike za torziono-fleksiono izvijanje	122
Slika 6.9 – Poređenje numeričkih i eksperimentalnih istraživanja sa proračunskim vrednostima nosivosti prema EN 1993-1-4 sa predloženom krivom izvijanja za ALW	123
Slika A.1 – Geometrijske imperfekcije uzorka ACF 80 × 80 × 4 – 1000 – 1.....	131
Slika A.2 – Geometrijske imperfekcije uzorka ACF 80 × 80 × 4 – 1000 – 2.....	131
Slika A.3 – Geometrijske imperfekcije uzorka ACF 80 × 80 × 4 – 1000 – 3.....	132
Slika A.4 – Geometrijske imperfekcije uzorka ACF 80 × 80 × 4 – 2000 – 1.....	132
Slika A.5 – Geometrijske imperfekcije uzorka ACF 80 × 80 × 4 – 2000 – 2.....	133
Slika A.6 – Geometrijske imperfekcije uzorka ACF 80 × 80 × 4 – 2000 – 3.....	133
Slika A.7 – Geometrijske imperfekcije uzorka ACF 80 × 80 × 4 – 2000 – 4.....	134
Slika A.8 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR 60 × 60 × 6 – 800 – 1	134
Slika A.9 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR 60 × 60 × 6 – 800 – 2.....	135
Slika A.10 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR 60 × 60 × 6 – 800 – 3.....	135
Slika A.11 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR 60 × 60 × 6 – 800 – 4.....	136
Slika A.12 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR 60 × 60 × 6 – 2000 – 1	136
Slika A.13 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR 60 × 60 × 6 – 2000 – 2.....	137
Slika A.14 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR 60 × 60 × 6 – 2000 – 4.....	137
Slika A.15 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR 100 × 100 × 10 – 500 – 1	138

Slika A.16 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $100 \times 100 \times 10 - 500 - 2$	138
Slika A.17 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $100 \times 100 \times 10 - 500 - 3$	139
Slika A.18 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $100 \times 100 \times 10 - 500 - 4$	139
Slika A.19 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 1$	140
Slika A.20 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 3$	140
Slika A.21 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 4$	141
Slika A.22 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $100 \times 100 \times 10 - 2500 - 1$	141
Slika A.23 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $100 \times 100 \times 10 - 2500 - 2$	142
Slika A.24 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $100 \times 100 \times 10 - 2500 - 3$	142
Slika A.25 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $100 \times 100 \times 10 - 2500 - 4$	143
Slika A.26 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW $60 \times 60 \times 6 - 800 - 2$	143
Slika A.27 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW $60 \times 60 \times 6 - 800 - 3$	144
Slika A.28 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW $60 \times 60 \times 6 - 800 - 4$	144
Slika A.29 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW $60 \times 60 \times 6 - 2000 - 1$	145
Slika A.30 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW $60 \times 60 \times 6 - 2000 - 2$	145
Slika A.31 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW $60 \times 60 \times 6 - 2000 - 3$	146
Slika A.32 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW $60 \times 60 \times 6 - 2000 - 4$	146
Slika A.33 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW $100 \times 100 \times 10 - 500 - 1$	147
Slika A.34 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW $100 \times 100 \times 10 - 500 - 2$	147
Slika A.35 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW $100 \times 100 \times 10 - 500 - 3$	148
Slika A.36 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW $100 \times 100 \times 10 - 500 - 4$	148
Slika A.37 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 1$	149
Slika A.38 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 2$	149
Slika A.39 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 3$	150
Slika A.40 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 4$	150
Slika A.41 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW $100 \times 100 \times 10 - 2500 - 1$	151
Slika A.42 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW $100 \times 100 \times 10 - 2500 - 2$	151
Slika A.43 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW $100 \times 100 \times 10 - 2500 - 3$	152
Slika B.1 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ACF $80 \times 80 \times 4 - 1000 - 1$	153
Slika B.2 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ACF $80 \times 80 \times 4 - 1000 - 4$	153
Slika B.3 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ACF $80 \times 80 \times 4 - 2000 - 2$	154
Slika B.4 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ACF $80 \times 80 \times 4 - 2000 - 3$	154
Slika B.5 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR $60 \times 60 \times 6 - 800 - 2$	155
Slika B.6 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR $60 \times 60 \times 6 - 800 - 3$	155
Slika B.7 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR $60 \times 60 \times 6 - 800 - 4$	156

Slika B.8 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR $60 \times 60 \times 6 - 2000 - 1$	156
Slika B.9 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR $60 \times 60 \times 6 - 2000 - 4$	157
Slika B.10 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR $100 \times 100 \times 10 - 500 - 1$	157
Slika B.11 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR $100 \times 100 \times 10 - 500 - 4$	158
Slika B.12 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 1$	158
Slika B.13 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 4$	159
Slika B.14 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR $100 \times 100 \times 10 - 2500 - 1$	159
Slika B.15 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR $100 \times 100 \times 10 - 2500 - 2$	160
Slika B.16 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR $100 \times 100 \times 10 - 2500 - 4$	160
Slika B.17 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW $60 \times 60 \times 6 - 800 - 1$	161
Slika B.18 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW $60 \times 60 \times 6 - 800 - 2$	161
Slika B.19 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW $60 \times 60 \times 6 - 800 - 4$	162
Slika B.20 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW $60 \times 60 \times 6 - 2000 - 1$	162
Slika B.21 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW $60 \times 60 \times 6 - 2000 - 4$	163
Slika B.22 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW $100 \times 100 \times 10 - 500 - 1$	163
Slika B.23 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW $100 \times 100 \times 10 - 500 - 2$	164
Slika B.24 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW $100 \times 100 \times 10 - 500 - 3$	164
Slika B.25 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 1$	165
Slika B.26 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 3$	165
Slika B.27 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 4$	166
Slika B.28 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW $100 \times 100 \times 10 - 2500 - 1$	166
Slika B.29 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW $100 \times 100 \times 10 - 2500 - 2$	167
Slika B.30 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW $100 \times 100 \times 10 - 2500 - 4$	167

Popis tabela

Tabela 2-1 Sažetak eksperimentalnih ispitivanja ugaonika od ugljeničnog čelika.....	19
Tabela 2-2 Sažetak ispitivanja ugaonika od nerđajućeg čelika.....	23
Tabela 2-3 Sažetak parametarskih analiza ispitivanja ugaonika od nerđajućeg čelika.....	24
Tabela 2-4 Vrednost koeficijenta imperfekcije α i granične relativne vitkosti λ_0 u EN 1993-1-4....	24
Tabela 2-5 Vrednost koeficijenta α , β , λ_0 i λ_1 u zavisnosti od klase nerđajućeg čelika prema [43]	27
Tabela 3-1 Hemijski sastav materijala EN 1.4301 prema atestu proizvođača i prema EN 10088-4.	33
Tabela 3-2 Hemijski sastav materijala EN 1.4162 prema EN 10088-4.....	33
Tabela 3-3 Mehanička svojstva materijala za poprečni pravac prema EN 10088-4 i atestu proizvođača	33
Tabela 3-4 Mehanička svojstva materijala EN 1.4162 dobijena ispitivanjem pri zatezanju	36
Tabela 3-5 Srednje vrednosti mehaničkih svojstva materijala EN 1.4162 dobijenih ispitivanjem pri zatezanju.....	37
Tabela 3-6 Mehanička svojstva materijala EN 1.4301 dobijena ispitivanjem pri zatezanju	39
Tabela 3-7 Srednje vrednosti mehaničkih svojstva materijala EN 1.4301 za vrućevaljane ugaonike dobijenih ispitivanjem pri zatezanju	39
Tabela 3-8 Srednje vrednosti mehaničkih svojstva materijala EN 1.4301 za laserski zavarene ugaonike dobijenih ispitivanjem pri zatezanju.....	40
Tabela 3-9 Mreža tačaka za određivanje početnih geometrijskih imperfekcija.....	43
Tabela 3-10 Maksimalne vrednosti početnih geometrijskih imperfekcija uzoraka	47
Tabela 3-11 Izmerene dimenzije uzoraka ACF $80 \times 80 \times 4 - 240$	52
Tabela 3-12 Izmerene dimenzije uzoraka AHR $60 \times 60 \times 4 - 180$ i AHR $100 \times 100 \times 10 - 300$	52
Tabela 3-13 Izmerene dimenzije uzoraka ALW $60 \times 60 \times 4 - 180$ i ALW $100 \times 100 \times 10 - 300$...	52
Tabela 3-14 Izmerene geometrijske karakteristike uzoraka kratkih stubova.....	56
Tabela 3-15 Izmerene dimenzije hladnooblikovanih uzoraka	58
Tabela 3-16 Izmerene dimenzije vrućevaljanih uzoraka	59
Tabela 3-17 Izmerene dimenzije laserski zavarenih uzoraka	60
Tabela 3-18 Položaj ugibomera u x-y koordinatnom sistemu	65
Tabela 3-19 Rezultati testa nosivosti na izvijanje elemenata hladnooblikovanih ugaonika.....	70
Tabela 3-20 Poređenje eksperimentalnih rezultatima sa proračunskim vrednostima za ACF	72
Tabela 3-21 Rezultati testa nosivosti na izvijanje elementa vrućevaljanih ugaonika.....	78
Tabela 3-22 Poređenje eksperimentalnih rezultatima sa proračunskim vrednostima za AHR.....	81
Tabela 3-23 Rezultati testa nosivosti na izvijanje elementa laserski zavarenih ugaonika.....	86
Tabela 3-24 Poređenje eksperimentalnih rezultatima sa proračunskim vrednostima za ALW	89

Tabela 4-1 Poređenje eksperimentalne i numeričke granične nosivosti kratkih stubova	99
Tabela 4-2 Poređenje eksperimentalne i numeričke nosivosti na izvijanje za ACF	104
Tabela 4-3 Poređenje eksperimentalne i numeričke nosivosti na izvijanje za AHR	104
Tabela 4-4 Poređenje eksperimentalne i numeričke nosivosti na izvijanje za ALW.....	104
Tabela 5-1 Rezultati studije osetljivosti na imperfekcije za hladnooblikovane ugaonike	106
Tabela 5-2 Rezultati studije osetljivosti na imperfekcije za vrućevaljane ugaonike	108
Tabela 5-3 Rezultati studije osetljivosti na imperfekcije za laserski zavarene ugaonike	109
Tabela 5-4 Geometrija poprečnih preseka i dužine uzoraka u parametarskoj analizi za hladnooblikovane ugaonike	110
Tabela 5-5 Nosivost poprečnih preseka korišćenih u parametarskoj analizi za hladnooblikovane ugaonike	111
Tabela 5-6 Geometrija poprečnih preseka i dužine uzoraka u parametarskoj analizi za vrućevaljane ugaonike	114
Tabela 5-7 Geometrija poprečnih preseka i dužine uzoraka u parametarskoj analizi za laserski zavarene ugaonike.....	115
Tabela 6-1 Poređenje eksperimentalnih i numeričkih rezultata sa proračunskim vrednostima za ACF prema preporučenim parametrima za EN 1993-1-4.....	119
Tabela 6-2 Poređenje eksperimentalnih i numeričkih rezultata sa proračunskim vrednostima za AHR prema preporučenim parametrima za EN 1993 – 1 – 4	121
Tabela 6-3 Poređenje eksperimentalnih i numeričkih rezultata sa proračunskim vrednostima za ALW prema preporučenim parametrima za EN 1993 – 1 – 4	123

Oznake

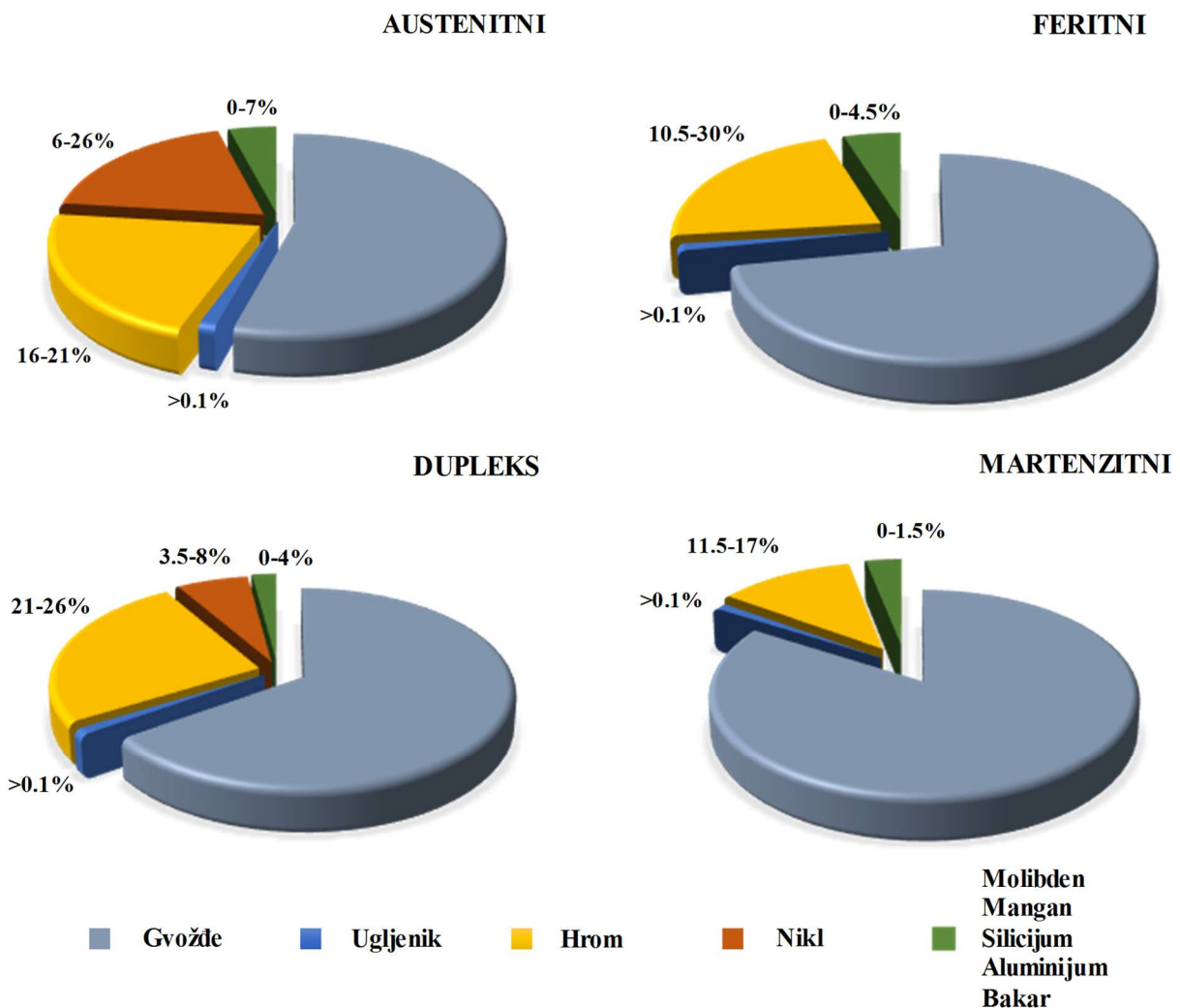
A	Bruto površina poprečnog preseka
A_{eff}	Površina efektivnog poprečnog preseka
A_e	Efektivna površina sračunata za napon izvijanja f_n (AS/NZS 4673)
A_g	Neto površina poprečnog preseka (AISC DG 27)
A_5	Izduženje pri lomu za standardnu dužinu merenja
b	Širina kraka L profila
C_w	Sektorski moment inercije (AS/NZS 4673)
C_{mz}	Koeficijent oblika dijagrama momenta savijanja (AS/NZS 4673)
d_x	Pomeranje u pravcu ose x pri ispitivanju nosivosti elemenata na izvijanje
d_y	Pomeranje u pravcu ose y pri ispitivanju nosivosti elemenata na izvijanje
d_u	Pomeranje u pravcu ose v pri ispitivanju nosivosti elemenata na izvijanje
$d_{u,u}$	Pomeranje u pravcu ose v pri dostizanju granične sile nosivosti elemenata na izvijanje
$d_{u,v}$	Pomeranje u pravcu ose u pri dostizanju granične sile nosivosti elemenata na izvijanje
d_v	Pomeranje u pravcu ose u pri ispitivanju nosivosti elemenata na izvijanje
E	Modul elastičnosti
E_t	Tangentni modul
e_{Nz}	Efektivno pomeranje težišta u pravcu glavne ose inercije pri naprezanju čistog pritiska
F_{cr}	Kritičan napon izvijanja (AISC DG 27)
F_e	Elastičan napon izvijanja (AISC DG 27)
f_n	Napon izvijanja (AS/NZS 4673)
f_y	Napon na granici razvlačenja
f_u	Čvrstoća pri zatezanju
$f_{0.2}$	Konvencionalna granica razvlačenja
G	Modul smicanja
I	Moment inercije
I_t	Torzioni moment inercije bruto poprečnog preseka
I_w	Sektorski moment inercije bruto poprečnog preseka
i_y	Poluprečnik inercije bruto poprečnog preseka oko ose $y - y$
i_z	Poluprečnik inercije bruto poprečnog preseka oko ose $z - z$
J	Torziona konstanta (AS/NZS 4673)
K	Koeficijent dužine izvijanja
K_T	Koeficijent dužine izvijanja za torziono izvijanje
k_z	Koeficijent interakcije
L	Dužina elementa
L_{cr}	Dužina izvijanja
L_t	Dužina izvijanja elemenata za torziono izvijanje
$N_{b,Rd}$	Nosivost na izvijanje centrično pritisnutih elemenata
$N_{u,test}$	Nosivost elemenata na izvijanje dobijena u eksperimentalnom ispitivanju
$N_{u,FEM}$	Nosivost elemenata na izvijanje dobijena u numeričkoj analizi
$N_{u,pred}$	Proračunska vrednost nosivosti uzoraka na izvijanje prema razmatranom standardu
N_c	Nosivost poprečnog preseka na pritisak (AS/NZS 4673)
$N_{c,u}$	Nosivost poprečnog preseka na pritisak
N_{cr}	Elastična kritična sila fleksionog izvijanja
$N_{cr,T}$	Elastična kritična sila torzionog izvijanja
$N_{cr,TF}$	Elastična kritična sila torziono-fleksionog izvijanja
N_{ED}	Proračunska vrednost uticaja aksijalne sile pritiska
N_e	Ojlerova kritična sila fleksionog izvijanja oko slabije ose inercije (AS/NZS 4673)
N^*	Proračunska vrednost sile pritiska (AS/NZS 4673)
N_s	Nominalna vrednost nosivosti poprečnog preseka na pritisak (AS/NZS 4673)
n	Ramberg Osgood – ov koeficijent nelinearnosti

M_z^*	Proračunska vrednost momenta savijanja oko z ose (AS/NZS 4673)
M_{bz}	Nominalna vrednost nosivosti elemenata na savijanje oko ose z (AS/NZS 4673)
$M_{c,v}$	Proračunska nosivost elementa na savijanje oko slabije ose inercije (AISC DG 27)
$M_{r,v}$	Proračunska vrednost momenta savijanja oko slabije ose (AISC DG 27)
m	Ramberg Osgood – ov koeficijent nelinearnosti
P_c	Proračunska vrednost nosivosti centrično pritisnutog elementa (AISC DG 27)
P_n	Nominalna vrednost nosivosti centrično pritisnutih elemenata (AISC DG 27)
P_r	Proračunska vrednost sile pritiska (AISC DG 27)
R_k	Karakteristična vrednost nosivosti uzoraka
r_i	Unutrašnji radijus prevoja kod hladnooblikovanih ugaonika
r_1	Radijus u uglu vrućevaljanog ugaonika
r_2	Radijus na krajevima nožica vrućevaljanog ugaonika
s_x	Standardna devijacija
Q	Koeficijent redukcije usled lokalnog izbočavanja
r	Poluprečnik inercije bruto poprečnog preseka (AS/NZS 4673)
t	Debljina kraka ugaonika
V_x	Koeficijent varijacije
W_{eff}	Otporni moment efektivnog poprečnog preseka
y_0	y koordinata centra smicanja u odnosu na težište bruto poprečnog preseka
z_0	z koordinata centra smicanja u odnosu na težište bruto poprečnog preseka
α	Koeficijent imperfekcije
η	Koeficijent nesavršenosti
γ_{M1}	Parcijalni koeficijent sigurnosti za nosivost elemenata
$\delta_{u,b}$	Skraćenje uzorka pri ispitivanju nosivosti poprečnog preseka na pritisak
δ_u	Imperfekcija u pravcu ose v
$\delta_{u,0}$	Maksimalna vrednost imperfekcije u pravcu ose v
δ_v	Imperfekcija u pravcu ose u
$\delta_{v,0}$	Maksimalna vrednost imperfekcije u pravcu ose u
ϵ_{nom}	Nominalne vrednosti dilatacija
ϵ_{true}	Stvarne vrednosti dilatacija
ϵ_u	Vrednost dilatacije koja odgovara čvrstoći pri zatezanju
ϵ_f	Vrednost dilatacije pri lomu
θ	Torziona imperfekcija poprečnog preseka
θ_0	Maksimalna vrednost torziona imperfekcije poprečnog preseka
$\bar{\lambda}$	Relativna vitkost
$\bar{\lambda}_0$	Početna relativna vitkost
$\bar{\lambda}_{\text{eff}}$	Efektivna relativna vitkost
σ_{nom}	Nominalne vrednosti napona
σ_{true}	Stvarne vrednosti napona
$\sigma_{0.01}$	Granica proporcionalnosti
$\sigma_{0.05}$	Vrednost napona koji odgovara trajnoj plastičnoj deformaciji od 0.05%
$\sigma_{1.0}$	Vrednost napona koji odgovara trajnoj plastičnoj deformaciji od 1.0%
$\sigma_{1,b}$	Normalni napon pri dostizanju kapaciteta nosivosti poprečnog preseka na pritisak
ϕ_b	Redukcioni faktor za elemente izložene savijanju (AS/NZS 4673)
ϕ_c	Redukcioni faktor za elemente izložene pritisku (AS/NZS 4673)
φ	Obrtanje poprečnog preseka pri ispitivanju nosivosti elemenata na izvijanje
φ_u	Obrtanje preseka pri dostizanju granične sile nosivosti elemenata na izvijanje
χ	Koeficijent redukcije
ω	Imperfekcija poprečnog preseka
ω_0	Maksimalna imperfekcija poprečnog preseka

1 UVOD

1.1 Opšte

Nerđajući čelik pripada grupi obnovljivih i održivih materijala čija primena u savremenoj građevinskoj praksi poslednjih godina beleži izraziti rastući trend u industrijski razvijenim zemljama sveta. Nerđajući čelik je generički naziv za legirani čelik čija se postojanost na dejstvo korozije postiže sa najmanje 10.5% hroma i najviše 1.2% ugljenika. Dodavanjem drugih legirajućih elemenata, poput nikla, molibdena, magnezijuma, bakra ili titanijuma poboljšavaju se fizička mehanička svojstva materijala, njegova obradljivost, žilavost i postojanost na visokim i niskim temperaturama. Prema mikrostrukтури dele se na: feritne, austenitne, austenitno-feritne (dupleks), martenzitne i precipitacijski očvršle čelike. U građevinarstvu najveću primenu imaju austenitni, feritni i dupleks čelici. Njihova fizička, hemijska i mehanička svojstva variraju u zavisnosti od hemijskog sastava, ali svaku od grupe nerđajućih čelika karakteriše mogućnost formiranja zaštitnog sloja koji im daje sposobnost otpornosti na koroziju. Veće prisustvo hroma povećava otpornost na koroziju, dok prisustvo nikla proširuje obim agresivnih sredina u kojima je moguće koristiti nerđajući čelik. Slika 1.1 prikazuje raspon u kome se kreće učešće hroma i nikla u četiri porodice nerđajućih čelika [1].



Slika 1.1– Hemijski sastav u zavisnosti od grupe nerđajućeg čelika

Austenitni nerđajući čelici poseduju površinski centriranu kubnu rešetku za čije je formiranje zaslužno postojanje nikla, mangana i azota. Legure austenitnog nerđajućeg čelika koje imaju najveću primenu u građevinarstvu sadrže od 17 do 18% hroma i od 8 do 11% nikla. Odlikuje ih velika otpornost na koroziju, visoka duktilnost, laka mogućnost hladnog oblikovanja i dobra zavarljivost. U poređenju sa ugljeničnim čelicima pokazuju znatno bolju žilavost u širokom opsegu temperature. Za razliku od vrućih plastičnih deformacija koje ne izazivaju povećanje mehaničkih karakteristika, postupcima hladnog oblikovanja dolazi do povećanja mehaničkih karakteristika. Koroziona otpornost može se povećati većim učešćem hroma, molibdena i azota. Najpopularnija legura austenitnog nerđajućeg čelika, koja ima odličnu korozionu otpornost uz izrazitu duktilnost, je EN 1.4301, koja sadrži 18% hroma i 8% nikla. Primena ove legure u konstruktivnim elementima moguća je kroz sledeće proizvode: limove, profile, šipke i zavarenu mrežu. Legura EN 1.4401 zbog povećanog prisustva molibdena ima primenu u slučaju kada se zahteva veća koroziona otpornost. Super austenitni nerđajući čelici kao što su legure EN 1.4529 i EN 1.4565 nalaze primenu u okruženjima u kojima postoji veliko prisustvo hlorida, kao što je to slučaj u zatvorenim bazenima.

Feritni nerđajući čelici ne sadrže nikl i predstavljaju legure gvožđa sa hromom, koji se, kod najčešće korišćenih legura kreće od 10.5 do 18%. Ovi čelici poseduju zapreminski centriranu kubnu rešetku i na sobnoj temperaturi njihove mehaničke karakteristike su veoma slične onima koje imaju tradicionalni ugljenični čelici. U odnosu na austenitne nerđajuće čelike imaju nešto veću granicu razvlačenja, manju zavarljivost, težu mogućnost oblikovanja, manju duktilnost i manji koeficijent termičkog širenja. Slično kao i austenitni nerđajući čelici i kod feritnih dolazi do poboljšanja mehaničkih karakteristika postupcima hladnog oblikovanja, dok postupak vrućih plastičnih deformacija ne dovodi do poboljšanja mehaničkih karakteristika. Njihova dobra koroziona otpornost, koja se poboljšava dodatkom molibdena, zaslužna je za primenu ovih čelika u širokom spektru korozivnih sredina.

Strukturu dupleks nerđajućih čelika čini mešavina površinski i zapreminski centrirane kubne rešetke. Zbog mešovite mikrostrukture austenitnih i feritnih čelika ovi čelici se često nazivaju i austenitno – feritni čelici. Kombinacijom ovih mikrostrukture napravljene su ekonomične legure nerđajućih čelika koje imaju bolje mehaničke karakteristike od austenitnih i feritnih nerđajućih čelika. Najčešće sadrže 21 do 26% hroma, 3.5 do 8% nikla, 0.05 do 4% molibdena 0.05 do 0.3% azota. Iako, dupleks nerđajuće čelike odlikuje izrazita duktilnost, zbog većih mehaničkih karakteristika mogućnost hladnog oblikovanja je teža u odnosu na austenitne nerđajuće čelike. Postupcima hladnog oblikovanja dolazi do ojačanja materijala. Imaju dobru zavarljivost i otpornost na koroziju.

Pored visoke jedinične cene, jedan od glavnih razloga relativno male primene nerđajućeg čelika u odnosu na ugljenični čelik je nepotpunost tehničke regulative, koja još uvek ne sagledava na pravi način sve specifičnosti ovog materijala. Postojanost i visoka otpornost na koroziju, značajan kapacitet plastifikacije i izrazita duktilnost, kao i atraktivan površinski izgled bez zaštitnih premaza predstavljaju glavne prednosti nerđajućeg čelika kao osnovnog materijala u nosećim konstrukcijama.

Ravnokraki ugaonici predstavljaju grupu tradicionalnih čeličnih proizvoda sa dominantnom primenom u aksijalno opterećenim elementima nosećih čeličnih konstrukcija. Osnovna karakteristika ovih konstruktivnih elemenata leži u jednostavnosti oblika i geometrije poprečnog preseka koja se direktno reflektuje na lakoću u manipulaciji i montaži tokom izgradnje konstrukcije. Međutim, jednostavnost oblika poprečnog preseka ravnokrakih ugaonika sa druge strane usložnjava njihovo ponašanje tokom eksploatacionog veka. Granična nosivost centrično pritisnutih ravnokrakih ugaonika dominantno zavisi od geometrijskih karakteristika poprečnog preseka. Položaj glavnih osa inercije koje zaklapaju ugao od 45° u odnosu na krake preseka i položaj centra smicanja u temenu preseka koji je ekscentričan u odnosu na težište preseka određuju zanemarljivu sektorsku i torzionu krutost ravnokrakih ugaonika. Kao posledica, gubitak stabilnosti centrično pritisnutog elementa ravnokrakog ugaonika izrazito je kompleksan i dvojakom uslovljen fleksionim ili torziona-fleksionim izvijanjem.

Motiv istraživanja u oblasti ponašanja centrično pritisnutih ugaonika od nerđajućeg čelika određen je nedostatkom eksplicitnih uputstava za dimenzionisanje centrično pritisnutih ugaonika od nerđajućeg čelika u aktuelnim referentnim evropskim propisima. Ograničen broj eksperimentalnih

istraživanja u ovoj oblasti rezultovao je u analogiji proračunskog pristupa u odnosu na ekvivalentne centrično pritisnute ugaonike od ugljeničnog čelika. Evropski standard za dimenzionisanje konstruktivnih elemenata od nerđajućih čelika, EN 1993-1-4 [2] u poglavlju 5.4.1 referiše primenu odredbi za nosivost elemenata na fleksiono, torziono i torziono-fleksiono izvijanje koje su date u referentnim standardima za ugljenični čelik EN 1993-1-1 [3] i EN 1993-1-3 [4], uz primenu modifikacija datih u poglavljima 5.4.2. i 5.4.3. Sa druge strane, poglavlje 5.4.2. ne daje eksplicitne vrednosti koeficijenta imperfekcije i granične bezdimenzione vitkosti za ravnokrake ugaonike od nerđajućeg čelika u odgovarajućoj ravni izvijanja, u zavisnosti od tipa proizvoda i mehaničkih svojstava materijala. Ovakav nedostatak otvara pitanje projektanta koje se tiče primene odgovarajuće krive izvijanja prilikom projektovanja centrično pritisnutih ugaonika od nerđajućeg čelika.

Ispitivanja u okviru ove disertacije proširuju naučnu bazu iz oblasti ponašanja centrično pritisnutih ugaonika od nerđajućeg čelika. Pored standardnih vrućevaljanih i hladnooblikovanih ugaonika, ispitivanja obuhvataju i laserski zavarene ugaonike čija se analiza ponašanja pri centričnom pritisku ne može naći u naučnoj literaturi.

Zaključci koji će proisteći iz ovog naučnog istraživanja mogu imati direktnu primenu u svakodnevnoj inženjerskoj praksi u obliku preporuka za dimenzionisanje centrično pritisnutih ugaonika od nerđajućeg čelika.

1.2 Predmet i cilj istraživanja

Predmet naučnog istraživanja u okviru ove disertacije je ponašanje centrično pritisnutih ugaonika od nerđajućeg čelika koji su na oba kraja zglobo oslonjeni. Na ponašanje centrično pritisnutih elemenata od nerđajućeg čelika utiču mnogi parametri od kojih su najznačajniji: početne geometrijske imperfekcije, zaostali naponi, nelinearna veza između napona i dilatacije, mogućnost torziono-fleksionog izvijanja pored fleksionog izvijanja i lokalna nestabilnost poprečnog preseka klase 4. Glavni cilj naučnog istraživanja koje je prikazano u okviru ove disertacije je analiza uticaja navedenih parametara na graničnu nosivost centrično pritisnutih ugaonika od nerđajućih čelika usled fleksionog ili torziono-fleksionog izvijanja, odnosno interakcije ovih globalnih oblika izvijanja sa lokalnim nestabilnostima kod stubova sa vitkim poprečnim preseccima. Imajući u vidu značajne razlike u mehaničkim svojstvima i stepenu materijalne nelinearnosti između različitih legura nerđajućih čelika koje imaju primenu u građevinarstvu, predmetno istraživanje je fokusirano na austenitnoj i dupleks leguri nerđajućeg čelika. Različiti postupci proizvodnje konstruktivnih ravnokrakih ugaonika značajno utiču na promenu bazičnih svojstava materijala osnovne čelične trake, odnosno čeličnog ignota. Naknadni postupci termičke obrade i završne faze izvlačenja i sečenja proizvoda utiču na raspodelu i veličinu zaostalih napona koji se razvijaju i uravnotežuju u elementu tokom proizvodnog procesa. Imajući u vidu značajan uticaj raspodele zaostalih napona u elementu, odnosno promene u strukturi materijala tokom proizvodnje, na graničnu nosivost pritisnutih elemenata, ovo istraživanje uključuje tri različite grupe proizvoda koji imaju primarnu primenu u građevinarstvu: hladooblikovane, vrućevaljane i laserski zavarene ugaonike (slika 1.2).

Ugaonici dobijeni postupkom vrućeg valjanja dostupni su na tržištu u različitim dimenzijama, sa maksimalnom širinom kraka od 150 mm i različitim debljinama kraka. Ugaonici većih dimenzija mogu se dobiti postupcima hladnog oblikovanja ili laserskog zavarivanja. Laserski zavareni ugaonici predstavljaju najsavremeniji tip proizvoda od nerđajućih čelika koji uključuje primenu specijalizovanih lasera za međusobno zavarivanje pljoštih vrućevaljanih čeličnih limova bez primene dodatnog materijala za zavarivanje. Kao rezultat, dobijaju se proizvodi koje karakterišu preseccima sa oštrim uglovima bez zaobljenja i vidnog šava. Hladnooblikovani ugaonici dobijaju se postupkom presovanja ili hladnog valjanja na sobnoj temperaturi. Uobičajene debljine traka koje se koriste za hladnooblikovane proizvode su od 1 do 6 mm. Postupkom hladnog oblikovanja dolazi do značajnog poboljšanja mehaničkih svojstava materijala u zonama prevoja u kojima materijal trpi velike plastične deformacije. Ova karakteristika nerđajućih čelika ima znatan uticaj na ponašanje pritisnutih elemenata u oblasti male vitkosti.



(a) Vrućevaljani

(b) Laserski zavareni

(c) Hladnooblikovani

Slika 1.2– Različiti tipovi ravnokrakih ugaonika

Takođe, značajan uticaj na nosivost elemenata na centričan pritisak predstavlja raspodela i amplituda početnih geometrijskih imperfekcija elemenata. Poseban izazov u ovom istraživanju je merenje početnih geometrijskih imperfekcija, kao i analitička obrada izmerenih geometrijskih parametara (koordinata tačaka) za svaki uzorak eksperimentalnog ispitivanja. Pouzdanost u proceni veličine i raspodele početnih geometrijskih imperfekcija određuje tačnost numeričkih simulacija eksperimenata i daljih parametarskih studija.

Prva faza eksperimentalnog ispitivanja je sprovođenje standardnih testova na zatezanje koji uključuju utvrđivanje veze između napona i dilatacija i vrednosti svih relevantnih mehaničkih svojstava nerđajućeg čelika. U cilju utvrđivanja stepena anizotropije i asimetrije kao i uticaja hladnog oblikovanja na poboljšanje svojstava materijala, ispitivanje se sprovodi na ravnim podužno i poprečno orijentisanim epruvetama i ugaonim epruvetama koje se uzimaju direktno iz preseka i osnovne trake lima, respektivno.

Procesom vrućeg valjanja i laserskog zavarivanja unose se zaostali naponi u elemente, koji ostaju u njima i tokom eksploatacije. Vrednost zaostalih napona, kao i postupci za njihovo određivanje predstavljaju temu mnogih postojećih naučnih diskusija. Stoga, eksperimentalno određivanje vrednosti i raspodele zaostalih napona predstavlja važnu aktivnost ovog istraživanja.

Specifičan položaj težišta poprečnog preseka i glavnih osa inercija ugaonika čini ispitivanje nosivosti vitkih stubova na izvijanje izuzetno složenim, imajući u vidu neophodnost centričnog unosa sile i obezbeđivanje zahtevanih graničnih uslova na krajevima stubova.

Osnovni cilj ovog naučnog istraživanja je definisanje metode proračuna za dimenzionisanje centrično pritisnutih ugaonika od nerđajućeg čelika. Potrebno je odrediti zavisnost između koeficijenta redukcije (χ) i relativne vitkosti ($\bar{\lambda}$), odnosno definisati krivu izvijanja. Osnovna funkcionalna zavisnost se uspostavlja uzimajući u obzir sve relevantne parametre: izražen stepen materijalne nelinearnosti nerđajućeg čelika, ojačanje materijala usled hladne deformacije, globalnu vitkost elementa, vitkost poprečnog preseka, raspodelu i intenzitet zaostalih napona, raspodelu i veličinu početnih geometrijskih imperfekcija i granične uslove na krajevima elemenata.

1.3 Sadržaj doktorske disertacije

Doktorska disertacija sadrži ukupno sedam poglavlja, od kojih prvo poglavlje predstavlja uvod dok je opis istraživanja podeljen u šest celina u narednim poglavljima:

U drugom poglavlju data je teorijska analiza nosivosti ravnokrakih ugaonika pri dejstvu centričnog pritiska, pregled i analiza postojećih standarda i sprovedenih naučnih istraživanja koji su u vezi sa temom doktorske disertacije. Dat je pregled dosadašnjih istraživanja centrično pritisnutih ugaonika od nerđajućeg čelika, ali i centrično pritisnutih ugaonika od ugljeničnog čelika koja su značajna za sprovođenje ovog istraživanja. Presentovani su postupci dati u evropskim i američkim propisima za proračun centrično pritisnutih elemenata od nerđajućeg čelika.

U trećem poglavlju opisana su eksperimentalna ispitivanja koja su deo ove disertacije. Pored ispitivanja nosivosti na izvijanje, u ovom poglavlju prikazane su i eksperimentalne aktivnosti sa

ciljem određivanja mehaničkih karakteristika, nosivosti poprečnih preseka, merenja početnih geometrijskih imperfekcija i merenja zaostalih napona. Data je analiza rezultata eksperimentalnih ispitivanja i poređenje sa proračunskim vrednostima prema referentnim standardima.

U četvrtom poglavlju prikazana je numerička simulacija i verifikacija ispitivanja nosivosti elemenata na izvijanje metodom konačnih elemenata. Numerički modeli korišćeni za simulaciju i verifikaciju uključili su sve parametre od uticaja na nosivost elemenata na izvijanje: specifične uslove oslanjanja, mehaničke karakteristike, početne geometrijske imperfekcije i zaostale napone. Na osnovu rezultata eksperimentalnih ispitivanja izvršena je kalibracija i verifikacija numeričkih modela.

U petom poglavlju predstavljena je parametarska analiza, koja je sprovedena u okviru ovog istraživanja. Parametarskoj analizi prethodila je studija osetljivosti na imperfekcije, koja je obuhvatila različite kombinacije znaka i tipa početnih strukturnih imperfekcija sa ciljem pronalaska merodavne kombinacije za opsežnu parametarsku analizu. Parametarska analiza sprovedena je za sva tri tipa proizvoda varirajući dimenzije poprečnih preseka i dužina elemenata.

U šestom poglavlju date su preporuke za određivanje nosivosti centrično pritisnutih ugaonika saglasno postupku koji je dat u evropskim standardima. Izvršeno je poređenje rezultata parametarske analize, sopstvenih eksperimentalnih rezultata i eksperimentalnih rezultata drugih istraživanja sa proračunskim vrednostima prema datim preporukama za dimenzionisanje.

U sedmom poglavlju dati su primarni zaključci doktorske disertacije i definisane su preporuke za buduća istraživanja.

2 PREGLED I ANALIZA LITERATURE

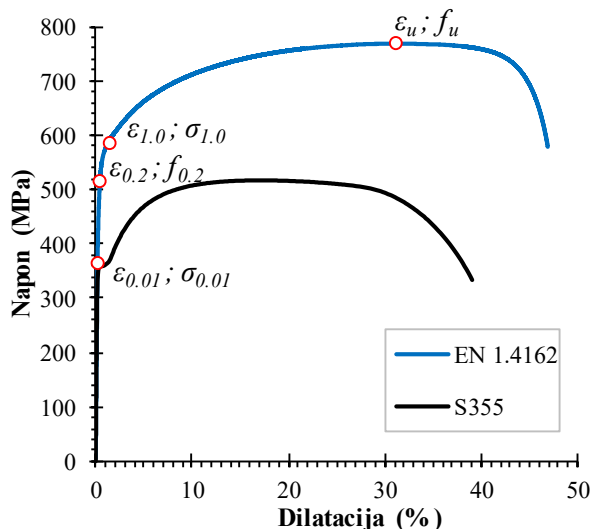
2.1 Opšte

Upotreba nerđajućeg čelika u građevinarstvu je u direktnoj sprezi sa dostupnošću relevantne tehničke regulative za projektovanje konstrukcija od nerđajućeg čelika. Nedostatak tehničke regulative proističe iz nedostatka naučnih istraživanja. Potreba za propisima za projektovanje konstrukcija od nerđajućeg čelika podstiče naučna istraživanja, dok postojanje jasnih i preciznih propisa podstiče upotrebu samog materijala u građevinarstvu.

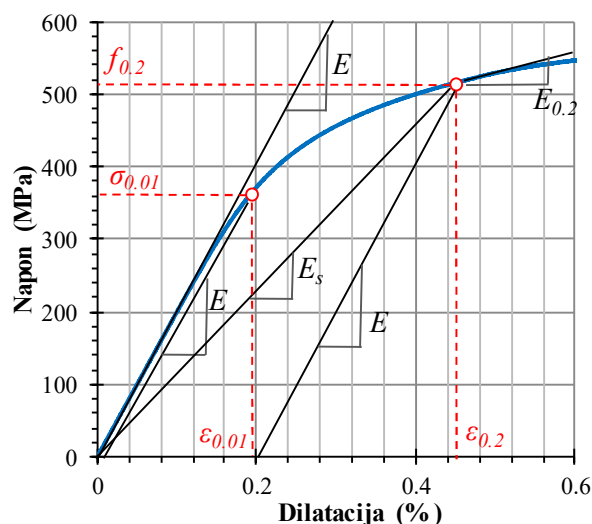
Za razliku od SAD gde se prvi zvanični dokument sa preporukama za projektovanje čeličnih konstrukcija od nerđajućeg čelika pojavio 1968. godine [5] u Evropi se priručnici ovog tipa pojavljuju tek krajem dvadesetog veka. Kao posledica potrebe savremenog građevinarstva za projektovanjem konstrukcije od nerđajućeg čelika, 1996. godine CEN (European Committee for Standardization) u okviru Evrokoda 3 publikuje predstandard koji će šest godina nakon toga preći u standard EN 1993-1-4: Proračun čeličnih konstrukcija – Deo 1-4: Dodatna pravila za nerđajuće čelike [2]. Zbog nedovoljnog broja eksperimentalnih ispitivanja ponašanja elemenata od nerđajućeg čelika ovaj standard se u velikoj meri oslanja na standard za ugljenične čelike EN 1993-1-1 [3] i EN 1993-1-3 [4] o čemu je bilo reči u prvom poglavlju.

2.2 Mehanička svojstva materijala

Pored izražene duktilnosti, anizotropije i značajnog kapaciteta plastifikacije, jedna od osnovnih karakteristika nerđajućeg čelika je nelinearna veza između napona i dilatacija. Dijagram koji daje zavisnost između napona i dilatacije kod nerđajućeg čelika predstavljen je zaobljenom krivom, bez jasno izražene granice razvlačenja. Na slici 2.1a prikazano je poređenje između naponsko deformacijske krive nerđajućeg čelika EN 1.4162 i ugljeničnog čelika S355.



(a) Krive σ - ϵ za 1.4162 i S355



(b) Početni deo krive σ - ϵ za 1.4162

Slika 2.1– Specifičnosti naponsko – deformacijske krive za nerđajući čelik

Veza između napona i dilatacije kod nerđajućeg čelika može se analitički opisati materijalnim modelima u funkciji parametara koji su prikazani na slici 2.1, a koji imaju sledeće značenje:

$f_{0.2}$ konvencionalna granica razvlačenja, koja predstavlja vrednost napona pri trajnoj plastičnoj deformaciji od 0.2%,

$\sigma_{0.01}$	granica proporcionalnosti, koja predstavlja vrednost napona pri trajnoj plastičnoj deformaciji od 0.01%,
f_u	čvrstoća pri zatezanju, koja predstavlja maksimalnu vrednost napona,
$\varepsilon_{0.2}$	ukupna dilatacija koja odgovara konvencionalnoj granici razvlačenja,
ε_u	ukupna dilatacija koja odgovara čvrstoći pri zatezanju,
E	modul elastičnosti, koji predstavlja nagib početnog elastičnog dela dijagrama u odnosu na apscisu,
E_t	tangentni modul, koji predstavlja nagib tangente dijagrama u odnosu na apscisu za određenu vrednost napona u neelastičnoj oblasti,
$E_{0.2}$	tangentni modul, koji odgovara konvencionalnoj granici razvlačenja,
E_s	sekantni modul, koji predstavlja odnos napona i ukupne dilatacije,
n, m	koeficijenti nelinearnosti, koji definišu stepen zakrivljenosti krive napon – dilatacija u određenoj oblasti.

Za opisivanje nelinearne veze između napona i dilatacija kod nerđajućeg čelika koriste se različiti materijalni modeli. Osnova za razvijanje različitih matematičkih interpretacija predstavlja Ramberg-Osgood-ov model [6] koji je razvijen 1943. godine. Godinu dana kasnije Hill [7] je izvršio modifikaciju ovog modela tako da se zavisnost između napona (σ) i dilatacija (ε) definiše izrazom datim u jednačini (1):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \cdot \left(\frac{\sigma}{f_{0.2}} \right)^n \quad (1)$$

gde je n koeficijent nelinearnosti koji se određuje na osnovu sledećeg izraza:

$$n = \frac{0.301}{\log\left(\frac{f_{0.2}}{\sigma_{0.1}}\right)} \quad (2)$$

Ramberg-Osgood-ov model definisan izrazom (1) može dobro da opiše različite faze nelinearne veze napon-dilatacija, odabirom različitog koeficijenta nelinearnosti, ali izborom jedinstvenog koeficijenta nelinearnosti nije moguće dati dovoljno tačnu predikciju stvarne veze napon-dilatacija. Upravo to je razlog što su kasnije modifikacije ovog modela usmerene na razvoj dvostepenih modela u kojima se različitim funkcijama u zavisnosti od nivoa naprežanja opisuje veza između napona i dilatacija u celom opsegu naprežanja. Mirambell i Real [8] predložili su dvostepeni model koji do konvencionalne granice razvlačenja zavisnost između napona i deformacija opisuje Ramberg-Osgood-ovim modelom prema jednačini (1), dok se za opseg naprežanja iznad konvencionalne granice razvlačenja koristi zavisnost definisana novim koordinatnim sistemom $\bar{\varepsilon} - \bar{\sigma}$, čiji je koordinatni početak u tački $(\varepsilon_{0.2}, \sigma_{0.2})$ – slika 2.2. Transformacija koordinata u novom koordinatnom sistemu iz prvobitnog koordinatnog sistema može se izvršiti pomoću jednačina (3) i (4).

$$\bar{\sigma} = \sigma - f_{0.2} \quad (3)$$

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon - \varepsilon_{0.2} \quad (4)$$

Prema Mirambell - Real-ov analitičkom modelu zavisnost između napona i dilatacija za opseg napona iznad konvencionalne granice razvlačenja se opisuje sledećim izrazom:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\bar{\sigma}}{E_{0.2}} + \bar{\varepsilon}_{pu} \left(\frac{\bar{\sigma}}{\bar{f}_u} \right)^m \quad \text{za } \sigma > f_{0.2} \quad (5)$$

gde je m koeficijent nelinearnosti za deo krive između konvencionalne granice razvlačenja i čvrstoće na zatezanje, $\bar{\varepsilon}_{pu}$ je trajna plastična deformacija u novom koordinatnom sistemu za vrednost čvrstoće na zatezanje i može se definisati izrazom (6):

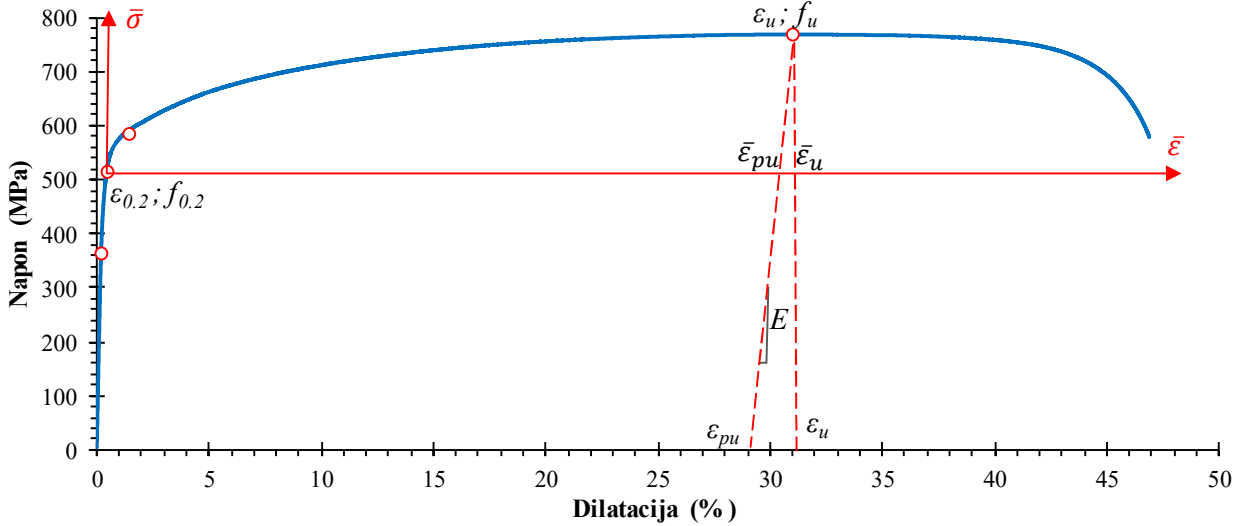
$$\bar{\varepsilon}_{pu} = \varepsilon_u - \varepsilon_{0.2} - \frac{f_u - f_{0.2}}{E_{0.2}} \quad (6)$$

Matematičkom transformacijom jednačine (5) uz relacije date u jednačinama (3), (4) i (6) dobija se zavisnost između napona i dilatacija u sledećem obliku:

$$\varepsilon = \frac{\sigma - f_{0.2}}{E_{0.2}} + \left(\varepsilon_u - \varepsilon_{0.2} - \frac{f_u - f_{0.2}}{E_{0.2}} \right) \left(\frac{\sigma - f_{0.2}}{f_u - f_{0.2}} \right)^m + \varepsilon_{0.2} \text{ za } \sigma > f_{0.2} \quad (7)$$

Tangentni modul, koji odgovara konvencionalnoj granici razvlačenja može se odrediti izrazom (8).

$$E_{0.2} = \frac{E}{1 + 0.002 \cdot n \cdot \frac{E}{f_{0.2}}} \quad (8)$$



Slika 2.2– Ilustracija Mirambell – Real-ovog analitičkog modela materijala

Nakon sprovedenih istraživanja materijalnih karakteristika austenitnih, feritnih i dupleks nerđajućih čelika *Rasmussen* [9] predlaže primenu Mirambell-Real-ovog modela uz izvesne modifikacije. Za opisivanje naponskog stanja za opseg napona koji je manji od vrednosti konvencionalne granice razvlačenja koristi se jednačina (1) u kojoj se koeficijent nelinearnosti n određuje u funkciji konvencionalne granice razvlačenja i granice proporcionalnosti:

$$n = \frac{\ln(20)}{\ln\left(\frac{f_{0.2}}{\sigma_{0.1}}\right)} \quad (9)$$

Vodeći se činjenicom da je nerđajući čelik izrazito duktilan materijal uvodi se pretpostavka da je trajna plastična dilatacija $\bar{\varepsilon}_{pu}$ jednaka ukupnoj dilataciji ε_u , na osnovu koje se izraz (7) transformiše u izraz (10).

$$\varepsilon = \frac{\sigma - f_{0.2}}{E_{0.2}} + \varepsilon_u \left(\frac{\sigma - f_{0.2}}{f_u - f_{0.2}} \right)^m + \varepsilon_{0.2} \text{ za } \sigma > f_{0.2} \quad (10)$$

Koeficijent nelinearnosti m , koji opisuje krivu napon – dilatacija iznad konvencionalne granice razvlačenja *Rasmussen* definiše u funkciji odnosa konvencionalne granice razvlačenja i čvrstoće pri zatezanju. Takođe, autor definiše i vrednost ukupne dilatacije ε_u primenom izraza (12).

$$m = 1 + 3.5 \cdot \frac{f_{0.2}}{f_u} \quad (11)$$

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{f_{0.2}}{f_u} \quad (12)$$

Analizirajući eksperimentalne rezultate autor predlaže primenu sledećih jednačina za određivanje odnosa konvencionalne granice razvlačenja i čvrstoće na zatezanje u zavisnosti od legure nerđajućeg čelika:

$$\frac{f_{0.2}}{f_u} = 0.2 + 185 \cdot \frac{f_{0.2}}{E} \text{ za austenitne i dupleks nerđajuće čelike} \quad (13)$$

$$\frac{f_{0.2}}{f_u} = \frac{0.2 + 185 \cdot \frac{f_{0.2}}{E}}{1 - 0.0375 \cdot (n-5)} \text{ za ostale legure nerđajućih čelika} \quad (14)$$

Analički model koji je predložio *Rasmussen*, kao jednostavan sa jedne strane i model koji pokazuje visok stepen poklapanja sa eksperimentalnim rezultatima uvršten je u Prilog C standarda EN 1993-1-4 [2].

Analizirajući veliki broj eksperimentalnih rezultata *Arrayago* i grupa autora [10] predlažu modifikaciju izraza datih u jednačinama (9), (11), (12), (13) i (14) prema sledećim jednačinama:

$$n = \frac{\ln(4)}{\ln\left(\frac{f_{0.2}}{\sigma_{0.05}}\right)} \text{ za sve legure nerđajućih čelika} \quad (15)$$

$$m = 1 + 2.8 \cdot \frac{f_{0.2}}{f_u} \text{ za sve legure nerđajućih čelika} \quad (16)$$

$$\frac{f_{0.2}}{f_u} = \begin{cases} 0.2 + 185 \cdot \frac{f_{0.2}}{E} & \text{ za austenitne i dupleks nerđajuće čelike} \\ 0.46 + 145 \cdot \frac{\sigma_{0.2}}{E} & \text{ za feritne nerđajuće čelike} \end{cases} \quad (17)$$

$$\varepsilon_u = \begin{cases} 1 - \frac{f_{0.2}}{f_u} & \text{ za austenitne i dupleks nerđajuće čelike} \\ 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{0.2}}{f_u}\right) & \text{ za feritne nerđajuće čelike} \end{cases} \quad (18)$$

2.3 Strukturne imperfekcije

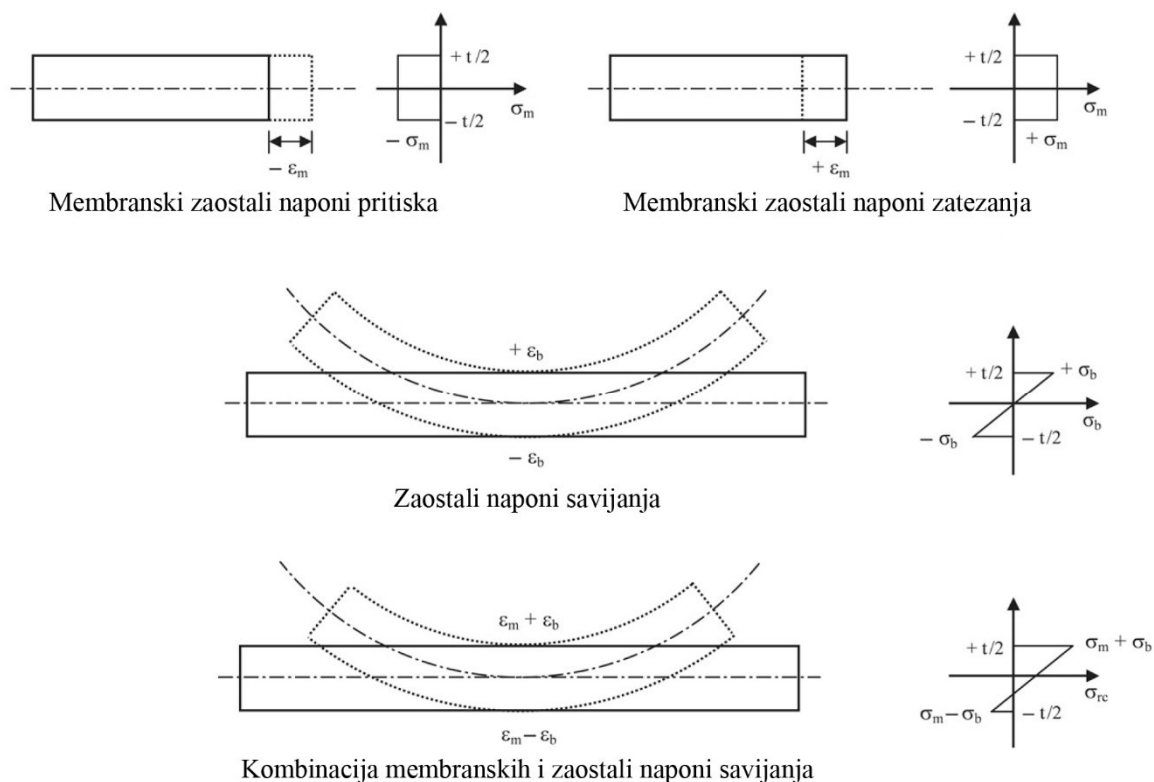
Kontrolom kvaliteta proizvodnje čeličnih elemenata, kontrolom procesa fabrikacije i montaže čelične konstrukcije obezbeđuje se da veličine strukturnih imperfekcija budu u okvirima dopuštenih tolerancija. U opštem slučaju, nosivost pritisnutih elemenata na izvijanje uslovljena je sa tri tipa imperfekcija:

- geometrijske imperfekcije koje podrazumevaju početne globalne geometrijske nesavršenosti (početna zakrivljenost ose štapa u odnosu na idealizovanu osu) i odstupanja stvarnih dimenzija poprečnog preseka u odnosu na nominalne vrednosti,
- materijalne imperfekcije koje uključuju nehomogenost materijala (promene u mehaničkim svojstvima materijala) i zaostale napone,
- imperfekcije veza koje mogu biti posledica odstupanja geometrije izvedene veze stuba sa drugim elementima ili detalja oslanjanja stuba u odnosu na projektovana, nominalna rešenja.

Maksimalne vrednosti početnih geometrijskih imperfekcija ne smeju prelaziti vrednosti tolerancija koje su definisane u relevantnim standardima koji se odnose na proizvodnju čeličnih elemenata.

2.3.1 Zaostali naponi

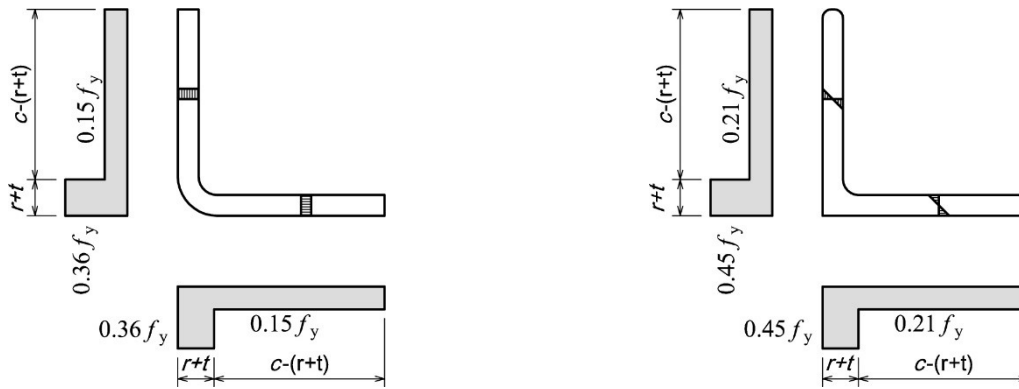
U procesu proizvodnje čeličnih elemenata usled neravnomernog zagrevanja ili hlađenja kod vrućevaljanih ili zavarenih preseka, ili trajnih plastičnih deformacija kod hladnooblikovanih preseka, javljaju se uravnoteženi zaostali naponi. Raspored i veličina zaostalih napona zavisi od proizvodnog procesa, oblika i dimenzija (debljine zida) poprečnog preseka. Za vrućevaljane i laserski zavarene profile uočeno je da je membransko stanje zaostalih napona dominantno, odnosno da nema promene zaostalih napona po debljini zida profila. Kod hladnooblikovanih profila uočena je promena napona po debljini što znači da izuzev membranske komponente postoji i komponenta savijanja koja se linearno menja po debljini profila [11]. Ilustracija komponenti zaostalih napona prikazana je na slici 2.3.



Slika 2.3– Modeli zaostalih napona sa membranskom komponentom i komponentom savijanja [11]

Uzimajući u obzir složenost procesa i zahtevanu veliku preciznost, ispitivanje zaostalih napona u elementima predstavlja složen i skup proces. Za merenje zaostalih napona koriste se destruktivne, poludestruktivne ili nedestruktivne metode. Ograničen broj istraživanja zaostalih napona sprovedena su na elementima od nerđajućeg čelika za hladnooblikovane, vrućevaljane i zavarene poprečne preseke.

Opsežno eksperimentalno ispitivanje merenja zaostalih napona u profilima od nerđajućeg čelika različitih poprečnih preseka sprovedli su *Cruise* i *Gardner* [11], [12]. Ovo istraživanje obuhvatilo je i merenje zaostalih napona na vrućevaljanim i hladnooblikovanim ugaonim poprečnim presecima. Zaostali naponi mereni su na vrućevaljanim ugaonicama poprečnih preseka $50 \times 50 \times 3$ mm, $50 \times 50 \times 5$ mm i $50 \times 50 \times 10$ mm i hladnooblikovanim ugaonicama poprečnih preseka $50 \times 50 \times 2$ mm, $50 \times 50 \times 3$ mm, $50 \times 50 \times 4$ mm i $50 \times 50 \times 10$ mm austenitne legure EN 1.4301. Autori razmatraju zaostale napone koji se dobijaju kao superpozicija membranske komponente i komponente savijanja. Autori su zaključili da su kod hladnooblikovanih ugaonika vrednosti zaostalih napona mali u odnosu na konvencionalnu granicu razvlačenja. Utvrđeno je da vrednost membranskih zaostalih napona kod hladnooblikovanih ugaonika iznosi $0.06 \cdot f_y$ na krakovima profila i $0.03 \cdot f_y$ u uglu profila. Sa druge strane, srednja vrednost zaostalih napona koji su predstavljeni kao naponi savijanja iznosi $0.06 \cdot f_y$ na krakovima profila i $0.24 \cdot f_y$ u uglu profila. Zaostale napone savijanja autori prikazuju kao konstantne napone po debljini zida profila. Kod vrućevaljanih profila izmerene su nešto veće vrednosti zaostalih napona, ali se one i dalje mogu smatrati malim u poređenju sa konvencionalnom granicom razvlačenja. Za razliku od hladnooblikovanih ugaonika, kod vrućevaljanih profila autori pretpostavljaju linearnu promenu zaostalih napona savijanja po debljini zida profila. Vrednost zaostalih napona savijanja iznosi $0.11 \cdot f_y$ na krakovima profila i $0.29 \cdot f_y$ u uglu profila, dok srednja vrednost membranskih zaostalih napona na krakovima i u uglu profila iznosi $0.05 \cdot f_y$ i $0.07 \cdot f_y$, respektivno. Na osnovu karakterističnih vrednosti i pretpostavljajući pravougaoni blok dijagram kod hladnooblikovanih ugaonika, odnosno linearnu promenu napona kod vrućevaljanih ugaonika autori su predložili modele za raspodelu zaostalih napona savijanja koji su prikazani na slici 2.4 [11].



a) Model zaostalih napona savijanja za hladnooblikovane ugaonike

b) Model zaostalih napona savijanja za vrućevaljane ugaonike

Slika 2.4– Predloženi modeli zaostalih napona savijanja za hladnooblikovane i vrućevaljane ugaonike [11]

U literaturi se ne mogu pronaći istraživanja koja su obuhvatila merenje zaostalih napona na laserski zavarenim ugaonicima. Gardner i grupa autora [13] sprovedli su opsežno eksperimentalno istraživanje na laserski zavarenim austenitnim I preseccima, koje je pored ispitivanja nosivosti na fleksiono izvijanje obuhvatilo i merenje zaostalih napona. Merenje zaostalih napona sprovedeno je na dva uzorka I poprečnog preseka legure EN 1.4307 i EN 1.4571 metodom sečenja. Maksimalne vrednosti napona zatezanja i pritiska na nožici I profila iznose $0.25 \cdot f_y$ i $-0.22 \cdot f_y$, respektivno. Ekstremne vrednosti izmerenih zaostalih napona na rebru I profila iznose $0.29 \cdot f_y$ i $-0.14 \cdot f_y$.

2.3.2 Početne geometrijske imperfekcije

Početne geometrijske imperfekcije predstavljaju odstupanje realnih elemenata od idealizovane geometrije. Odstupanja realnih elemenata moraju biti u dozvoljenim tolerancijama, koje su definisane referentnim standardima. Generalno, početne geometrijske imperfekcije mogu se podeliti na geometrijske imperfekcije elemenata u koje spadaju otklon, zakrivljenje i uvrtnje u pravcu podužne ose elementa i geometrijske imperfekcija poprečnog preseka u koje spadaju zakrivljenost i otklon delova poprečnog preseka.

Oblik početnih geometrijskih imperfekcija poprečnog preseka u numeričkoj analizi najčešće se reprezentuje jednim od najnižih sopstvenih tonova elastičnog izbočavanja. Amplituda početne geometrijske imperfekcije poprečnog preseka ω_0 u opštem slučaju može se dati u funkciji debljine zida poprečnog preseka t , kao što je to prikazano u jednačini (18), gde k predstavlja bezdimenzioni koeficijent. Međutim, u slučaju ugaonika često se amplituda daje u funkciji širine kraka profila c , kao što je to dato u izrazu (19), gde je a predstavljen bezdimenzioni koeficijent.

$$\omega_0 = k \cdot t \quad (18)$$

$$\omega_0 = c/a \quad (19)$$

Dawson i Walker [14] nakon opsežne analize predlažu izraze (20) i (21) za određivanje amplitude početnih geometrijskih imperfekcija poprečnog preseka, koje će biti osnov za sve kasnije analize. Amplituda početne geometrijske imperfekcije u ovim izrazima data je u funkciji odnosa konvencionalne granice razvlačenja, elastičnog kritičnog napona izbočavanja σ_{cr} , debljine elementa i koeficijenata α i γ .

$$\omega_0 = \alpha \cdot t \cdot \sqrt{\frac{f_{0.2}}{\sigma_{cr}}} \quad (20)$$

$$\omega_0 = \gamma \cdot t \cdot \frac{f_{0.2}}{\sigma_{cr}} \quad (21)$$

Sa ciljem dobijanja vrednosti amplituda početnih geometrijskih imperfekcija poprečnog preseka *Cruise* i *Gardner* [15] sproveli su opsežno istraživanje, koje je obuhvatilo merenje geometrijskih imperfekcija na uzorcima od austenitnog nerđajućeg čelika. Istraživanje je obuhvatilo tri različite grupe poprečnih preseka – hladnooblikovane šuplje profile, hladnooblikovane i vrućevaljane ugaonike. Autori su amplitude početnih geometrijskih imperfekcija definisali pomoću parametara širine elemenata ζ koji ima vrednost 1 kada je dužina polutalasa jednaka širini elementa i ima vrednost 10 kada je dužina polutalasa 10 puta veća u odnosu na širinu kraka. Za određivanje vrednosti amplituda početnih geometrijskih imperfekcija autori predlažu primenu jednačina (22) i (23) za hladnooblikovane ugaonike i (24) i (25) za vrućevaljane ugaonike za granične vrednosti parametra širine elementa.

$$\omega_0 = 0.008 \cdot t \cdot \frac{f_{0.2}}{\sigma_{cr}} \text{ za } \zeta = 1 \text{ za hladnooblikovane ugaonike} \quad (22)$$

$$\omega_0 = 0.052 \cdot t \cdot \frac{f_{0.2}}{\sigma_{cr}} \text{ za } \zeta = 10 \text{ za hladnooblikovane ugaonike} \quad (23)$$

$$\omega_0 = 0.044 \cdot t \cdot \frac{f_{0.2}}{\sigma_{cr}} \text{ za } \zeta = 1 \text{ za vrućevaljane ugaonike} \quad (24)$$

$$\omega_0 = 0.415 \cdot t \cdot \frac{f_{0.2}}{\sigma_{cr}} \text{ za } \zeta = 10 \text{ za vrućevaljane ugaonike} \quad (25)$$

Početne geometrijske imperfekcije elemenata mogu se definisati kao bočno odstupanje sistemne ose elementa od idealizovane prave linije, koje predstavlja zakrivljenost elementa. Uzimajući u obzir da se usled postojanja ovih imperfekcija javljaju dopunski momenti savijanja prilikom delovanja centričnog pritiska, početne geometrijske imperfekcija predstavljaju značajne parametar za konačnu nosivost centrično pritisnutih elemenata. Zakrivljenost sistemne ose elementa najčešće se prikazuje sinusnim polutalansom u funkciji amplitude (maksimalne deformacije u sredini elementa) δ_0 i ukupne dužine elementa L , kao što je to prikazano u jednačini (26), gde x predstavlja koordinatu na podužnoj osi štapa.

$$\delta = \delta_0 \cdot \sin \pi \frac{x}{L} \quad (26)$$

Amplituda početne geometrijske imperfekcije δ_0 se najčešće predstavlja u funkciji ukupne dužine elemenata i prema dopuštenoj toleranciji koja je propisana standardom EN 1090-2 [16] maksimalna vrednost zakrivljenosti ose elementa ne sme da prelazi $L/750$.

2.4 Teorijska analiza nosivosti ravnokrakih ugaonika pri dejstvu centričnog pritiska

Na ponašanje centrično pritisnutih stubova izrađenih od ugaonika značajno utiču specifičnosti geometrijskih karakteristika poprečnog preseka. Iako jednostavni po svom obliku, ravnokraki ugaonici su vrlo složeni za teorijsku analizu – položaj centra smicanja u preseku krakova ugaonika prouzrokuje njegovu malu torzionu krutost što određuje dvojakom osetljivost stuba ravnokrakog ugaonika na fleksiono izvijanje oko slabije ose preseka i torziona-fleksionog izvijanja oko jače ose poprečnog preseka. Osim toga, kod vitkih, tankozidnih poprečnih preseka klase 4, usled pomeranja težišta efektivnog poprečnog preseka nakon elastičnog lokalnog izbočavanja u odnosu na težište inicijalnog bruto preseka duž jače ose inercije, dolazi do pojave dopunskog momenta savijanja oko slabije ose inercije. Otuda je oblik loma hladnooblikovanih stubova izrađenih od ugaonika uslovljen ekscentričnim pritiskom, odnosno interakcijom lokalnog izbočavanja preseka i globalnog torziona-fleksionog odnosno fleksionog izvijanja.

2.4.1 Nosivost poprečnog preseka na pritisak i nosivost poprečnog preseka pri izbočavanju

Nosivost poprečnog preseka ugaonika na pritisak ($N_{c,u}$), kao i za ostale poprečne preseke, može se odrediti proizvodom površine poprečnog preseka (A) i naponom koji odgovara konvencionalnoj granici razvlačenja ($f_{0,2}$):

$$N_{c,u} = A \cdot f_{0,2} \quad (27)$$

Međutim, uslov za primenu izraza (27) za nosivost poprečnog preseka na pritisak jeste da se u svim delovima poprečnog preseka može dostići napon na granici razvlačenja, a da pri tome ne dođe do izbočavanja delova poprečnog preseka. Poprečni preseki koji ne mogu ispuniti ovaj uslov, odnosno kod kojih dolazi do izbočavanja delova poprečnog preseka pre dostizanja napona na granici razvlačenja nazivaju se vitki poprečni preseki.

Nosivost poprečnog preseka pri izbočavanju može se odrediti primenom elastične teorije izbočavanja. Međutim, primena ove teorije kod elastoplastičnih materijala može se koristiti samo u početnom domenu elastičnosti. Nerđajući čelici predstavljaju materijale sa nelinearnom vezom između napona i deformacije, kod kojih je za naprezanje iznad granice proporcionalnosti krutost pri opterećenju proporcionalna tangentnom modulu, dok je krutost pri rasterećenju proporcionalna modulu elastičnosti. Zbog toga se kod poprečnih preseka kod kojih do izbočavanja delova preseka dolazi pri naprezanju koje je veće od granice proporcionalnosti ne može primeniti izraz za elastičan kritičan napon izbočavanja.

Kritičan napon izbočavanja (f_{cr}) za pravougaonu ploču može se odrediti primenom izraza (28) [17]:

$$f_{cr} = \frac{\eta \cdot k_{\sigma} \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (28)$$

gde je η plastični koeficijent redukcije, k_{σ} koeficijent izbočavanja, E modul elastičnosti, ν Poisson-ov koeficijent, b širina ploče i t debljina ploče. Koeficijent izbočavanja zavisi od uslova oslanjana ploče i načina naprezanja i ima iste vrednosti kao što je to u slučaju izbočavanja u elastičnoj oblasti. Plastični koeficijent redukcije prema [17] za ukružene poprečne preseke dat je u funkciji tangentnog modula (E_t), dok je u slučaju neukružanih poprečnih preseka dat u funkciji sekantnog modula (E_s) kao što je to prikazano u izrazima (29) i (30), respektivno.

$$\eta = \sqrt{\frac{E_t}{E}} \text{ za ukružene poprečne preseke} \quad (29)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{E_s}{E}} \text{ za neukružene poprečne preseke} \quad (30)$$

Iscrpljene nosivosti ploče nije određeno dostizanjem kritičnog napona izbočavanja. Nakon dostizanja kritičnog napona izbočavanja naprezanja u ploči mogu da rastu bez značajnog povećanja poprečnih deformacija, jer dolazi do preraspodele napona u ravni ploče. Delovi ploče veće krutosti preuzimaju veće uticaje, jer imaju mogućnost da prihvate napone koji su veći od kritičnog napona izbočavanja. Dakle, analizom graničnog stanja nosivosti uočavaju se dve faze – prva faza u kojoj su naprezanja manja od kritičnog napona izbočavanja i druga koja predstavlja post-kritičnu nosivost na izbočavanje. U prvoj fazi naprezanja po širini ploče su uniformna, dok u drugoj fazi dolazi do preraspodele naprezanja, koja prvenstveno zavisi od uslova oslanjanja ploče na krajevima. Najrasprostranjeniji metod analize ploče na izbočavanje predstavlja koncept efektivne širine, koji se zasniva na pretpostavci da je napon konstantan na efektivnoj širini ploče, koja se dobija redukcijom stvarne širine ploče.

Kod ravnokrakih ugaonika izbočavanje delova poprečnih preseka koji se klasifikuju kao vitki poprečni preseki svodi se na gubitak stabilnosti krakova ugaonika, koji se mogu predstaviti pločom koja je na jednom kraju uklještena, a na drugom kraju slobodna. U post-kritičnoj fazi nosivosti krajevi ploče koji su bliži uglu profila prihvataju veća naprezanja u odnosu na slobodne krajeve krakova.

Usled ovakve raspodele naprezanja dolazi do pomeranja težišta poprečnog preseka, koje za posledicu kod centrično opterećenih elemenata ima pojavu dopunskog momenta savijanja oko slabije ose inercije. Dakle, nosivost centrično pritisnutih elemenata vitkih poprečnih preseka svodi se na određivanje nosivosti ekscentrično pritisnutih elemenata koji su osim aksijalne sile opterećeni i dopunskim momentom savijanja usled pomeranja težišta efektivnog poprečnog preseka u odnosu na bruto poprečni presek.

2.4.2 Nosivost elementa na izvijanje

Specifičnost elastičnog ponašanja centrično pritisnutih elemenata izrađenih od ugaonika predstavlja činjenica da se centar smicanja i težište poprečnog preseka ne poklapaju. Centar smicanja ugaonika nalazi se u preseku sistemnih linija krakova ugaonika čime je njegov sektorski moment inercije zanemarljiv (slika 2.5). Kritična sila N_{cr} pri kojoj dolazi do iscrpljenja nosivosti centrično pritisnutog elementa tankozidnog poprečnog preseka predstavlja minimalno rešenje jednačine [18]:

$$(N_{cr,u} - N_{cr}) \cdot (N_{cr,v} - N_{cr}) \cdot (N_{cr,T} - N_{cr}) - N_{cr}^2 \cdot \left[(N_{cr,u} - N_{cr}) \cdot v_0^2 + (N_{cr,v} - N_{cr}) \cdot u_0^2 \right] \cdot \frac{1}{i_0^2} = 0 \quad (31)$$

gde su sa $N_{cr,u}$, $N_{cr,v}$ i $N_{cr,T}$ označene elastične kritične sile fleksionog izvijanja oko ose u - u , v - v i torzionog izvijanja definisani izrazima (32), (33) i (34), respektivno. Vrednosti v_0 i u_0 predstavljaju koordinate centra smicanja u u - v koordinatnom sistemu, dok je i_0 definisano izrazom (35).

$$N_{cr,u} = \pi^2 \frac{EI_u}{L^2} \quad (32)$$

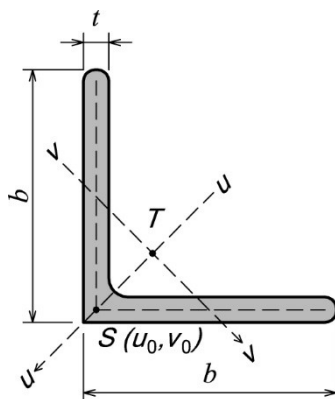
$$N_{cr,v} = \pi^2 \frac{EI_v}{L^2} \quad (33)$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left(GI_t + \pi^2 \frac{EI_w}{L^2} \right) \quad (34)$$

$$i_0^2 = i_u^2 + i_v^2 + u_0^2 + v_0^2 \quad (35)$$

Simboli u prethodnim izrazima imaju sledeća značenja: E - modul elastičnosti; I_u i I_v - momenti inercije bruto poprečnog preseka za glavne ose inercije; G - modul smicanja; I_t - torzioni moment inercije bruto poprečnog preseka; i_y i i_z – poluprečnici inercije bruto poprečnog preseka oko glavnih osa inercije; L - sistemna dužina štapa i I_w - sektorski moment inercije bruto poprečnog preseka, koji je kod L profila jednak nuli, pa se izraz (34) može predstaviti kao:

$$N_{cr,T} = \frac{GI_t}{i_0^2} \quad (36)$$



Slika 2.5– Položaj centra smicanja i glavnih osa inercije kod ravnokrakih ugaonika

Uzimajući u obzir da je kod ravnokrakih ugaonika koordinata centra smicanja $v_0=0$, jednačina (31) se može transformisati u sledeći izraz:

$$(N_{cr,u} - N_{cr}) \cdot (N_{cr,v} - N_{cr}) \cdot (N_{cr,T} - N_{cr}) = N_{cr}^2 \cdot [(N_{cr,v} - N_{cr}) \cdot u_0^2] \cdot \frac{1}{i_0^2} \quad (37)$$

Jedno rešenje jednačine (37) je $N_{cr} = N_{cr,v}$ odnosno elastična kritična sila jednaka je sili fleksionog izvijanja oko slabije glavne ose inercije. Ostala rešenja jednačine (37) za $N_{cr} \neq N_{cr,v}$, iz čega proizilazi da je $N_{cr,v} - N_{cr} \neq 0$, dobijaju se rešavanjem jednačine (38), koja se može prikazati u obliku jednačine (39). Uz uvođenje koeficijenta β koji je definisan izrazom (40), rešenja jednačine (39) mogu se predstaviti u obliku izraza (41):

$$(N_{cr,u} - N_{cr}) \cdot (N_{cr,T} - N_{cr}) = N_{cr}^2 \cdot \frac{u_0^2}{i_0^2} \quad (38)$$

$$N_{cr}^2 \left(1 - \frac{u_0^2}{i_0^2}\right) + N_{cr} \cdot (-N_{cr,T} - N_{cr,u}) + N_{cr,u} \cdot N_{cr,T} = 0 \quad (39)$$

$$\beta = 1 - \left(\frac{u_0}{i_0}\right)^2 \quad (40)$$

$$N_{cr} = \frac{(N_{cr,T} + N_{cr,u}) \pm \sqrt{(N_{cr,T} + N_{cr,u})^2 - 4 \cdot \beta \cdot N_{cr,u} \cdot N_{cr,T}}}{2 \cdot \beta} \\ = \frac{N_{cr,u}}{2\beta} \left[1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,u}} \pm \sqrt{\left(1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,u}}\right)^2 - 4 \cdot \beta \cdot \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,u}}} \right] \quad (41)$$

Obzirom da se za kritičnu silu izvijanja uzima minimalna vrednost od dva moguća rešenja predstavljena jednačinom (41), konačan oblik elastične kritične sile torziono-fleksionog izvijanja predstavljen je u sledećem obliku:

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,u}}{2\beta} \left[1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,u}} - \sqrt{\left(1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,u}}\right)^2 - 4 \cdot \beta \cdot \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,u}}} \right] \quad (42)$$

Dakle, elastična kritična sila izvijanja kod ravnokrakih ugaonika, saglasno mogućim oblicima izvijanja i analitičkoj interpretaciji, jednaka je minimalnoj vrednosti između elastične kritične sile fleksionog izvijanja oko slabije glavne ose inercije $N_{cr,v}$ (određene izrazom (33)) i elastične kritične sile torziono-fleksionog izvijanja $N_{cr,TF}$, koja je definisana izrazom (42).

Treba napomenuti da izrazi (32) i (33) važe za obostrano zglobno oslonjen element, u slučaju drugačijih uslova oslanjanja umesto sisteme dužine u ovim izrazima neophodno je koristiti efektivnu dužinu izvijanja koja se određuje u funkciji odgovarajuće elastične kritične sile izvijanja.

Za određivanje kritične sile izvijanja, kada do izvijanja dolazi u neelastičnoj oblasti u literaturu se mogu pronaći dva različita pristupa: teorija tangentnog i teorija redukovano modula elastičnosti. Teorija tangentnog modula usvojena je kao osnov proračunskog koncepta proračuna nosivosti pritisnutih elemenata od nerđajućeg čelika u američkim propisima SEI/ASCE 8-02 [19]. Teorija tangentnog modula podrazumeva korekciju jednačina (32) i (33) tako da se umesto modula elastičnosti koristi tangentni modul E_t , dok modul smicanja G koji figuriše u jednačini (36) ostaje nepromenjen.

2.5 Pregled dosadašnjih eksperimentalnih i numeričkih istraživanja

Proteklih decenija sproveden je značajan broj eksperimentalnih i analitičkih istraživanja nosivosti centrično pritisnutih ugaonika od ugljeničnog čelika u cilju razvoja proračunskih modela za projektovanje širokog spektra ovih proizvoda od različitih materijala. Međutim, broj publikovanih radova koji se bave problemom nosivosti centrično pritisnutih ugaonika od nerđajućeg čelika je ograničen i uglavnom datiraju iz poslednjih nekoliko godina. Uprkos značajnim razlikama u ponašanju elemenata od nerđajućeg čelika i ugljeničnog čelika, istraživanja nosivosti centrično pritisnutih ugaonika od ugljeničnog čelika su dragocena kao osnov za razumevanje problema nosivosti centrično pritisnutih ugaonika od nerđajućeg čelika, definisanje koncepta ispitivanja i analizu uticajnih parametara koji određuju ponašanje ovih elemenata u stanju granične nosivosti.

2.5.1 Eksperimentalna i numerička istraživanja ugaonika od ugljeničnog čelika

Prvo eksperimentalno istraživanje nosivosti centrično pritisnutih vrućevaljanih ugaonika sprovedli su *Strang* i *Strlckenberg* [20] davne 1924. godine. Iako prvo, ovo ispitivanje predstavlja najobimnije ispitivanje po broju ispitanih uzorka – ispitano je ukupno 170 uzoraka. Razlog ovako velikog broja uzorka jeste želja autora da ispitivanjem obuhvate različite uslove oslanjanja na krajevima elemenata. Ispitivani su elementi L poprečnog preseka koji su na kraju zavareni po konturi, koji se na krajevima vezuju preko jednog ili oba kraka sa jednim ili sa više zavrtnjeva po kraku ugaonika, kao i ugaonici kod kojih je jedan krak zasečen u zoni oslanjanja. Autori su rezultate ovog ispitivanja prikazali grafički kroz krivu koja daje zavisnost između nosivosti elemenata i vitkosti. U cilju razvijanja proračunskog modela za stubove dalekovoda, *Wakabayashi* i *Nonaka* (1965) [21] su sprovedli opsežna ispitivanja na centrično i ekscentrično pritisnutim ugaonicima. Varirajući vitkost elemenata i ekscentričnost opterećenja sprovedli su ispitivanje na 57 vrućevaljanih ugaonika. Uzorci su na krajevima bili vezani sa jednim zavrtnjem na oba kraka. Autori su zaključili da oblik loma i granična nosivost zavise od vitkosti elemenata i veličine ekscentriciteta. *Kitipornchai* i *Lee* (1986) [22] su izvršili ispitivanje centrično pritisnutih elemenata različitih poprečnih preseka. Autori su ispitivali zglobno oslonjene ugaonike, višedelne elemente čiji poprečni presek čine dva ugaonika povezana “leđa o leđa” i elemente T poprečnog preseka. Eksperimentalno ispitivanje obuhvatilo je ukupno 54 uzoraka, od toga 26 ugaonika jednodelnog poprečnog preseka. Dobijene eksperimentalne rezultate autori su poredili sa proračunskim vrednostima datim u tadašnjem australijskom standardu AS 1250-1981 [23] i AISC specifikaciji [24] i zaključili su da su proračunske preporuke na strani sigurnosti u odnosu na rezultate dobijene u eksperimentu. *Al-Sayed* i *Bjorhovde* (1989) [25] su ispitivali ponašanje centrično pritisnutih jednokrakih i raznokrakih vrućevaljanih ugaonika. Poređenjem eksperimentalnih i proračunskih rezultata zaključili su da postoji dobro poklapanje tih vrednosti. U okviru svog ispitivanja sprovedli su merenje zaostalih napona u ugaonicima metodom sečenja. Utvrdili su da se maksimalne vrednosti zaostalih napona pritiska nalaze na krajevima kraka i da najveća izmerena vrednost iznosi 32% granice razvlačenja, dok se maksimalne vrednosti zaostalih napona zatezanja nalaze u blizini polovine kraka ugaonika i one dostižu vrednost do 40% granice razvlačenja. U cilju razvijanja zavisnosti između relativne vitkosti i koeficijenta redukcije za centrično pritisnute ugaonike, *Adhuri* i *Murty* (1996) [26], [27] su predstavili rezultate eksperimentalnog ispitivanja 26 uzoraka vrućevaljanih ugaonika. Ispitivanje je obuhvatilo i merenje zaostalih napona i početnih geometrijskih imperfekcija uzoraka. *Popović* i grupa autora (1999) [28] su publikovali rad u kome su prikazali rezultate eksperimentalnih ispitivanja pritisnutih hladnooblikovanih ugaonika. Eksperimentalno ispitivanje obuhvatilo je određivanje mehaničkih karakteristika materijala, merenje zaostalih napona, merenje početni geometrijskih imperfekcija, određivanje kapaciteta nosivosti poprečnog preseka – test kratkih stubova i testove stabilnosti elemenata. Programom testova stabilnosti elemenata predviđeno je 30 uzoraka, od kojih su 12 obostrano uklješteni elementi, a 18 elementi zglobno oslonjeni na krajevima. Poređenjem eksperimentalnih rezultata sa australijskim i američkim standardima za projektovanje

hladnooblikovanih elemenata, došli su do zaključka da su proračunske vrednosti na strani sigurnosti. Takođe, autori su dokazali da smer početne geometrijske imperfekcije ima značajan uticaj na krajnju nosivost elemenata od hladnooblikovanih ugaonika na centričan pritisak. Ukoliko je smer imperfekcije takav da dovodi do povećanja napona pritiska u uglu profila, a smanjuje napone pritiska na slobodnim krajevima krakova, tada će nosivost elementa biti veća nego što je to slučaj sa imperfekcijom suprotnog smera. *Ben Young* (2004) [29] je sproveo ispitivanje centrično pritisnutih ugaonika dobijenih postupkom hladnog oblikovanja. Ugaonici su napravljeni savijanjem lima visoke čvrstoće čija je granica razvlačenja 450 i 500 MPa. Ukupno je ispitano 24 uzorka koji su uklješteni na oba kraja. Autor je predložio proračunski model za koji je pokazao da daje bolje poklapanje sa eksperimentalnim rezultatima u odnosu na australijske i američke standarde za projektovanje hladnooblikovanih elemenata. *Shi* i grupa autora (2011) [30] su istraživali nosivost kratkih stubova, dobijenih postupkom vrućeg valjanja od čelika visoke čvrstoće (420 MPa), na centričan pritisak. Ispitivanje je uključivalo ukupno 15 uzoraka. Autori su rezultate ispitivanja poredili sa odgovarajućim standardima za proračun ANSI/AISC 360-05 [24] i standardom EN 1993-1-1 [3]. Dobijene vrednosti u eksperimentu bile su veće od onih koje su dobijene proračunom, a povećanjem odnosa širine kraka i debljine konzervativnost proračunskih vrednosti je rasla. *Cau* i grupa autora (2015) [31] su sprovedli opsežno istraživanje na ukupno 90 uzoraka vrućevaljanih ugaonika velikih dimenzija kraka (od 220 do 250 mm) napravljenih od čelika visoke čvrstoće Q420. Autori su rezultate ove studije poredili sa proračunskim vrednostima prema propisima GB 50017-2003 [32] i EN 1993-1-1 [3]. Zaključak autora jeste da su pomenuti propisi davali konzervativne vrednosti, stoga su u okviru studije predložili tačniji proračunski model za određivanje nosivosti centrično pritisnutih ugaonika velikih dimenzija napravljenih od čelika visoke čvrstoće. *Rasmussen* (2005) [33] je razvio novu metodu proračuna za centrično pritisnute ugaonike vitkih poprečnih preseka. Proračunski postupak isključuje torziona naprezanja u određivanju nosivosti poprečnog preseka na pritisak i savijanje i uzima u obzir pomeranje težišta efektivnog poprečnog preseka u odnosu na bruto poprečni presek i stvarnu raspodelu napona nakon izvijanja. Paralelno s tim, autor je predložio jednostavan proračunski postupak za centrično pritisnute ugaonike koji primenjuje redukcionni faktor kako bi se obuhvatio efekat dodatnog momenta savijanja izazvanog pomeranjem efektivne neutralne ose i ne uključuje upotrebu jednačina interakcije. *Chodraui* i grupa autora (2006) [34] izvršili su procenu tačnosti nosivosti na izvijanje centrično opterećenih jednokrakih ugaonika na osnovu proračunskih predikcija metodom efektivne širine i metodom direktne čvrstoće (*DSM - direct strength method* [35]) koristeći rezultate eksperimenata, numeričkih analiza i analiza osetljivosti na imperfekcije. Rezultati autora, suprotno prethodnoj studiji [33], ukazali su da pristup koji ignoriše torziona izvijanje kao globalni način proračuna može dovesti do nekonzervativnih predviđanja. Zaključeno je da proračunski modeli treba da tretiraju lokalno izvijanje i torziona izvijanje kao režim lokalnog izbočavanja i kao globalno ponašanje elemenata. *Dinis* i *Camotim* (2015) [36] razvili su novi pristup proračuna tankozidnih ugaonika sa uklještenim i zglobno oslonjenim krajevima, zasnovan na metodi direktne čvrstoće. Proračunski pristup uključuje upotrebu krivih koje u funkciji dužine daju nosivost na torziona-fleksiono izvijanje i interakciju između dva globalna oblika izvijanja – torziona-fleksionog izvijanja i fleksionog izvijanja. *Bhilawe* i *Gupta* (2015) u svom radu [37] opisali su eksperimentalno ispitivanje pritisnutih vrućevaljanih ugaonika. Uzorci su zglobno oslonjeni na krajevima dok je opterećenje aplicirano sa minimalnim ekscentricitetom koji iznosi $L/1000$ (gde je L dužina uzorka) oko slabije ose inercije u smeru koji izaziva pritisak na vrhovima krakova ugaonika. Istraživanje je obuhvatilo ukupno 24 uzorka, od toga 12 sa vezom kraka preko jednog zavrtnja, 6 sa vezom kraka preko dva zavrtnja i 6 sa zavarenim krakovima na krajevima elemenata. Eksperimentalni rezultati nosivosti pritisnutih vrućevaljanih ugaonika upoređeni su sa indijskim standardom IS 800:2007 [38] i dobijeno je da su eksperimentalne vrednosti za 15 - 40% veće u odnosu na proračunske vrednosti prema referentnom standardu. *Landesmann* i grupa autora (2016) objavili su studiju [39] u kojoj su opisali eksperimentalno ispitivanje, numeričke simulacije i proračun prema metodi direktne čvrstoće vitkih stubova od hladnooblikovanih ugaonika. Eksperimentalno ispitivanje i studija sprovedeni su u cilju razvoja primene *DSM* metode [35] za hladnooblikovane ugaonike.

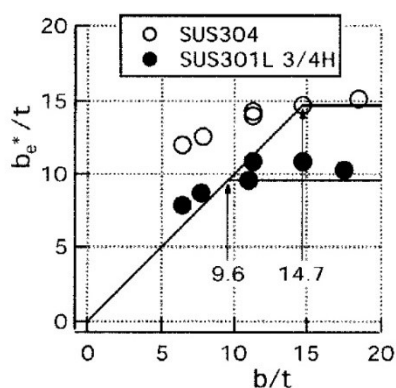
U tabeli 2-1 prikazan je sažetak eksperimentalnih ispitivanja ugaonika od ugljeničnog čelika.

Tabela 2-1 Sažetak eksperimentalnih ispitivanja ugaonika od ugljeničnog čelika

Autori	Čelični materijal	Proizvod od čelika	Dimenzije preseka [mm]	Broj uzorka
Strang i Strlckenberg	-	Vrućevaljani ugaonici	min. L 32 × 32 × 3.2 maks. L 152 × 152 × 19	170
Wakabayashi i Nonaka	SS 41	Vrućevaljani ugaonici	L 90 × 90 × 7	57
Kitipornchai i Lee	$f_y=250$ MPa	Vrućevaljani ugaonici	min. L 64 × 64 × 5 maks. L 102 × 76 × 6.5	26
Al-Sayed i Bjorhovde	$f_y=250$ MPa	Vrućevaljani ugaonici	min. L 76 × 76 × 10 maks. L 152 × 101 × 20	12
Adluri i Murty	$f_y=300$ MPa	Vrućevaljani ugaonici	min. L 64 × 64 × 9.5 maks. L 127 × 127 × 9.5	26
Popović i grupa autora	$f_y=350$ MPa	Hladnooblikovani ugaonici	min. L 50 × 50 × 2.5 maks. L 50 × 50 × 5	30
Ben Young	G500 i G450	Hladnooblikovani ugaonici	min. L 70 × 70 × 1.2 maks. L 70 × 70 × 1.9	24
Shi i grupa autora	Q420	Vrućevaljani ugaonici	min. L 125 × 128 × 8 maks. L 200 × 200 × 14	15
Cau i grupa autora	Q420	Vrućevaljani ugaonici	min. L 220 × 220 × 20 maks. L 250 × 250 × 30	90
Bhilawe i Gupta	$f_y=350$ MPa	Vrućevaljani ugaonici	min. L 50 × 50 × 6 maks. L 65 × 65 × 6	24
Landesmann i grupa autora	ZAR 345	Hladnooblikovani ugaonici	min. L 50 × 50 × 1.55 maks. L 90 × 90 × 1.55	20

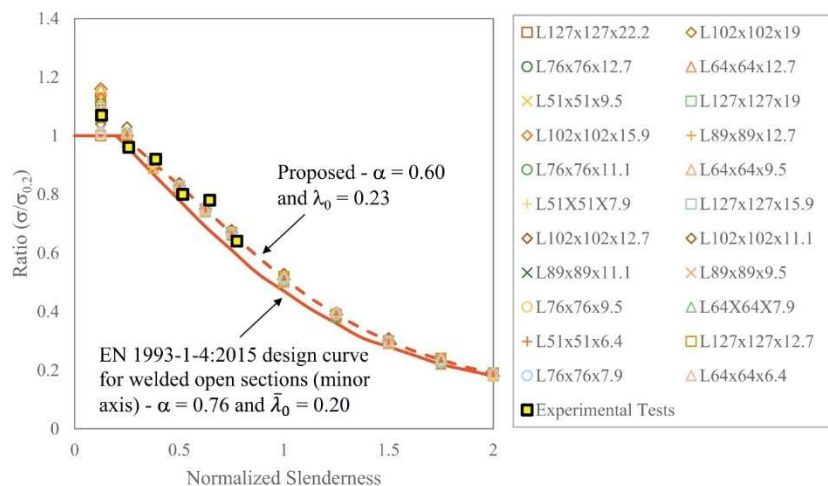
2.5.2 Eksperimentalna i numerička istraživanja ugaonika od nerđajućeg čelika

U literature se može naći svega nekoliko istraživanja koja su se bavila nosivošću centrično pritisnutih elemenata od nerđajućeg čelika i koja većinom datiraju iz prethodnih nekoliko godina. Prvo istraživanje koje je između ostalih poprečnih preseka obuhvatilo i eksperimentalno ispitivanje centrično pritisnutih ugaonika od nerđajućeg čelika sproveo je *Kuwamura* (2003) [40]. Istraživanje je obuhvatilo ispitivanje 12 uzoraka hladnooblikovanih ugaonika kratkih dužina napravljenih od austenitnog nerđajućeg čelika SUS304 (EN 1.4301) i SUS301L 3/4H (EN 1.4318). Jedan od ciljeva analize prikazane u radu je određivanje granične vitkosti iznad koje se poprečni preseki mogu smatrati vitkim. Na osnovu dobijenih eksperimentalnih rezultata nosivosti poprečnih preseka autor je određivao zamjenjujuću efektivnu širinu kraka ugaonika. Slika 2.6 predstavlja poređenje nominalne vitkosti kraka ugaonika sa efektivnom vitkošću dobijenom na osnovu rezultata ispitivanja.



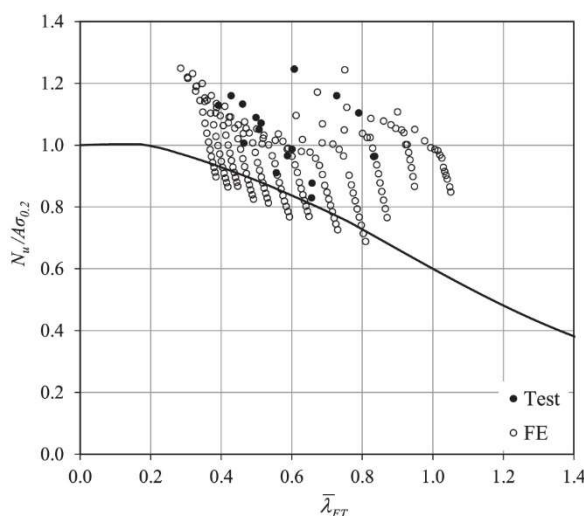
Slika 2.6– Poređenje efektivne i nominalne vitkosti poprečnih preseka ispitanih ugaonika [40]

De Menzes i grupa autora (2017) publikovali su rad [41] u kome su opisali eksperimentalnu i numeričku studiju ponašanja centrično pritisnutih stubova vrućevaljanih ugaonika od austenitnog nerđajućeg čelika. Ispitivanje je obavljeno na ukupno 13 stubova poprečnog preseka $L 64 \times 64 \times 6.4$ dužina od 250 do 1500 mm. Eksperimentalno istraživanje poslužilo je kao osnov za kalibrisanje numeričkih modela i razvijanje parametarske studije od ukupno 22 različita poprečna preseka, od kojih je napravljeno 242 numeričkih modela. Autori su predložili modifikaciju evropske krive izvijanja sa usvajanjem koeficijenta imperfekcije $\alpha = 0.6$ i bezdimenzione granične vitkosti $\bar{\lambda}_0 = 0.23$. Poređenje eksperimentalnih rezultata i rezultata numeričke analize sa proračunskim vrednostima prema standardu EN 1993-1-4 [2] i predloženom krivom izvijanja prikazano je na slici 2.7.



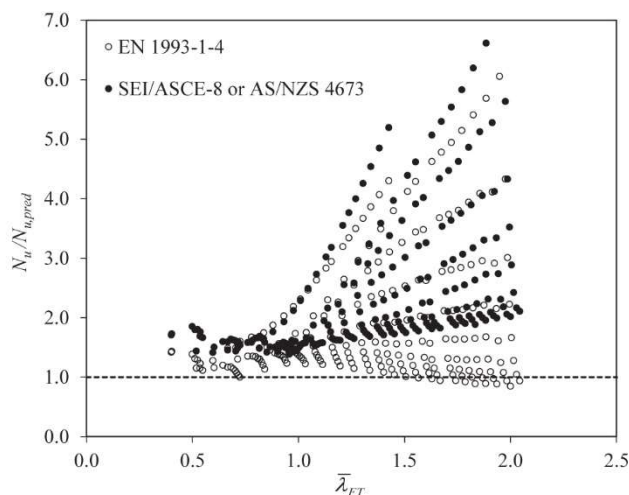
Slika 2.7– Poređenje rezultata studije [41] sa proračunskim vrednostima i predloženo krivom izvijanja

Liang i grupa autora (2019) [42] publikovali su opširnu studiju ponašanja centrično pritisnutih vrućevaljanih ugaonika od nerđajućeg čelika. Rad sadrži opis numeričkog i eksperimentalnog ispitivanja. Eksperimentalno ispitivanje sprovedeno je na 16 obostrano uklještenih stubova. Stubovi su poprečnog preseka $L 80 \times 80 \times 10$, $L 100 \times 100 \times 8$ i $L 100 \times 100 \times 10$ od dve različite legure austenitnog nerđajućeg čelika EN 1.4307 i EN 1.457. Dužina ispitanih uzorka kreće se od 240 do 1950 mm. Eksperimentalni rezultati poslužili su autorima za validaciju numeričkih modela u cilju razvijanja parametarske analize. Parametarska analiza napravljena je na osnovu 180 razvijenih numeričkih modela. Rezultati testa i parametarske analize poređeni su sa proračunskim vrednostima prema standardima EN 1993-1-4 [2], SEI/ASCE-8 [19] i AS/NZS 4673 [43], kao i sa predloženom metodom direktne čvrstoće (DSM [35]). Rezultati komparativne studije prikazani su na slici 2.8.



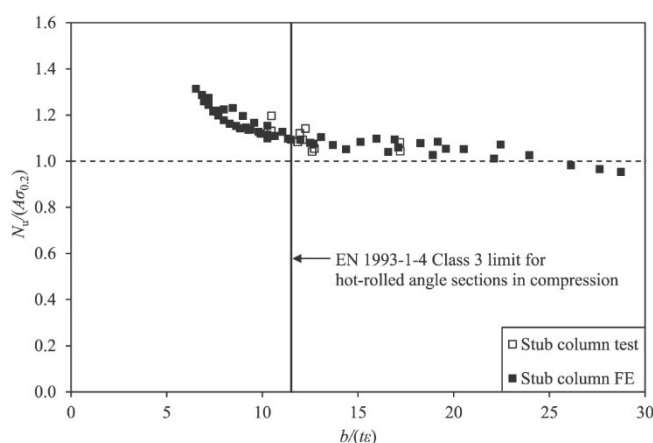
Slika 2.8– Prikaz rezultata eksperimentalnog ispitivanja i numeričke analize studije [42]

Zhang i grupa autora (2019) [44] su objavili studiju koja se odnosi na ponašanje hladnooblikovanih ugaonika od nerđajućeg čelika. Eksperimentalno ispitivanje obuhvatilo je stubove poprečnog preseka $L 50 \times 50 \times 6$ i $L 100 \times 100 \times 6$ napravljenih postupkom hladnog oblikovanja od austenitnog nerđajućeg čelika EN 1.4420. Testirano je po 7 uzoraka svakog poprečnog preseka koji su uklješteni na krajevima. Sprovedena je parametarska studija na ukupno 210 numeričkih modela. Na slici 2.9 prikazano je poređenje rezultata eksperimentalnog ispitivanja i numeričke analize sa proračunskim vrednostima prema standardima EN 1993-1-4 [2] i SEI/ASCE-8 [19], odnosno AS/NZS 4673 [43].



Slika 2.9– Prikaz rezultata eksperimentalnog ispitivanja i numeričke analize studije [44]

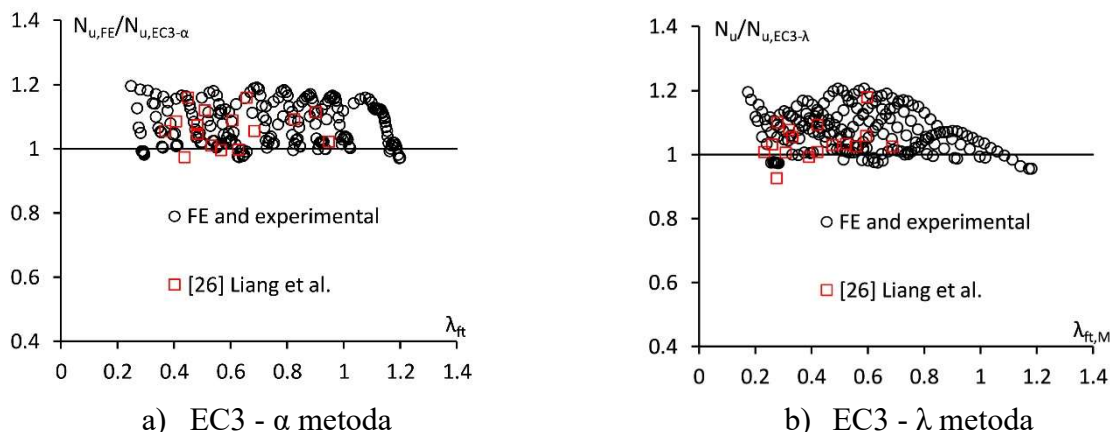
Sun i grupa autora (2019) [45] prezentovali su eksperimentalno ispitivanje nosivosti poprečnog preseka vrućevaljanih ugaonika na dejstvo pritiska, koje je obuhvatilo po dva ponovljena uzoraka za svaki od ukupno pet kratkih stubova napravljenih od austenitnog nerđajućeg čelika. Ispitivani poprečni preseki su bili nominalnih dimenzija $80 \times 80 \times 10$ mm materijala EN 1.4307, EN 1.4404 i EN 1.4571, $100 \times 100 \times 10$ mm materijala EN 1.4307 i $100 \times 100 \times 8$ mm materijala EN 1.4571. Analizirana je granična vitkost krakova ugaonika za klasifikaciju poprečnih preseka prema EN 1993-1-4 [2] i zaključeno je da granična vitkost koju definiše standard daje konzervativne rezultate (slika 2.10).



Slika 2.10– Prikaz rezultata eksperimentalnog ispitivanja i numeričke studije [45]

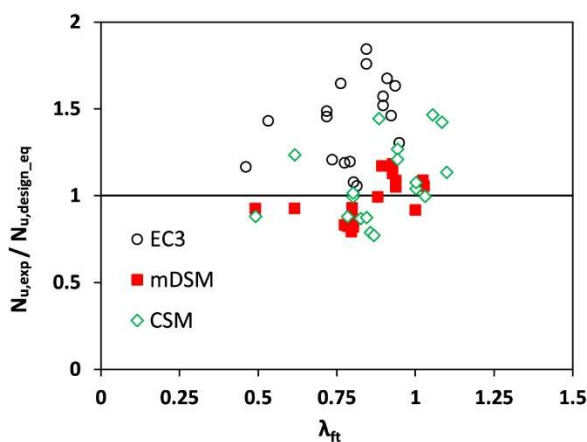
Sarquis i grupa autora (2020) [46] sproveli su opsežno istraživanje kako bi proučili torziono-fleksiono ponašanje uklještenih vrućevaljanih ugaonika od nerđajućeg čelika izrađenih od austenitne legure EN 1.4301. Program eksperimentalnog ispitivanja obuhvatio je 10 uzoraka ispitivanih na izvijanje, nominalnih dimenzija $76 \times 76 \times 6.4$ mm, $64 \times 64 \times 4.8$ mm i $64 \times 64 \times 6.4$ mm, dok su dužine uzorka bile od 800 do 1500 mm. Sprovedena je i numerička analiza koja je validirana

rezultatima eksperimentalnog ispitivanja sa ciljem sprovođenja parametarske studije za generisanje rezultata u širem opsegu dimenzija poprečnog preseka i vitkosti stuba. Dobijeni rezultati korišćeni su za procenu tačnosti postupaka proračuna predviđenih u EN 1993-1-4 [2] i novog proračunskog pristupa zasnovanog na *DSM* [35]. Zaključujući da istražene metode projektovanja ne nude tačno predviđanje nosivosti elemenata, autori su predložili dva modela proračuna. Predložen je EC3 - α metoda zasnovana na skupu različitih krivi u funkciji dužine elementa i alternativna EC3 - λ metoda zasnovana na modifikaciji vitkosti stuba uz korišćenje jedinstvene krive izvijanja. Autori su u radu prikazali poređenje rezultata dobijenih u svom istraživanju, kao i eksperimentalnih rezultata dobijenih u studiji [42] sa predloženim modelima proračuna (slika 2.11)



Slika 2.11–Poređenje rezultata eksperimentalnog ispitivanja i numeričke studije sa predloženim modelima proračuna [46]

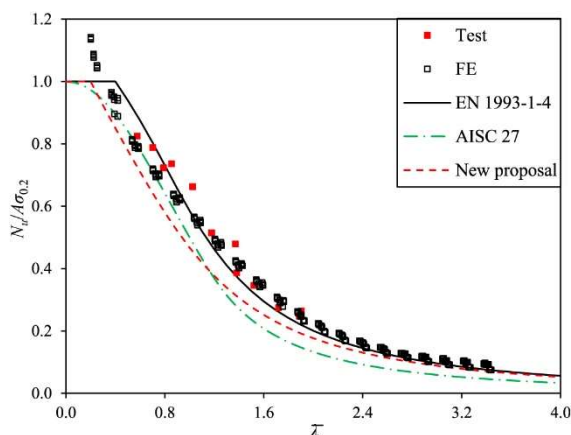
Sirqueira i grupa autora (2020) [47] sprovedli su ispitivanje na seriji vrućevaljanih ugaonika od austenitnog nerđajućeg čelika. U eksperimentalnim ispitivanjima korišćena su tri različita poprečna preseka nominalnih dimenzija $76 \times 76 \times 6.4$ mm, $64 \times 64 \times 4.8$ mm i $102 \times 102 \times 6.4$ mm sa dužinama u opsegu od 152 do 1893 mm. Oblik izvijanja ispitanih uzoraka bio je torziono-fleksiono izvijanje, izuzev uzorka poprečnog preseka $64 \times 64 \times 4.8$ mm i dužine 1470 mm, čiji je oblik izvijanja bilo fleksiono izvijanje oko slabije ose inercije. Autori su dobijene eksperimentalne rezultate poredili sa proračunske vrednostima prema standardu EN 1993-1-4 [2], prema metodi direktne čvrstoće (*DSM*) [35] i prema metodi kontinualne čvrstoće (*CSM - continuous strength method* [48]) – slika 2.12.



Slika 2.12–Poređenje rezultata eksperimentalnog ispitivanja sa proračunskim vrednostima [47]

Zhang i grupa autora (2020) [49] sprovedli su eksperimentalno i numeričko istraživanje fleksionog izvijanja oko slabije ose inercije zglobno oslonjenih vrućevaljanih ugaonika od nerđajućeg čelika. Program ispitivanja obuhvatio je 12 uzoraka nominalnih dimenzija poprečnog preseka $80 \times 80 \times 10$ mm proizvedenih od tri različite austenitne legure EN 1.4307, EN 1.4571 i EN 1.4404. Na osnovu eksperimentalnih rezultata i numeričke simulacije, izvršena je parametarska studija koja je

omogućila procenu tačnosti analitičkih postupaka predviđenih u EN 1993-1-4 [2] i AISC DG 27 [50]. Autori predlažu da se za proračun zglobno oslonjenih stubova vrućevaljanih ugaonika od nerđajućeg čelika koristi procedura definisana u EN 1993-1-4 [2] uz vrednost koeficijenta imperfekcije $\alpha = 0.76$ i vrednost granične vitkosti $\bar{\lambda}_0 = 0.2$. Na slici 2.13 prikazano je poređenje rezultata studije sa proračunskim vrednostima prema [2], [50] i predloženim postupku proračuna.



Slika 2.13–Poređenje rezultata eksperimentalnog ispitivanja i numeričke studije sa proračunskim vrednostima i predloženim postupkom proračuna [49]

U tabeli 2-2 prikazan je sažetak eksperimentalnih ispitivanja ugaonika od nerđajućeg čelika. U tabeli 2-3 prikazani su rezultati sprovedenih parametarskih analiza ovih autora kroz srednje vrednosti poređenja nosivosti elemenata u numeričkim studijama (N_u) sa proračunskim vrednostima prema referentnim standardima. U pomenutoj tabeli $N_{u,ASCE}$ označava proračunsku vrednost nosivosti prema standardu SEI/ASCE-8 [19], $N_{u,AS/NZS}$ proračunsku vrednost nosivosti prema standardu AS/NZS 4673 [43], $N_{u,DG27}$ proračunsku vrednost nosivosti prema standardu AISC DG 27 [50], $N_{u,DSM}$ proračunsku vrednost dobijenu metodom direktne čvrstoće (*DSM*) [35] i $N_{u,CSM}$ proračunsku vrednost dobijenu metodom kontinualne čvrstoće (*CSM*) [48].

Tabela 2-2 Sažetak ispitivanja ugaonika od nerđajućeg čelika

Autori	Čelični materijal	Proizvod od čelika	Dimenzije preseka [mm]	Broj uzorka
Kuwamura	EN 1.4301 i EN 1.4318	Hladnooblikovani ugaonici	L 25 × 25 × 3, L 30 × 30 × 3, L 40 × 40 × 3, L 50 × 50 × 3 i L 60 × 60 × 3	12
De Menzes i grupa autora	EN 1.4301	Vrućevaljani ugaonici	L 64 × 64 × 6.4	13
Liang i grupa autora	EN 1.4307 i EN 1.4571	Vrućevaljani ugaonici	L 80 × 80 × 10, L 100 × 100 × 10 i L 100 × 100 × 8	16
Zhang i grupa autora	EN 1.4420	Hladnooblikovani ugaonici	L 50 × 50 × 6 i L 100 × 100 × 6	14
Sun i grupa autora	EN 1.4307, EN 1.4404 i EN 1.4571	Vrućevaljani ugaonici	L 80 × 80 × 10, L 100 × 100 × 8 i L 100 × 100 × 10	10
Sarquis i grupa autora	EN 1.4301	Vrućevaljani ugaonici	L 64 × 64 × 4.8, L 64 × 64 × 6.4 i L 76 × 76 × 6.4	10
Sirqueira i grupa autora	EN 1.4301	Vrućevaljani ugaonici	L 64 × 64 × 4.8, L 76 × 76 × 6.4 i L 102 × 102 × 6.4	18
Zhang i grupa autora	EN 1.4307, EN 1.4571 i EN 1.4404	Vrućevaljani ugaonici	L 80 × 80 × 10	12

Tabela 2-3 Sažetak parametarskih analiza ispitivanja ugaonika od nerđajućeg čelika

Autori	Broj FE modela	$N_u/N_{u,EC3}$	$N_u/N_{u,ASCE}$	$N_u/N_{AS/NZS}$	N_u/N_{DG27}	N_u/N_{DSM}	N_u/N_{CSM}
De Menzes i grupa autora	242	0.94	-	-	-	-	-
Liang i grupa autora	180	1.2	1.63	1.6	-	0.99	-
Zhang i grupa autora	210	1.89	2.39	2.39	-	1.02	-
Sun i grupa autora	60	1.21	-	-	-	-	1.09
Sarquis i grupa autora	201	1.11	-	-	-	0.93	-
Zhang i grupa autora	180	1.07	-	-	1.23	-	-

2.6 Nosivost centrično pritisnutih elemenata prema EN 1993-1-4

Proračun stabilnosti centrično pritisnutih elemenata prema EN 1993-1-4 [2] zasniva se na Perry-Robertson-ovoj funkciji, koja daje zavisnost između relativne vitkosti i koeficijenta redukcije – bezdimenzionog koeficijenta izvijanja. Ova funkcija uzima u obzir početne geometrijske imperfekcije i zaostale napone uz pomoć koeficijenta imperfekcije - α i granične relativne vitkosti - $\bar{\lambda}_0$, dok efekat materijalne nelinearnosti na nosivost elemenata na izvijanje nije eksplicitno uzet u obzir. U tabeli 2-4 prikazane su vrednosti koeficijenta imperfekcije - α i granične relativne vitkosti - $\bar{\lambda}_0$ koje su definisane u EN 1993-1-4 [2]. Iz tabele 2-4 se vidi da pravila za projektovanje centrično pritisnutih elemenata od nerđajućeg čelika koja su data u standardu EN 1993-1-4 [2] ne navode jasne vrednosti koeficijenta imperfekcije α i granične relativne vitkosti $\bar{\lambda}_0$ za ugaonike u funkciji proizvodnog procesa, ose oko koje se posmatra izvijanje i kvaliteta nerđajućeg čelika.

Tabela 2-4 Vrednost koeficijenta imperfekcije α i granične relativne vitkosti $\bar{\lambda}_0$ u EN 1993-1-4

Oblik izvijanja	Tip elementa	α	$\bar{\lambda}_0$
Fleksiono	Hladnooblikovani otvoreni preseci	0.49	0.4
	Šuplji preseci (šavni i bešavni)	0.49	0.4
	Zavareni otvoreni preseci (jača osa)	0.49	0.2
	Zavareni otvoreni preseci (slabija osa)	0.76	0.2
Torziono i torziono-fleksiono	Za sve elemente	0.34	0.2

Nosivost na izvijanje centrično pritisnutih elemenata od nerđajućeg čelika određuje se izrazom (43):

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \quad (43)$$

gde je f_y konvencionalna granica razvlačenja materijala, koja odgovara vrednosti napona pri dilataciji od 0.2%; A je površina poprečnog preseka elementa koja je za poprečne preseke klase 1, 2 i 3 jednaka bruto površini poprečnog preseka, dok je za poprečne preseke klase 4 jednaka efektivnoj površini poprečnog preseka A_{eff} ; i γ_{M1} predstavlja parcijalni koeficijent za nosivost elementa usled njegove nestabilnosti.

Koeficijent redukcije χ dat je izrazom (44):

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (44)$$

gde je $\bar{\lambda}$ bezdimenziona vitkost koja predstavlja kvadratni koren od količnika nosivosti poprečnog preseka na pritisak ($A \cdot f_y$) i elastične kritične sile izvijanja N_{cr} ; dok je ϕ koeficijent definisan izrazom (45):

$$\phi = 0.5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \lambda_0) + \bar{\lambda}^2) = 0.5(1 + \eta + \bar{\lambda}^2) \quad (45)$$

Elastična kritična sila fleksionog izvijanja se određuje prema izrazu (46):

$$N_{cr} = \pi^2 \frac{EI}{L_{cr}^2} \quad (46)$$

gde je E - modul elastičnosti; I - moment inercije bruto poprečnog preseka za razmatranu osu; L_{cr} - dužina izvijanja za posmatranu ravan izvijanja.

Tačka 6.2.3 standarda EN 1993-1-3 [4] definiše izraze za određivanje elastične kritične sile torzionog izvijanja i elastične kritične sile torziono-fleksionog izvijanja koji su dati jednačinama (47) i (48), respektivno:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left(GI_t + \pi^2 \frac{EI_w}{L_t^2} \right) \quad (47)$$

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,y}}{2\beta} \left[1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} \right)^2 + 4 \left(\frac{y_0}{i_0} \right)^2 \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}} \right] \quad (48)$$

gde su:

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2 \quad (49)$$

i_y i i_z - poluprečnici inercije bruto poprečnog preseka oko glavnih osa inercije;
 y_0 i z_0 - koordinate centra smicanja u odnosu na težište bruto poprečnog preseka;
 G - modul smicanja;
 I_t - torzioni moment inercije bruto poprečnog preseka;
 I_w - sektorski moment inercije bruto poprečnog preseka;
 L_t - dužina izvijanja elemenata za torziono izvijanje;
 $N_{cr,y}$ - elastična kritična sila fleksionog izvijanja oko glavne ose inercije;

$$\beta = 1 - \left(\frac{y_0}{i_0} \right)^2 \quad (50)$$

Ugaonici se na krajevima najčešće vezuju sa oslonačkim elementima preko jednog kraka bilo zavrtnjevima ili direktnim zavarivanjem. Pored aksijalne sile pritiska, ovakvi elementi su opterećeni i momentom savijanja kao posledica ekscentrične veze krajeva elemenata. Postupak proračuna ovakvih elemenata prema Prilogu BB standarda EN 1993-1-1 [3] svodi se na primenu efektivne relativne vitkosti $\bar{\lambda}_{eff}$ umesto relativne vitkosti. Efektivna relativna vitkost za izvijanje oko osa $v-v$, $y-y$ i $z-z$ definisana je sledećim izrazima, respektivno:

$$\bar{\lambda}_{eff,v} = 0,35 + 0,7\bar{\lambda}_v \quad (51)$$

$$\bar{\lambda}_{eff,y} = 0,5 + 0,7\bar{\lambda}_y \quad (52)$$

$$\bar{\lambda}_{eff,z} = 0,5 + 0,7\bar{\lambda}_z \quad (53)$$

U slučaju veze ugaonika preko jednog kraka ekscentriciteti veze se u proračunu mogu zanemariti uvođenjem efektivne relativne vitkosti, uz uslov da veze na krajevima obezbeđuju odgovarajuće ukleštenje (krak preko koga se ostvaruje veza je zavaren ili se veza ostvaruje sa bar dva zavrtnja). Za drugačije uslove oslanjanja elementi treba da budu tretirani kao ekscentrično opterećeni elementi.

Kao ekscentrično pritisnuti elementi tretiraju se i elementi čiji poprečni presek pripada klasi 4, kod kojih usled pomeranja težišta efektivnog poprečnog preseka u odnosu na težište bruto poprečnog preseka dolazi do pojava momenta savijanja oko slabije glavne ose inercije pri delovanju aksijalne sile pritiska. Usled pomeranja težišta inicijalno centrično pritisnuti elementi se ponašaju kao ekscentrično pritisnuti, pa je u proračunu neophodno zadovoljiti izraz (54) koji je u skladu sa tačkom 6.1.9 standarda EN 1993-1-3 [4] i izraz (55) koji je u skladu sa tačkom 5.5 standarda EN 1993-1-4 [2].

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff}f_y/\gamma_{M0}} + \frac{N_{Ed}e_{Nz}}{W_{eff,z,min}f_y/\gamma_{M0}} \leq 1.0 \quad (54)$$

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{min}} + k_z \left(\frac{N_{Ed}e_{Nz}}{W_{eff,z}f_y/\gamma_{M1}} \right) \leq 1.0 \quad (55)$$

U prethodno pomenutim izrazima:

N_{Ed} je proračunska vrednost uticaja aksijalne sile pritiska;

e_{Nz} je efektivno pomeranje težišta u pravcu jače glavne ose inercije pri čistom pritisku;

A_{eff} je efektivna površina poprečnog preseka za naprezanje čistim pritiskom;

$W_{eff,z}$ je otporni moment efektivnog poprečnog preseka oko ose z;

$(N_{brd})_{min}$ je najmanja vrednost proračunske vrednosti na izvijanje za sledeća četiri oblika izvijanja: fleksiono izvijanje oko ose y, fleksiono izvijanje oko ose z, torziono izvijanje i torziono - fleksiono izvijanje.

Koeficijent interakcije k_z može se odrediti izrazom (56), uz ograničenja koja su data u izrazu (57).

$$k_z = 1.0 + 2(\bar{\lambda}_z - 0.5) \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{min1}} \quad (56)$$

$$1.2 \leq k_z \leq 1.2 + 2 \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{min1}} \quad (57)$$

gde je $(N_{b,rd})_{min1}$ najmanja vrednost proračunske nosivosti na izvijanje za sledeća tri oblika izvijanja: fleksiono izvijanje oko ose z, torziono izvijanje i torziono-fleksiono izvijanje.

2.7 Nosivost centrično pritisnutih elemenata prema AS/NZS 4673 i SEI/ASCE 8-02

Australijski standard za proračune hladnooblikovanih elemenata od nerđajućeg čelika AS/NZS 4673 [43] baziran je na američkom standardu za proračun hladnooblikovanih elemenata konstrukcije od nerđajućeg čelika SEI/ASCE 8-02 [19]. Saglasno tački 3.4.1 standarda AS/NZS 4673 [43] proračunska vrednost aksijalne sile pritiska predstavlja proizvod ϕ_c i N_c , gde je ϕ_c redukcioni faktor za pritisnute elemente, a N_c je definisano kao:

$$N_c = A_e f_n \quad (58)$$

gde su:

A_e - efektivna površina sračunata za napon izvijanja f_n ;

f_n - najmanji napon od napona fleksionog, torzionog i torziono-fleksionog izvijanja.

Zbog izražene nelinearnosti materijala, standard [43] predviđa primenu interaktivnog postupka zasnovanog na tangentskom modulu. Za poprečne preseke koji nisu osetljivi na torziono i torziono-fleksiono izvijanje, napon fleksionog izvijanja definiše se kao:

$$f_n = \frac{\pi^2 E_t}{(KL/r)^2} \leq f_y \quad (59)$$

gde su:

K - koeficijent dužine izvijanja,

L - sistemna dužina elementa,

r - poluprečnik inercije bruto poprečnog preseka,

E_t - tangenti modul koji odgovara vrednosti napona pri kome dolazi do izvijanja. Postupak za određivanje tangentskog modula dat je u Dodatku B standarda [43] i zasniva se na *Ramberg Osgood*-ovom izrazu:

$$E_t = \frac{f_y \cdot E_0}{f_y + 0.002 \cdot n \cdot E_0 \cdot \left(\frac{f}{f_y}\right)^{n-1}} \quad (60)$$

U izrazu (60) prikazane veličine imaju sledeće značenje:

f_y - konvencionalna granica razvlačenja,

E_0 - početni modul elastičnosti,

f - napon koji odgovara nominalnoj vrednosti graničnog napona fleksionog, torzionog ili torziono-fleksionog izvijanja,

n - *Ramberg Osgood*-ov koeficijent nelinearnosti.

Kao alternativu interaktivnoj metodi, standard [43] dozvoljava i primenu direktnog postupka baziranog na *Perry-Robertson*-ovoj jednačini koja se koristi u standardu EN 1993-1-4 [2]. Koeficijent nesavršenosti određuje se nelinearnim izrazom:

$$\eta = \alpha \left((\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_1)^\beta - \bar{\lambda}_0 \right) \quad (61)$$

Vrednosti koeficijenata α , β , λ_0 i λ_1 koji figurišu u jednačini (61) u funkciji materijala (za austenitni EN 1.4301, feritni EN 1.4003 i dupleks 1.4432 nerđajući čelik) prikazani su u tabeli 2-5.

Tabela 2-5 Vrednost koeficijenata α , β , λ_0 i λ_1 u zavisnosti od klase nerđajućeg čelika prema [43]

Koeficijent	Klasa nerđajućeg čelika		
	Austenitni	Feritni	Dupleks
α	1.59	0.94	1.16
β	0.28	0.15	0.13
λ_0	0.55	0.56	0.65
λ_1	0.20	0.27	0.42

Saglasno ovom postupku granični napon fleksionog izvijanja definiše se izrazom:

$$f_n = \frac{f_y}{\phi + [\phi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0.5}} \leq f_y \quad (62)$$

gde je parametar ϕ definisan izrazom koji je identičan izrazu (45).

Za određivanje graničnog napona torzionog izvijanja koristi se izraz:

$$f_n = \left(\frac{1}{Ar_0^2} \right) \left(G_0 J + \frac{\pi^2 E_0 C_w}{(K_T L_T)^2} \right) \left(\frac{E_t}{E_0} \right) \quad (63)$$

gde su:

A - površina bruto poprečnog preseka;

G_0 - početni modul smicanja;

J - torziona konstanta;

C_w - sektorski moment inercije;

K_t - koeficijent dužine izvijanja za torziono izvijanje;

L_t - sistemna dužina elementa;

r_0 je definisano sledećim izrazom:

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2} \quad (64)$$

U izrazu (64) r_x i r_y predstavljaju poluprečnike inercija oko glavnih osa inercija, dok je x_0 rastojanje između centra smicanja i težišta poprečnog preseka u pravcu glavne ose inercije.

Granični napon torziono-fleksionog izvijanja određuje se prema izrazu:

$$f_n = \frac{1}{2\beta} \left[\sigma_{ey} + \sigma_t - \sqrt{(\sigma_{ey} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ey}\sigma_t} \right] \quad (65)$$

U prethodnom izrazu σ_{ey} predstavlja kritičan napon fleksionog izvijanja oko jače glavne ose inercije. Koeficijent β ima isto značenje kao u standardu EN 1993-1-3 [4] i definisan je izrazom (50).

Za dimenzionisanje centrično pritisnutih ugaonika, standard AS/NZS 4673 [43] predviđa uvođenje dodatnog momenta savijanja intenziteta $P \cdot L / 1000$ (gde je P vrednost aksijalne sile pritiska, a L sistemna dužina elementa) koji deluje oko slabije ose inercije. Smer delovanja ovog momenta savijanja treba da bude takav da izaziva pritisak na krajevima krakova L profila. Dakle, proračun centrično pritisnutih ugaonika svodi se na proračun ekscentrično pritisnutih elemenata i neophodno je koristiti izraze (66) i (67).

$$\frac{N^*}{\phi_c N_s} + \frac{M_z^*}{\phi_b M_{bz}} \leq 1.0 \quad (66)$$

$$\frac{N^*}{\phi_c N_c} + \frac{C_{mz} M_z^*}{\phi_b M_{bz} \alpha_{nz}} \leq 1.0 \quad (67)$$

gde su:

N^* - proračunska vrednost sile pritiska;

M_z^* - proračunska vrednost momenta savijanja oko z ose efektivnog poprečnog preseka. Proračunska vrednost momenta predstavlja zbir momenta ekscentriciteta $P \cdot L / 1000$ i momenta koji se javlja kao posledica pomeranja težišta kod efektivnog poprečnog preseka;

N_s - nominalna vrednost nosivosti poprečnog preseka na pritisak;

M_{bz} - nominalna vrednost nosivosti elementa na savijanje oko z ose;

α_{nz} - koeficijent koji se određuje izrazom:

$$\alpha_{nz} = 1 - \frac{N^*}{N_e} \quad (68)$$

N_e - Ojlerova kritična sila fleksionog izvijanja oko slabije ose inercije;

C_{mz} - koeficijent oblika momenta savijanja;

ϕ_b - redukcioni faktor za elemente izložene savijanju.

2.8 Nosivost centrično pritisnutih elemenata prema AISC *Design Guide 27*

Saglasno postupku proračuna koji je dat u severnoameričkom standardu ANSI / AISC 360-10 [24] za čelične konstrukcije, preporuke za proračun elemenata od nerđajućeg čelika AISC *Design Guide 27* [50] predviđaju jedinstvenu krivu izvijanja za određivanje nosivosti centrično pritisnutih elemenata za sve poprečne preseke i za sve oblike izvijanja.

U skladu sa tačkom 5.5 AISC 27 [50], nominalna vrednost nosivosti centrično pritisnutih elemenata od nerđajućeg čelika određuje se prema sledećem izrazu:

$$P_n = F_{cr} \cdot A_g \quad (69)$$

gde je A_g neto površina poprečnog preseka, a F_{cr} je kritičan napon koji se dobija na osnovu izraza:

$$F_{cr} = Q \left(0.50 \frac{Q F_y}{F_e} \right) F_y \text{ za } \frac{KL}{r} \leq 3.77 \sqrt{\frac{E}{Q F_y}} \quad (70)$$

$$F_{cr} = 0.531 F_e \text{ za } \frac{KL}{r} > 3.77 \sqrt{\frac{E}{Q F_y}} \quad (71)$$

Parametri u izrazima (70) i (71) imaju sledeće značenje:

F_e predstavlja elastičan napon izvijanja, koji se može odrediti prema jednačinama (E3-4) i (E4-3) datim u standardu AISC 360 [24] za fleksiono izvijanje i torziono ili torziono-fleksiono izvijanje, respektivno. Sa Q je predstavljen koeficijent redukcije usled lokalnog izbočavanja, koji se koristi za vitke preseke i računa se prema tački 5.6.1 standarda AISC 27 [50], a za kompaktne ili polukompaktne preseke $Q = 1.0$, F_y je napon na granici razvlačenja, KL je dužina izvijanja stuba, r je poluprečnik inercije.

Za vitke poprečne preseke kod kojih usled pomeranja težišta poprečnog preseka dolazi do pojave dopunskog momenta savijanja, interakcija između fleksionog ili torziono-fleksionog izvijanja i savijanja oko slabije ose inercije se može proveriti korišćenjem interaktivnih formula definisanih u tački H1.1 standarda AISC 360 [24], datih u jednačinama (72) i (73).

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8 M_{r,v}}{9 M_{c,v}} \leq 1.0 \text{ za } \frac{P_r}{P_c} \geq 0.2 \quad (72)$$

$$\frac{P_r}{2P_c} + \frac{M_{r,v}}{M_{c,v}} \leq 1.0 \text{ za } \frac{P_r}{P_c} < 0.2 \quad (73)$$

U jednačinama (72) i (73) korišćene oznake imaju sledeće značenje:

P_r - proračunska vrednost sile pritiska;

$M_{r,v}$ - moment savijanja oko slabije ose usled pomeranja težišta efektivnog poprečnog preseka;

P_c - proračunska vrednost nosivosti centrično pritisnutog elementa;

$M_{c,v}$ - proračunska nosivost elementa na savijanje oko slabije ose inercije.

3 EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA¹

3.1 Sadržaj eksperimentalnog ispitivanja

Eksperimentalno ispitivanje ponašanja centrično pritisnutih ugaonika od nerđajućeg čelika podjeljeno je u pet faza:

- ispitivanje mehaničkih svojstava materijala,
- merenje početnih geometrijskih imperfekcija,
- merenje zaostalih napona,
- ispitivanje nosivosti poprečnog preseka na pritisak (ispitivanje kratkog stuba pri pritisku),
- ispitivanje nosivosti elemenata na izvijanje.

Ispitivanjem su obuhvaćene tri grupe uzoraka: vrućevaljani, laserski zavareni i hladnooblikovani ugaonici. Vrućevaljani i laserski zavareni uzorci izrađeni su od austenitne legure nerđajućeg čelika klase EN 1.4301 sa nominalnom granicom razvlačenja od 190 MPa [51], dok su hladnooblikovani uzorci dobijeni savijanjem lima od niskolegiranog dupleks čelika klase EN 1.4162 sa nominalnom granicom razvlačenja od 480 MPa [51]. Nominalne dimenzije poprečnih preseka vrućevaljanih i laserski zavarenih uzoraka su $60 \times 60 \times 6$ mm i $100 \times 100 \times 10$ mm. Hladnooblikovani ugaonici napravljeni su postupkom presovanja (abkantovanja) od vrućevaljane trake debljine 4 mm. Nominalne dimenzije poprečnih preseka hladnooblikovanih uzoraka su $80 \times 80 \times 4$ mm.

Cilj prve faze eksperimentalnog ispitivanja je utvrđivanje mehaničkih svojstava materijala koje krucijalno određuju graničnu nosivost razmatranog elementa u elastičnoj ili plastičnoj oblasti naprezanja. Dobijeni rezultati su takođe veoma važni u numeričkim simulacijama eksperimentalnih ispitivanja i sprovođenje parametarske analize. Mehanička svojstva materijala hladnooblikovanih, vrućevaljanih i laserski zavarenih elemenata određena su standardnim testovima pri zatezanju. Kod hladnooblikovanih ugaonika ispitan je i uticaj hladnog oblikovanja na poboljšanje mehaničkih svojstva materijala ispitivanjem epruvete koja je uzeta iz prevoja (ugla) ugaonika.

Imajući u vidu značaj uticaja početnih geometrijskih imperfekcija na graničnu nosivost, ali i oblik loma centrično pritisnutog elementa, utvrđena je raspodela i veličine relevantnih početnih geometrijskih imperfekcija svih uzoraka primenom geodetskih metoda, korišćenjem laserskog interferometra za „praćenje“ (eng. *laser interferometric tracker*).

Ispitivanjem kratkih stubova na pritisak dobijene su informacije o deformacionom kapacitetu poprečnih preseka uzoraka, odnosno njihovoj mogućnosti da se plastifikuju u stanju granične nosivosti pod uticajem aksijalne sile pritiska. Dobijeni rezultati omogućili su procenu klase poprečnog preseka (izbočavanje u elastičnoj ili plastičnoj oblasti naprezanja) u skladu sa preporukama datim u EN 1993-1-4 [2].

Peta faza ispitivanja je merenje zaostalih napona kod vrućevaljanih i laserski zavarenih ugaonika. Opšte je poznato da tradicionalne metode vrućeg valjanja i zavarivanja čeličnih elemenata dovodi do pojave inicijalnih zaostalih napona koji su međusobno uravnoteženi u okviru elementa. Pored početnih geometrijskih imperfekcija, zaostali naponi mogu značajno redukovati vrednost granične nosivosti idealizovanog centrično pritisnutog elementa. U tom kontekstu, sprovedeno je merenje raspodele i veličine zaostalih napona u uzorcima vrućevaljanih i laserski zavarenih ugaonika koristeći invazivnu metodu sečenja. Merenje zaostalih napona u uzorcima hladnooblikovanih ugaonika je izostavljeno, obzirom da rezultati brojnih sprovedenih istraživanja ukazuju na

¹ Rezultati koji su prikazani u ovom poglavlju publikovani su u sledećim radovima:

1. J. Dobrić, A. Filipović, Z. Marković, N. Baddoo, Structural response to axial testing of cold-formed stainless steel angle columns, *Thin-Walled Structures* 156 (2020).
2. A. Filipović, J. Dobrić, N. Baddoo, P. Može, Experimental response of hot-rolled stainless steel angle columns, *Thin-Walled Structures*, 163 (2021).
3. A. Filipović, J. Dobrić, D. Buđevac, N. Fric, N. Baddoo, Experimental response of laser-welded stainless steel angle columns, *Thin-Walled Structures*, 164 (2021).

irelevantnost zaostalih napona u pogledu granične nosivosti centrično pritisnutih hladnooblikovanih elemenata.

Najznačajnija faza eksperimentalnog programa je ispitivanje nosivosti elemenata na izvijanje. Ova faza je obuhvatila ispitivanje nosivosti 48 obostrano zglobno oslonjenih uzoraka pod dejstvom centrične sile pritiska (slika 3.1). U cilju utvrđivanja uticaja globalne vitkosti (dužine) elementa na njegovu graničnu nosivost i oblik loma, ispitivanjem su obuhvaćene tri serije uzoraka: uzorci male vitkosti ($0.2 < \bar{\lambda} < 0.5$), srednje ($0.5 < \bar{\lambda} < 1.1$) i velike vitkosti ($1.1 < \bar{\lambda} < 2.3$). Takođe je analiziran uticaj vitkosti tankozidnog poprečnog preseka na interakciju lokalne i globalne nestabilnosti kod hladnooblikovanih pritisnutih elemenata. U cilju pouzdanosti dobijenih rezultata i njihove statističke obrade, svaka ispitna serija je uključila 4 geometrijski ista, ponovljena uzorka. Svi relevantni testovi su kvalitativno simulirani primenom metode konačnih elemenata u cilju dobijanja relevantnih i pouzdanih numeričkih modela potrebnih za dalje kvantitativne parametarske studije i izradu preporuka za projektovanje.



Slika 3.1 - Uzorci korišćeni u eksperimentu

Uzorci su označeni slovno-numeričkim oznakama na sledeći način:

- oznaka za hladnooblikovani uzorak ACF $b \times b \times t - L - X$ (ACF – *angle cold-formed*),
- oznaka za vrućevaljani uzorak AHR $b \times b \times t - L - X$ (AHR – *angle hot-rolled*),
- oznaka za laserski zavaren uzorak ALW $b \times b \times t - L - X$ (ALW – *angle laser-welded*).

Simboli „b“ i „t“ predstavljaju nominalne vrednosti širine i debljine kraka poprečnog preseka u milimetrima, respektivno, dok simbol „L“ označava nominalnu dužinu uzorka. Simbol „X“ predstavlja redni broj ponovljenog uzorka u odgovarajućoj ispitnoj seriji – 1 do 4 za uzorke podvrgnute testovima globalne nestabilnosti, odnosno 1 do 3 za uzorke kod kojih je ispitivan kapacitet nosivosti poprečnog preseka na pritisak.

3.2 Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala

Eksperimentalnim ispitivanjem su obuhvaćene dve, u građevinarstvu široko primenjene legure nerđajućeg čelika – nisko legirani dupleks nerđajući čelik EN 1.4162 (X2CrMnNiN21-5-1) kod hladnooblikovanih ugaonika i austenitni nerđajući čelik EN 1.4301 (X5CrNi18-10) kod vrućevaljanih i laserski zavarenih uzoraka. U tabeli 3-1 prikazana je procentualna zastupljenost legirajućih elemenata za austenitni čelik EN 1.4301 prema atestu proizvođača. Tabela 3-2 prikazuje nominalne vrednosti hemijskog sastava niskolegiranog dupleks čelika EN 1.4162 prema EN 10088-4 [51]. U tabeli 3-3 su prikazane vrednosti mehaničkih svojstva za ove dve legure nerđajućeg čelika prema standardu EN 10088-4 [51] i atestu proizvođača, gde su:

$f_{0.2}$ - konvencionalna granica razvlačenja;

$\sigma_{1.0}$ - vrednost napona koji odgovara trajnoj plastičnoj deformaciji od 1.0%;

f_u - čvrstoća pri zatezanju;

A_5 - izduženje pri lomu za standardnu dužinu merenja od $5.65 \cdot \sqrt{A_c}$, gde je sa A_c označena površina poprečnog preseka ispitivane epruvete.

Tabela 3-1 Hemijski sastav materijala EN 1.4301 prema atestu proizvođača i prema EN 10088-4

Proizvod	Učešće (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N
AHR 100 × 100 × 10	0.020	0.420	1.060	0.035	0.022	8.070	18.260	0.078
AHR 60 × 60 × 6	0.023	0.440	1.110	0.040	0.024	8.060	18.220	0.079
ALW 100 × 100 × 10	0.017	0.320	1.130	0.034	0.001	8.060	18.180	0.062
ALW 60 × 60 × 6	0.021	0.440	1.540	0.033	0.001	8.000	18.200	0.052

Tabela 3-2 Hemijski sastav materijala EN 1.4162 prema EN 10088-4

Oznaka čelika	Učešće (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N
EN 1.4162	≤ 0.04	≤ 1.00	4.0 ≤ 6.0	≤ 0.04	≤ 0.015	0.20 ≤ 0.25	21 ≤ 22	1.35 ≤ 1.70

Tabela 3-3 Mehanička svojstva materijala za poprečni pravac prema EN 10088-4 i atestu proizvođača

		$f_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{1.0}$ (MPa)	f_u (MPa)	A_5 (%)	
EN 1.4301	EN 10088-4	Profili (AHR)	≥ 190	-	500	≥ 45
		Vrućevaljani lim (ALW)	≥ 210	250	520-720	≥ 45
	Atest proizvođača	AHR 100 × 100 × 10	303	343	644	47
		AHR 60 × 60 × 6	327	368	688	46
		ALW 100 × 100 × 10	332	383	641	56
ALW 60 × 60 × 6	278	316	567	53		
EN 1.4162	EN 10088-4	≥ 480	-	680-900	≥ 30	

Sa ciljem dobijanja naponsko-deformacijskog zapisa i utvrđivanja ključnih mehaničkih svojstava materijala sprovedeni su standardni testovi pri zatezanju u skladu sa EN ISO 6892-1 [52].

Ispitivanje mehaničkih svojstava niskolegiranog dupleks čelika EN 1.4162 kod hladnooblikovanih uzoraka sprovedeno je na ukupno 9 epruveta. Iz osnovne vrućevaljane trake debljine 4 mm od koje su procesom presovanja napravljeni hladnooblikovani ugaonici uzeto je pet epruveta, dve epruvete u pravcu valjanja i tri epruvete upravno na pravac valjanja trake. Iz finalnog hladnooblikovanog uzorka nominalnih dimenzija 80 × 80 × 4 mm uzete su četiri epruvete, dve ravne epruvete iz kraka ugaonika i dve ugaone epruvete iz prevoja ugaonika. Na slici 3.2 prikazana je epruveta iz prevoja ugaonika. Ispitna površina ugaone epruvete odgovara zoni prevoja i ne uključuje ravne delove poprečnog preseka uzorka (videti sliku 3.9).



Slika 3.2 – Epruveta iz prevoja hladnooblikovanog ugaonika

Po tri epruvete su uzete iz srednjeg dela kraka vrućevaljanih i laserski zavarenih ugaonika nominalnih dimenzija 100 × 100 × 10 mm, napravljenih od austenitne legure čelika EN 1.4301 – slika 3.3. Sve epruvete su isečene tehnologijom sečenja vodenim mlazom kako bi se smanjilo zagrevanje materijala tokom njihove izrade.



Slika 3.3 – Epruveta iz gotovog proizvoda vrućevaljanog ugaonika

Ispitivanje materijala pri zatezanju sprovedeno je u Laboratoriji za preradu metala u plastičnom stanju na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Ispitivanje je sprovedeno na elektromehaničkoj kitalici za ispitivanje zatezanjem *Shimadzu AG - Xplus* kapaciteta 300 kN u skladu sa standardom EN ISO 6892-1 [52]. Podužno izduženje radnog dela epruveta praćeno je sa kalibrisanim ekstenzometrom početne merne dužine $L_0 = 50$ mm i opsegom merenja do 100%. Brzina nanošenja opterećenja u početnoj fazi ispitivanja iznosila je 0.1 mm/min do približno 1% ukupne deformacije, nakon čega je brzina nanošenja opterećenja povećana na 2.0 mm/min. Na slici 3.4 prikazana je postavka testa pri zatezanju epruvete, dok je na slici 3.5 prikazana epruveta pre i nakon ispitivanja.



Slika 3.4 – Ispitivanje epruvete testom na zatezanje



Slika 3.5 – Epruveta od nerđajućeg čelika pre i nakon ispitivanja

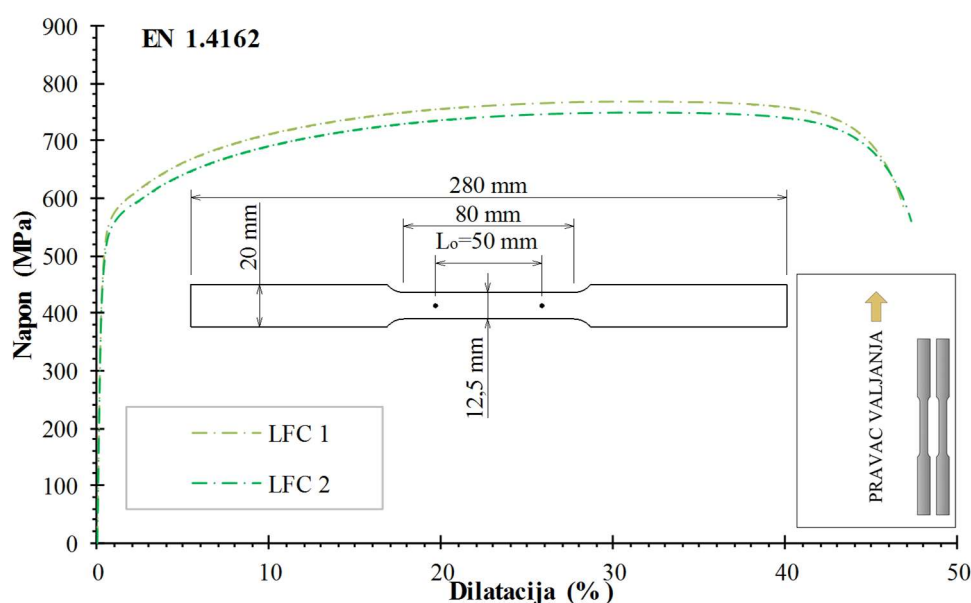
Na osnovu eksperimentalno utvrđene veze napon – dilatacija, određena su osnovna mehanička svojstva materijala: $\sigma_{0.01}$ granica proporcionalnosti, $\sigma_{0.05}$ vrednost napona koji odgovara trajnoj plastičnoj deformaciji od 0.05%, $\sigma_{1.0}$ vrednost napona koji odgovara trajnoj plastičnoj deformaciji od 1.0%, f_y granica razvlačenja koja odgovara konvencionalno utvrđenoj vrednosti napona $f_{0.2}$ pri trajnoj plastičnoj dilataciji od 0.2%, f_u čvrstoća pri zatezanju, ϵ_u dilatacija koja odgovara čvrstoći pri zatezanju, ϵ_F ukupna dilatacija pri lomu i E vrednost modula elastičnosti. U cilju validacije eksperimentalnih krivi sa analitičkim modelima materijala koji se zasnivaju na modifikaciji *Ramber-Odsgood*-ovog modela [10] određeni su koeficijenti nelinearnosti n i m primenom regresione analize.

3.2.1 Rezultati standardnih testova pri zatezanju za materijal EN 1.4162

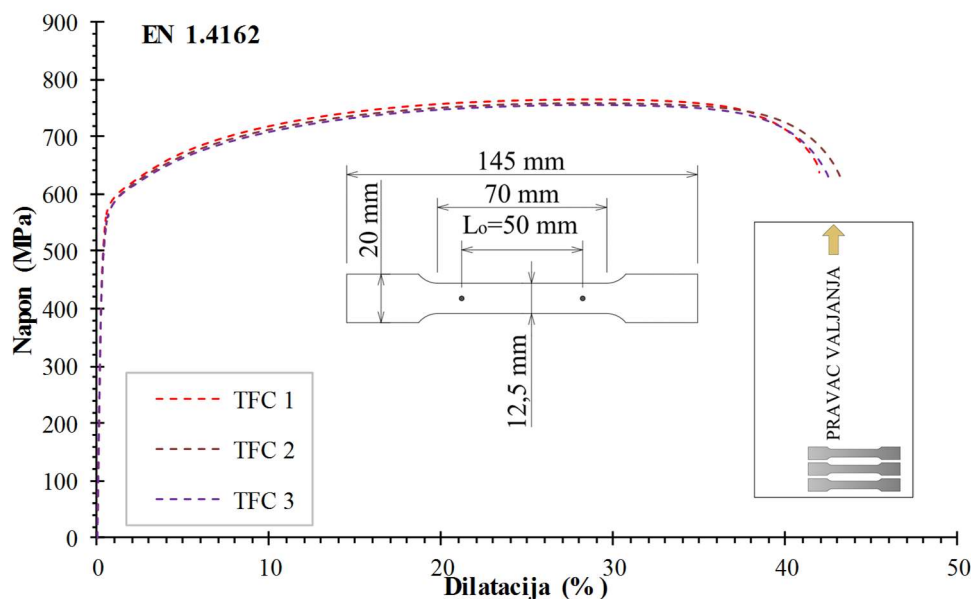
Ispitivanje mehaničkih svojstava niskolegiranog dupleks nerđajućeg čelika EN 1.4162 od koga su napravljani hladnooblikovani ugaonici sprovedeno je na četiri grupe epruveta:

- epruvete uzete iz osnovnog materijala u pravcu valjanja sa oznakom LFC (*Longitudinal Flat Coupon*),
- epruvete uzete iz osnovnog materijala upravno na pravac valjanja sa oznakom TFC (*Transverse Flat Coupon*),
- epruvete uzete iz kraka (ravnog dela) hladnooblikovanog ugaonika dimenzija $80 \times 80 \times 4$ mm sa oznakom FLC (*Flat Leg Coupon*),
- epruvete uzete iz prevoja (ugla) hladnooblikovanog ugaonika dimenzija $80 \times 80 \times 4$ mm sa oznakom CC (*Corner Coupon*).

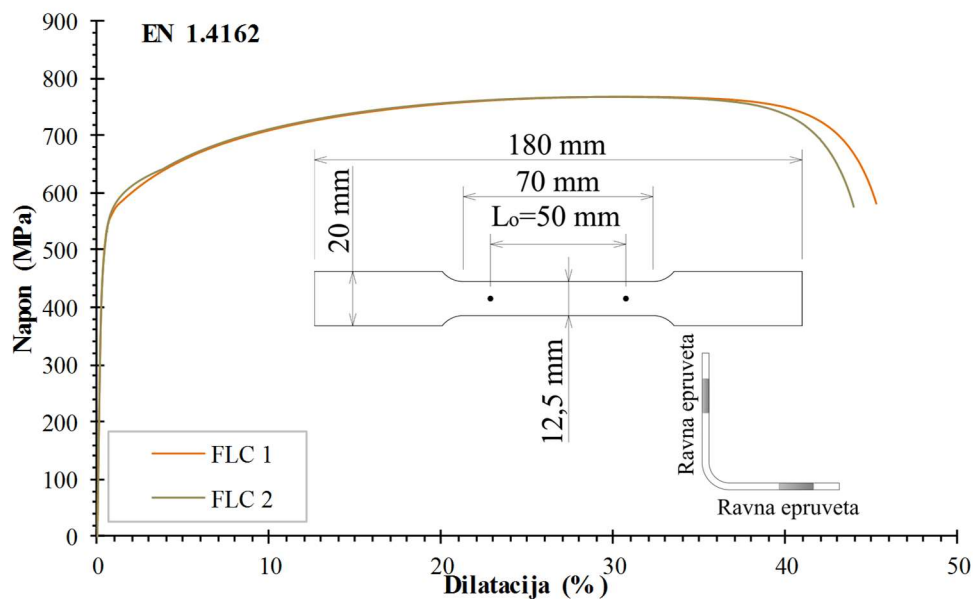
Nominalne dimenzije epruveta zajedno sa eksperimentalno utvrđenim krivama napon - dilatacija prikazane su na slikama 3.6 do 3.9. Rezultati ispitivanja i njihova statistička obrada: srednja vrednost, standardna devijacija s_x i koeficijent varijacije V_x su prikazani u tabeli 3-4. U cilju poređenja krivih napon-dilatacija za epruvete uzete iz osnovne trake čeličnog materijala, odnosno ravnog dela (kraka) i prevoja finalnog hladnooblikovanog uzorka, slika 3.10 objedinjuje sve eksperimentalne krive napon – dilatacija, dok su u tabeli 3-5 date srednje vrednosti mehaničkih svojstava za epruvete u okviru iste ispitne grupe kao i odgovarajuće nominalne vrednosti prema EN 10088-4 [51].



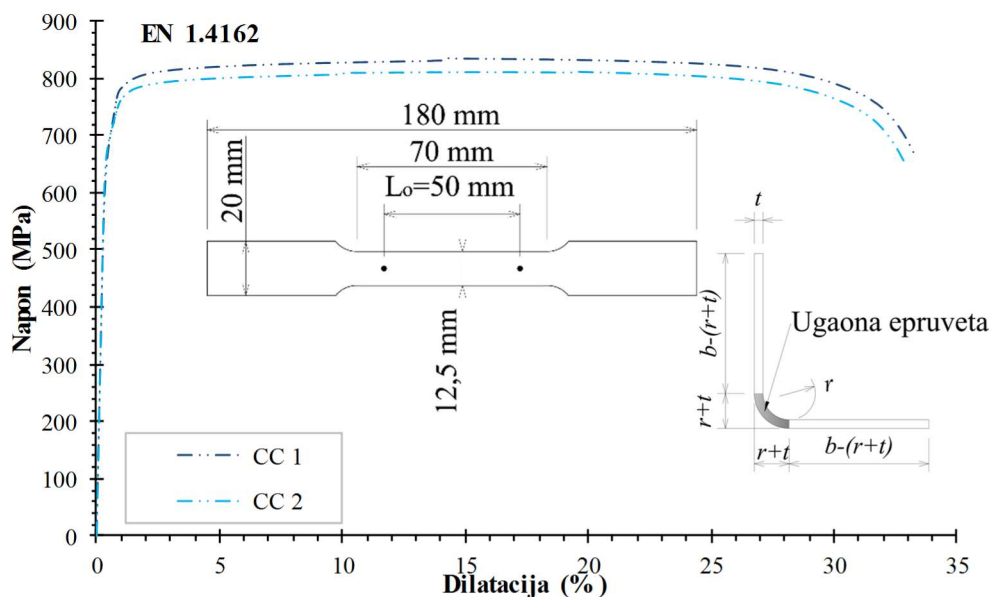
Slika 3.6 – Krive napon - dilatacija dobijene ispitivanjem LFC epruveta



Slika 3.7 – Krive napon - dilatacija dobijene ispitivanjem TFC epruveta



Slika 3.8 – Krive napon - dilatacija dobijene ispitivanjem ravnih epruveta iz kraka L profila



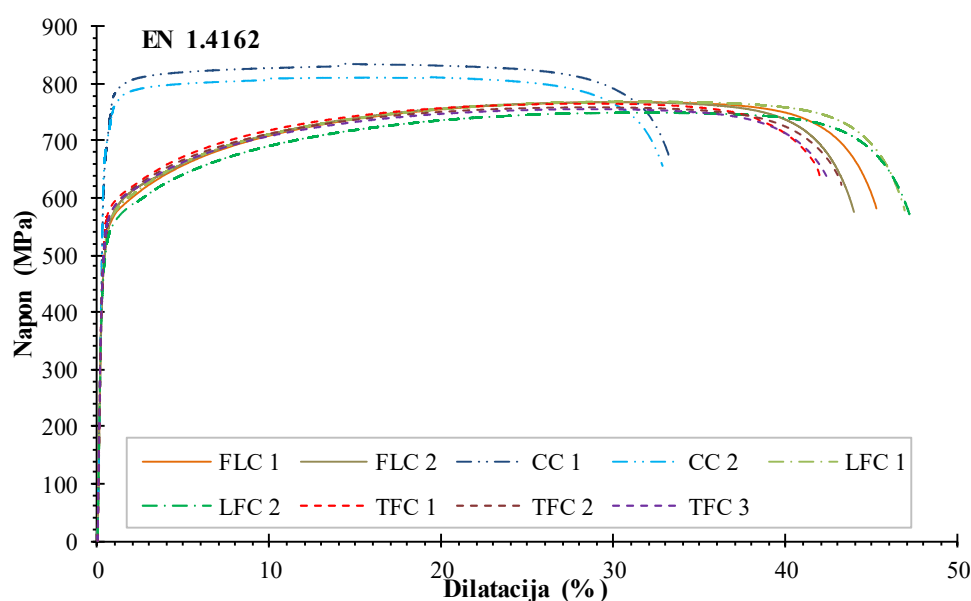
Slika 3.9 – Krive napon - dilatacija dobijene ispitivanjem ugaonih epruveta iz prevoja L profila

Tabela 3-4 Mehanička svojstva materijala EN 1.4162 dobijena ispitivanjem pri zatezanju

Epruveta	f_y (MPa)	$\sigma_{0.01}$ (MPa)	$\sigma_{0.05}$ (MPa)	$\sigma_{1.0}$ (MPa)	f_u (MPa)	E (MPa)	ϵ_u (%)	ϵ_f (%)	Koeffijenti nelinearnosti	
									n	m
LFC 1	515	363	435	586	768	199422	31	47	8	3.05
LFC 2	500	351	429	570	749	199274	32	47	8	3.15
Sr. vred.	508	357	432	578	759	199348	32	47	8	3.1
s_x	11	9	4	12	14	105	1	0	0	0
V_x (%)	2.1	2.4	1.0	2.0	1.8	0.1	2.6	0.6	0.0	2.3
TFC 1	554	422	488	609	764	199342	26	42	8.0	2.6
TFC 2	533	349	442	598	758	199915	28	43	8.0	3.1
TFC 3	534	382	452	596	755	199557	28	44	8.0	3.0
Sr. vred.	540	384	461	601	759	199605	27	43	8.0	2.9
s_x	12	37	24	7	4	289	1	1	0	0
V_x (%)	2.2	9.6	5.2	1	0.6	0.1	4.2	2.9	0.0	9.9

Tabela 3-4 Nastavak

Epruveta	f_y (MPa)	$\sigma_{0.01}$ (MPa)	$\sigma_{0.05}$ (MPa)	$\sigma_{1.0}$ (MPa)	f_u (MPa)	E (MPa)	ε_u (%)	ε_f (%)	Koefficienti nelinearnosti	
									n	m
FLC 1	519	342	425	583	768	198630	31	45	8.0	3.0
FLC 2	514	358	422	593	767	196260	30	45	8.0	3.5
Sr. vred.	517	350	424	588	768	197445	31	45	8	3.2
s_x	3	11	2	7	0	1676	1	0	0	0
V_x (%)	0.6	3.3	0.5	1.2	0.0	0.8	1.9	0.0	0.0	10.9
CC 1	701	603	652	779	811	200000	19	33	10.0	12.0
CC 2	705	569	630	797	835	199810	14	33	12.0	14.0
Sr. vred.	703	586	641	788	823	199905	17	33	11.0	13.0
s_x	3	24	16	13	17	134	4	0	1	1
V_x (%)	0.4	4.2	2.5	1.7	2.0	0.1	21.7	0.0	12.9	10.9



Slika 3.10 – Krive napon - dilatacija dobijene ispitivanjem epruveta pri zatezanju za materijal EN 1.4162

Tabela 3-5 Srednje vrednosti mehaničkih svojstva materijala EN 1.4162 dobijenih ispitivanjem pri zatezanju

Epruveta	f_y (MPa)	$\sigma_{0.01}$ (MPa)	$\sigma_{0.05}$ (MPa)	$\sigma_{1.0}$ (MPa)	f_u (MPa)	E (MPa)	ε_u (%)	ε_f (%)	Koefficienti nelinearnosti	
									n	m
LFC	508	357	432	578	759	199348	32	47	8.0	3.1
TFC	540	384	461	601	759	199605	27	43	8.0	2.9
FLC	517	350	424	588	768	197445	31	45	8.0	3.2
CC	703	586	641	788	823	199905	17	33	11	13
EN 10088-4	≥ 480	-	-	-	680- 900	200000	-	≥ 30	-	-

Analizom rezultata standardnih testova pri zatezanju sprovedenih na epruvetama uzetim iz osnovne vrućevaljane trake i uzorka finalnog hladnooblikovanog ugaonika od niskolegiranog dupleks čelika EN 1.4162 koji su prikazani u tabeli 3-5 i na slici 3.10 mogu se dati sledeći komentari:

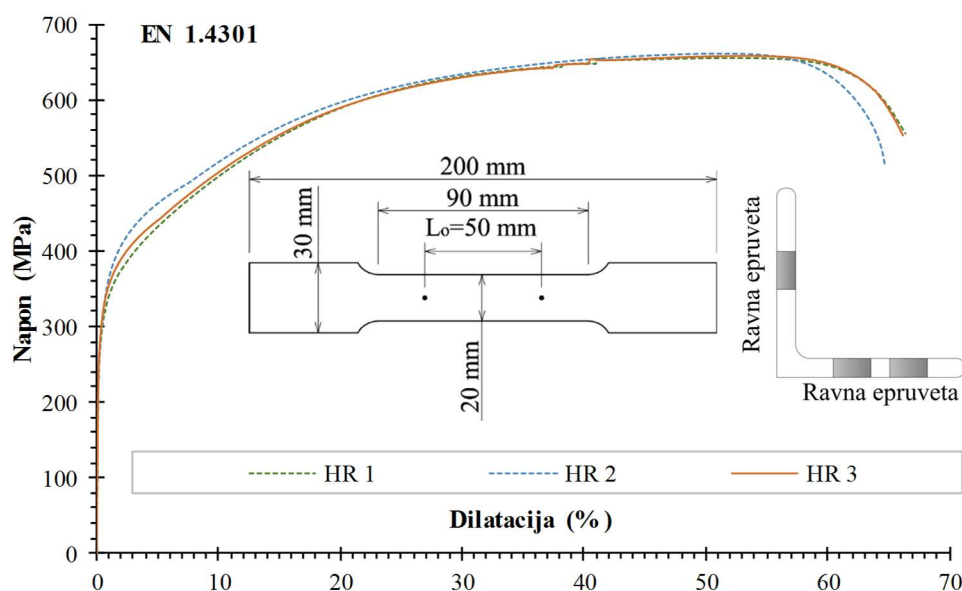
- veza između napona i dilatacije pokazuje visok nivo nelinearnosti materijala, bez jasno izražene granice razvlačenja i sa visokim vrednostima izduženja pri lomu,
- osnovni materijal pokazuje umerena svojstva anizotropnosti – granica razvlačenja osnovnog materijala upravno na pravac valjanja je za 6% veća u odnosu na granicu razvlačenja osnovnog materijala u pravcu valjanja,
- granica razvlačenja osnovnog materijala vrućevaljane čelične trake upravno na pravac valjanja je veća od odgovarajuće nominalne vrednosti od 480 MPa za 12.5%,
- postupkom hladnog oblikovanja – presovanja, dolazi do povećanja mehaničkih svojstava materijala u prevoju ugaonika i smanjenja izduženja pri lomu – granica razvlačenja epruvete koja je uzeta iz prevoja ugaonika je za 38% veća u odnosu na granicu razvlačenja osnovnog materijala, dok je izduženje pri lomu manje za 30%.

3.2.2 Rezultati standardnih testova pri zatezanju za materijal EN 1.4301

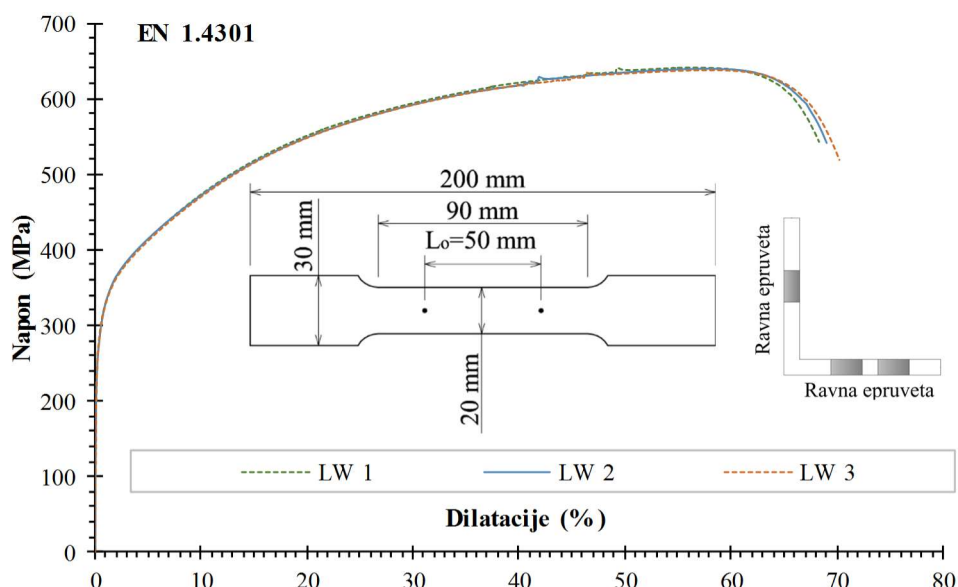
U cilju utvrđivanja mehaničkih svojstava austenitne legure nerđajućeg čelika EN 1.4301 od koga su napravljeni vrućevaljani i laserski zavareni ugaonici ispitane su ravne epruvete u okviru dve ispitne grupe:

- epruvete uzete iz vrućevaljanog ugaonika nominalnih dimenzija $100 \times 100 \times 10$ mm sa oznakom HR (*Hot Rolled*)
- epruvete uzete iz laserski zavarenog ugaonika nominalnih dimenzija $100 \times 100 \times 10$ mm sa oznakom LW (*Laser Welded*).

Dijagrami koji predstavljaju zavisnost između napona i dilatacije za ispitane epruvete iz vrućevaljanog ugaonika zajedno sa dimenzijama epruveta prikazani su na slici 3.11, dok su dijagrami za epruvete iz laserski zavarenih ugaonika prikazane na slici 3.12. Rezultati ispitivanja, odgovarajuće srednje vrednosti, standardne devijacije s_x i koeficijenti varijacije V_x dobijenih rezultata za svaku ispitnu grupu prikazani su u tabeli 3-6. U tabelama 3-7 i 3-8 izdvojene su srednje vrednosti mehaničkih svojstava ispitanih epruveta dobijenih standardnim testovima pri zatezanju, prema atestu proizvođača, kao i odgovarajuće nominalne vrednosti prema EN 10088-4 [51] za vrućevaljane i laserski zavarene ugaonike, respektivno.



Slika 3.11 – Krive napon - dilatacija dobijene ispitivanjem epruveta iz vrućevaljanog ugaonika



Slika 3.12 – Krive napon - dilatacija dobijene ispitivanjem epruveta iz laserski zavarenog ugaonika

Tabela 3-6 Mehanička svojstva materijala EN 1.4301 dobijena ispitivanjem pri zatezanju

Epruveta	f_y (MPa)	$\sigma_{0.01}$ (MPa)	$\sigma_{0.05}$ (MPa)	$\sigma_{1.0}$ (MPa)	f_u (MPa)	E (MPa)	ϵ_u (%)	ϵ_f (%)	Koeficijenti nelinearnosti	
									n	m
HR 1	281	200	244	350	655	199604	52	71	8.0	2.8
HR 2	288	201	242	375	661	197161	51	65	8.0	3.5
HR 3	294	203	248	363	658	199924	54	67	8.0	2.9
Sr. vred.	288	201	244	363	658	198896	52	67	8.0	3.1
s_x	7	2	3	13	3	1511	1	3	0	0
V_x (%)	2.3	0.8	1.2	3.5	0.4	0.8	2.1	4.7	0.0	12.3
LW 1	275	193	236	338	641	199949	55	69	9.0	2.8
LW 2	270	192	234	338	639	199950	58	69	9.0	3.0
LW 3	271	199	236	336	637	199941	57	70	9.0	2.9
Sr. vred.	272	194	235	337	639	199947	57	69	9.0	2.9
s_x	3	4	1	1	2	5	1	1	0	0
V_x (%)	1.0	1.9	0.6	0.4	0.3	0.0	2.1	0.8	0.0	3.4

Tabela 3-7 Srednje vrednosti mehaničkih svojstva materijala EN 1.4301 za vrućevaljane ugaonike dobijenih ispitivanjem pri zatezanju

	f_y (MPa)	$\sigma_{0.01}$ (MPa)	$\sigma_{0.05}$ (MPa)	$\sigma_{1.0}$ (MPa)	f_u (MPa)	E (MPa)	ϵ_u (%)	ϵ_f (%)	Koeficijenti nelinearnosti	
									n	m
HR	288	201	244	363	658	198896	52	67	8.0	3.1
Atest	303	-	-	343	644	-	-	47	-	-
EN 10088-4	≥ 190	-	-	-	500	200000	-	≥ 45	-	-

Tabela 3-8 Srednje vrednosti mehaničkih svojstva materijala EN 1.4301 za laserski zavarene ugaonike dobijenih ispitivanjem pri zatezanju

	f_y (MPa)	$\sigma_{0.01}$ (MPa)	$\sigma_{0.05}$ (MPa)	$\sigma_{1.0}$ (MPa)	f_u (MPa)	E (MPa)	ϵ_u (%)	ϵ_f (%)	Koeficijenti nelinearnosti n m	
LW	272	194	235	337	639	199947	57	69	9.0	2.9
Atest	332			383	641	-	-	56	-	-
EN 10088-4	≥ 210	-	-	250	520- 720	200000	-	≥ 45	-	-

Analizom rezultata standardnih testova pri zatezanju sprovedenih na epruvetama uzetih iz finalnih vrućevaljanih i laserski zavarenih ugaonika od austenitne legure nerđajućeg čelika EN 1.4301 koji su respektivno prikazani u tabelama 3-7 i 3-8, mogu se dati sledeći komentari:

- nisu uočene značajne razlike u mehaničkim svojstvima materijal epruveta iz vrućevaljanih i laserski zavarenih ugaonika,
- materijal pokazuje svojstva nelinearnosti, bez jasno izražene granice razvlačenja sa visokim vrednostima izduženja pri lomu – kod epruveta iz laserski zavarenih ugaonika izduženje pri lomu dostiže skoro 70%,
- eksperimentalno utvrđene vrednosti granice razvlačenja, čvrstoće pri zatezanju i izduženja pri lomu, su manje u odnosu na ekvivalentne vrednosti prema atestu proizvođača, ali veće od odgovarajućih nominalnih vrednosti prema EN 10088-4,
- granica razvlačenja materijala vrućevaljanih ugaonika je veća od nominalne vrednosti od 190 MPa za 52%, dok je granica razvlačenja materijala laserski zavarenih ugaonika veća od odgovarajuće nominalne vrednosti od 210 MPa za 30%.

3.3 Merenje početnih geometrijskih imperfekcija

U cilju utvrđivanja raspodele i veličine početnih geometrijskih imperfekcija uzoraka, odnosno veličine odstupanja njihove stvarne u odnosu na idealizovanu geometriju, uzorci su neposredno pre eksperimentalnih ispitivanja podvrgnuti nizu međusobno zavisnih radnji koje uključuju sledeće:

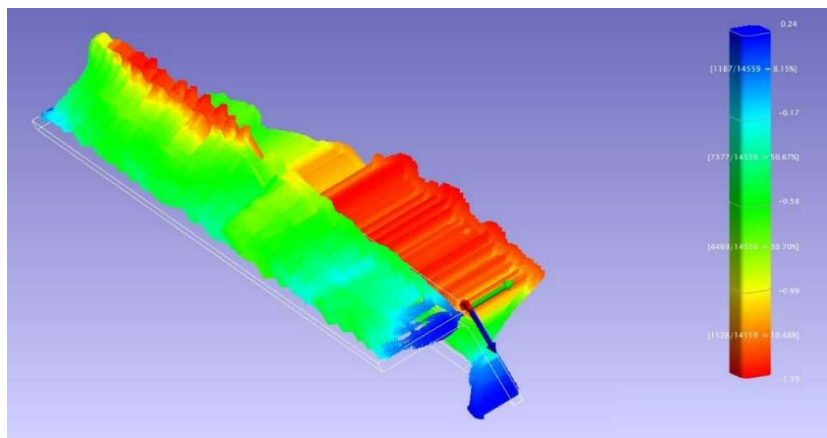
- merenje dimenzija uzoraka utvrđivanjem 3D koordinata velikog broja tačaka na uzorcima primenom geodetskih metoda koje su uključile primenu visoko preciznog mernog sistema,
- definisanje mreže (grida) konačnih elemenata na osnovu dužine i geometrije poprečnog preseka svakog uzorka,
- određivanje 3D koordinata centara mreže konačnih elemenata na osnovu prethodno utvrđenih koordinata tačaka na uzorku,
- određivanje geometrijskih karakteristika uzorka za svaki poprečni presek duž mreže,
- prikaz odstupanja geometrijskih karakteristika uzoraka u odnosu na idealizovane u funkciji podužne ose uzorka.

Merenje dimenzija uzoraka izvršeno je pomoću laserskog interferometra za „praćenje“ (eng. *laser interferometric tracker*). U tu svrhu korišćen je uređaj *Leica Absolute Tracker AT960*, proizvođača *Hexagon Manufacturing Intelligence* iz Velike Britanije, projektovan kao prenosivi merni sistem sa šest stepeni slobode – slika 3.13. Ovaj merni sistem čine merni uređaj (merna stanica), ciljni uređaj (sferni reflektor) i računar sa aplikativnim softverom. Sa tačnošću optičkog centriranja sfernog reflektora od $\pm 3 \mu\text{m}$, ovim uređajem postiže se određivanje koordinata proizvoljne tačke tačnosti od $15 + 6 \cdot l \mu\text{m}$, gde l predstavlja udaljenost tačke koja se meri od merne stanice izražena u metrima. Da bi se obezbedila deklarirana tačnost merenja i uključili uticaji spoljašnjih faktora, u mernoj stanici integrisan je i uređaj za praćenje spoljašnjih uticaja (temperature, pritiska i vlažnosti vazduha). Primenom ovog mernog sistema obezbeđuje se dobijanje pouzdanih podataka sa mogućnošću prikaza određenih koordinata tačaka u toku samog merenja – slika 3.14.



Slika 3.13 – Ilustracija merenja mernim sistemom Leica Absolute Tracker AT960

U toku merenja uzorci su bili fiksirani i kontinualno oslonjeni na čeličnu gredu kako bi se izbegla deformacija uzorka od sopstvene težine i onemogućilo pomeranje uzorka. U cilju definisanja 3D modela idealizovane geometrije uzorka u softveru za obradu podata najpre se prizmom snimaju referente tačke na uzorku. Zatim se prizmom laganim pokretima prelazi preko površine uzorka, dok merna stanica kontinuirano (100 tačaka u sekundi) meri položaj prizme, čime se u softveru dobija zapis koordinata tačaka (x, y i z) centra prizme. Naknadnom obradom rezultata softver sračunava koordinate tačaka na uzorku koje je prizma dodirivala u toku merenja. Postupak merenja tačaka ponovljen je za oba kraka L profila. U zavisnosti od dužine uzorka i vremena merenja za svaki krak L profila izmereno je između 8 000 i 15 000 tačaka. U daljem tekstu ovaj skup tačaka nazivan je skup merenih tačaka.

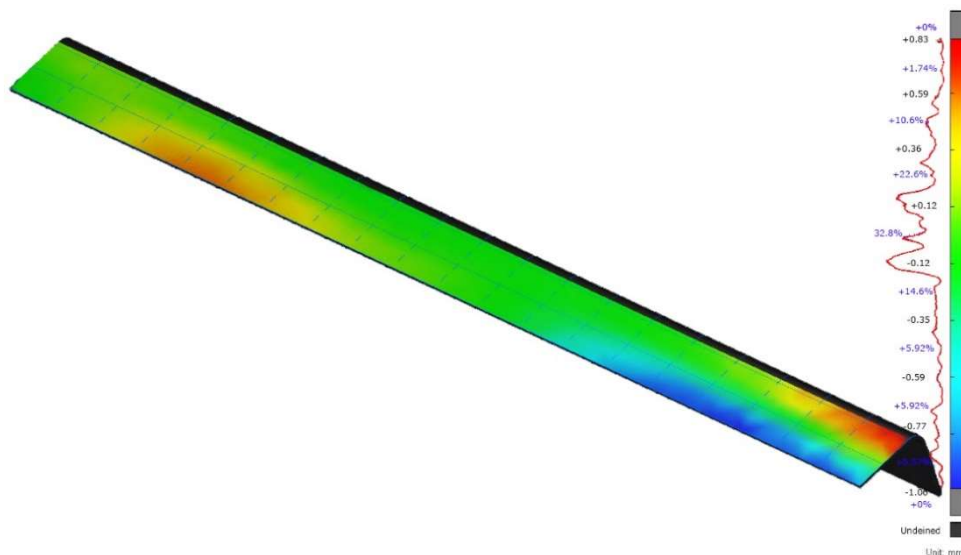


Slika 3.14 – Prikaz rezultata merenja korišćenog mernog sistema, Leica Absolute Tracker AT960

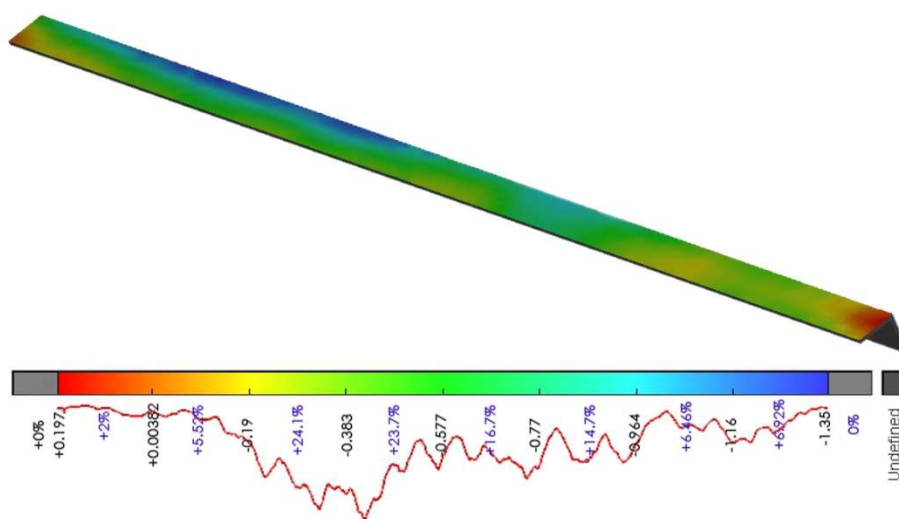
Na ovaj način, za svaki od 48 uzoraka podvrgnutih testovima na izvijanje, dobijen je skup koordinata proizvoljnih tačaka na spoljašnjoj konturi krakova ugaonika – skup merenih tačaka. Na slikama 3.15, 3.16 i 3.17 na 3D modelima prikazan je raspored izmerenih odstupanja merenih tačaka, u odnosu na idealizovanu površ uzorka, na spoljašnjoj konturi uzoraka za ACF $80 \times 80 \times 4 - 1000 - 1$, AHR $60 \times 60 \times 6 - 2000 - 4$ i ALW $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 3$, respektivno. Prema legendi koja je data na ovim slikama definisana je veličina odstupanja svake izmerene tačke na konturi uzorka u odnosu na njenu projekciju na idealizovanu površinu u mm, kao i broj tačaka (procentualno u odnosu na ukupan broj izmerenih tačaka) koje pripadaju određenom rangu odstupanja. Na primer, prema slici 3.17, na kojoj je prikazano odstupanje izmerenih tačaka za uzorak ALW $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 3$, maksimalno odstupanje izmerenih tačaka u odnosu na idealizovanu geometriju iznosi 0.689 mm. Najveći broj tačaka (16.7% od ukupnog broja izmerenih tačaka) pripada rangu odstupanja između 0.594 mm i 0.689 mm.

Spoljašnje konture krakova izdelfjene su na konačne elemente – kvadrate određenih dimenzija (slika 3.18). Sledeći korak predstavlja određivanje odstupanja tačke koja se nalazi u centru svakog od kvadrata mreže konačnih elemenata u odnosu na idealizovanu geometriju. Odstupanje se određuje na osnovu skupa merenih tačaka – za centar svakog konačnog elementa interpolacijom najbližih tačaka, koje pripadaju skupu merenih tačaka, određeno je odstupanje. Na ovaj način dobijen je skup tačaka koji je nazvan skup interpoliranih tačaka. Sve tačke u skupu interpoliranih tačaka koje imaju iste z koordinate (prema slici 3.18) pripadaju jednom poprečnom preseku koji je nazvan interpolirani poprečni presek.

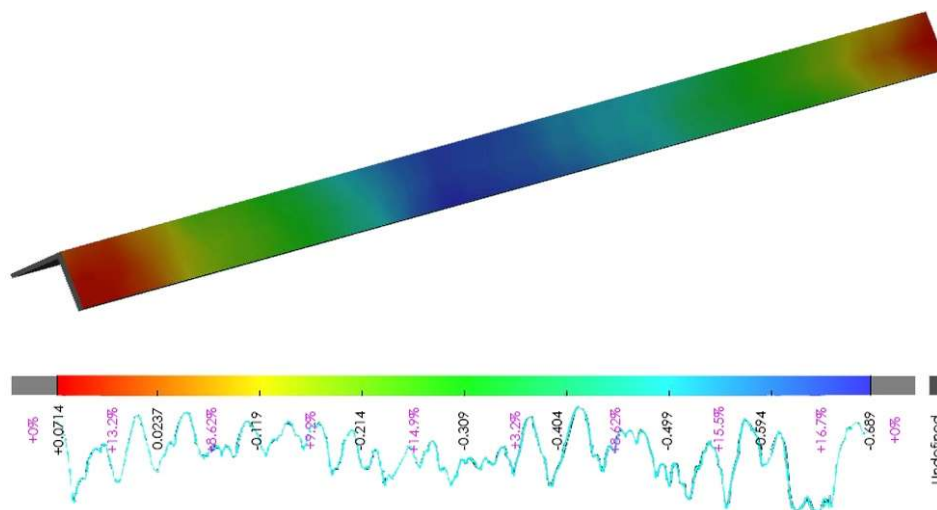
Uzorci hladnooblikovanih ugaonika poprečnog preseka $80 \times 80 \times 4$ mm, kao i vrućevaljanih i laserski zavarenih ugaonika poprečnog preseka $100 \times 100 \times 10$ mm podeljeni su na konačne elemente dimenzija 5×5 mm, dok su uzorci vrućevaljanih i laserski zavarenih ugaonika poprečnog preseka $60 \times 60 \times 6$ mm podeljeni na konačne elemente dimenzija 3×3 mm. Na ovaj način za svaki element napravljena je gusta mreža tačaka sa informacijama o odstupanjima izabranih tačaka na uzorcima. U tabeli 3-9 za svaku seriju uzoraka prikazana je dimenzija konačnog elementa, broj tačaka u interpoliranom poprečnom preseku, broj interpoliranih poprečnih preseka duž uzorka i ukupan broj interpoliranih tačaka za ceo uzorak. Broj tačaka u interpoliranom poprečnom preseku kreće se od 32 do 40, dok se ukupan broj interpoliranih tačaka po uzorku kreće od 4.000 do 26.640.



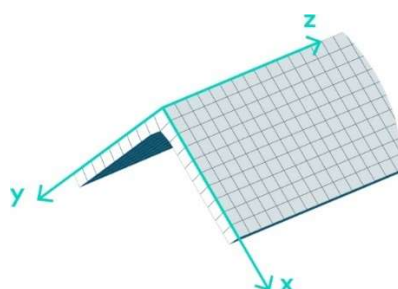
Slika 3.15 – Raspored odstupanja na 3D modelu za uzorak ACF $80 \times 80 \times 4 - 1000 - 1$



Slika 3.16 – Raspored odstupanja na 3D modelu za uzorak AHR $60 \times 60 \times 6 - 2000 - 4$



Slika 3.17 – Raspored odstupanja na 3D modelu za uzorak ALW 100 × 100 × 10 – 1500 – 3



Slika 3.18 – Podela konture uzorka na konačne elemente u cilju određivanja imperfekcija

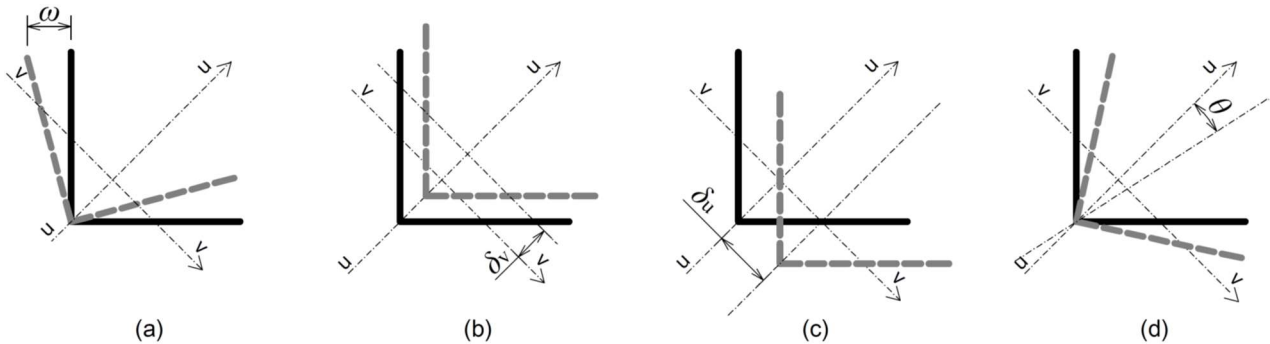
Tabela 3-9 Mreža tačaka za određivanje početnih geometrijskih imperfekcija

Seriya uzoraka	Gustina mreže	Broj int. tačaka u poprečnom preseku	Broj int. poprečnih preseka po dužini	Ukupan broj int. tačaka
ACF 80 × 80 × 4 – 1000	5 × 5	32	200	6400
ACF 80 × 80 × 4 – 2000	5 × 5	32	400	12800
AHR 60 × 60 × 6 – 800	3 × 3	40	266	10640
ALW 60 × 60 × 6 – 800				
AHR 60 × 60 × 6 – 2000	3 × 3	40	666	26640
ALW 60 × 60 × 6 – 2000				
AHR 100 × 100 × 10 – 500	5 × 5	40	100	4000
ALW 100 × 100 × 10 – 500				
AHR 100 × 100 × 10 – 1500	5 × 5	40	300	12000
ALW 100 × 100 × 10 – 1500				
AHR 100 × 100 × 10 – 2500	5 × 5	40	500	20000
ALW 100 × 100 × 10 – 2500				

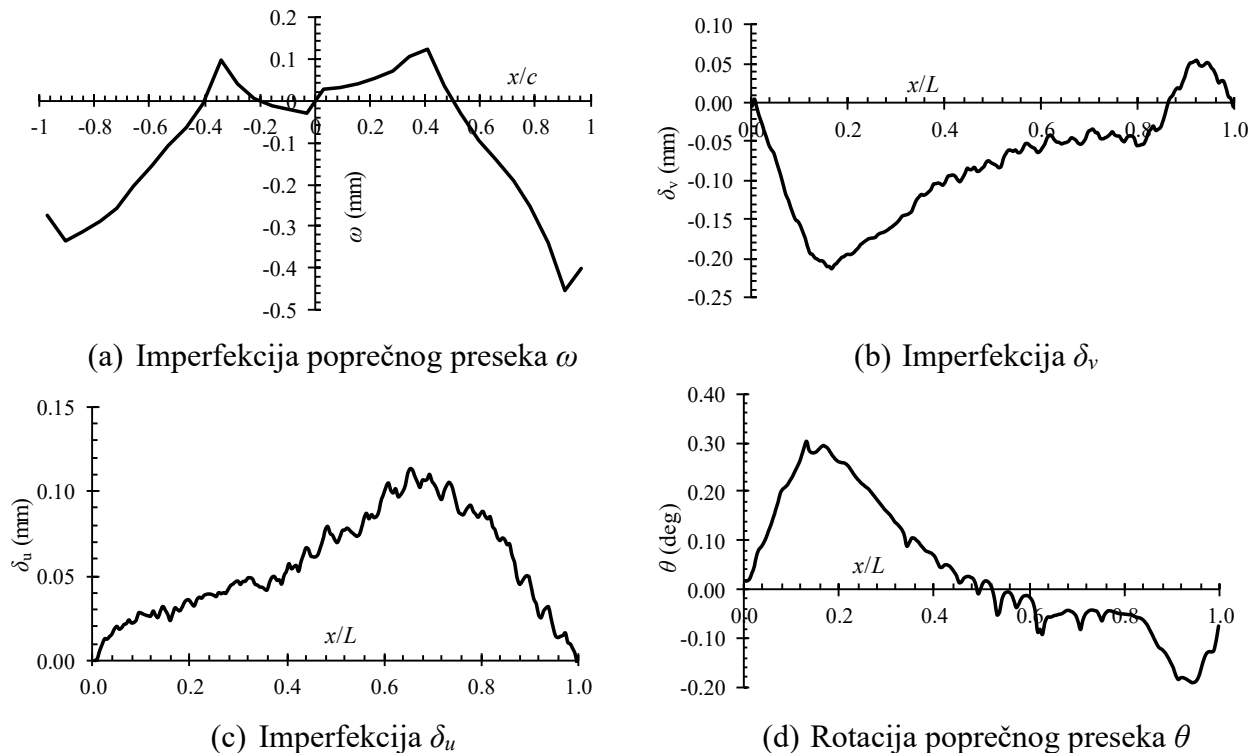
Konačan rezultat merenja je utvrđivanje raspodele i veličine 4 tipa imperfekcije svakog uzorka: (1) lokalna imperfekcija ω – odstupanje krakova uzorka od upravnosti, (2) globalna imperfekcija δ_u – odstupanje od pravca oko jače ose inercije preseka u-u, (3) globalna imperfekcija δ_v – odstupanje od pravca oko slabije ose inercije preseka v-v, (4) globalna torziona imperfekcija θ – uvrtnje elementa, odnosno obrtnje poprečnog preseka. Fizičko značenje ovih parametara prikazano je na slici 3.19. Maksimalna vrednost (amplituda) lokalne imperfekcije uzorka označena je sa ω_0 , dok su maksimalne vrednosti (amplitude) globalnih imperfekcija označene sa $\delta_{u,0}$, $\delta_{v,0}$ i θ_0 za imperfekcije odstupanja od pravca oko ose u-u, v-v, odnosno torzionu imperfekciju, respektivno.

Za svaki interpolirani presek duž jednog uzorka sračunato je težište poprečnog preseka pod pretpostavkom da odstupanja na unutrašnjoj konturi prati odstupanja na spoljašnjoj konturi – unutrašnja ravan kraka L profila paralelna je sa spoljašnjom ravni, izuzev na mestu radijusa kod

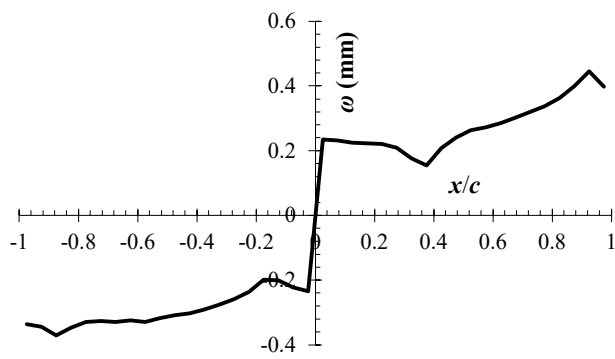
vrućevaljanih profila. Nakon toga za svaki interpolirani poprečni presek sračunat je otklon odnosno odstupanje težišta poprečnog preseka u pravcu glavnih osa inercija, kao i obrtanje poprečnog preseka u odnosu na idealizovani poprečni presek. Na taj način dobijena je zavisnost parametara imperfekcija u funkciji podužne ose elementa. Matematičkim relacijama izvršena je transformacija odstupanja težišta poprečnog preseka δ_v i δ_u tako da vrednost ovih odstupanja na krajevima elemenata bude jednaka nuli. Zapis ugla obrtanja poprečnog preseka θ duž elementa transformisan je tako da referentni poprečni presek u odnosu na koji se prikazuje rotacija ostalih poprečnih preseka duž elementa bude u sredini dužine elementa. Na ovaj način dobijeni su dijagrami zavisnosti normalizovanih parametara imperfekcija u funkciji normalizovane dužine uzoraka, na osnovu kojih su određene maksimalne veličine imperfekcija ω_0 , $\delta_{v,0}$, $\delta_{u,0}$ i θ_0 za svaki uzorak. Na slikama 3.20 do 3.24 prikazane su distribucije izmerenih početnih geometrijskih imperfekcija za uzorke ACF $80 \times 80 \times 4 - 1000 - 4$, AHR $60 \times 60 \times 6 - 2000 - 3$, AHR $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 2$, ALW $60 \times 60 \times 6 - 800 - 1$ i ALW $100 \times 100 \times 10 - 2500 - 4$, respektivno. Imperfekcija poprečnog preseka ω data je u funkciji normirane dužine kraka ugaonika x/c , gde c predstavlja dimenziju kraka ugaonika, dok su pomeranja težišta poprečnog preseka δ_v , δ_u i obrtanje poprečnog preseka θ dati u funkciji normirane dužine uzorka x/L , gde L predstavlja ukupnu dužinu uzorka. Distribucije imperfekcija za ostale uzorke prikazane su na dijagramima koji su dati u Prilogu A ove disertacije.



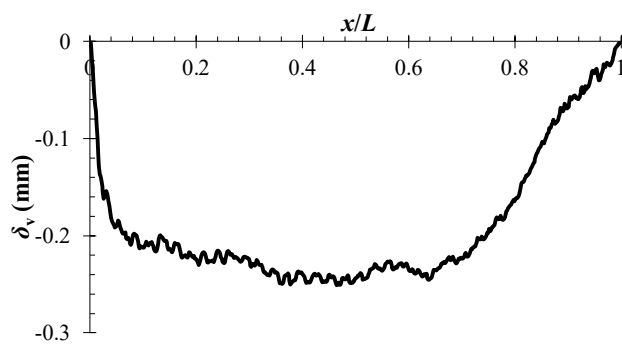
Slika 3.19 – Definicija parametara imperfekcije: (a) otklon; (b) imperfekcija u pravcu ose u; (c) imperfekcija u pravcu ose v; (d) rotacija



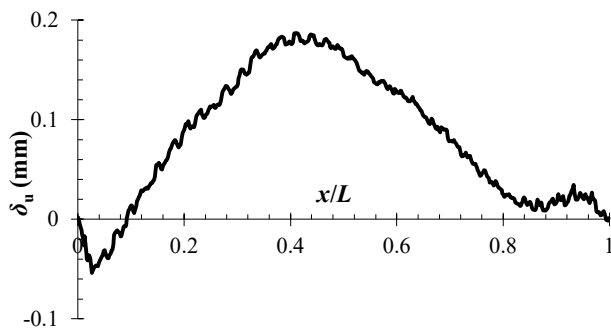
Slika 3.20 – Distribucija izmerenih početnih geometrijskih imperfekcija za uzorak ACF $80 \times 80 \times 4 - 1000 - 4$



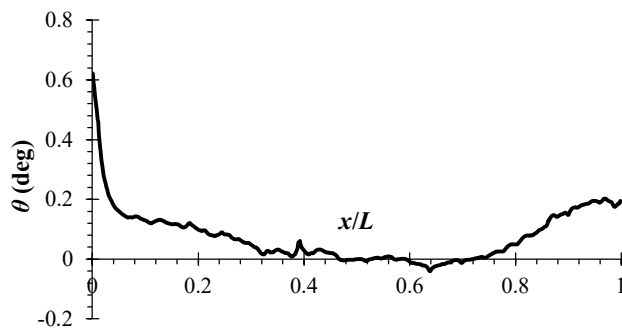
(a) Imperfekcija poprečnog preseka ω



(b) Imperfekcija δ_v

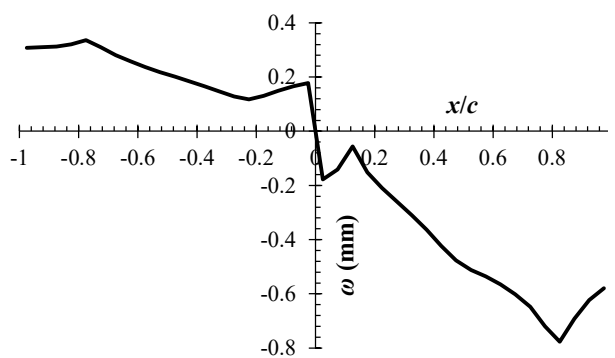


(c) Imperfekcija δ_u

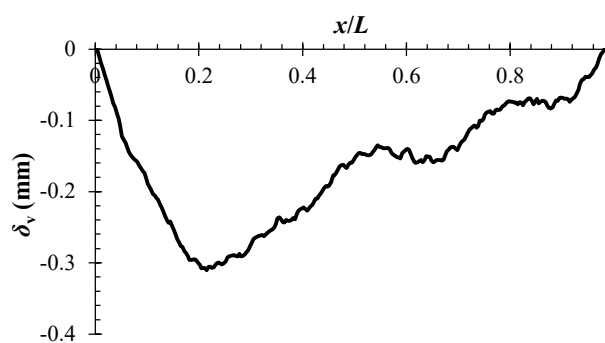


(d) Rotacija poprečnog preseka θ

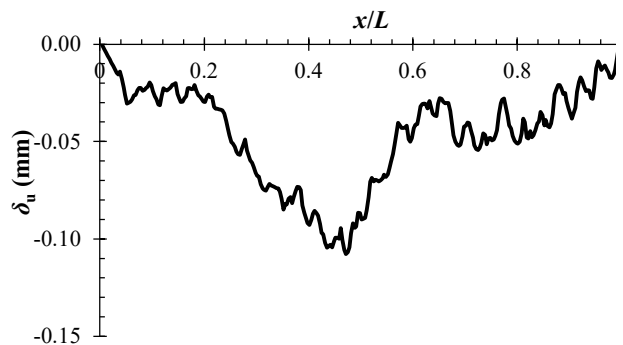
Slika 3.21 – Distribucija izmerenih početnih geometrijskih imperfekcija za uzorak AHR $60 \times 60 \times 6 - 2000 - 3$



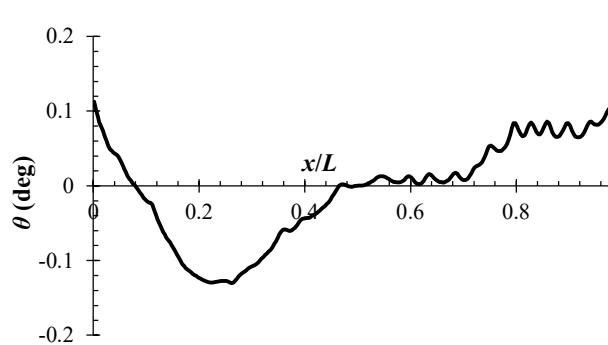
(a) Imperfekcija poprečnog preseka ω



(c) Imperfekcija δ_v

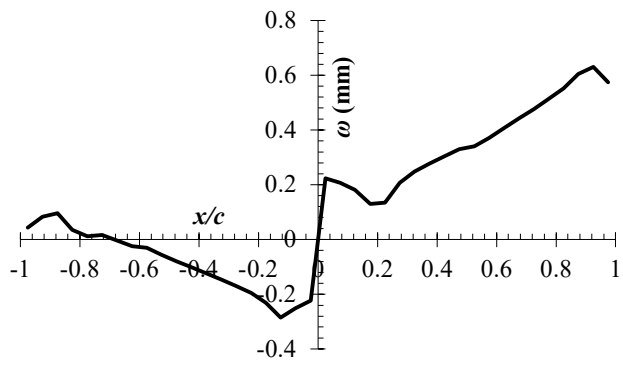


(d) Imperfekcija δ_u

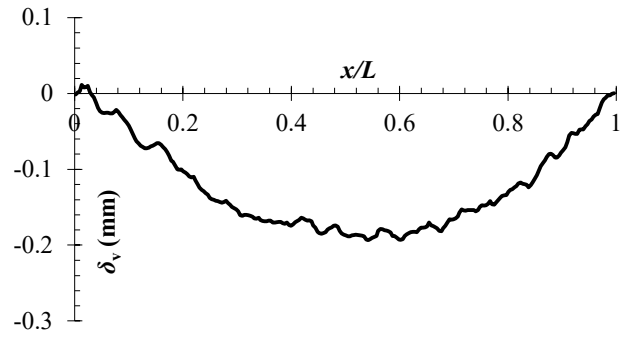


(f) Rotacija poprečnog preseka θ

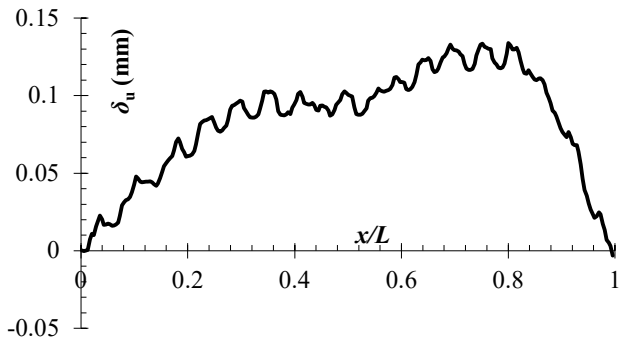
Slika 3.22 – Distribucija izmerenih početnih geometrijskih imperfekcija za uzorak AHR $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 2$



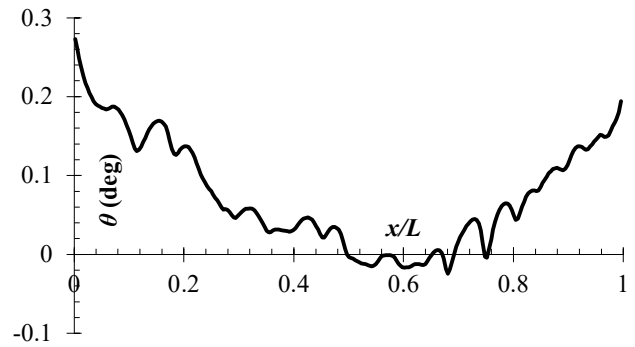
(a) Imperfekcija poprečnog preseka ω



(b) Imperfekcija δ_v

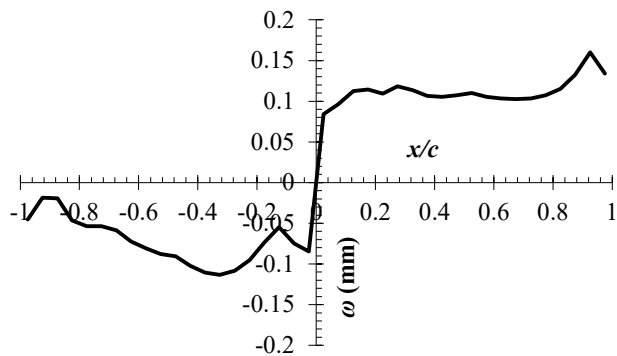


(c) Imperfekcija δ_u

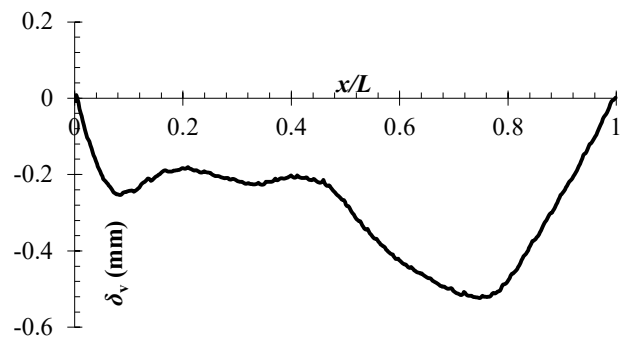


(d) Rotacija poprečnog preseka θ

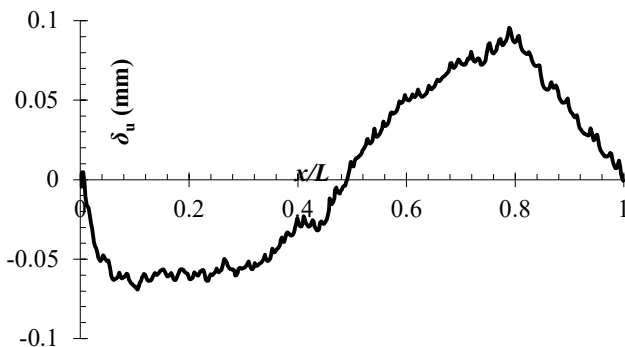
Slika 3.23 – Distribucija izmerenih početnih geometrijskih imperfekcija za uzorak ALW $60 \times 60 \times 6 - 800 - 1$



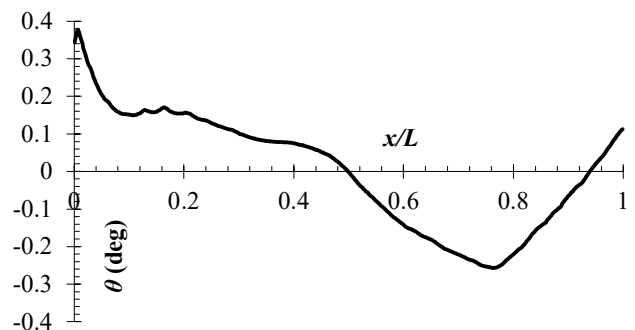
(a) Imperfekcija poprečnog preseka ω



(b) Imperfekcija δ_v



(c) Imperfekcija δ_u



(d) Rotacija poprečnog preseka θ

Slika 3.24 – Distribucija izmerenih početnih geometrijskih imperfekcija za uzorak ALW $100 \times 100 \times 10 - 2500 - 4$

Tabela 3-10 prikazuje amplitude izmerenih početnih geometrijskih imperfekcija ω_0 , $\delta_{v,0}$, $\delta_{u,0}$ i θ_0 , kao i normalizovane vrednosti ω_0/c , $\delta_{v,0}/L$, $\delta_{u,0}/L$ i θ_0/L za svih 48 uzoraka. Saglasno rezultatima prikazanim u tabeli 3-10, maksimalne amplitude početnih geometrijskih imperfekcija za grupu hladnooblikovanih ugaonika iznose $\delta_{u,0} = L/3562$ i $\delta_{v,0} = L/3834$, za grupu vrućevaljanih ugaonika iznose $\delta_{u,0} = L/4141$ i $\delta_{v,0} = L/4830$, dok za grupu laserski zavarenih ugaonika iznose $\delta_{u,0} = L/4250$ i $\delta_{v,0} = L/1871$. Amplitude početnih geometrijskih imperfekcija su značajno manje od proizvodnih tolerancija prema EN 1090-2 [16] koji ove vrednosti ograničava na $L/750$. Maksimalne torzione imperfekcije po dužini hladnooblikovanih uzoraka ne prelazi $1^\circ/m$ što je granična vrednost za hladnooblikovane elemente prema EN 10162 [53]. Takođe, lokalna imperfekcija poprečnog preseka je u granici dozvoljenih vrednosti u skladu sa standardom EN 10056-2 [54] koji za ugaonike čija dimenzija kraka ne prelazi 100 mm definiše maksimalno dopušteno odstupanje krakova ugaonika od upravnosti u iznosu od $\omega_0 = 1$ mm.

Tabela 3-10 Maksimalne vrednosti početnih geometrijskih imperfekcija uzoraka

Uzorak	ω_0 (mm)	ω_0/c	$\delta_{u,0}$ (mm)	$\delta_{u,0}/L$	$\delta_{v,0}$ (mm)	$\delta_{v,0}/L$	θ_0 (°)	θ_0/L (°)	
ACF 80 × 80 × 4 –	1000 – 1	+0.663	c/121	+0.250	L/4006	+0.110	L/9066	+0.627	0.627
	1000 – 2	+0.775	c/103	-0.128	L/7842	-0.076	L/13098	+0.306	0.306
	1000 – 3	-0.365	c/219	-0.281	L/3562	+0.088	L/11318	+0.317	0.317
	1000 – 4	+0.454	c/176	-0.214	L/4677	+0.114	L/8789	+0.302	0.302
	2000 – 1	+0.584	c/137	+0.272	L/7363	+0.522	L/3834	+0.478	0.239
	2000 – 2	+0.633	c/126	+0.303	L/6609	-0.461	L/4334	+0.730	0.365
	2000 – 3	+0.568	c/141	-0.323	L/6194	+0.434	L/4607	+0.451	0.225
	2000 – 4	-0.701	c/114	+0.259	L/7715	-0.477	L/4197	+0.643	0.321
AHR 60 × 60 × 6 –	800 – 1	-0.164	c/367	-0.015	L/51763	+0.036	L/22434	+0.069	0.086
	800 – 2	-0.546	c/110	-0.043	L/18447	0.134	L/5963	-0.255	0.318
	800 – 3	-0.737	c/81	+0.103	L/7747	-0.076	L/10562	+0.549	0.686
	800 – 4	-0.279	c/215	-0.101	L/7922	-0.093	L/8632	-0.124	0.155
	2000 – 1	-0.498	c/121	0.185	L/10788	-0.254	L/7864	+0.549	0.274
	2000 – 2	+0.836	c/72	-0.445	L/4496	-0.242	L/8277	+0.235	0.118
	2000 – 3	+0.445	c/135	+0.187	L/10692	-0.251	L/7974	+0.621	0.310
	2000 – 4	+0.188	c/319	+0.062	L/32263	+0.309	L/6474	+0.346	0.173
AHR 100 × 100 × 10 –	500 – 1	-0.692	c/145	-0.121	L/4141	-0.063	L/7969	+0.117	0.234
	500 – 2	+0.571	c/175	+0.077	L/6475	-0.056	L/8865	-0.093	0.187
	500 – 3	-0.883	c/113	+0.062	L/8082	-0.092	L/5456	+0.099	0.197
	500 – 4	-0.581	c/172	+0.116	L/4313	+0.060	L/8337	0.120	0.240
	1500 – 1	-0.551	c/181	+0.189	L/7947	-0.246	L/6087	-0.211	0.141
	1500 – 2	-0.777	c/128	-0.108	L/13920	-0.311	L/4830	-0.130	0.087
	1500 – 3	-0.739	c/135	+0.168	L/8908	-0.103	L/14583	+0.130	0.087
	1500 – 4	-0.221	c/452	-0.091	L/16397	+0.252	L/5963	-0.212	0.141
ALW 60 × 60 × 6 –	2500 – 1	+0.579	c/173	+0.114	L/21915	-0.262	L/9550	-0.290	0.116
	2500 – 2	+0.567	c/176	-0.131	L/19094	-0.363	L/6884	+0.414	0.166
	2500 – 3	-0.979	c/102	-0.293	L/8532	-0.468	L/5337	+0.316	0.127
	2500 – 4	+0.526	c/190	-0.193	L/12921	-0.437	L/5724	+0.329	0.132
	800 – 1	+0.631	c/95	+0.134	L/5980	-0.193	L/4138	+0.273	0.342
	800 – 2	+0.506	c/118	-0.188	L/4250	-0.428	L/1871	+0.420	0.525
	800 – 3	+0.472	c/127	-0.084	L/9560	-0.114	L/7030	+0.119	0.149
	800 – 4	+0.435	c/138	-0.085	L/9379	-0.206	L/3891	-0.263	0.329
ALW 60 × 60 × 6 –	2000 – 1	-0.498	c/121	+0.187	L/10683	-0.257	L/7788	+0.549	0.274
	2000 – 2	+0.148	c/405	-0.123	L/16208	-0.481	L/4156	+0.701	0.350
	2000 – 3	-0.407	c/147	+0.170	L/11740	-0.262	L/7623	+0.692	0.346
	2000 – 4	+0.281	c/214	-0.101	L/19764	-0.296	L/6749	+0.422	0.211

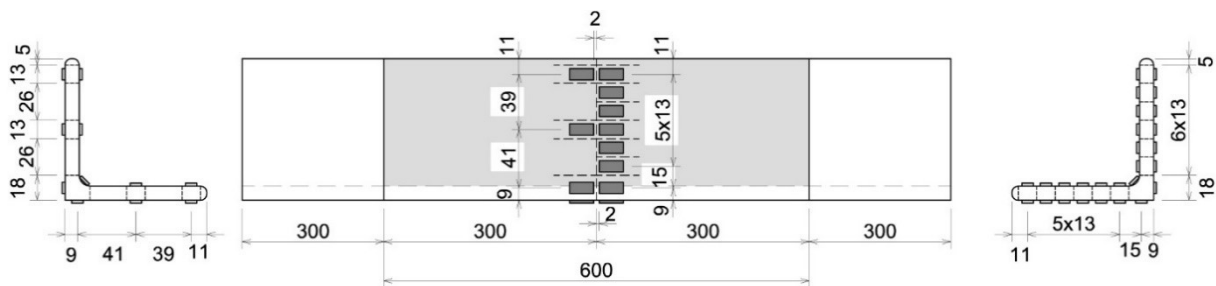
Tabela 3-10 Nastavak

Uzorak	ω_0 (mm)	ω_0/c	$\delta_{u,0}$ (mm)	$\delta_{u,0}/L$	$\delta_{v,0}$ (mm)	$\delta_{v,0}/L$	θ_0 (°)	θ_0/L (°)	
ALW 100 × 100 × 10 –	500 – 1	-0.268	c/374	+0.066	L/7575	-0.168	L/2976	+0.247	0.494
	500 – 2	-0.136	c/738	-0.021	L/23267	-0.029	L/17398	-0.165	0.330
	500 – 3	-0.209	c/478	+0.036	L/14048	-0.024	L/21217	+0.142	0.283
	500 – 4	+0.100	c/995	-0.016	L/31341	+0.084	L/5953	-0.156	0.311
	1500 – 1	-0.155	c/647	-0.058	L/25719	+0.197	L/7633	+0.097	0.064
	1500 – 2	+0.117	c/858	+0.080	L/18678	-0.252	L/5957	+0.174	0.116
	1500 – 3	-0.338	c/296	-0.157	L/9574	+0.520	L/2882	-0.502	0.335
	1500 – 4	-0.293	c/341	+0.134	L/11209	-0.352	L/4266	+0.183	0.122
	2500 – 1	+0.180	c/557	-0.098	L/25599	-0.857	L/2918	+0.735	0.294
	2500 – 2	-0.422	c/237	-0.306	L/8159	-0.864	L/2895	+0.926	0.370
	2500 – 3	+0.098	c/1026	-0.293	L/8532	-0.468	L/5337	+0.557	0.223
	2500 – 4	+0.160	c/623	+0.096	L/26125	-0.524	L/4773	+0.377	0.151

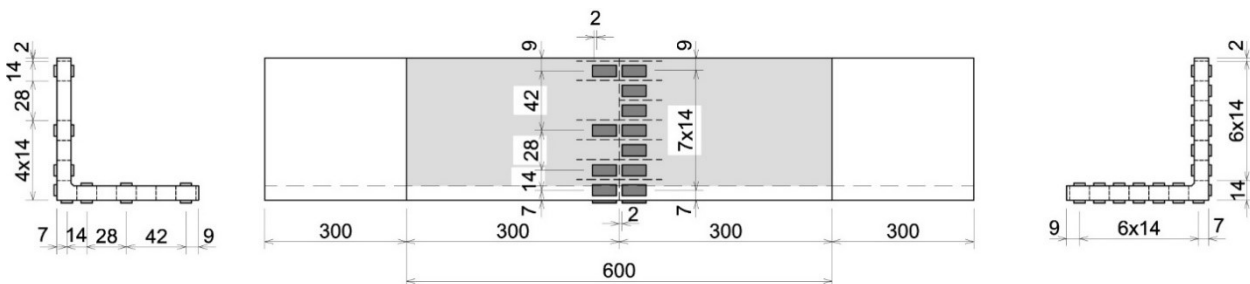
3.4 Merenje zaostalih napona

Merenje raspodele i veličine zaostalih napona je sprovedeno na jednom vrućevaljanom ugaoniku AHR 100 × 100 × 10 i jednom laserski zavarenom ugaoniku ALW 100 × 100 × 10 primenom invazivne metode sečenja na sobnoj temperaturi. Procedura merenja je u skladu sa procedurom opisanom u istraživanju *Može* i grupa autora [55] koje je obuhvatilo merenje zaostalih napona u vrućevaljanim ugaonicima od ugljeničnog čelika. Metoda merenja uključuje tehnologiju sečenja vodenim mlazom, dok se vodonepropusnim mernim trakama beleže podužne dilatacije. Tehnologija sečenja vodenim mlazom predstavlja metodu sečenja pomoću visokog pritiska mešavine, koju čine voda i abrazivni materijal. U toku sečenja pritisak dostiže vrednost i do 3800 bara. Tehnologija sečenja vodenim mlazom pogodna je za vršenje ovakvog ispitivanja, jer se rezovi mogu izvesti sa velikom tačnošću, a pritom se ne vrši zagrevanje i ne dolazi do promene naponskog stanja u zoni reza usled zagrevanja materijala koji se seče. Zaostali naponi koji se nalaze u elementima su uravnoteženi, a isecanjem dela materijala koji je napregnut dolazi do relaksacije napona u neposrednoj blizini reza i posledično pojave membranskih deformacija i deformacija savijanja. Na osnovu izmerenih dilatacija uz pomoć mernih traka, koje se nalaze u neposrednoj blizini reza, primenom Hukovog zakona sračunavaju se naponi relaksacije koji zapravo predstavljaju zaostale napone.

Na slikama 3.25 i 3.26 prikazane su dimenzije uzoraka za ispitivanje zaostalih napona, raspored mernih traka i položaj rezova. Dužina uzoraka usvojena je poštujući preporuke date u sličnom istraživanju [56], koje u cilju neutralisanja efekta kraja uzorka zahtevaju da segment uzorka na kome se ispituju zaostali naponi bude udaljen od kraja elementa najmanje 1.5 do 2 puta poprečne dimenzije uzorka, dok ukupna dužina segmenta uzorka na kome se vrši ispitivanje treba da bude bar 3 puta veća od poprečne dimenzije uzorka. Kao što se na pomenutim slikama može videti, dužina ispitnog dela uzorka iznosi 600 mm, dok je ispitni deo od kraja elementa udaljen 300 mm sa obe strane. Za merenje zaostalih napona korišćene su vodonepropusne merne trake *WFLA-3-17-3LDBB-F* širine 3 mm. Merne trake su postavljene u svemu kako je to prikazano na slikama 3.25 i 3.26. Kod uzorka AHR 100 × 100 × 10 u jednom poprečnom preseku sa spoljne i unutrašnje strane L profila na oba kraka postavljeno je ukupno 27 mernih traka. Osim u uglu profila sve merne trake su postavljene u paru – sa obe strane kraka profila. Pored ovih mernih traka na suprotnoj strani poprečnog reza postavljeno je još 11 kontrolnih mernih traka u svemu kako je to prikazano na slici 3.25. Za ispitivanje uzorka ALW 100 × 100 × 10 korišćeno je ukupno 40 mernih traka i to 26 u jednom poprečnom preseku i 14 kontrolnih mernih traka sa suprotne strane poprečnog reza u svemu prema slici 3.26.

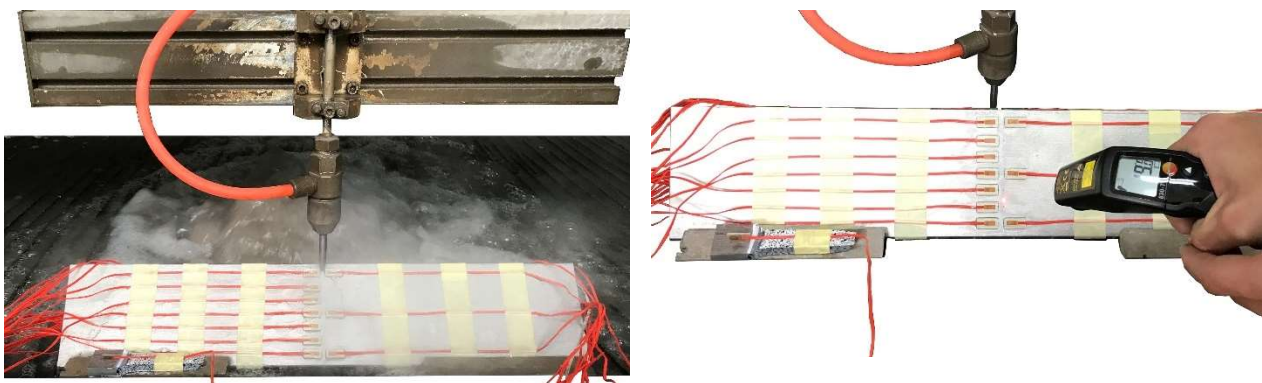


Slika 3.25 – Dimenzije uzorka AHR $100 \times 100 \times 10$, raspored mernih traka i položaj rezova

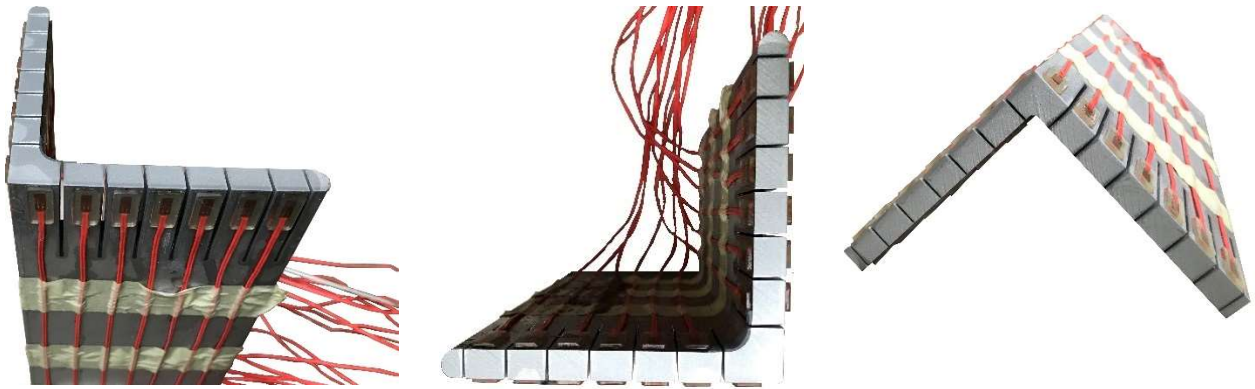


Slika 3.26 – Dimenzije uzorka ALW $100 \times 100 \times 10$, raspored mernih traka i položaj rezova

Sečenje vodenim mlazom uzorka izvršeno je u pogonu za sečenje pod kontrolisanim uslovima temperature vazduha. Najpre su uzorci poprečnim rezom podeljeni na dva dela, čime je došlo do relaksacije napona i pojave dilatacija u mernim trakama. Poprečno sečenje uzorka prikazano je na slici 3.27. Zatim su izvršeni podužni rezovi dužine 40 mm sa obe strane svake merne trake. Na slici 3.28 prikazani su uzorci za ispitivanje zaostalih napona nakon poprečnog i podužnog sečenja. Jedna merna traka za kompenzaciju eventualnih promena temperature okoline nalazila se na limu istog materijala u neposrednoj blizini sečenja uzorka (slika 3.27). Prirast deformacija zabeležen je u toku čitavog postupka merenja zaostalih napona, ali treba naglasiti da je vrednost izmerenih deformacija značajno veća nakon poprečnog reza u odnosu na one koje su izmerene nakon podužnih sečenja. U toku ispitivanja vršeno je kontinuirano snimanje dilatacija mernih traka na akvizicionom uređaju MGC+ proizvođača HBM. Snimanje je nastavljeno još 30 minuta nakon završetka svih aktivnosti sečenja. Na osnovu krajnjih vrednosti dilatacija sračunati su zaostali naponi korišćenjem modula elastičnosti određenog u poglavlju 3.2.

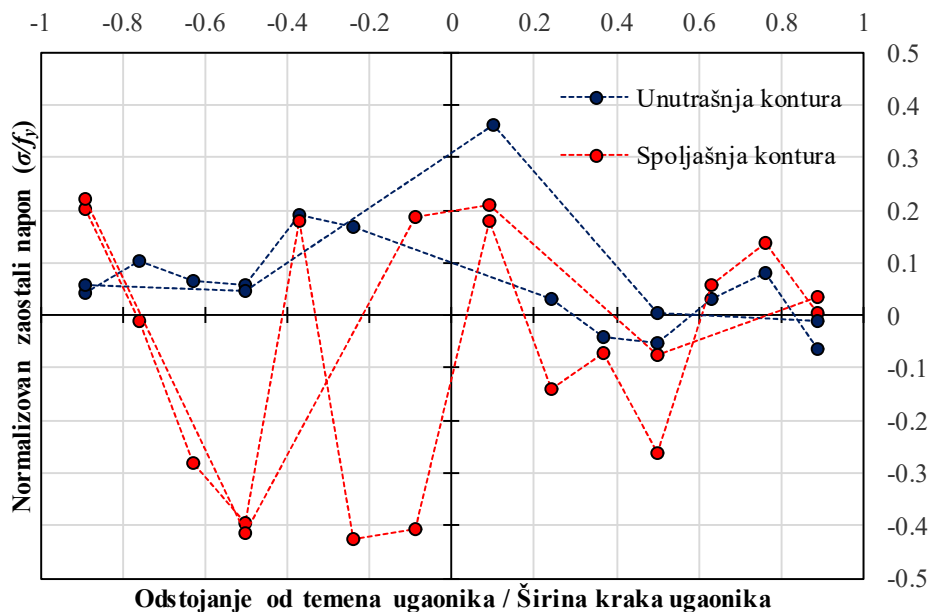


Slika 3.27 – Poprečno sečenje uzorka za ispitivanje zaostalih napona

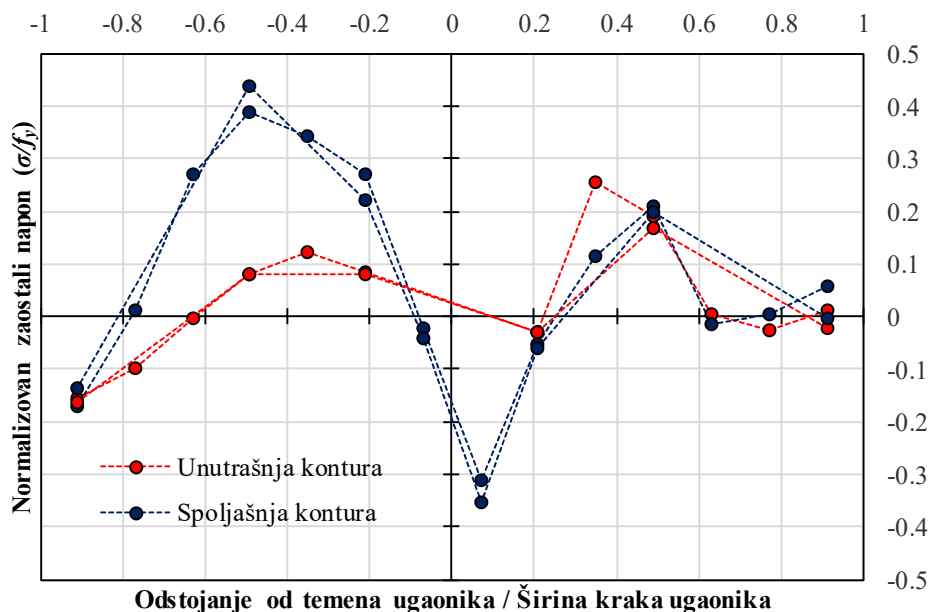


Slika 3.28 – Uzorci za ispitivanje zaostalih napona nakon sečenja

Dobijene vrednosti zaostalih napona, normalizovane naponom na granici razvlačenja, prikazane su u funkciji normalizovane koordinate duž kraka ugaonika na slikama 3.29 i 3.30 za uzorke AHR $100 \times 100 \times 10$ i ALW $100 \times 100 \times 10$, respektivno. Pozitivne vrednosti na ovim dijagramima predstavljaju zaostale napone zatezanja, dok su negativne vrednosti naponi pritiska. Kod uzorka AHR $100 \times 100 \times 10$ uočava se rasipanje rezultata bez izraženog trenda. Minimalna vrednost zaostalog napona iznosi $-0.42 \cdot f_y = -122$ MPa, dok maksimalna vrednost zaostalog napona iznosi $0.36 \cdot f_y = 104$ MPa. Kod uzorka ALW $100 \times 100 \times 10$ raspodelu normalnih napona karakteriše izraženi maksimumi u tri karakteristične tačke: na krajevima krakova, na sredinama širine krakova i uglu (temenu) ugaonika. Ovakav raspored zaostalih napona upućuje na prediktivni model kod vrućevaljanih ravnokrakih ugaonika od ugljeničnog čelika sa raspodelom zaostalih napona kroz tri tačke [57]. Maksimalna vrednost zaostalog napona pritiska određena je u blizini temena ugaonika i iznosi $-0.35 \cdot f_y = -96$ MPa. Maksimalni napon zatezanja dobijen je u blizini sredine kraka ugaonika i iznosi $0.44 \cdot f_y = 119$ MPa.



Slika 3.29 – Raspored zaostalih napona u funkciji širine kraka kod uzorka AHR $100 \times 100 \times 10$



Slika 3.30 – Raspored zaostalih napona u funkciji širine kraka kod uzorka ALW 100 × 100 × 10

3.5 Ispitivanje kratkih stubova na pritisak

Da bi se utvrdili kapaciteti deformacije poprečnih preseka uzoraka u stanju graničnih nosivosti i njihov potencijal za punu plastifikaciju, sprovedeno je ispitivanje kratkih stubova, odnosno uzoraka male dužine, na pritisak. Izvršeno je ukupno 15 testova kratkih stubova na pritisak – po tri ponovljena testa za svaki od poprečnih preseka uzoraka hladnooblikovanih, vrućevaljanih i laserski zavarenih ugaonika. Ispitivanje kratkog stuba sprovedeno je u skladu sa preporukama datim u A.3.2.1 standarda EN 1993-1-3 [4]. Prema ovim preporukama, dužina uzorka treba da bude odabrana kao manja vrednost od trostruke širine najšireg ravnog dela poprečnog preseka, odnosno dvadesetostruke vrednosti minimalnog poluprečnik inercije bruto poprečnog preseka i_{min} . Ovako odabrana dužina u dovoljnoj meri reprezentuje uticaj zaostalih napona na graničnu nosivost, pri čemu lom uzorka nije određen globalnim oblikom fleksione nestabilnosti oko slabije ose preseka. Sledeći navedenu preporuku, za poprečni presek hladnooblikovanog uzorka ACF 80 × 80 × 4 je usvojena dužina kratkog stuba 240 mm, dok su dužine uzoraka kratkih stubova vrućevaljanih AHR 60 × 60 × 6 i laserski zavarenih uzoraka ALW 60 × 60 × 6 180 mm, odnosno 300 mm u slučaju poprečnih preseka AHR 100 × 100 × 10 i ALW 100 × 100 × 10.

Pre ispitivanja uzoraka na pritisak, sprovedena su merenja njihovih dimenzija i geometrijskih karakteristika. Rezultati merenja su statistički obrađeni i respektivno prikazani u tabelama 3-11, 3-12 i 3-13 za kratke stubove hladnooblikovanih, vrućevaljanih i laserski zavarenih ugaonika, zajedno sa odgovarajućim nominalnim vrednostima i odstupanjima. Odstupanja koja su data u ovim tabelama predstavljaju razliku između srednje vrednosti izmerenih veličina i nominalnih vrednosti izražena u procentima. U tabeli 3-12, nominalne vrednosti radijusa na krajevima nožica vrućevaljanih ugaonika nisu date zbog odsustva ovih podataka od strane proizvođača [58]. Na slici 3.31 definisane su oznake geometrijskih karakteristika poprečnih preseka ugaonika koje su prikazane u tabelama 3-11, 3-12 i 3-13.

Tabela 3-11 Izmerene dimenzije uzoraka ACF 80 × 80 × 4 – 240

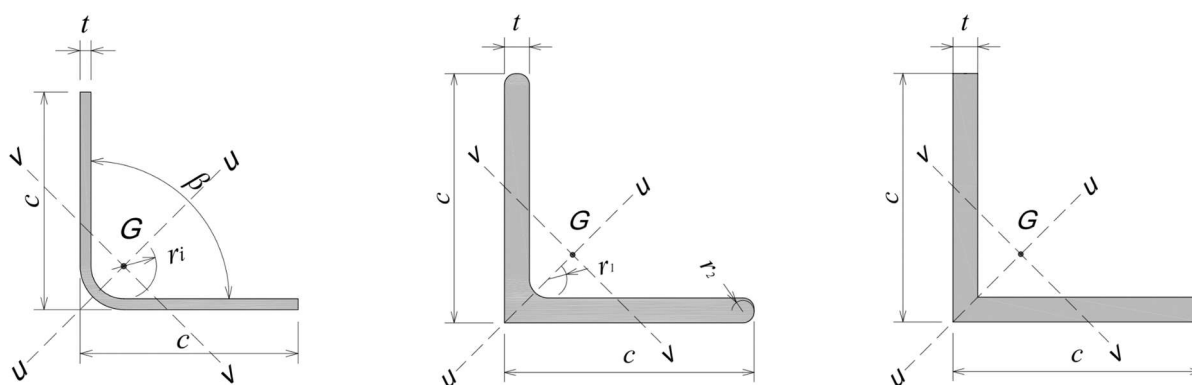
Oznaka uzorka	Dužina L (mm)	Širina kraka 1 c_1 (mm)	Širina kraka 2 c_2 (mm)	Debljina t (mm)	Unutrašnji radijus prevoja r_1 (mm)	Ugao između krakova β (°)	Površina poprečnog preseka A (mm ²)
ACF80×80×4-240-1	240	80.4	81.4	4.0	11.9	89	607.3
ACF80×80×4-240-2	240	80.7	80.4	4.1	12.0	91.2	619.0
ACF80×80×4-240-3	241	80.2	81.1	4.1	12.0	90.6	619.8
Nominalne vrednosti	240	80.0	80.0	4.0	12.0	90	606.8
Srednja vrednost	240	80.4	81.0	4.0	12.0	90.2	615.4
V_x (%)	0.3	0.3	0.6	2.9	0.5	1.0	1.1
Odstupanje (%)	0.0	-0.5	-1.3	0.0	0.0	-0.2	-1.4

Tabela 3-12 Izmerene dimenzije uzoraka AHR 60 × 60 × 4 – 180 i AHR 100 × 100 × 10 – 300

Oznaka uzorka	Dužina L (mm)	Širina kraka 1 c_1 (mm)	Širina kraka 2 c_2 (mm)	Debljina t (mm)	Radijus u uglu r_1 (mm)	Radijus na krajevima nožica r_2 (mm)	Površina poprečnog preseka A (mm ²)
AHR60×60×6-180-1	181	61.9	61.7	6.0	7.5	2.5	706.7
AHR60×60×6-180-2	180	61.6	61.9	6.0	7.6	3.0	706.8
AHR60×60×6-180-3	180	61.3	62.3	6.0	7.5	3.0	704.6
Nominalne vrednosti	180	60.0	60.0	6.0	7.5	-	690.7
Srednja vrednost	180	61.6	62.0	6.0	7.5	2.8	706.0
V_x (%)	0.3	0.5	0.5	0.2	0.8	-	0.2
Odstupanje (%)	0.0	2.7	3.3	-0.7	0.4	-	2.2
AHR100×100×10-300-1	301	101.5	101.5	9.6	7.0	4.0	1848.1
AHR100×100×10-300-2	301	102.0	101.6	9.6	7.1	5.0	1851.1
AHR100×100×10-300-3	300	101.5	101.9	9.6	7.0	4.9	1846.0
Nominalne vrednosti	300	100.0	100.0	10.0	7.0	-	1893.1
Srednja vrednost	301	101.6	101.6	9.6	7.0	4.6	1848.4
V_x (%)	0.2	0.3	0.2	0.2	0.8	-	0.1
Odstupanje (%)	0.3	1.6	1.6	-4.2	0.5	-	-2.4

Tabela 3-13 Izmerene dimenzije uzoraka ALW 60 × 60 × 4 – 180 i ALW 100 × 100 × 10 – 300

Oznaka uzorka	Dužina L (mm)	Širina kraka 1 c_1 (mm)	Širina kraka 2 c_2 (mm)	Debljina t (mm)	Površina poprečnog preseka A (mm ²)
ALW 60 × 60 × 6 – 180 – 1	180	60.3	60.5	6.1	699.7
ALW 60 × 60 × 6 – 180 – 2	181	60.4	60.2	6.0	687.6
ALW 60 × 60 × 6 – 180 – 3	180	60.5	60.4	6.0	689.4
Nominalne vrednosti	180	60.0	60.0	6.0	684.0
Srednja vrednost	180	60.4	60.4	6.0	692.2
V_x (%)	0.3	0.2	0.3	1.0	0.9
Odstupanje (%)	0.0	0.7	0.6	0.6	1.2
ALW 100 × 100 × 10 – 300 – 1	300	100.0	100.2	9.9	1884.0
ALW 100 × 100 × 10 – 300 – 2	301	100.2	100.1	10.0	1903.0
ALW 100 × 100 × 10 – 300 – 3	301	100.3	100.2	10.1	1923.0
Nominalne vrednosti	300	100.0	100.0	10.0	1900.0
Srednja vrednost	301	100.2	100.2	10.0	1903.3
V_x (%)	0.2	0.2	0.1	1.0	1.0
Odstupanje (%)	0.3	0.2	0.2	0.0	0.2



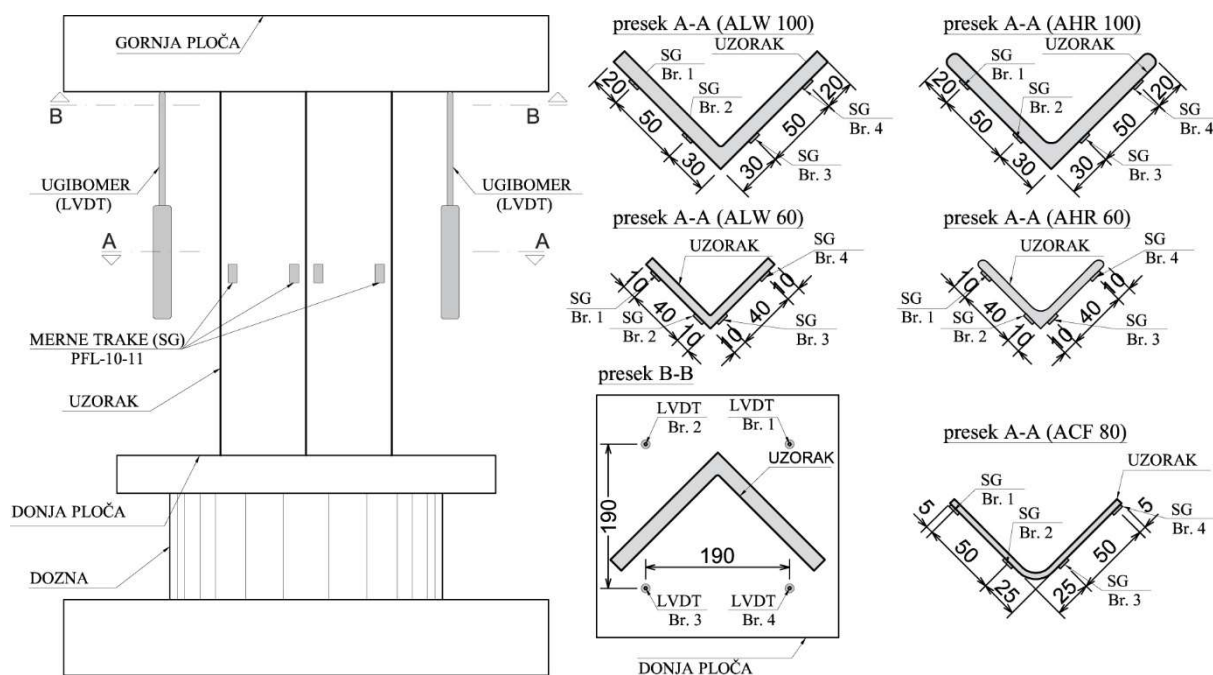
a) Hladnooblikovani ugaonici

b) Vrućevaljani ugaonici

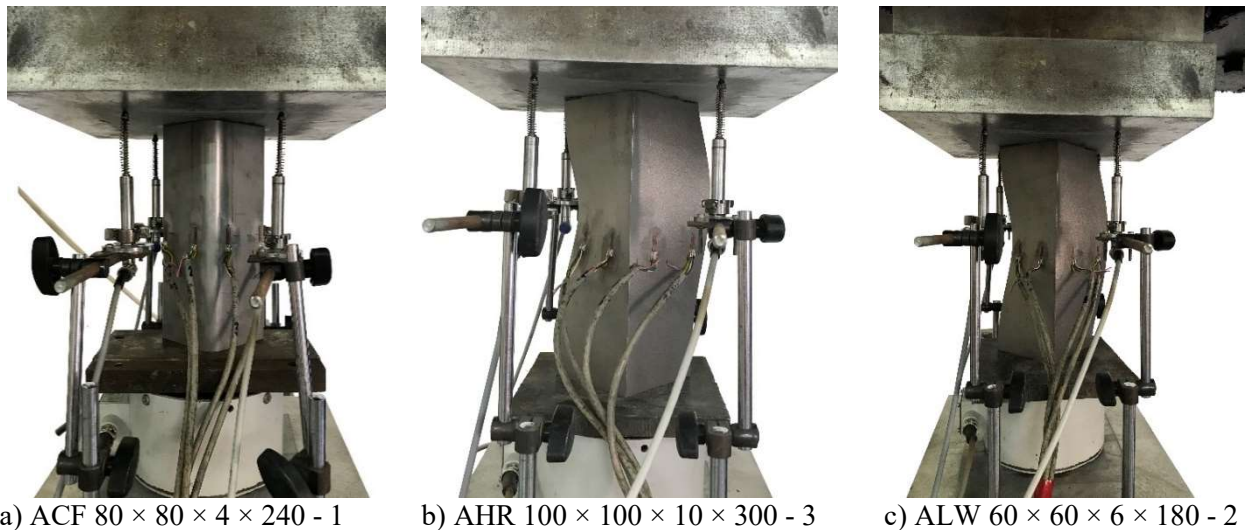
c) Laserski zavareni ugaonici

Slika 3.31 – Oznake geometrijskih karakteristika poprečnih preseka

Na slici 3.32 prikazana je dispozicija ispitivanja kratkog stuba na pritisak sa rasporedom mernih uređaja. Da bi se ostvario potpuni kontakt krajeva uzorka sa oslonačkim pločama i sprečila njihova rotacija, izvršeno je precizno sečenje svakog uzorka pod vodenim mlazom. Ispitivanje kratkih stubova na pritisak sprovedeno je u Laboratoriji za građevinske materijale Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu na presi *Amsler* kapaciteta 3500 kN. Nanošenje sile vršeno je sa kontrolisanom deformacijom, sa prirastom deformacije od 0.001 s^{-1} . U toku ispitivanja praćene su podužne deformacije – skraćenje stuba pomoću četiri ugibomera koji su postavljeni na gornjoj oslonačkoj ploči prese na međusobnom rastojanju od 190 mm (slika 3.32, presek B-B). Pomoću četiri merne trake tipa *PFL 10-11*, proizvođača *Tokyo Sakki Kenkyujo Co*, merne baze od 10 mm, koje su postavljene po obimu preseka u sredini visine stuba, praćeno je naponsko-deformacijsko stanje merenog poprečnog preseka. Položaj mernih traka za različite poprečne preseke prikazan je na presecima A-A na slici 3.32. Prirast sile praćen je na donjoj oslonačkoj ploči pomoću dozne *C6A* proizvođača *HBM* sa opsegom merenja od 2000 kN. Svi eksperimentalni rezultati – sila, pomeranje i dilatacije zapisivani su u intervalima od jedne sekunde na akvizicionom uređaju *MGC+* proizvođača *HBM*. Na slici 3.33 prikazane su fotografije ispitivanja kratkog stuba na pritisak za sva tri tipa ugaonika.



Slika 3.32 – Dispozicija ispitivanja kratkog stuba na pritisak



Slika 3.33 – Ispitivanje kratkog stuba pri pritisku

3.5.1 Rezultati ispitivanja kratkih stubova na pritisak

Do iscrpljenja nosivosti poprečnih preseka kratkih stubova na pritisak došlo je usled torziono-fleksionog izvijanja. Ovaj oblik loma karakteriše se pojavom značajnih torzionih deformacija oba kraka kritičnog poprečnog preseka u srednjoj visini uzorka i teško primetnim fleksionim deformacijama (translacijama) oko jače ose preseka. Linije spoja između krakova ostale su ravne, a uglovi između krakova nepromenjeni. Treba naglasiti da performanse torziono-fleksionog izvijanja kratkih pritisnutih stubova odgovaraju performansama lokalnog izbočavanja vitkih poprečnih preseka.

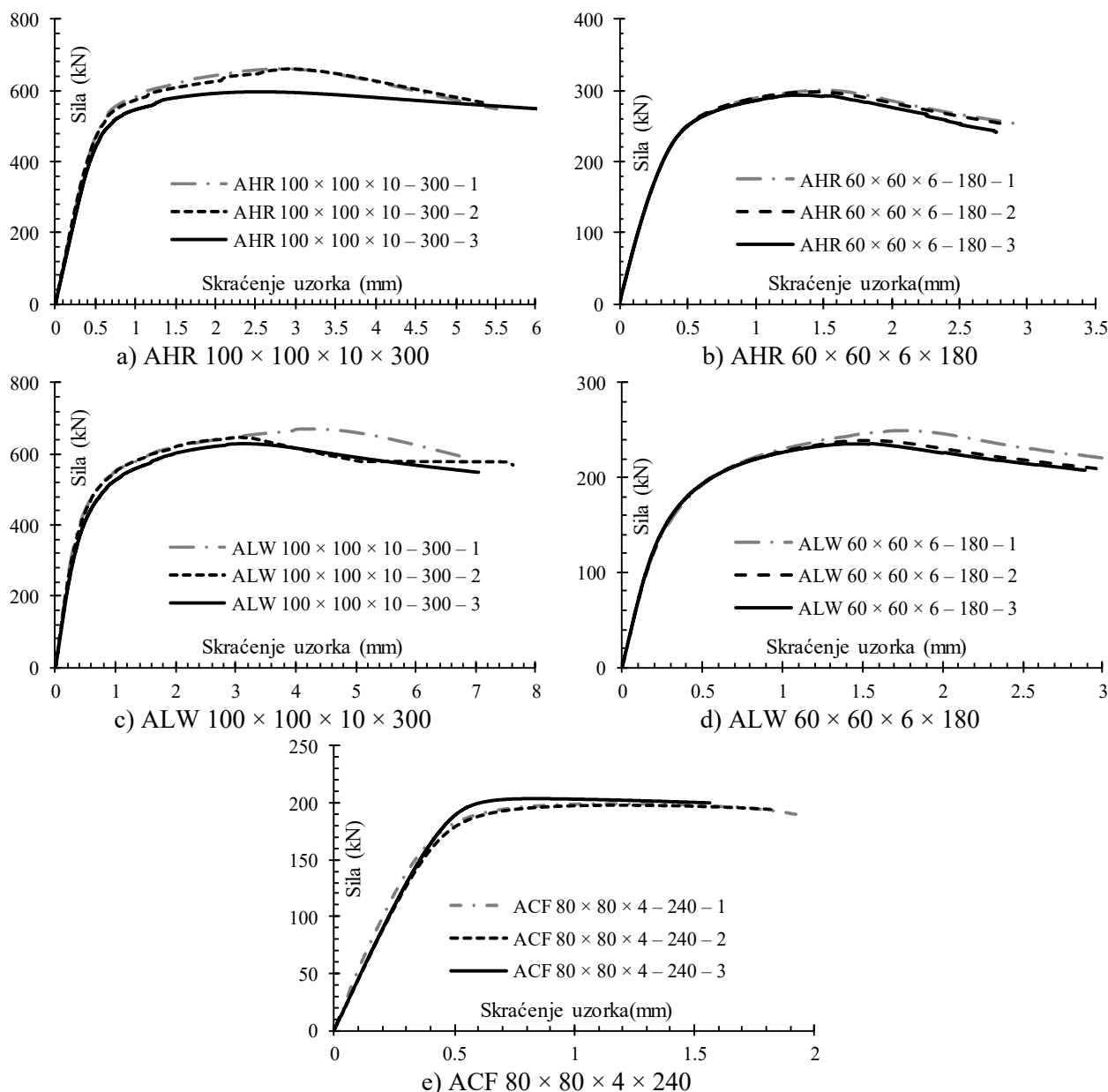
Na slici 3.34 prikazani su deformisani oblici kratkih stubova nakon dostizanja granične nosivosti za sva tri tipa ugaonika.

Na slici 3.35 prikazani su dijagrami sila - skraćenje uzorka dobijeni ispitivanjem svih kratkih stubova pri pritisku. Skraćenje uzorka koje je predstavljeno na ovim dijagramima sračunato je pomoću zapisa mernih traka. Skraćenje sračunato prema zapisima mernih traka pouzdanije je u odnosu na zapise ugibomera, jer pomeranje ugibomera uključuje i elastičnu deformaciju oslonačke ploče.



a) ACF $80 \times 80 \times 4 \times 240 - 2$ b) AHR $100 \times 100 \times 10 \times 300 - 2$ c) ALW $100 \times 100 \times 10 \times 300 - 2$

Slika 3.34 – Deformisani oblik kratkih stubova nakon ispitivanja



Slika 3.35 – Dijagrami sila - skraćenje uzorka

Rezultati ispitivanja kratkih stubova na pritisak prikazani su u tabeli 3-14, u kojoj $N_{c,u}$ predstavlja graničnu vrednost sile pri ispitivanju kratkog stuba na pritisak, δ_u predstavlja skraćenje uzorka pri vrednosti granične sile određeno pomoću mernih traka, $\sigma_{1,b}$ predstavlja normalni napon u poprečnom preseku pri dostizanju granične sile dobijen kao količnik granične sile i merene površine poprečnog preseka. U tabeli 3-14 je prikazano i poređenje normalnog napona $\sigma_{1,b}$ sa naponom na granici razvlačenja f_y . Za ovo poređenje kod hladnooblikovanih ugaonika umesto vrednosti konvencionalne granice razvlačenja korišćenja je osrednjena vrednost granice razvlačenja za poprečni presek (f_{ya}), koja uzima u obzir poboljšanje mehaničkih svojstava, odnosno veću vrednost granice razvlačenja u prevoju ugaonika usled hladnog oblikovanja sračunatu prema jednačini (74) [59]. U izrazu (74) f_{yc} je konvencionalna granica razvlačenja materijala u prevoju ugaonika, $A_{c,pb}$ je površina prevoja ugaonika, dok je sa A označena ukupna površina ugaonika. Takođe, u tabeli 3-14 su date normalizovane vitkosti kraka ugaonika $(c/t)/\epsilon$, gde je c širina ravnog dela kraka, t debljina zida kraka ugaonika (slika 3.31), a ϵ materijalni koeficijent koji se u skladu sa EN 1993-1-4 [2], određuje prema izrazu (75).

Tabela 3-14 Izmerene geometrijske karakteristike uzoraka kratkih stubova

Oznaka uzorka	$(c/t)/\varepsilon$	$N_{c,u}$ (kN)	δ_u (mm)	$\sigma_{1,b}$ (N/mm ²)	f_y (N/mm ²)	$\sigma_{1,b}/f_y$
ACF 80 × 80 × 4 – 240 – 1	31.1	199.0	1.21	327.7	544.1	0.60
ACF 80 × 80 × 4 – 240 – 2	31.1	198.2	1.17	320.2	544.2	0.59
ACF 80 × 80 × 4 – 240 – 3	31.1	203.7	0.83	328.7	544.2	0.60
Srednja vrednost		200.3	1.1			
Standardna devijacija		3.0	0.2			
V_x (%)		1.5	19.5			
AHR 60 × 60 × 6 – 180 – 1	11.3	301.3	1.49	426.3	288	1.48
AHR 60 × 60 × 6 – 180 – 2	11.3	298.2	1.42	421.9	288	1.46
AHR 60 × 60 × 6 – 180 – 3	11.3	292.5	1.32	415.2	288	1.44
Srednja vrednost		297.3	1.41			
Standardna devijacija		4.4	0.1			
V_x (%)		1.5	6.2			
AHR 100 × 100 × 10 – 300 – 1	11.3	659.6	2.80	356.9	288	1.24
AHR 100 × 100 × 10 – 300 – 2	11.3	661.7	2.91	357.4	288	1.24
AHR 100 × 100 × 10 – 300 – 3	11.3	595.6	2.52	322.6	288	1.12
Srednja vrednost		638.9	2.74			
Standardna devijacija		37.5	0.2			
V_x (%)		5.9	7.4			
ALW 60 × 60 × 6 – 180 – 1	11.0	250.3	1.73	363.4	272	1.34
ALW 60 × 60 × 6 – 180 – 2	11.0	239.0	1.54	347.6	272	1.28
ALW 60 × 60 × 6 – 180 – 3	11.0	235.7	1.43	341.9	272	1.25
Srednja vrednost		241.7	1.6			
Standardna devijacija		7.7	0.2			
V_x (%)		3.2	9.7			
ALW 100 × 100 × 10 – 300 – 1	11.0	671.1	4.18	352.8	272	1.29
ALW 100 × 100 × 10 – 300 – 2	11.0	646.0	3.05	339.5	272	1.25
ALW 100 × 100 × 10 – 300 – 3	11.0	630.6	3.16	331.0	272	1.22
Srednja vrednost		649.2	3.5			
Standardna devijacija		20.4	0.6			
V_x (%)		3.1	18.0			

$$f_{ya} = \frac{f_{yc} \cdot A_{c,pb} + f_y(A - A_{c,pb})}{A} \quad (74)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \cdot \frac{E}{210\,000}} \quad (75)$$

3.5.2 Analiza rezultata ispitivanja

Na osnovu rezultata ispitivanja kratkih stubova na pritisak koji su prezentovani u tabeli 3-14 i na slikama 3.35 i 3.34 mogu se dati sledeći zaključci:

- Do gubitka nosivosti poprečnog preseka kod svih ispitanih uzoraka došlo je usled torziono-fleksionog izvijanja koje se karakteriše značajnim torzionim deformacijama oba kraka kritičnog poprečnog preseka u srednjem delu visine uzorka i teško primetnim fleksionim deformacijama oko jače ose preseka. Kraci L profila i nakon izbočavanja ostaju međusobno upravni.

- Uzorci serije ACF $80 \times 80 \times 4 - 240$ imaju izrazito ujednačene rezultate sa srednjom vrednosti granične nosivosti od 200.3 kN i koeficijentom varijacije od samo 1.5%. Normirana vitkost kraka ugaonika $(c/t)/\varepsilon$ ovog poprečnog preseka je 31.1 što premašuje graničnu vrednost vitkosti za poprečne preseke klase 3 od 14ε prema EN 1993-1-4 [2]. Do iscrpljenja kapaciteta nosivosti poprečnog preseka dolazi pri dostizanju napona koji iznosi 60% od granice razvlačenja, što ukazuje da se ovaj poprečni presek može klasifikovati kao poprečni presek klase 4 prema EN 1993-1-4 [2].
- Srednja vrednost graničnih sila kod uzoraka serije AHR $60 \times 60 \times 6 - 180$ iznosi 297.3 kN sa izrazito ujednačenim rezultatima i koeficijentom varijacije od 1.5%. Uzorci serije AHR $100 \times 100 \times 10 - 300$ imaju srednju vrednost nosivosti poprečnih preseka 638.9 kN uz nešto veće rasipanje rezultata sa koeficijentom varijacije od 5.9%. Za obe ispitne serije uzoraka, normirana vitkost kraka ugaonika $(c/t)/\varepsilon$ iznosi 11.3 što je ispod granične vrednosti za poprečne preseke klase 3 od 14ε prema EN 1993-1-4 [2]. Normalni napon pri graničnoj sili premašuje vrednost granice razvlačenja, što potvrđuje da ova dva poprečna preseka pripadaju klasi 3 prema EN 1993-1-4 [2].
- Uzorci serije ALW $60 \times 60 \times 6 - 180$ imaju srednju vrednost granične sile 241.7 kN, dok kod uzorka serije ALW $100 \times 100 \times 10 - 300$ ova vrednost iznosi 649.2 kN. U obe serije rezultati pokazuju zadovoljavajuću ujednačenost sa koeficijentima varijacije od 3.2% i 3.1%, respektivno. Normirana vitkost kraka ugaonika $(c/t)/\varepsilon$ za ove poprečne preseke iznosi 11.0, što ih, kao i u slučaju vrućevaljanih ugaonika, svrstava u poprečne preseke klase 3 prema EN 1993-1-4 [2]. Takođe, do iscrpljenja kapaciteta nosivosti dolazi u plastičnoj oblasti naprezanja, pri vrednostima napona koji su veći od napona na granici razvlačenja što potvrđuje da se i u ovom slučaju radi o poprečnim presecima klase 3.

3.6 Ispitivanje nosivosti elemenata na izvijanje

3.6.1 Opis ispitanih uzoraka

U cilju određivanja graničnih nosivosti i oblika loma obostrano zglobno oslonjenih, centrično pritisnutih ugaonika, sprovedeno je opsežno eksperimentalno ispitivanje njihove stabilnosti elemenata. Ukupno je ispitano 48 uzoraka, od kojih su 8 uzoraka hladnooblikovani ugaonici i po 20 uzoraka vrućevaljanih i laserski zavarenih ugaonika. Ukupan broj uzoraka podeljen je u 12 serija, tako da svaku seriju čine četiri ponovljena uzorka iste dužine i istih nominalnih dimenzija poprečnog preseka. Nominalne dimenzije poprečnih preseka, kao i dužine uzorka birane su pažljivo u cilju utvrđivanja njihovog uticaja na odgovor pritisnutog elementa u stanju granične nosivosti. Odabrana su tri karakteristična opsega vitkosti: opseg male vitkosti, srednje vitkosti i velike vitkosti. Odabir dimenzija bio je uslovljen i ciljem da pored fleksionog izvijanja u ispitivanju bude zastupljeno i torziono-fleksiono izvijanje. Hladnooblikovani uzorci dobijeni su savijanjem vrućevaljane trake debljine 4 mm od niskolegiranog dupleks čelika EN 1.4162. Širina kraka hladnooblikovanih ugaonika iznosi 80 mm, dok je unutrašnji radijus savijanja jednak trostrukoj debljini lima, odnosno 12 mm. Ovi uzorci su podeljeni u dve serije sa nominalnim dužinama od 1000 i 2000 mm. Vrućevaljani i laserski zavareni uzorci izrađeni su od austenitnog čelika EN 1.4301 sa nominalnim dimenzijama $60 \times 60 \times 6$ mm i $100 \times 100 \times 10$ mm. Uzorci poprečnog preseka $60 \times 60 \times 6$ mm podeljeni su u dve serije nominalnih dužina 800 i 2000 mm, dok su uzorci poprečnog preseka $100 \times 100 \times 10$ mm podeljeni u tri serije nominalnih dužina 500, 1500 i 2500 mm.

Geometrija uzoraka kontrolisana je mehaničkim merenjem koje je sprovedeno u Laboratoriji za materijale Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Merene su sledeći geometrijski parametri: dužina uzorka (L), širina kraka profila (c_1 i c_2), debljina zida profila (t), radijus prevoja (r_i), radijus u uglu profila (r_1), radijus na krajevima nožica kod vrućevaljanih profila (r_2) i ugao između krakova (β). Dužina profila merena je pomoću laserskog daljinomera. Širina kraka, debljina zida profila i radijusi mereni su u četiri nasumično odabrana preseka duž profila, pa su za reprezentativne vrednosti usvojene srednje vrednosti izmerenih veličina. Za merenje širine kraka i debljine zida

profila korišćeno je digitalno kljunasto merilo. Merenje radijusa vršeno je pomoću mašinskih šablona. U tabelama 3-15, 3-16 i 3-17 prikazani su rezultati merenja, nominalne dimenzije, srednje vrednosti sa koeficijentom varijacije i odstupanja srednje vrednosti od nominalnih za hladnooblikovane, vrućevaljane i laserski zavarene ugaonike, respektivno. Odstupanje koje je prikazano u tabelama predstavlja razliku između srednjih vrednosti i nominalnih vrednosti izraženu u procentima u odnosu na nominalne vrednosti. U tabeli 3-16 nominalna vrednost radijusa na krajevima nožica vrućevaljanog ugaonika nije prezentovana, jer proizvođač u svojim tabelama [58] nije definisao ovu vrednost.

Kao što se u tabelama 3-15, 3-16 i 3-17 može videti za sva tri proizvodna procesa L profila odstupanja su manja od proizvodnih tolerancija. Odstupanje koje predstavlja prekoračenje srednje vrednosti u odnosu na nominalne dimenzije izraženo u procentima ne prelazi vrednost od 1.6%, 4.8% i 1.3% kod hladnooblikovanih, vrućevaljanih i laserski zavarenih ugaonika, respektivno. Koeficijent varijacije ima maksimalne vrednosti 2.4%, 3% i 1.4% za sva tri proizvodna procesa istim redosledom. Dakle, može se zaključiti da se maksimalna odstupanja javljaju kod vrućevaljanih ugaonika, a minimalna odstupanja kod laserski zavarenih ugaonika što je i za očekivati uzimajući u obzir specifičnosti ova tri proizvodna procesa.

Tabela 3-15 Izmerene dimenzije hladnooblikovanih uzoraka

Oznaka uzorka	Dužina L (mm)	Širina kraka 1 c_1 (mm)	Širina kraka 2 c_2 (mm)	Debljina t (mm)	Unutrašnji radijus prevoja r_i (mm)	Ugao između krakova β (°)	Površina poprečnog preseka A (mm ²)
ACF80×80×4-1000-1	1000	80.2	79.3	4.1	12.2	90.7	612.1
ACF80×80×4-1000-2	1002	80.6	81.0	3.9	11.9	91	606.5
ACF80×80×4-1000-3	1002	80.4	81.0	4.0	12.1	90.6	605.4
ACF80×80×4-1000-4	999	80.7	79.6	4.1	12.0	89.1	615.7
Nominalne vrednosti	1000	80.0	80.0	4.0	12.0	90	606.8
Srednja vrednost	1001	80.5	80.2	4.0	12.1	90.3	609.9
V_x (%)	0.1	0.3	1.1	2.4	1.1	0.8	0.8
Odstupanje (%)	0.1	0.6	0.2	0.0	0.8	-0.3	0.5
ACF80×80×4-2000-1	2002	80.0	81.4	4.1	11.8	91.2	620.6
ACF80×80×4-2000-2	2002	80.7	81.5	3.9	12.2	89.8	623.1
ACF80×80×4-2000-3	1999	79.8	80.8	4.0	12.1	90.5	602.2
ACF80×80×4-2000-4	2001	81.6	80.0	4.1	12.0	89.1	621.0
Nominalne vrednosti	2000	80.0	80.0	4.0	12.0	89	606.8
Srednja vrednost	2001	80.5	80.9	4.0	12.0	89.9	616.7
V_x (%)	0.1	1.0	0.9	2.4	1.4	1.0	1.6
Odstupanje (%)	0.05	0.6	1.1	0.0	0.0	-1.0	1.6

Tabela 3-16 Izmerene dimenzije vrućevaljanih uzoraka

Oznaka uzorka	Dužina L (mm)	Širina kraka 1 c_1 (mm)	Širina kraka 2 c_2 (mm)	Debljina t (mm)	Radijus u uglu r_1 (mm)	Radijus na krajevima nožica r_2 (mm)	Površina poprečnog preseka A (mm ²)
AHR60×60×6-800-1	802	62.2	61.4	6.0	7.5	2.5	709.7
AHR60×60×6-800-2	802	62.2	61.4	5.9	7.6	2.5	705.8
AHR60×60×6-800-3	802	61.4	62.3	6.0	7.5	3.0	706.1
AHR60×60×6-800-4	803	61.3	62.1	6.0	7.7	3.0	704.8
Nominalne vrednosti	800	60.0	60.0	6.0	7.5	-	690.7
Srednja vrednost	802	61.8	61.8	6.0	7.6	2.8	706.6
V_x (%)	0.1	0.8	0.8	0.3	1.3	-	0.3
Odstupanje (%)	0.2	2.9	3.0	-0.7	1.0	-	2.3
AHR60×60×6-2000-1	2002	62.3	61.2	6.0	7.6	3.0	703.9
AHR60×60×6-2000-2	2001	61.4	62.5	6.0	7.5	2.8	707.3
AHR60×60×6-2000-3	2001	61.3	62.2	6.0	7.5	3.0	709.4
AHR60×60×6-2000-4	2001	61.3	62.2	6.0	7.5	2.9	704.5
Nominalne vrednosti	2000	60.0	60.0	6.0	7.5	-	690.7
Srednja vrednost	2001	61.6	62.0	6.0	7.5	2.9	706.2
V_x (%)	0.02	0.7	0.9	0.4	0.7	-	0.4
Odstupanje (%)	0.05	2.6	3.4	-0.6	0.3	-	2.2
AHR100×100×10-500-1	501	101.8	101.5	9.4	7.2	4.6	1815.2
AHR100×100×10-500-2	500	101.6	101.5	9.9	7.0	4.8	1903.4
AHR100×100×10-500-3	501	101.6	101.5	9.4	7.1	4.5	1805.2
AHR100×100×10-500-4	501	101.5	102.3	9.5	7.0	4.5	1829.4
Nominalne vrednosti	500	100.0	100.0	10.0	7.0	-	1893.1
Srednja vrednost	501	101.6	101.7	9.5	7.1	4.6	1838.3
V_x (%)	0.1	0.1	0.4	2.7	1.4	-	2.4
Odstupanje (%)	0.2	1.6	1.7	-4.8	1.1	-	-2.9
AHR100×100×10-1500-1	1502	101.5	102.4	9.5	7.2	4.0	1844.2
AHR100×100×10-1500-2	1502	101.6	101.5	9.4	7.0	4.3	1814.1
AHR100×100×10-1500-3	1502	101.4	100.7	9.8	7.1	3.8	1886.9
AHR100×100×10-1500-4	1503	102.4	101.6	9.4	7.0	5.0	1810.7
Nominalne vrednosti	1500	100.0	100.0	10.0	7.0	-	1893.1
Srednja vrednost	1502	101.7	101.6	9.5	7.1	4.3	1839.0
V_x (%)	0.03	0.4	0.7	2.2	1.4	-	1.9
Odstupanje (%)	0.1	1.7	1.6	-4.8	1.1	-	-2.9
AHR100×100×10-2500-1	2501	102.1	101.5	9.4	7.1	4.5	1818.5
AHR100×100×10-2500-2	2501	101.5	101.6	10.0	7.0	5.0	1910.3
AHR100×100×10-2500-3	2500	101.6	101.4	9.3	7.1	4.6	1797.6
AHR100×100×10-2500-4	2501	101.3	102.6	9.5	7.0	5.0	1831.7
Nominalne vrednosti	2500	100.0	100.0	10.0	7.0	-	1893.1
Srednja vrednost	2501	101.6	101.8	9.5	7.1	4.8	1839.5
V_x (%)	0.02	0.4	0.5	3.0	0.8	-	2.7
Odstupanje (%)	0.04	1.6	1.8	-4.6	0.7	-	-2.8

Tabela 3-17 Izmerene dimenzije laserski zavarenih uzoraka

Oznaka uzorka	Dužina L (mm)	Širina kraka 1 c_1 (mm)	Širina kraka 2 c_2 (mm)	Debljina t (mm)	Površina poprečnog preseka A (mm ²)
ALW 60 × 60 × 6 – 800 – 1	802	60.5	60.4	6.0	689.4
ALW 60 × 60 × 6 – 800 – 2	802	60.4	60.3	6.0	688.2
ALW 60 × 60 × 6 – 800 – 3	802	60.4	60.5	6.1	700.3
ALW 60 × 60 × 6 – 800 – 4	801	60.5	60.4	6.0	689.4
Nominalne vrednosti	800	60.0	60.0	6.0	684.0
Srednja vrednost	802	60.5	60.4	6.0	691.8
V_x (%)	0.1	0.1	0.1	0.8	0.8
Odstupanje (%)	0.2	0.8	0.7	0.4	1.1
ALW 60 × 60 × 6 – 2000 – 1	2002	60.1	60.6	6.0	688.2
ALW 60 × 60 × 6 – 2000 – 2	2003	60.4	60.3	6.1	699.1
ALW 60 × 60 × 6 – 2000 – 3	2003	60.5	60.0	6.0	687.0
ALW 60 × 60 × 6 – 2000 – 4	2003	60.2	60.4	5.9	676.7
Nominalne vrednosti	2000	60.0	60.0	6.0	684.0
Srednja vrednost	2003	60.3	60.3	6.0	687.7
V_x (%)	0.02	0.3	0.4	1.4	1.3
Odstupanje (%)	0.2	0.5	0.5	0.0	0.5
ALW 100 × 100 × 10 – 500 – 1	501	100.0	100.3	10.0	1903.0
ALW 100 × 100 × 10 – 500 – 2	501	100.4	100.1	10.0	1905.0
ALW 100 × 100 × 10 – 500 – 3	500	100.3	100.3	10.1	1924.1
ALW 100 × 100 × 10 – 500 – 4	501	100.4	100.2	10.0	1906.0
Nominalne vrednosti	500	100.0	100.0	10.0	1900.0
Srednja vrednost	501	100.3	100.2	10.0	1909.5
V_x (%)	0.1	0.2	0.1	0.5	0.5
Odstupanje (%)	0.2	0.3	0.2	0.2	0.5
ALW 100 × 100 × 10 – 1500 – 1	1501	100.0	100.2	9.9	1884.0
ALW 100 × 100 × 10 – 1500 – 2	1501	100.0	100.3	9.9	1885.0
ALW 100 × 100 × 10 – 1500 – 3	1502	100.0	100.2	10.0	1902.0
ALW 100 × 100 × 10 – 1500 – 4	1502	100.3	100.0	10.1	1921.0
Nominalne vrednosti	1500	100.0	100.0	10.0	1900.0
Srednja vrednost	1502	100.1	100.2	10.0	1898.0
V_x (%)	0.04	0.1	0.1	1.0	0.9
Odstupanje (%)	0.1	0.1	0.2	-0.3	-0.1
ALW 100 × 100 × 10 – 2500 – 1	2501	100.1	100.2	9.9	1885.0
ALW 100 × 100 × 10 – 2500 – 2	2501	100.4	100.2	10.1	1924.1
ALW 100 × 100 × 10 – 2500 – 3	2502	100.2	100.2	10.0	1904.0
ALW 100 × 100 × 10 – 2500 – 4	2501	100.4	100.1	9.8	1868.9
Nominalne vrednosti	2500	100.0	100.0	10.0	1900.0
Srednja vrednost	2501	100.3	100.2	10.0	1895.5
V_x (%)	0.02	0.1	0.0	1.3	1.3
Odstupanje (%)	0.05	0.3	0.2	-0.5	-0.2

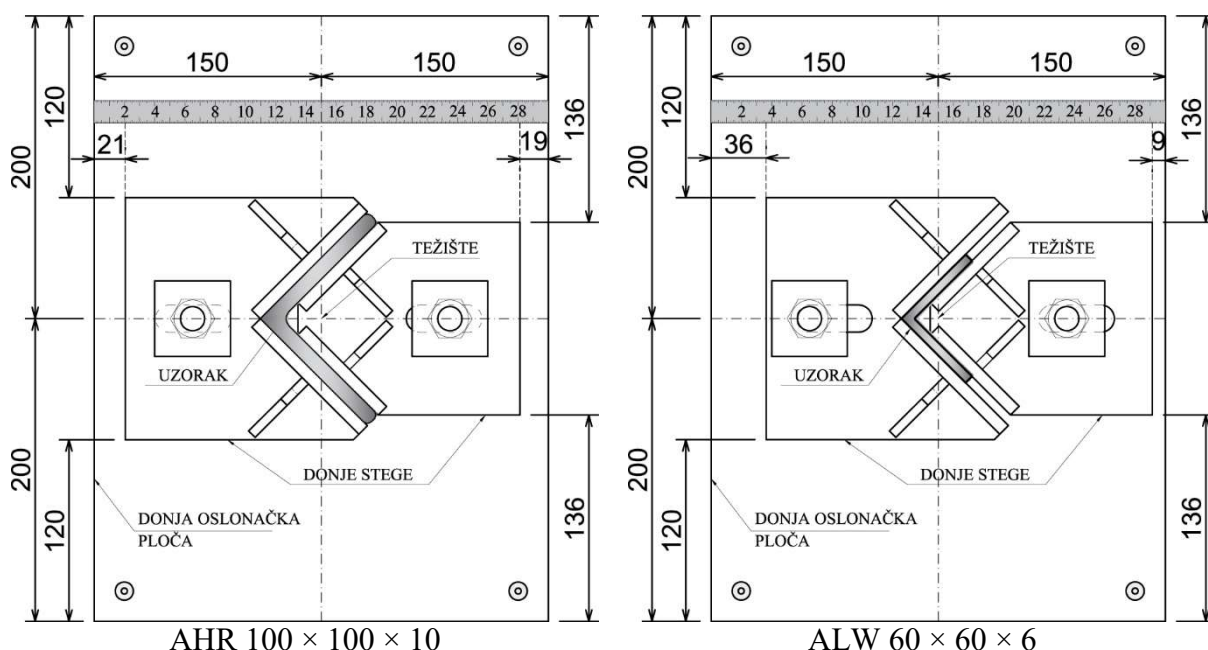
3.6.2 Dispozicija i postupak ispitivanja

Ispitivanje nosivosti elemenata na izvijanje sprovedeno je u Laboratoriji za konstrukcije Instituta za materijale Srbije u Beogradu. Za ispitivanje uzoraka korišćena je hidraulička presa za ispitivanje *Amsler*, kapaciteta 2000 kN. Radi obezbeđivanja zglobnog oslanjanja elemenata na krajevima za potrebe ovog istraživanja projektovana su i izrađena zglobna ležišta koja su instalirana na oba kraja kontakta uzorka i ležišnih ploča prese. Zglobna ležišta napravljena su iz dva segmenta koja ostvaruju kontakt duž jedne linije – ose rotacije ležišta. Na slici 3.36 prikazana su zglobna ležišta na gornjem i donjem kraju uzorka. Materijal od koga su napravljena ležišta je konstrukcioni čelik S355. Uzorak je pozicioniran tako da se osa rotacije ležišta poklapa sa glavnom osom inercije ugaonika, čime je dozvoljena rotacija oko slabije ose krajnjih poprečnih preseka, dok je ujedno sprečena rotacija oko jače ose i uvrtanje poprečnog preseka. Visinsko rastojanje između kraja uzorka i ose rotacije ležišta iznosi 90 mm, stoga je efektivna visina uzorka koji se ispituje $L_e = L + 2 \cdot 90$ mm, gde je L nominalna dužina uzorka izražena u mm.



Slika 3.36 – Zglobna ležišta na gornjem i donjem kraju uzorka

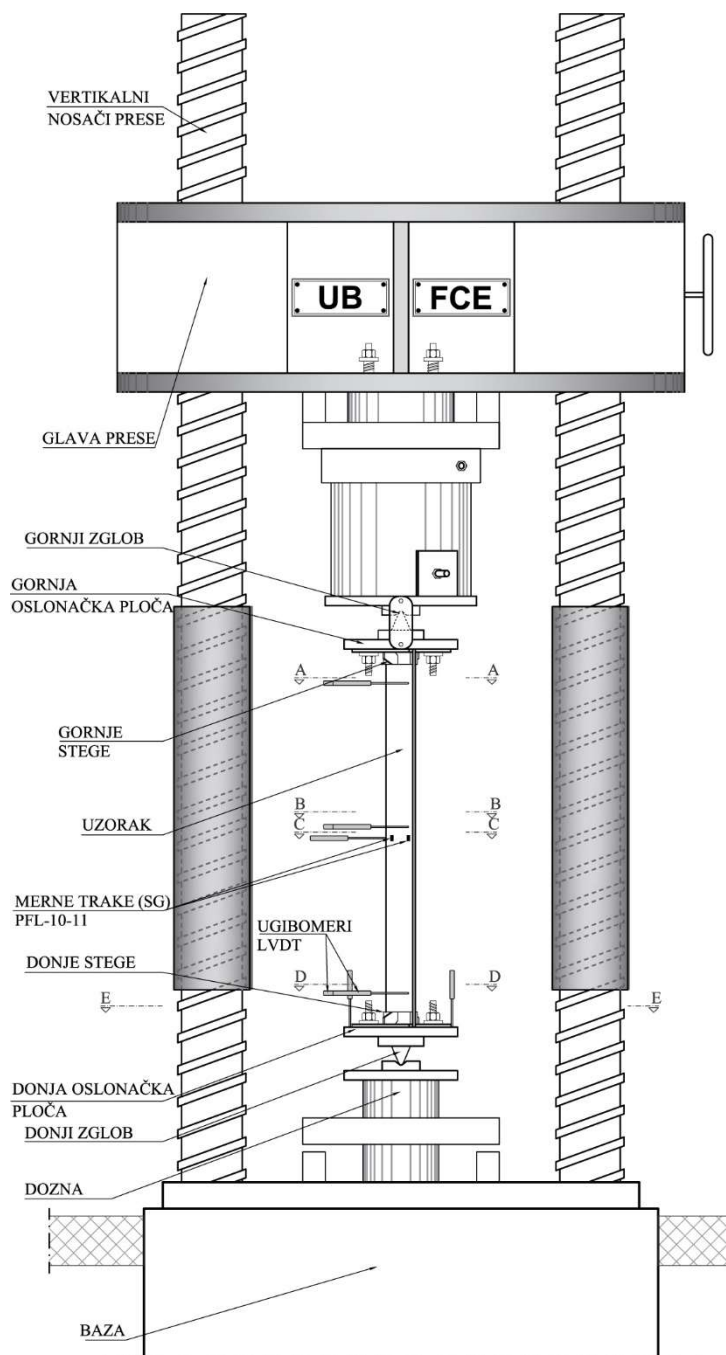
Sa ciljem centričnog unosa sile posebna pažnja posvećena je postavljanju uzoraka u projektovani položaj pre početka ispitivanja. Na površini ploče na kojoj se ostvaruje kontakt sa uzorkom označen je tačan položaj stega koje fiksiraju uzorak u oba pravca kako bi se osa rotacije ležišta poklopila sa glavnom osom inercije uzorka i težište uzorka poklopilo sa težištem ploče preko koje se unosi opterećenje. Označavanje tačnog položaja je izvršeno za svih pet različitih poprečnih preseka uzorka koji se ispituju. Na slici 3.37 ilustrovano je postavljanje uzoraka u centričan položaj za poprečne preseke AHR $100 \times 100 \times 10$ i ALW $60 \times 60 \times 6$. Nakon postavljanja uzoraka u projektovan centričan položaj vrši se provera vertikalnosti uzorka i centričnosti unosa sile. Provera centričnog unosa sile vrši se kontrolisanjem naponskog stanja u mernim trakama prilikom nanošenja radnog opterećenja intenziteta do 5 kN. Za fiksiranje uzorka korišćene su stege sa vertikalnim ukrucenjima. Veza stega i oslončke ploče obezbeđuje se ankerom koji je fiksiran na oslončkoj ploči, dok se pomeranje stega vrši samo u poprečnom pravcu u kome su predviđene ovalne rupe. Nakon postavljanja stega u konačan položaj anker se zaključava sa kontra pločom na vrhu stega. Ravna površina uzorka za što bolji kontakt između oslončke ploče i same površine uzorka obezbeđena je sečenjem ugaonika u fazi pripreme tehnologijom vodenog mlaza.



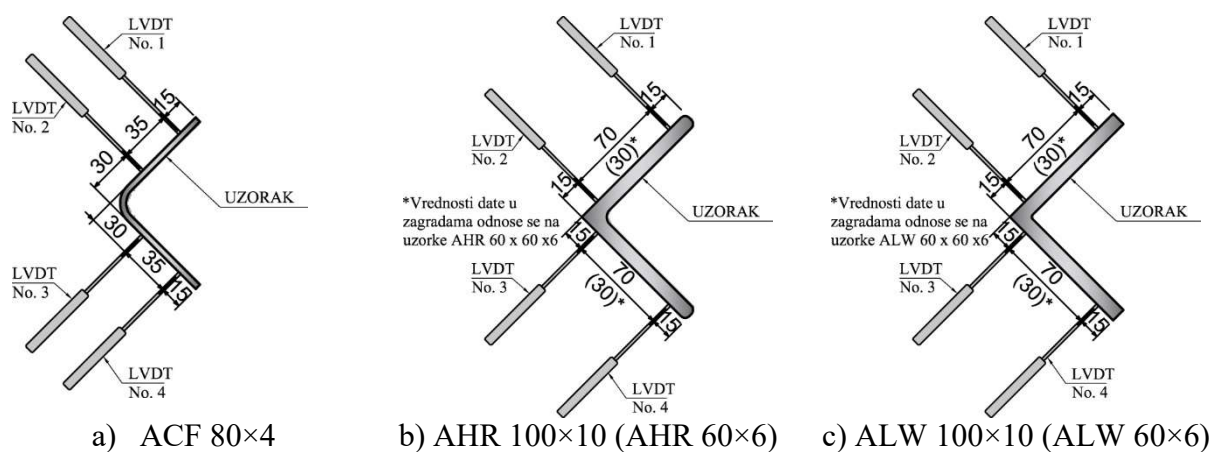
Slika 3.37 – Postavljanje uzoraka u centričan položaj

Postavka eksperimenta i raspored mernih uređaja u toku ispitivanja nosivosti na izvijanje prikazan je na slikama 3.38, 3.39, 3.40, 3.41, 3.42 i 3.43. Za praćenje naponsko - deformacionog stanja u toku ispitivanja uzoraka korišćene su merne trake (skraćeno SG - *strain gauge*) tipa *PFL 10-11*, proizvođača *Tokyo Sakki Kenkyujo Co*, sa mernom bazom od 10 mm. Merne trake su pozicionirane u polovini visine uzorka. Raspored mernih traka u poprečnom preseku prikazan je na slici 3.41 za svih pet različitih poprečnih preseka. Za uzorke poprečnih preseka AHR $100 \times 100 \times 10$ i ALW $100 \times 100 \times 10$ predviđeno je postavljanje 8 mernih traka u paru sa spoljašnje i unutrašnje strane kraka ugaonika, dok je za uzorke ostalih poprečnih preseka predviđeno postavljanje mernih traka samo sa spoljašnje strane – ukupno 4. U cilju beleženja pomeranja i rotiranja uzoraka u toku ispitivanja korišćeno je ukupno 17 ugibomera (skraćeno LVDT - *linear variable displacement transducers*). Za merenje pomeranja poprečnog preseka na krajevima i u sredini postavljeno je po 4 ugibomera u jednom poprečnom preseku 200 mm od krajeva uzoraka i u neposrednoj blizini polovini visine uzorka. Raspored ugibomera za sve poprečne preseke dat je na slikama 3.39, 3.40 i 3.42. Vrednosti izmerenih pomeranja ovih ugibomera kasnije su korišćene za računanje pomeranja uzoraka u pravcu glavnih osa inercije i rotacije poprečnih preseka. Kontrolni ugibomer za praćenje pomeranja poprečnog preseka u pravcu glavne ose inercije (upravno na slabiju osu inercije) postavljen je u polovini visine uzorka u svemu prema slici 3.41. Za praćenje rotacije donje oslonačke ploče postavljena su četiri ugibomera na oslonačkoj ploči u svemu prema skici prikazanoj na slici 3.43. Za merenje sile u toku ispitivanja korišćena je kalibrisana dozna C6A proizvođača HBM iz Nemačke. Za snimanje vrednosti sile, pomeranja ugibomera i beleženja dilatacija mernih traka korišćen je akvizicioni uređaj MGC+ proizvođača HBM sa periodom snimanja od jedne sekunde. Na slici 3.44 prikazani su detalji rasporeda merne opreme – mernih traka i ugibomera prilikom sprovođenja testa nosivosti elemenata na izvijanje.

Nakon pažljivog centriranja uzoraka sproveden je test nosivosti na izvijanje sa kontrolisanom deformacijom koja je iznosila 0.01 mm/s. Nosivost uzoraka na izvijanje jednaka je maksimalnoj dostignutoj sili pri testu nakon koje vrednost sile opada sa povećanjem deformacija. Test je nastavljen i nakon dostizanja maksimalne sile sve dok vrednost sile ne padne na 70% nosivosti uzorka na izvijanje, nakon čega se vrši potpuno rasterećenje uzorka i završava se ispitivanje.



Slika 3.38 – Postavka eksperimenta i raspored uređaja za merenje

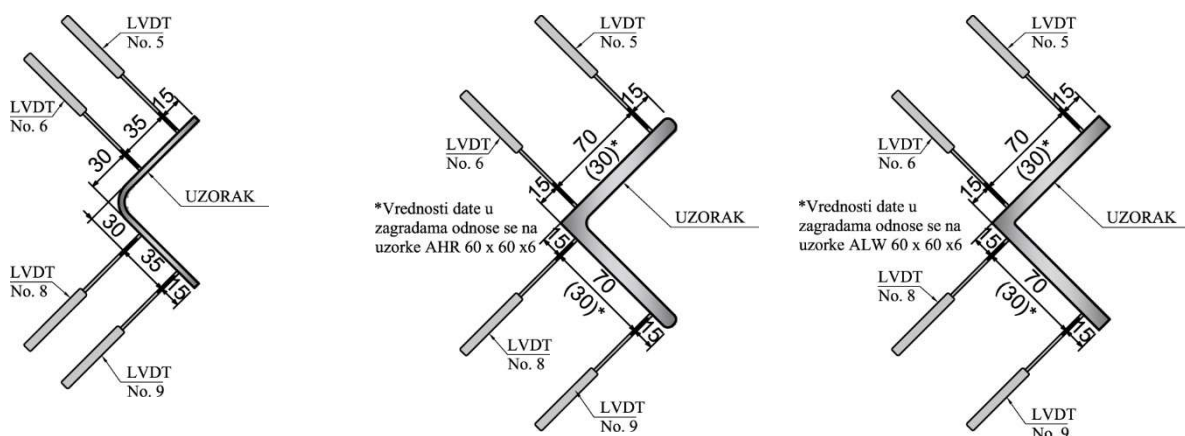


a) ACF 80×4

b) AHR 100×10 (AHR 60×6)

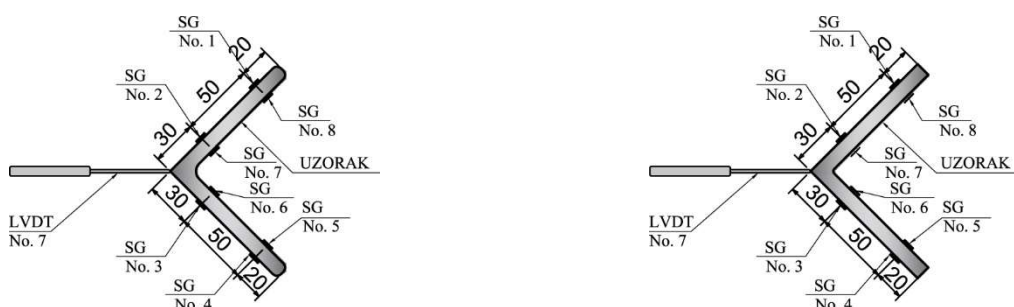
c) ALW 100×10 (ALW 60×6)

Slika 3.39 – Raspored ugibomera pri vrhu elementa (presek A-A slika 3.38)



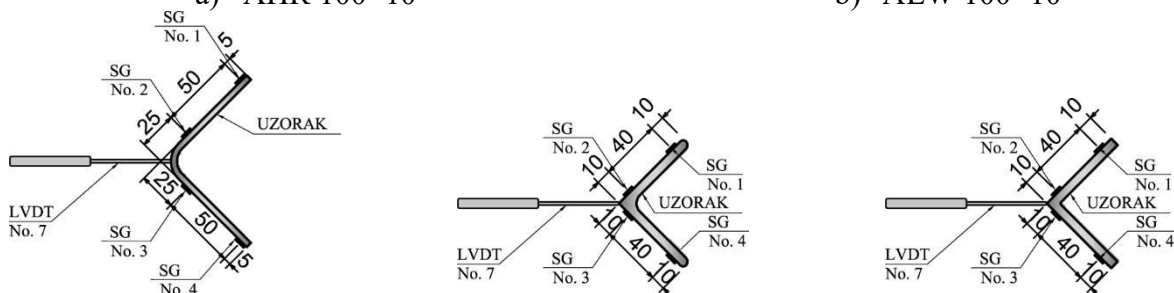
a) ACF 80×4 b) AHR 100×10 (AHR 60×6) c) ALW 100×10 (ALW 60×6)

Slika 3.40 – Raspored ugibomera neposredno iznad polovine visine elementa (presek B-B slika 3.38)



a) AHR 100×10

b) ALW 100×10

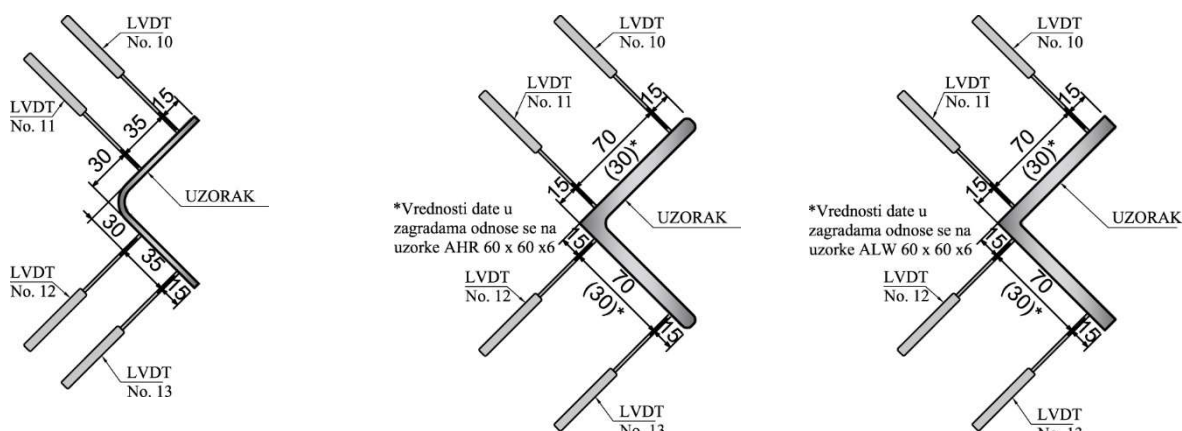


c) ACF 80×4

d) AHR 60×6

e) ALW 60×6

Slika 3.41 – Raspored mernih uređaja u polovini visine elementa (presek C-C slika 3.38)

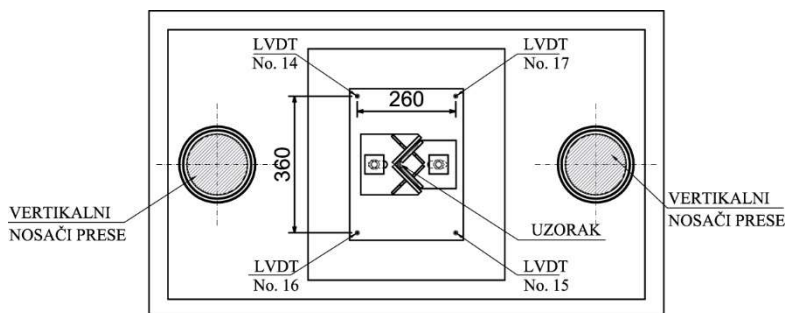


a) ACF 80×4

b) AHR 100×10 (AHR 60×6)

c) ALW 100×10 (ALW 60×6)

Slika 3.42 – Raspored ugibomera pri dnu elementa (presek D-D slika 3.38)



Slika 3.43 – Raspored ugibomera na donjoj oslonačkoj ploči (presek E-E slika 3.38)



Slika 3.44 – Detalji rasporeda merne opreme pri ispitivanju nosivosti elemenata na izvijanje

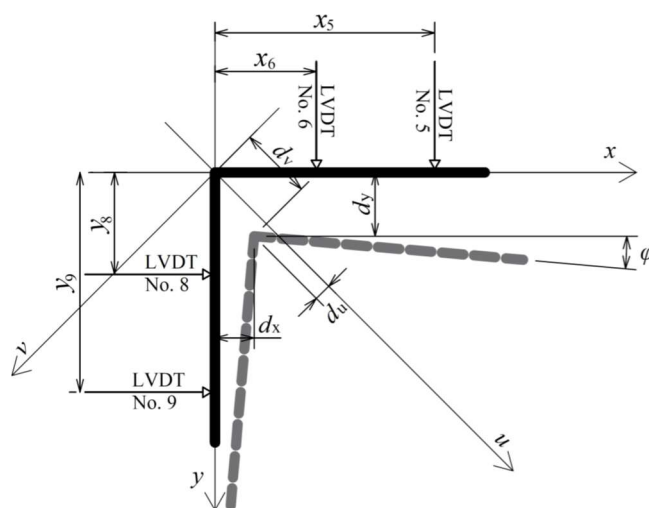
3.6.3 Prikaz rezultata ispitivanja i diskusija

U ovom poglavlju prikazani su rezultati ispitivanja nosivosti elemenata na izvijanje i data je diskusija rezultata za elemente od hladnooblikovanih, vrućevaljanih i laserski zavarenih ugaonika. Prikazani su deformisani oblici uzorka nakon ispitivanja, dijagrami bočnih pomeranja oko jače u-u i slabije v-v ose inercije, kao i torzione deformacije (rotacije) poprečnih preseka u sredini visine uzorka u funkciji prirasta aksijalnih sila pritiska. Takođe su prikazane raspodele aksijalnih dilatacija u poprečnim presecima u sredini visine uzorka izmerene mernim trakama u funkciji prirasta aksijalnih sila pritiska.

Bočna pomeranje kritičnog poprečnog preseka u sredini visine uzorka, u pravcima glavnih osa inercije i odgovarajuća torziona deformacija određene su na osnovu izmerenih veličina bočnih pomeranja ugibomera pozicioniranih u srednjoj visini svakog uzorka. Transformacija pravaca pomeranja je urađena prema proceduri koja je opisana u radu *Landsmana* i grupe autora [39]. Ilustracija ove procedure data je na slici 3.45 na kojoj je punom crnom linijom prikazana spoljna kontura nedeformisanog poprečnog preseka, dok je isprekidanom sivom linijom prikazan poprečni presek nakon deformacije. Položaj ugibomera u skladu sa slikama 3.40 i 3.45 dat je u tabeli 3-18 za sve poprečne preseke. Obrtanje poprečnog preseka φ može odrediti uz pomoć izraza (76) i (77), gde su sa l_5 , l_6 , l_8 i l_9 označena očitana pomeranja ugibomera sa oznakama LVDT5, LVDT6, LVDT8 i LVDT9, redom.

Tabela 3-18 Položaj ugibomera u x-y koordinatnom sistemu

Uzorak	x_5 (mm)	x_6 (mm)	y_8 (mm)	y_9 (mm)
ACF $80 \times 80 \times 4$	65	30	30	65
AHR $100 \times 100 \times 10$	85	15	15	85
AHR $60 \times 60 \times 6$	45	15	15	45
ALW $100 \times 100 \times 10$	85	15	15	85
ALW $60 \times 60 \times 6$	45	15	15	45



Slika 3.45 – Ilustracija položaja deformisanog poprečnog preseka u odnosu na nedeformisani

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{l_9 - l_8}{y_9 - y_8}\right) \quad (76)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{l_5 - l_6}{x_5 - x_6}\right) \quad (77)$$

Komponente pomeranja deformisane konfiguracije u x - y koordinatnom sistemu označene su sa d_x i d_y i mogu se odrediti na osnovu izraza (78) i (79).

$$d_x = (l_9 \tan \varphi + l_5 + y_9 \tan^2 \varphi - x_5 \tan \varphi) / (1 + \tan^2 \varphi) \quad (78)$$

$$d_y = (l_9 - l_5 \tan \varphi + y_9 \tan \varphi + x_5 \tan^2 \varphi) / (1 + \tan^2 \varphi) \quad (79)$$

Pomeranja u pravcu glavnih osa inercije označena sa d_u i d_v mogu se odrediti transformacijom pomeranja iz koordinatnog sistema x - y u koordinatni sistem u - v prema jednačinama (80) i (81).

$$d_u = (d_y - d_x) / \sqrt{2} \quad (80)$$

$$d_v = (d_x + d_y) / \sqrt{2} \quad (81)$$

Zbog obimnog broja podataka u ovom poglavlju prikazani su dijagrami ključnih parametara za reprezentativne uzorke. Za ostale uzorke dijagrami su dati u Prilogu B ove disertacije.

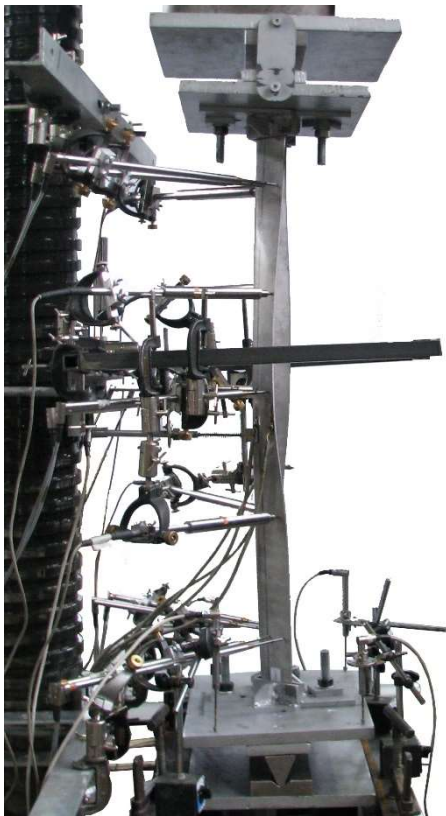
3.6.3.1 Rezultati ispitivanja nosivosti na izvijanje hladnooblikovanih ugaonika

Karakteristični oblici deformacije uzoraka ACF $80 \times 80 \times 4 - 1000$ i ACF $80 \times 80 \times 4 - 2000$ nakon dostizanja granične sile izvijanja prikazani su na slikama 3.46 i 3.47, respektivno.

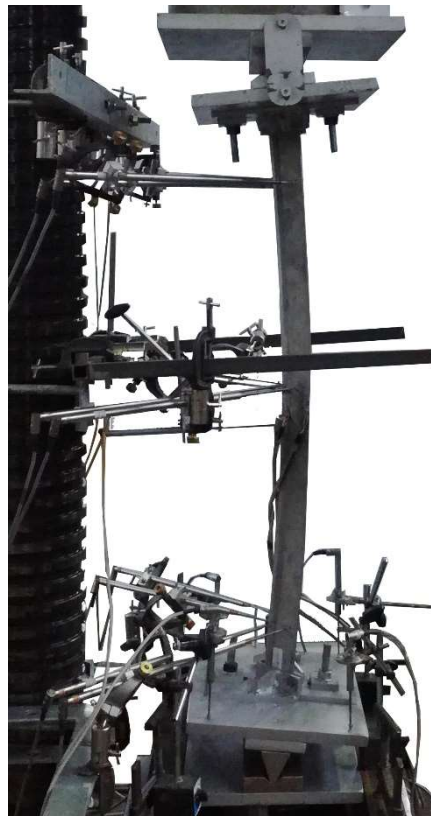
Eksperimentalni rezultati prezentovani u formi dijagrama: sila – bočno pomeranje u pravcima glavnih osa inercije, sila - torziona deformacija poprečnog preseka i sila - aksijalne dilatacije, prikazani su na slikama 3.48, 3.49, 3.50 i 3.51 za uzorke ACF $80 \times 80 \times 4 - 1000 - 3$, ACF $80 \times 80 \times 4 - 1000 - 2$, ACF $80 \times 80 \times 4 - 2000 - 1$ i ACF $80 \times 80 \times 4 - 2000 - 4$, respektivno.

U tabeli 3-19 dati su ključni rezultati ispitivanja nosivosti elemenata na izvijanje za sve uzorke hladnooblikovanih ugaonika. Sa $N_{u, \text{test}}$ označena je nosivost elemenata na izvijanja (granična vrednost sile), dok $d_{u,v}$ i $d_{u,u}$ predstavljaju deformacije poprečnog preseka u sredini visine elementa u pravcu slabije i jače glavne ose inercije pri dostizanju nosivosti elementa, respektivno. Torziona deformacija poprečnog preseka u sredini visine elementa pri graničnoj sili označena je sa φ_u . Za svaku seriju uzoraka prikazana je srednja vrednost, standardna devijacija i koeficijent varijacije za vrednosti granične sile. Takođe, u tabeli 3-19 prikazane su i karakteristične vrednosti nosivosti uzoraka R_k u okviru jedne serije, u skladu sa statističkom obradom podataka koja je definisana u Prilogu D standarda EN 1990:2002 [60]. U tabeli 3-19 prikazan je i oblik izvijanja za svaki uzorak. Oznaka TFB predstavlja torziono-

fleksiono izvijanje (*torsional flexural buckling*), FB označava fleksiono izvijanje oko slabije ose inercije (*flexural buckling*), dok LB označava da je došlo lokalnog izbočavanja (*local buckling*).

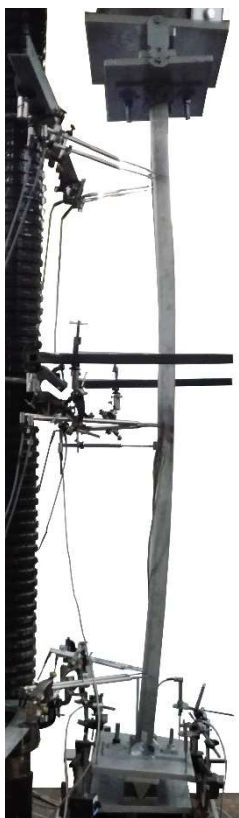


a) ACF $80 \times 80 \times 4 - 1000 - 3$



b) ACF $80 \times 80 \times 4 - 1000 - 2$

Slika 3.46 – Tipični oblici deformacije uzoraka serije ACF $80 \times 80 \times 4 - 1000$

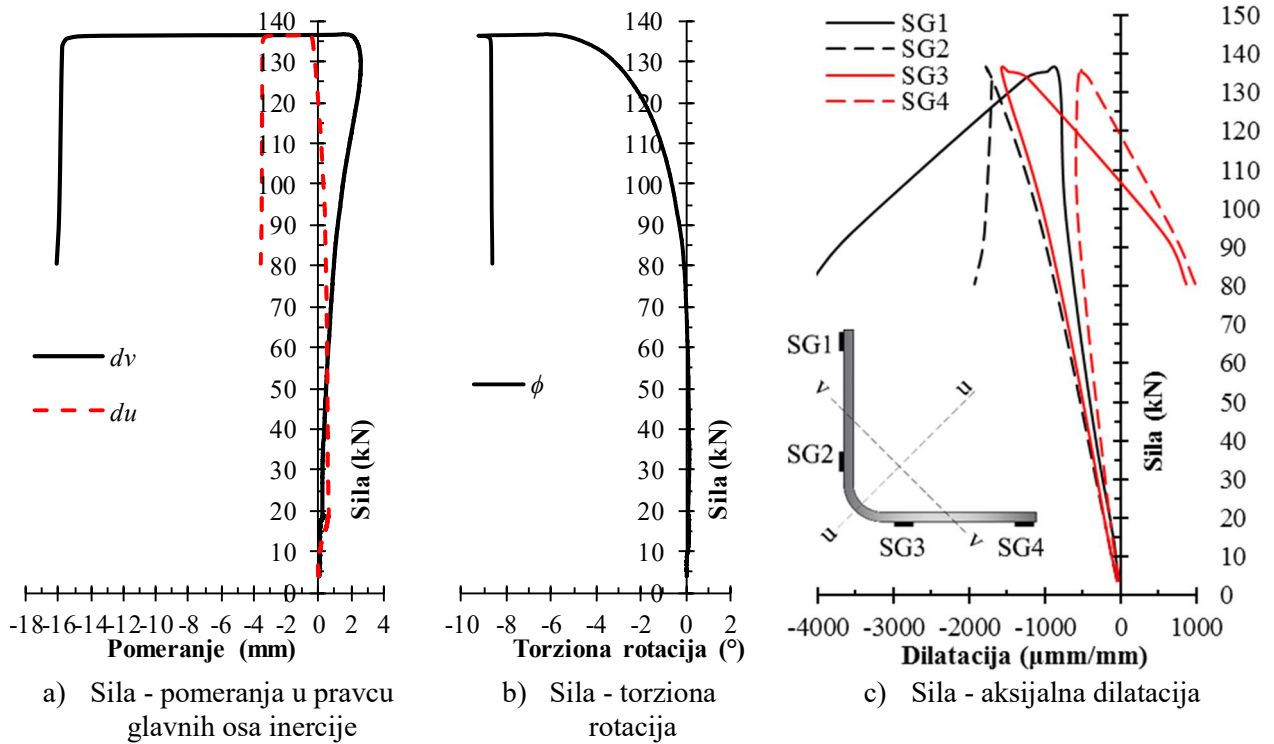


a) ACF $80 \times 80 \times 4 - 2000 - 1$

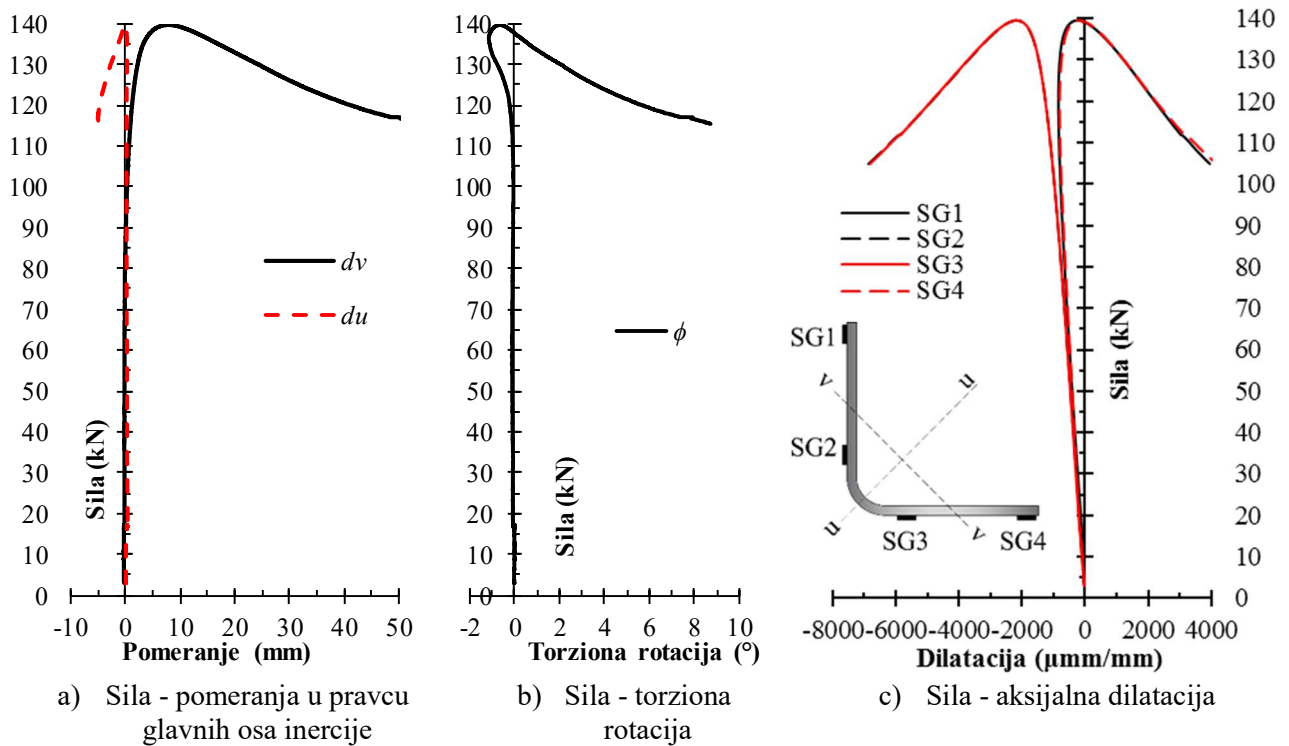


b) ACF $80 \times 80 \times 4 - 2000 - 4$

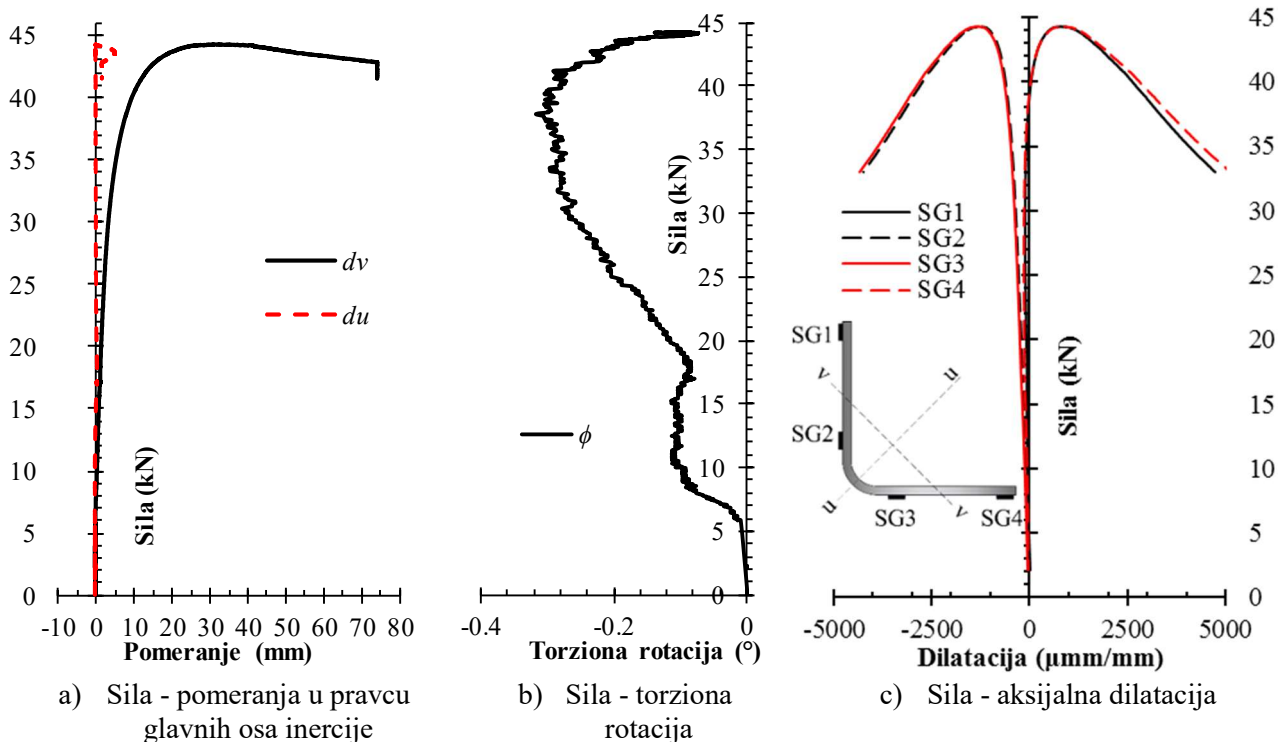
Slika 3.47 – Tipični oblici deformacije uzoraka serije ACF $80 \times 80 \times 4 - 1000$



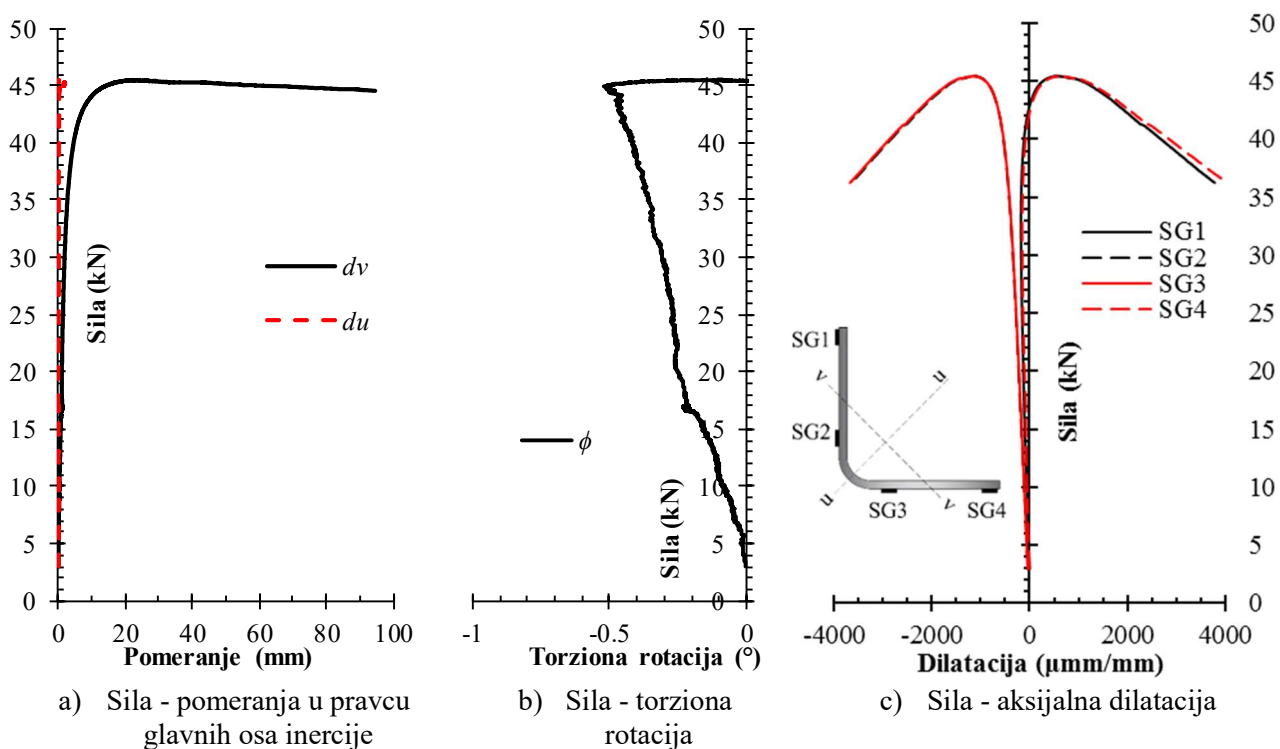
Slika 3.48 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ACF $80 \times 80 \times 4 - 1000 - 3$



Slika 3.49 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ACF $80 \times 80 \times 4 - 1000 - 2$



Slika 3.50 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ACF 80 × 80 × 4 – 2000 – 1



Slika 3.51 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ACF 80 × 80 × 4 – 2000 – 4

Tabela 3-19 Rezultati testa nosivosti na izvijanje elemenata hladnooblikovanih ugaonika

Uzorak	Oblik izvijanja	$N_{u,test}$ (kN)	$d_{u,u}$ (mm)	$d_{u,v}$ (mm)	φ_u (°)
ACF 80 × 80 × 4 – 1000 – 1	TFB+LB+FB	132.5	+0.335	+0.339	-8.013
ACF 80 × 80 × 4 – 1000 – 2	FB+LB+ TFB	139.5	-0.156	+8.149	-0.613
ACF 80 × 80 × 4 – 1000 – 3	TFB+LB+FB	136.6	-0.468	+1.471	-6.234
ACF 80 × 80 × 4 – 1000 – 4	TFB+LB+FB	135.5	-0.288	+0.846	-8.060
Srednja vrednost		136.0			
Standardna devijacija		2.90			
V_x (%)		2.13			
R_k (EN 1990 prilog D)		128.4			
ACF 80 × 80 × 4 – 2000 – 1	FB	44.3	-0.053	+31.487	-0.103
ACF 80 × 80 × 4 – 2000 – 2	FB	45.8	+0.229	+23.948	-0.274
ACF 80 × 80 × 4 – 2000 – 3	FB	46.8	-1.132	+29.094	+0.987
ACF 80 × 80 × 4 – 2000 – 4	FB	45.5	-0.023	+21.972	-0.204
Srednja vrednost		45.6			
Standardna devijacija		1.03			
V_x (%)		2.26			
R_k (EN 1990 prilog D)		42.9			

U skladu sa prikazanim rezultatima testa nosivosti elemenata na izvijanje mogu se konstatovati sledeća zapažanja:

1) Uzorci srednje vitkosti: ACF 80 × 80 × 4 – 1000 ($L = 1000$ mm, $\bar{\lambda}_v = 0.929$)

U seriji uzoraka ACF 80 × 80 × 4 – 1000, tri uzorka, obeležena sa brojevima 1, 3 i 4, pri dostizanju granične vrednosti sile imali su gotovo identičan oblik izvijanja, koji je karakterističan za torziona-fleksioni oblik izvijanja u sprezi sa fleksionim izvijanjem oko slabije ose i lokalnim izbočavanjem. Na slici 3.46a prikazan je oblik izvijanja jednog od ova tri uzorka. Saglasno tabeli 3-19 vidi se da je torziona deformacija dominantna u odnosu na pomeranja u pravcu glavnih osa inercije kod ova tri uzorka. Do istog zaključka može se doći i ako se posmatraju dijagrami prikazani na slikama 3.48a i 3.48b. Na ovim dijagramima može se uočiti da neposredno pre dostizanja granične nosivosti, pomeranja u pravcu glavnih osa inercije imaju male vrednosti, da bi u trenutku dostizanja granične sile došlo do promene znaka pomeranja i naglog rasta nakon dostizanja granične sile. Zavisnost između sile i podužnih dilatacija koja je prikazana na slici 3.48c potvrđuje da je uzorak centrično opterećen na osnovu ujednačenih vrednosti u početnoj fazi ispitivanja. Postepeno razilaženje krivih na dijagramu sila - dilatacija ukazuje na savijanje poprečnog preseka oko obe glavne ose inercije. U trenutku dostizanja granične sile kod ovih uzoraka ceo poprečni presek se nalazi u pritisku. Nakon dostizanja granične sile, zbog savijanja poprečnog preseka oko obe glavne ose inercije, jedan krak ugaonika ostaje u pritisku, dok drugi krak ugaonika postepeno prelazi u zatezanje.

Za razliku od ova tri uzorka, oblik izvijanja uzorka ACF 80 × 80 × 4 – 1000 – 2 određen je interakcijom fleksionog izvijanja oko slabije ose i lokalnim izbočavanjem poprečnog preseka sa izrazitim pomeranjem u ravni upravno na slabiju osu inercije (pomeranje d_v), malim vrednostima pomeranja u ravni upravno na jaču osu inercije (pomeranje d_u) i malim vrednostima torzionog obrtanja poprečnog preseka. Zavisnost između pomeranja d_v i sile, koje je prikazana na slici 3.49a, predstavljena je glatkom krivom sa malim vrednostima pomeranja u početnoj fazi opterećenja. Neposredno pre dostizanja granične sile torziona rotacija preseka je veoma mala, da bi se postepeno povećavala do granične nosivosti. Nakon dostizanja granične nosivosti torziona rotacija ubrzano raste što ukazuje na osetljivost poprečnog preseka na torziona-fleksiono izvijanje i lokalno izbočavanje poprečnog preseka. Zapis između sile i podužnih dilatacija takođe jasno ukazuju da se radi o dominantnom fleksionom izvijanju oko slabije ose. U trenutku dostizanja granične nosivosti ceo poprečni presek je pritisnut, da bi nakon toga kraj krakova uzorka postepeno prešao u zatezanje, dok

preostali deo poprečnog preseka beleži povećanje pritiska, što jasno ukazuje na to da je savijanje oko slabije ose inercije dominantno u odnosu na savijanje oko jače ose inercije. Na drugačiji odziv uzorka ACF $80 \times 80 \times 4 - 1000 - 2$ u odnosu na preostala tri uzorka iz ove serije može uticati pojava početnog ekscentriciteta unosa sile, tako da se tačka unosa sile pomerila u pravcu glavne ose inercije ka uglu profila. Ovo povećava njegovu otpornost i dovodi do drugačijeg oblika izvijanja u odnosu na preostale uzorke kod kojih torziona-fleksioni oblik izvijanja predstavlja dominantan oblik izvijanja.

Uprkos različitim oblicima izvijanja, može se reći da su rezultati u pogledu granične vrednosti nosivosti elemenata na izvijanje u ovoj seriji prilično ujednačeni u opsegu od 132.5 kN do 139.5 kN, sa srednjom vrednosti od 136.0 kN i standardnom devijacijom od 2.9 kN. Karakteristična nosivost uzoraka određena prema Prilogu D standarda EN 1990:2002 [60] iznosi 128.4 kN.

2) Uzorci velike vitkosti: ACF $80 \times 80 \times 4 - 2000$ ($L = 2000$ mm, $\bar{\lambda}_v = 1.717$)

Karakterističan oblik izvijanja za uzorke serije ACF $80 \times 80 \times 4 - 2000$ predstavlja fleksiono izvijanje oko slabije ose inercije, kao što je prikazano na slici 3.47. Zapisi između pomeranja i sile, kao i torziona rotacije i sile koji su prikazani na slikama 3.50 i 3.51 pokazuju da se pri dostizanju granične sile javljaju dominantna pomeranja u ravni upravnoj na slabiju osu inercije (pomeranje d_v), dok su vrednosti pomeranja u ravni upravnoj na jaču osu (pomeranje d_u) i torziona deformacije izrazito mala. Dominantne vrednosti pomeranja d_v u odnosu na ostale dve komponente deformacija ukazuje na to da se radi o čistom fleksionom izvijanju oko slabije ose inercije. Ovo potvrđuje i zapis podužnih dilatacija u funkciji sile, prikazan na slikama 3.50c i 3.51c. Dijagrami mernih traka se postepeno razdvajaju u paru tako da su, nakon ili neposredno pre dostizanja granične nosivosti, krajevi krakova zategnuti, dok je deo poprečnog preseka ka uglu pritisnut.

Vrednosti graničnih sila su ujednačene u okviru ove serije uzoraka. Kreću se u opsegu od 44.3 kN do 46.8 kN, sa srednjom vrednosti od 45.6 kN i sa standardnom devijacijom od 1.03 kN. Karakteristična vrednost nosivosti na izvijanje uzoraka ove serije iznosi 42.9 kN.

3.6.3.2 Poređenje rezultata ispitivanja sa proračunskim vrednostima za ACF uzorke

U tabeli 3-20 prikazano je poređenje srednje vrednosti nosivosti na izvijanje elemenata sa proračunskim vrednostima prema standardima EN 1993-1-4 [2] i AS/NZS 4673 [43]. Poređenje je prikazano kao odnos $N_{u,test}$ i $N_{u,pred}$, gde $N_{u,test}$ predstavlja srednju vrednost granične sile dobijene testom izvijanja za određenu seriju, dok $N_{u,pred}$ predstavlja proračunsku vrednost prema pomenutim standardima. Specifičnosti i postupak proračuna prema ovim standardima dati su u poglavlju 2.6 i poglavlju 2.7 ove disertacije. Za određivanje proračunske vrednosti nosivosti na izvijanje, saglasno odredbama EN 1993-1-4 [2] koje se koriste za hladnooblikovane elemente primenjena je kriva izvijanja koju definiše granična relativna vitkost $\bar{\lambda}_0 = 0.4$, i koeficijent imperfekcije $\alpha=0.49$ odnosno kriva izvijanja koju definiše granična relativna vitkost $\bar{\lambda}_0 = 0.2$, i koeficijent imperfekcije $\alpha=0.34$ za fleksiono i torziona-fleksiono izvijanje, respektivno.

Na osnovu poređenja eksperimentalnih rezultata sa proračunskim vrednostima može se zaključiti da razmatrani propisi predviđaju dobar oblik izvijanja u oblasti srednje vitkosti i velike vitkosti. Međutim, proračunske vrednosti nosivosti sračunate prema ovim standardima daju vrednosti koje su na strani sigurnosti i veoma konzervativne. Standard AS/NZS 4673 [43] daje manje konzervativne rezultate u odnosu na standard EN 1993-1-4 [2]. U oblasti srednje vitkosti odnos nosivosti dobijene u eksperimentu i proračunske vrednosti nosivosti na izvijanje iznosi 4.98 i 3.16 za standarde EN 1993-1-4 i AS/NZS 4673, respektivno. Dok je u oblasti velike vitkosti ovaj odnos nešto manji i iznosi 2.58 i 1.78 za standarde EN 1993-1-4 i AS/NZS 4673, respektivno.

Tabela 3-20 Poređenje eksperimentalnih rezultata sa proračunskim vrednostima za ACF

Uzorak	Oblik izvijanja	Bezdimezionna vitkost $\bar{\lambda}_v$	EN 1993-1-4 AS/NZS 4673	
			$N_{u,test} / N_{u,pred}$	$N_{u,test} / N_{u,pred}$
ACF 80 × 80 × 4 – 1000	FTB+LB+FB	0.929	4.98	3.16
ACF 80 × 80 × 4 – 2000	FB	1.717	2.58	1.78

3.6.3.3 Rezultati ispitivanja nosivosti na izvijanje vrućevaljanih ugaonika

Tipični oblici deformacije vrućevaljanih uzoraka male, srednje i velike vitkosti nakon dostizanja granične sile izvijanja prikazani su na slikama 3.52, 3.53 i 3.54, respektivno. U oblasti male vitkosti ispitana je jedna serija uzoraka - AHR 100 × 100 × 10 – 500, u oblasti srednje i velike vitkosti ispitane su po dve serije uzoraka AHR 100 × 100 × 10 – 1500 i AHR 60 × 60 × 6 – 800, odnosno AHR 100 × 100 × 10 – 2500 i AHR 60 × 60 × 6 – 2000.

Na slikama 3.55, 3.56, 3.57, 3.58, 3.59, 3.60, 3.61 i 3.62 prikazani su ključni eksperimentalni rezultati u sredini visine elementa, prezentovani u formi dijagrama sila - pomeranje u pravcima glavnih osa inercije, sila - torziona rotacija poprečnog preseka i sila - aksijalne dilatacije za uzorke AHR 100 × 100 × 10 – 500 – 2, AHR 100 × 100 × 10 – 500 – 3, AHR 60 × 60 × 6 – 800 – 1, AHR 100 × 100 × 10 – 1500 – 2, AHR 100 × 100 × 10 – 1500 – 3, AHR 60 × 60 × 6 – 2000 – 2, AHR 60 × 60 × 6 – 2000 – 3 i AHR 100 × 100 × 10 – 2500 – 3, respektivno.

U tabeli 3-21 dati su ključni rezultati ispitivanja nosivosti elemenata na izvijanje za sve uzorke vrućevaljanih ugaonika. Sve oznake u tabeli imaju isto značenje kao kod rezultata za hladnooblikovane uzorke. Za svaku seriju uzoraka prikazana je srednja vrednost, standardna devijacija i koeficijent varijacije za vrednosti granične sile, kao i karakteristična vrednost nosivosti uzoraka na izvijanje. U tabeli 3-21 prikazan je i oblik izvijanja za svaki uzorak, sa oznakama koje imaju isto značenje kao što je to bio slučaj kod uzoraka hladnooblikovanih ugaonika.

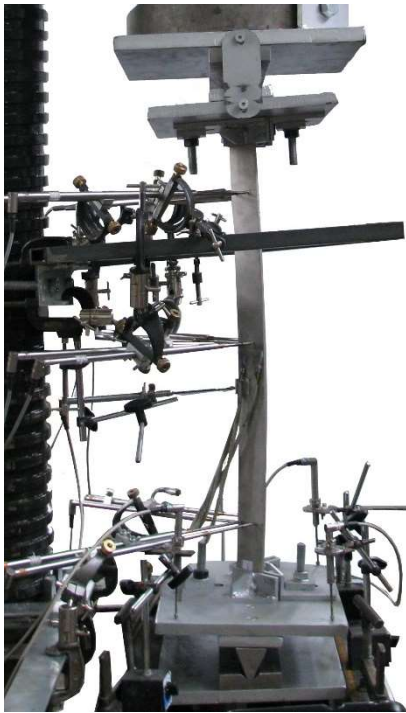


a) AHR 100 × 100 × 10 – 500 – 2

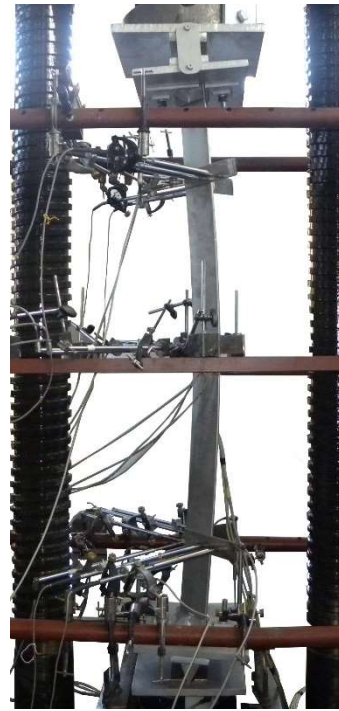


b) AHR 100 × 100 × 10 – 500 – 3

Slika 3.52 – Tipični oblici deformacije vrućevaljanih uzoraka u oblasti male vitkosti



a) AHR $60 \times 60 \times 6 - 800 - 1$



b) AHR $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 2$

Slika 3.53 – Tipični oblici deformacije vrućevaljanih uzoraka u oblasti srednje vitkosti

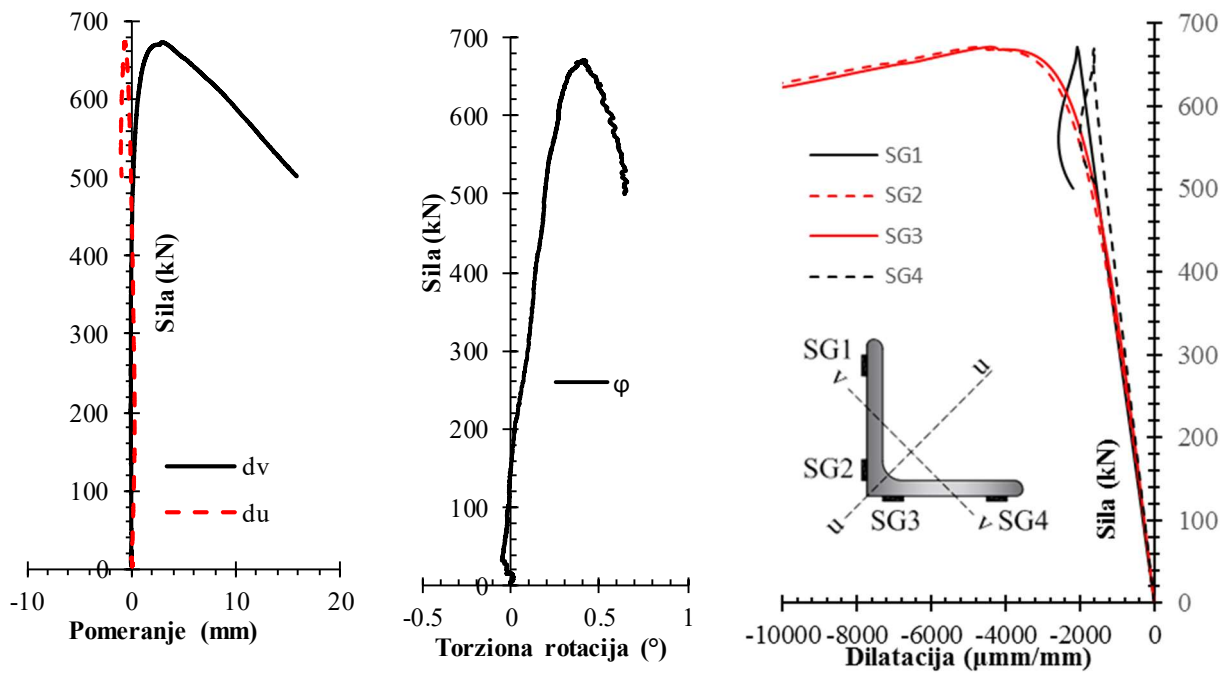


a) AHR $60 \times 60 \times 6 - 2000 - 2$



b) AHR $100 \times 100 \times 10 - 2500 - 3$

Slika 3.54 – Tipični oblici deformacije vrućevaljanih uzoraka u oblasti visoke vitkosti

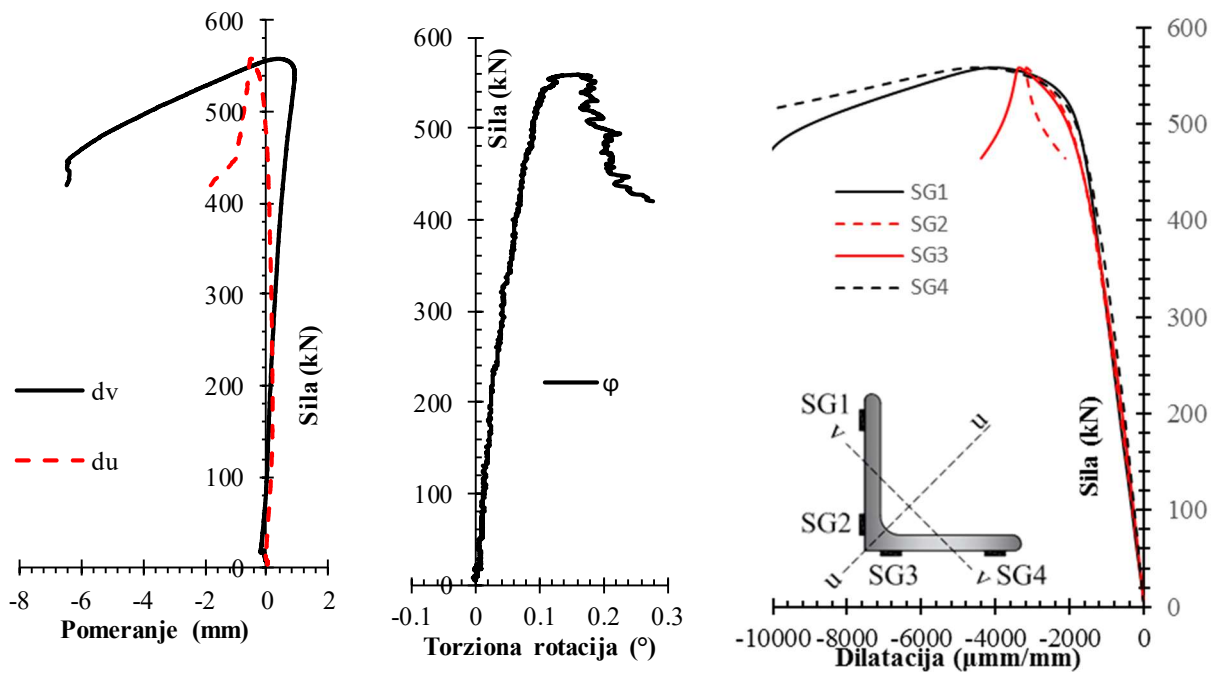


a) Sila - pomeranja u pravcu glavnih osa inercije

b) Sila - torziona rotacija

c) Sila - aksijalna dilatacija

Slika 3.55 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR 100 × 100 × 10 – 500 – 2

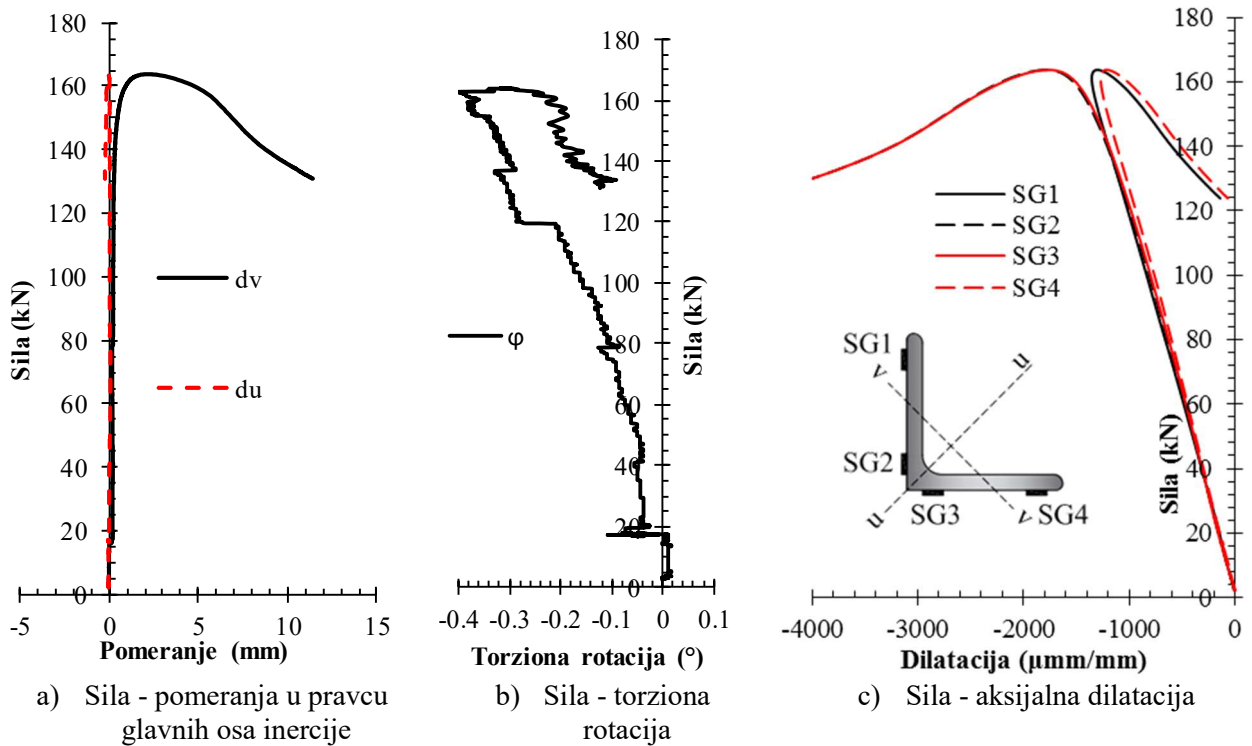


a) Sila - pomeranja u pravcu glavnih osa inercije

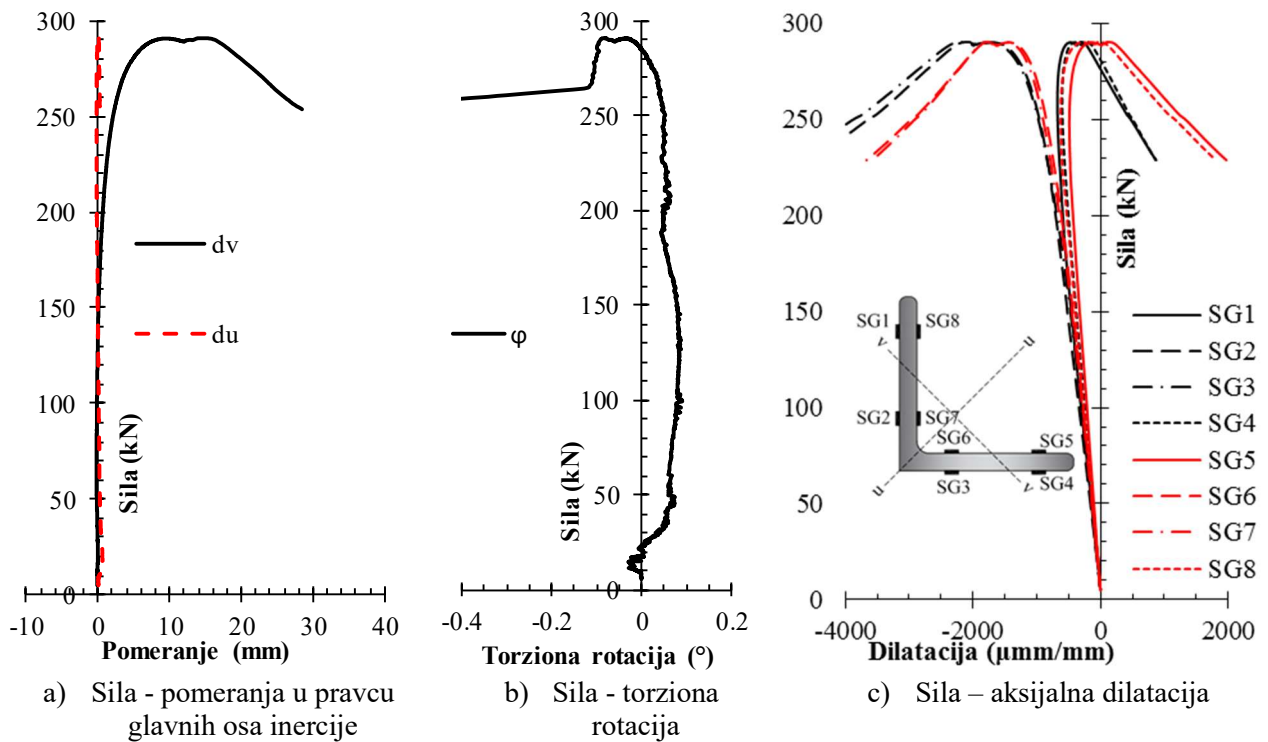
b) Sila - torziona rotacija

c) Sila - aksijalna dilatacija

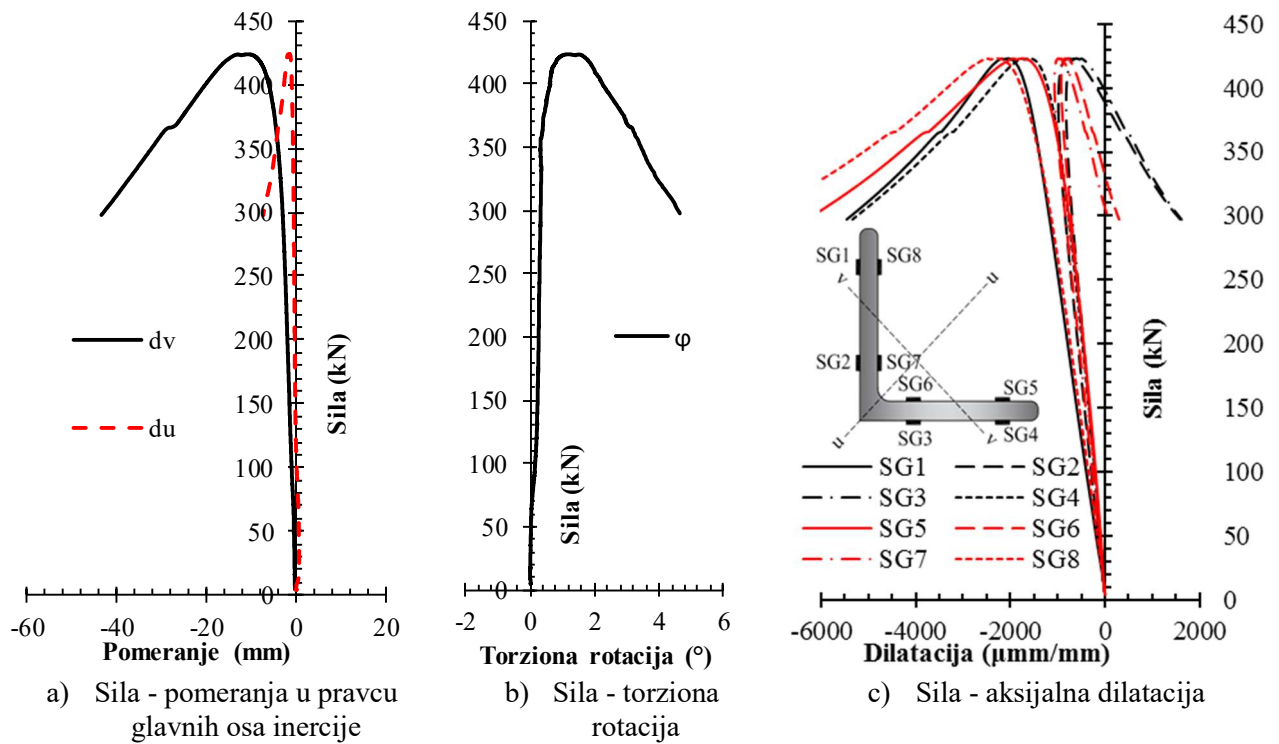
Slika 3.56 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR 100 × 100 × 10 – 500 – 3



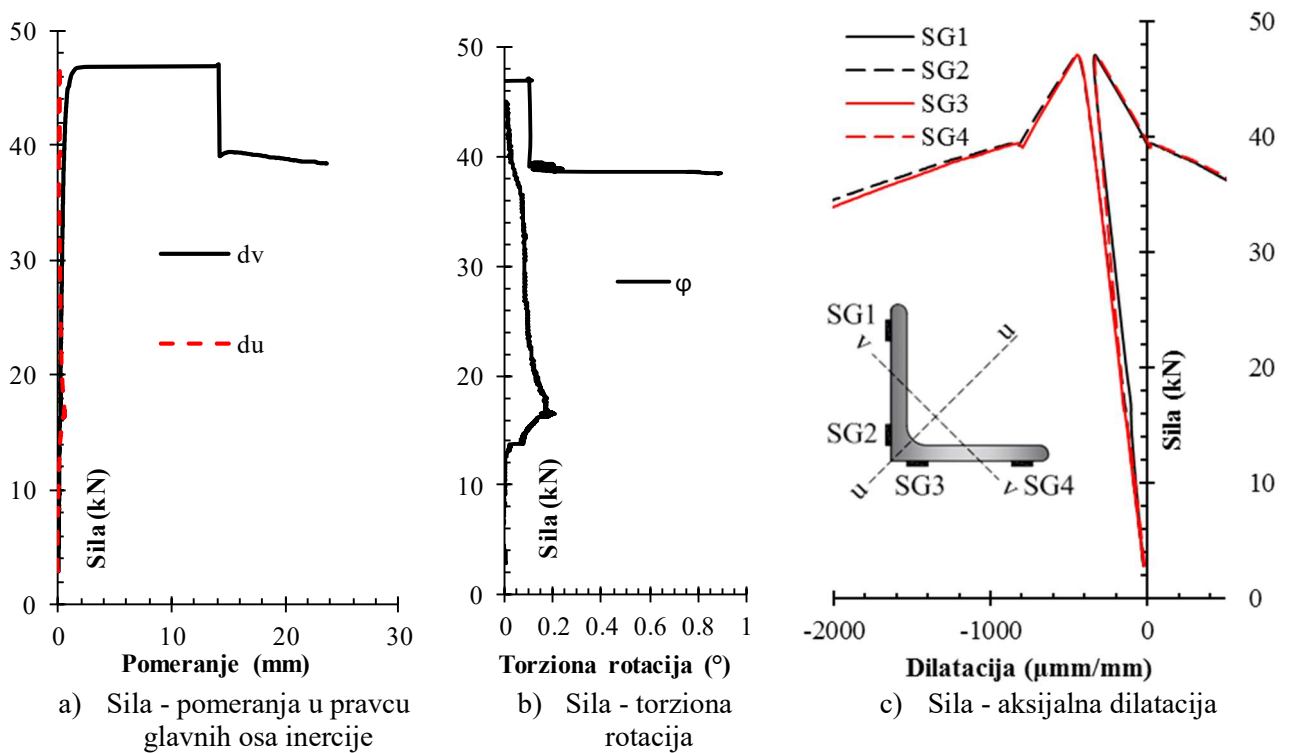
Slika 3.57 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR 60 × 60 × 6 – 800 – 1



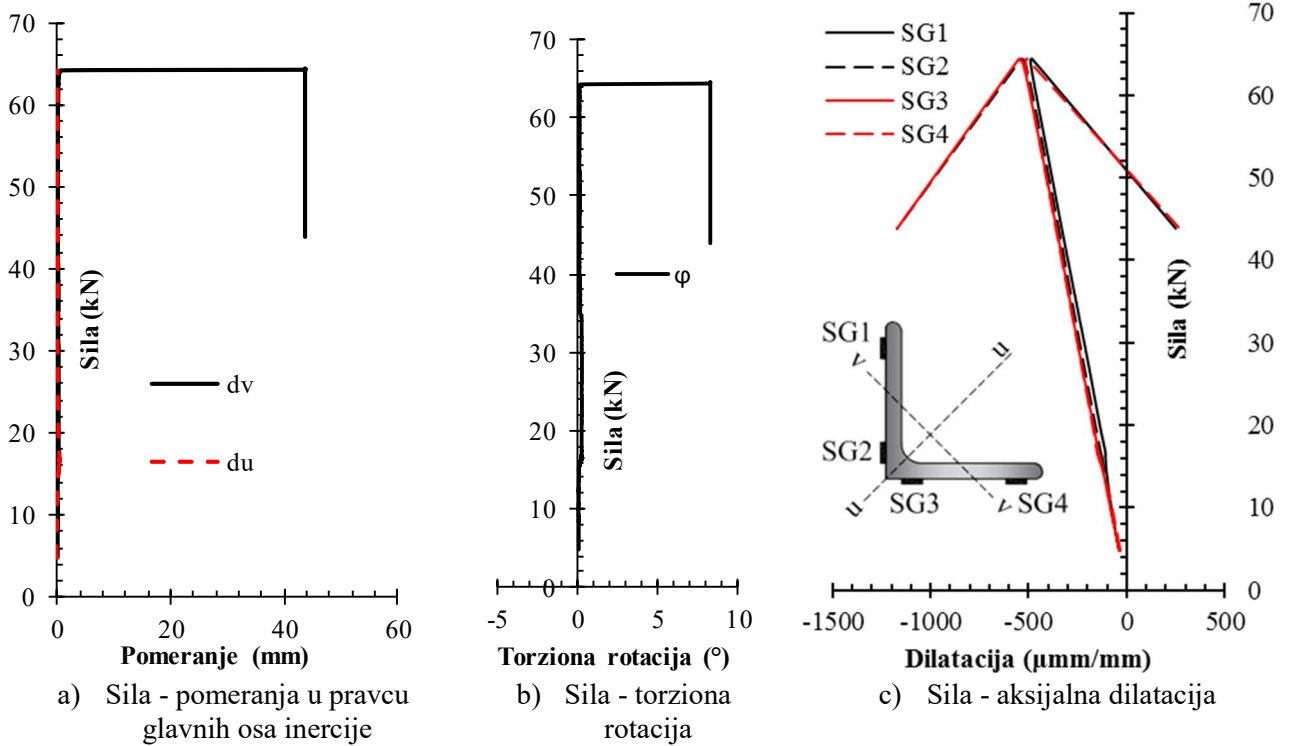
Slika 3.58 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR 100 × 100 × 10 – 1500 – 2



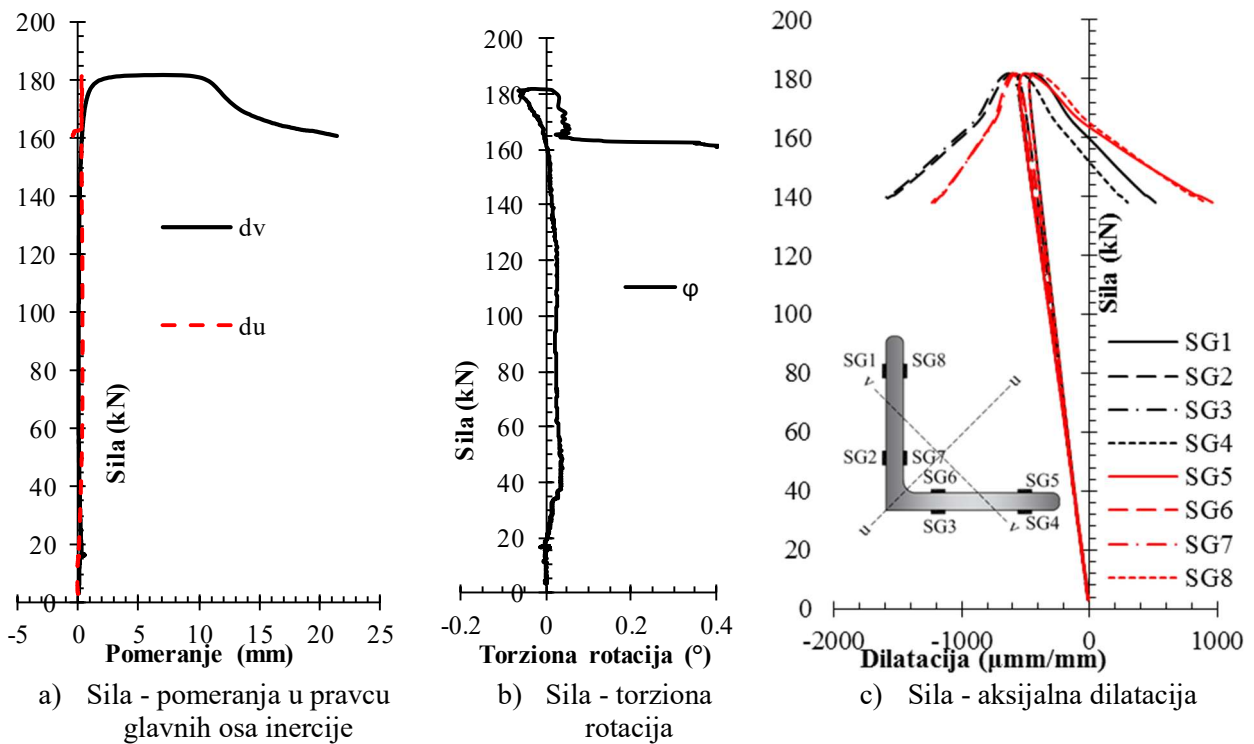
Slika 3.59 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR 100 × 100 × 10 – 1500 – 3



Slika 3.60 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR 60 × 60 × 6 – 2000 – 2



Slika 3.61 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR 60 × 60 × 6 – 2000 – 3



Slika 3.62 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR 100 × 100 × 10 – 2500 – 3

Tabela 3-21 Rezultati testa nosivosti na izvijanje elementa vrućevaljanih ugaonika

Uzorak	Oblik izvijanja	$N_{u,test}$ (kN)	$d_{u,u}$ (mm)	$d_{v,u}$ (mm)	φ_u (°)
AHR 60 × 60 × 6 – 800 – 1	FB	163.9	-0.023	+2.235	-0.298
AHR 60 × 60 × 6 – 800 – 2	FB	145.1	-0.388	-4.308	+0.126
AHR 60 × 60 × 6 – 800 – 3	FB	172.2	-0.142	+1.834	+0.097
AHR 60 × 60 × 6 – 800 – 4	FB	151.6	-0.081	+3.170	+0.343
Srednja vrednost		158.2			
Standardna devijacija		12.2			
V_x (%)		7.7			
R_k (EN 1990 prilog D)		126.2			
AHR 60 × 60 × 6 – 2000 – 1	FB	38.0	+0.384	+9.609	-0.175
AHR 60 × 60 × 6 – 2000 – 2	FB	47.1	+0.198	+14.113	+0.098
AHR 60 × 60 × 6 – 2000 – 3	FB + TFB	64.4	+2.313	+32.614	+8.286
AHR 60 × 60 × 6 – 2000 – 4	FB	43.8	+0.987	-10.246	-1.186
Srednja vrednost		48.3			
Standardna devijacija		11.4			
V_x (%)		23.6			
R_k (EN 1990 prilog D)		18.4			
AHR 100 × 100 × 10 – 500 – 1	FB + TFB	466.0	-0.921	-2.488	+0.296
AHR 100 × 100 × 10 – 500 – 2	FB + TFB	671.7	-0.668	+2.987	+0.409
AHR 100 × 100 × 10 – 500 – 3	TFB + FB	558.7	-0.527	+0.369	+0.158
AHR 100 × 100 × 10 – 500 – 4	FB + TFB	595.2	+0.303	-1.617	+0.585
Srednja vrednost		572.9			
Standardna devijacija		85.4			
V_x (%)		14.9			
R_k (EN 1990 prilog D)		348.2			
AHR 100 × 100 × 10 – 1500 – 1	FB	333.7	-0.722	+6.621	-0.369
AHR 100 × 100 × 10 – 1500 – 2	FB	290.2	-0.098	+9.506	-0.036
AHR 100 × 100 × 10 – 1500 – 3	FB + TFB	423.0	-1.533	-10.467	+1.163
AHR 100 × 100 × 10 – 1500 – 4	FB	289.4	-0.672	-8.587	+0.561
Srednja vrednost		334.1			
Standardna devijacija		62.8			
V_x (%)		18.8			
R_k (EN 1990 prilog D)		169.0			
AHR 100 × 100 × 10 – 2500 – 1	FB	182.9	-0.117	-8.279	-0.056
AHR 100 × 100 × 10 – 2500 – 2	FB	188.9	-0.857	-8.791	+0.114
AHR 100 × 100 × 10 – 2500 – 3	FB	181.8	0.294	+6.155	-0.035
AHR 100 × 100 × 10 – 2500 – 4	FB	204.7	-0.462	+17.624	-0.059
Srednja vrednost		186.5			
Standardna devijacija		14.1			
V_x (%)		7.6			
R_k (EN 1990 prilog D)		149.3			

U skladu sa prikazanim rezultatima testa nosivosti elemenata na izvijanje mogu se konstatovati sledeća zapažanja:

1) Uzorci male vitkosti: AHR 100 × 100 × 10 – 500 ($L = 500$ mm, $\bar{\lambda}_v = 0.421$)

Oblik izvijanja uzoraka serije AHR 100 × 100 × 10 – 500 pri dostizanju granične sile predstavljen je kombinacijom fleksionog izvijanja oko slabije ose i torziono-fleksionog izvijanja. Tri uzorka iz ove serije, sa oznakama 1, 2 i 4, imali su značajne vrednosti pomeranja u ravni upravnoj na slabiju osu inercije (pomeranje d_v) u kombinaciji sa manjim pomeranjima u ravni upravnoj na jaču

osu (pomeranje d_u) i manjom torzionom rotacijom što se može videti na slici 3.52a i u tabeli 3-21. Zapis sila - pomeranje d_v koji je prikazan na slici 3.55a predstavlja glatku krivu na kojoj se uočava povećanje prirasta pomeranja neposredno pre dostizanja granične sile. Nakon dostizanja granične nosivosti, sila opada uz postepeno povećanje deformacija bez naglih skokova. Pojava pomeranja u ravni upravnoj na jaču osu na dijagramu sila -pomeranja prikazanom na slici 3.55a postaje vidljiva tek pri velikoj vrednosti sile i nakon dostizanja granične vrednosti sile nema značajan prirast. Međutim, čak i ove male vrednosti pomeranja izazivaju torziju rotaciju poprečnog preseka, koja je prikazana na dijagramu 3.55b, gde se vidi konstantan prirast torziona rotacije, što ukazuje na osetljivost poprečnog preseka na torziona-fleksiono izvijanje. Na dijagramu podužnih dilatacija koje su prikazane na slici 3.55c u funkciji nanošenja opterećenja može se uočiti da je uzorak centrično opterećen jer postoji poklapanje mernih traka neposredno pre dostizanja granične sile kada dolazi do grananja krivih. Nakon dostizanja granične vrednosti sile, dolazi do neravnomernog opterećenja uzorka, tako da deo poprečnog preseka koji je bliži uglu L profila trpi veći pritisak u odnosu na deo poprečnog preseka u zoni kraja krakova.

Za razliku od ovih uzoraka, kod uzorka AHR $100 \times 100 \times 10 - 500 - 3$ oblik izvijanja određen je dominantnom torziona-fleksionom deformacijom u kombinaciji sa fleksionim izvijanjem oko slabije ose, kao što je prikazano na slici 3.52b i u tabeli 3-21. Dijagrami sila - pomeranja i sila - torziona rotacija koji su prikazani na slici 3.56 pokazuju isti trend kao kod preostalih uzoraka iz ove serije – postepeni rast do dostizanja granične nosivosti na torziona-fleksiono izvijanje. U delu dijagrama nakon dostizanja granične nosivosti uočava se povećanje svih deformacija, ali sa značajnijim vrednostima primećenim u ravni upravnoj na slabiju osu, što ukazuje na osetljivost uzorka na fleksiono izvijanje oko slabije ose inercije. Na dijagramima prikazanim na slici 3.56c koji daju zavisnost između sile i podužne dilatacije uočava se poklapanje krivih sve do dostizanja granične sile, što ukazuje na centričnu opterećenost uzorka. Nakon dostizanja sile dolazi do razilaženja dijagrama, kao posledica savijanja oko obe glavne ose inercije. Takođe, prisutno je neravnomerno opterećenje poprečnog preseka, ali za razliku od ostala tri uzorka u ovoj seriji sada imamo veći pritisak na krajevima krakova, a manji pritisak u uglu profila.

Granična nosivost uzorka na izvijanje kreće se u opsegu od 466.0 kN do 671.7 kN, sa srednjom vrednosti od 572.9 kN, standardnom devijacijom 85.4 kN i koeficijentom varijacije od 14.9%.

2) Uzorci srednje vitkosti: AHR $60 \times 60 \times 6 - 800$ ($L = 800$ mm, $\bar{\lambda}_v = 1.011$) i AHR $100 \times 100 \times 10 - 1500$ ($L = 1500$ mm, $\bar{\lambda}_v = 1.041$)

Tipičan oblik izvijanja za uzorke iz serije AHR $60 \times 60 \times 6 - 800$, koji pripadaju oblasti srednje vitkosti, je fleksiono izvijanje oko slabije ose, kao što je to prikazano na slici 3.53a. Dijagrami sila - pomeranja i sila - torziona rotacija koji su prikazani na slikama 3.57a i 3.57b ukazuju na značajno veća pomeranja u ravni upravnoj na slabiju osu inercije (pomeranje d_v) u odnosu na pomeranja u ravni upravnoj na jaču osu inercije (pomeranje d_u) i u odnosu na torziona rotacije, što se može i videti u tabeli 3-21 gde su prikazane ove vrednosti pri dostizanju granične sile izvijanja. Fleksiono izvijanje oko slabije ose uočava se i na dijagramu sila - aksijalne dilatacije koji je prikazan na slici 3.57c. Krive se neposredno pre dostizanja graničnog opterećenja postepeno razdvajaju kako raste pomeranje koje izaziva savijanje oko slabije ose. U celom opsegu merenja poprečni presek u sredini visine je u pritisku, s tim što nakon izvijanja, usled savijanja oko slabije ose inercije, pritisak raste u uglu profila, dok se ujedno smanjuje na krajevima krakova profila.

Kod tri uzorka, obeleženih oznakama 1, 2 i 4, u seriji AHR $100 \times 100 \times 10 - 1500$ došlo je do fleksionog izvijanja oko slabije ose inercije, kao što je to prikazano na slici 3.53b. Ovakav oblik izvijanja praćen je značajnim pomeranjima u ravni upravnoj na slabiju osu inercije (pomeranje d_v), sa gotovo nultim pomeranjima u drugoj relevantnoj ravni (pomeranje d_u) i malim vrednostima torziona rotacije, što se može videti na slikama 3.58a i 3.58b, kao i u tabeli 3-21. Fleksiono izvijanje oko slabije ose inercije može se konstatovati i na osnovu zapisa podužne dilatacije u funkciji nanošenja opterećenja koje je prikazano na slici 3.58c. Grananje dijagrama mernih traka postepeno je i prati pomeranje d_v koje izaziva savijanje oko slabije ose. U trenutku dostizanja granične vrednosti

nosivosti na izvijanje ceo poprečni presek na mestu gde su merene dilatacije je u pritisku, da bi nakon toga deo preseka uz kraj krakova prešao u zatezanje, dok je ugao preseka imao rast pritiska.

U odnosu na ova tri uzorka, kod uzorka AHR $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 3$ uočene su veće vrednosti deformacija koje su karakteristične za torziono-fleksiono izvijanje, kao što je to prikazano u tabeli 3-21. Na slici 3.59a pored pomeranja koje izaziva savijanje oko slabije ose (pomeranje d_v) uočava se i prirast pomeranja upravnog na jaču osu inercije (pomeranje d_u). Male vrednosti pomeranja d_u izazivaju savijanje oko jače ose i pojavu torzione rotacije, koja naglo raste nakon dostizanja granične vrednosti sile, kao što je to prikazano na slici 3.59b. Dijagrami podužnih dilatacija u funkciji sile takođe ukazuju na kombinaciju fleksionog izvijanja oko slabije ose i torziono-fleksionog izvijanja. Rano grananje krivih ovog dijagrama i njihovo razdvajanje na četiri grupe potvrđuje da dolazi do savijanja oko obe glavne ose inercije. Nakon dostizanja granične sile, kod krajeva krakova uočava se rast pritiska, dok u uglu profila postepeno pritisak prelazi u zatezanje što ukazuje na dominantno fleksiono izvijanje oko slabije ose inercije.

Nosivost na izvijanje uzoraka serije AHR $60 \times 60 \times 6 - 800$ kreće se u opsegu od 145.1 kN do 172.2 kN, srednja vrednost granične sile iznosi 158.2 kN, sa standardnom devijacijom od 12.2 kN i koeficijentom varijacije od 7.7%.

Granične vrednosti sile kod uzoraka serije AHR $100 \times 100 \times 10 - 1500$ su u opsegu od 290.2 kN do 423.0 kN, sa srednjom vrednosti od 334.1 kN, standardnom devijacijom od 62.8 kN, i koeficijentom varijacije od 18.8%.

3) Uzorci velike vitkosti: AHR $60 \times 60 \times 6 - 2000$ ($L = 2000$ mm, $\bar{\lambda}_p = 2.250$) i AHR $100 \times 100 \times 10 - 2500$ ($L = 2500$ mm, $\bar{\lambda}_p = 1.660$)

Prilikom ispitivanja nosivosti na izvijanje, tri uzorka serije AHR $60 \times 60 \times 6 - 2000$ obeležena brojevima 1, 2 i 4 su pokazala ponašanje koje je karakteristično za fleksiono izvijanje oko slabije ose kao što je to prikazano na slici 3.54a. Dijagrami prikazani na slikama 3.60a i 3.60b ukazuju na postojanje pomeranja koje izaziva savijanje oko slabije ose, dok su torzione rotacije i pomeranja u drugoj relevantnoj ravni gotovo jednaka nuli. Krive zapisa mernih traka takođe ukazuju na to da se radi o fleksionom izvijanju oko slabije ose inercije – krive se postepeno granaju, bez indicija da postoji savijanje oko jače ose inercije. U trenutku dostizanja granične sile, ceo poprečni presek je u pritisku, da bi se nakon toga pritisak u uglovima povećao, a kraj krakova postepeno prelazio u zatezanje.

Kod uzorka AHR $60 \times 60 \times 6 - 2000 - 3$ se može reći da oblik izvijanja predstavlja kombinaciju fleksionog izvijanja oko slabije ose i torziono-fleksionog izvijanja. Prema vrednostima deformacija pri dostizanju granične sile datim u tabeli 3-21 uočava se da osim pomeranja u ravni upravnoj na slabiju osu inercije (pomeranje d_v) postoje i nezamernarljive vrednosti pomeranja u drugoj relevantnoj ravni (pomeranje d_u), kao i torzione rotacije. Prema dijagramima deformacija prikazanim na slikama 3.61a i 3.61b može se zaključiti da su vrednosti svih deformacija neposredno pre dostizanja granične vrednosti sile bile ujednačene i male. Do izvijanja dolazi u trenutku naglog skoka kako pomeranja tako i rotacije poprečnog preseka. Na slici 3.61c se uočava zapis mernih traka koji je karakterističan za fleksiono izvijanje oko slabije ose inercije. Ujednačene vrednosti dilatacija pre, i njihovo naglo grananje u trenutku dostizanja graničnog opterećenja, potvrđuju da neposredno pre dostizanja graničnog opterećenja nije bilo značajnih deformacija. U trenutku dostizanja granične sile ceo presek je uniformno pritisnut, da bi se nakon toga naglo povećao pritisak u uglu profila, a krajevi krakova prešli u zatezanje.

Sva četiri uzorka serije AHR $100 \times 100 \times 10 - 2500$ u trenutku granične nosivosti imali su oblik izvijanja karakterističan za fleksiono izvijanje oko slabije ose inercije. Na dijagramima deformacija prikazanim na slikama 3.62a i 3.62b uočeno je dominantno pomeranje u ravni upravnoj na slabiju osu inercije (pomeranje d_v) u odnosu na pomeranje u drugoj relevantnoj ravni i u odnosu na torzionu deformaciju, koji su imali gotovo zanemarljive vrednosti. Takođe, dijagram podužnih dilatacija u funkciji sile prikazan na slici 3.62c potvrđuje da se radi o fleksionom izvijanju. Dijagrami se granaju neposredno pre dostizanja granične sile uz jasno uočljivo savijanje oko slabije ose, usled čega krajevi

krakova nakon dostizanja granične sile prelaze iz pritiska u zatezanje, dok se u uglu profila povećava pritisak.

Granična vrednost sile za uzorke serije AHR $60 \times 60 \times 6 - 2000$ kreće se od 38.0 kN do 64.4 kN, sa srednjom vrednosti od 48.3 kN, standardnom devijacijom od 11.4 kN i koeficijentom varijacije od 23.6%. Veće rasipanje rezultata u ovoj seriji može se pripisati različitim vrednostima početnih geometrijskih imperfekcija, različitim vrednostima i raspodeli zaostalih napona, kao i ekscentričnosti delovanja sile koje i pored malih vrednosti kod uzoraka velike vitkosti ima značajan uticaj na dobijene rezultate.

Nosivost na izvijanje uzoraka serije AHR $100 \times 100 \times 10 - 2500$ je u opsegu od 181.8 kN do 204.7 kN i ima srednju vrednost 186.5 kN, sa standardnom devijacijom od 14.1 kN i koeficijentom varijacije od 7.6%.

3.6.3.4 Poređenje rezultata ispitivanja sa proračunskim vrednostima za AHR uzorke

U tabeli 3-203-22 prikazano je poređenje srednje vrednosti nosivosti na izvijanje elemenata sa proračunskim vrednostima zasnovanim na odredbama datim u evropskim standardima EN 1993-1-1 [3] i EN 1993-1-4 [2] i američkom standardu *AISC Design Guide 27* [50]. Poređenje je prikazano kao odnos $N_{u,test}$ i $N_{u,pred}$, gde $N_{u,test}$ predstavlja srednju vrednost granične sile dobijene testom izvijanja, dok $N_{u,pred}$ predstavlja proračunsku vrednost prema pomenutim standardima. Obzirom da evropski standardi ne definišu egzaktno krivu izvijanja za proračun vrućevaljanih ugaonika od nerđajućeg čelika, za određivanje proračunske vrednosti nosivosti na fleksiono izvijanje korišćene su tri kombinacije vrednosti koeficijenta imperfekcije α i granične relativne vitkosti $\bar{\lambda}_0$, kao što je prikazano u tabeli 3-203-22.

Prema rezultatima poređenja datim u tabeli 3-22 može se zaključiti da proračun prema analiziranim standardima predviđa dobar oblik izvijanja. Vrednosti nosivosti su na strani sigurnosti i u nekim slučajevima daju izrazito konzervativne rezultate. Analizirajući evropske standarde može se reći da se najpribližnije poklapanje sa eksperimentalnim vrednostima dobija primenom koeficijenta imperfekcije $\alpha = 0.34$ i granične relativne vitkosti $\bar{\lambda}_0 = 0.2$, kao što je predviđeno standardom EN 1993-1-1 [3] za dimenzionisanje ugaonika od ugljeničnog čelika. Za ovaj izbor krive izvijanja odnos između proračunske vrednosti i rezultata eksperimenta kreće se u opsegu od 1.08 do 1.43. Američki standard *AISC Design Guide 27* [50] daje nešto konzervativnije rezultate i ovaj odnos se kreće od 1.29 do 2.32.

Tabela 3-22 Poređenje eksperimentalnih rezultatima sa proračunskim vrednostima za AHR

Uzorak	Oblik izvijanja	Bezdimenziona vitkost $\bar{\lambda}_v$	EN 1993-1-1, EN 1993-1-4			AISC Design Guide 27
			$\bar{\lambda}_0 = 0.4$	$\bar{\lambda}_0 = 0.2$	$\bar{\lambda}_0 = 0.2$	
			$\alpha = 0.49$	$\alpha = 0.34$	$\alpha = 0.49$	
			$N_{u,test} / N_{u,pred}$	$N_{u,test} / N_{u,pred}$	$N_{u,test} / N_{u,pred}$	$N_{u,test} / N_{u,pred}$
AHR $60 \times 60 \times 6 - 800$	FB	1.011	1.37	1.34	1.48	1.62
AHR $60 \times 60 \times 6 - 2000$	FB	2.250	1.49	1.43	1.52	2.32
AHR $100 \times 10 \times 10 - 500$	FB+TFB	0.421	1.32	1.32	1.32	1.40
AHR $100 \times 10 \times 10 - 1500$	FB	1.041	1.11	1.08	1.20	1.29
AHR $100 \times 10 \times 10 - 2500$	FB	1.660	1.24	1.18	1.28	1.77

3.6.3.5 Rezultati ispitivanja nosivosti na izvijanje laserski zavarenih ugaonika

Karakteristični oblici deformacije uzoraka male, srednje i velike vitkosti nakon dostizanja nosivosti elemenata na izvijanje prikazani su na slikama 3.63, 3.64, 3.65, respektivno. Slično kao i kod vrućevaljanih ugaonika u oblasti male vitkosti ispitana je jedna serija uzoraka ALW $100 \times 100 \times 10 - 500$, u oblasti srednje i velike vitkosti ispitane su dve serije uzoraka ALW $100 \times 100 \times 10 - 1500$ i ALW $60 \times 60 \times 6 - 800$, odnosno ALW $100 \times 100 \times 10 - 2500$ i ALW $60 \times 60 \times 6 - 2000$.

Ključni eksperimentalni rezultati u sredini visine elementa prezentovani u formi dijagrama sila - pomeranje u pravcima glavnih osa inercije, sila - torziona rotacija poprečnog preseka i sila - aksijalne dilatacije prikazani su na slikama 3.66, 3.67, 3.68, 3.69, 3.70 i 3.71 za uzorke ALW $100 \times 100 \times 10 - 500 - 4$, ALW $60 \times 60 \times 6 - 800 - 3$, ALW $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 2$, ALW $60 \times 60 \times 6 - 2000 - 2$, ALW $60 \times 60 \times 6 - 2000 - 3$ i ALW $100 \times 100 \times 10 - 2500 - 3$, respektivno.

U tabeli 3-23 prezentovani su ključni rezultati ispitivanja nosivosti elemenata na izvijanje za sve uzorke laserski zavarenih ugaonika. Sve oznake u tabeli imaju isto značenje kao kod rezultata za hladnooblikovane i vrućevaljane uzorke. Za svaku seriju uzoraka prikazan je oblik izvijanja, srednja vrednost, standardna devijacija i koeficijent varijacije za vrednosti granične sile, kao i karakteristična vrednost nosivosti uzoraka na izvijanje i oblik izvijanja.

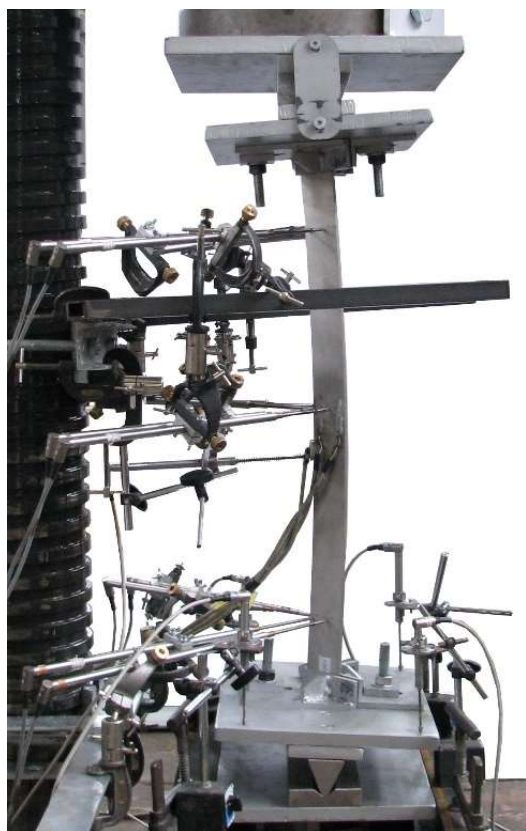


ALW $100 \times 100 \times 10 - 500 - 1$



ALW $100 \times 100 \times 10 - 500 - 4$

Slika 3.63 – Tipični oblici deformacije vrućevaljanih uzoraka u oblasti male vitkosti



ALW $60 \times 60 \times 6 - 800 - 1$



ALW $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 2$

Slika 3.64 – Tipični oblici deformacije vrućevaljanih uzoraka u oblasti srednje vitkosti

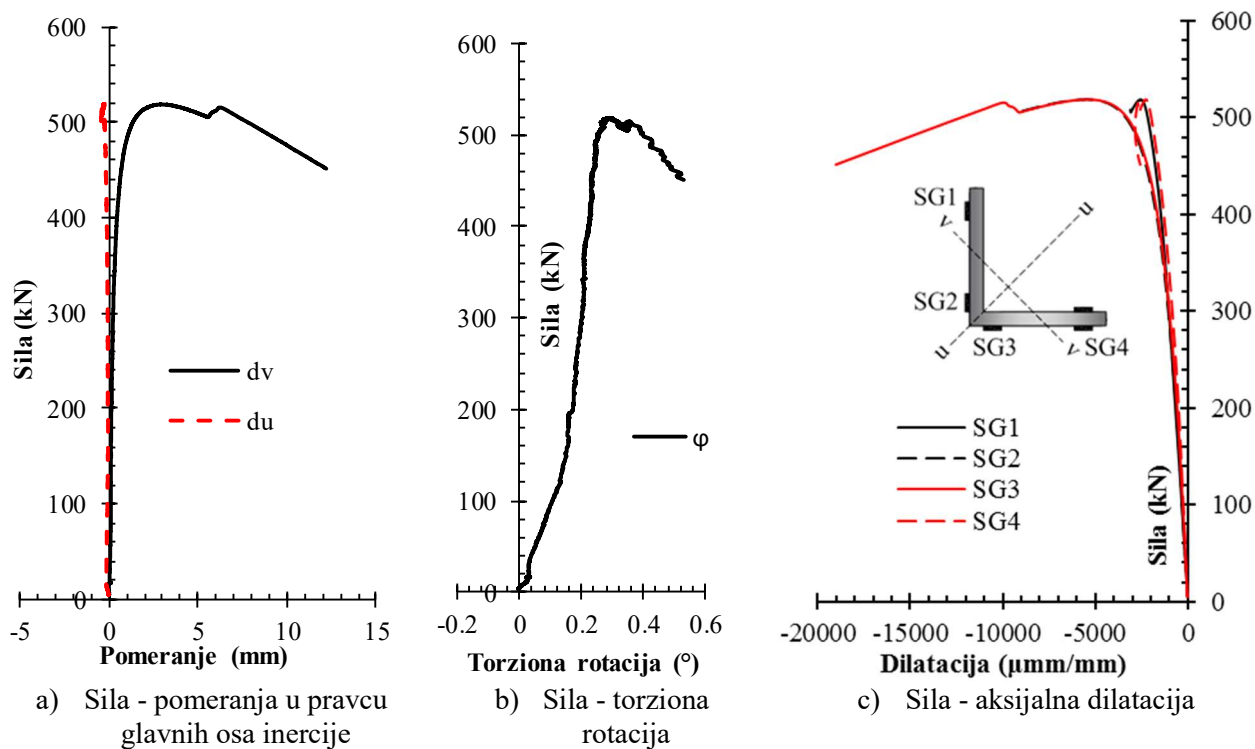


ALW 60 × 60 × 6 – 2000 – 2

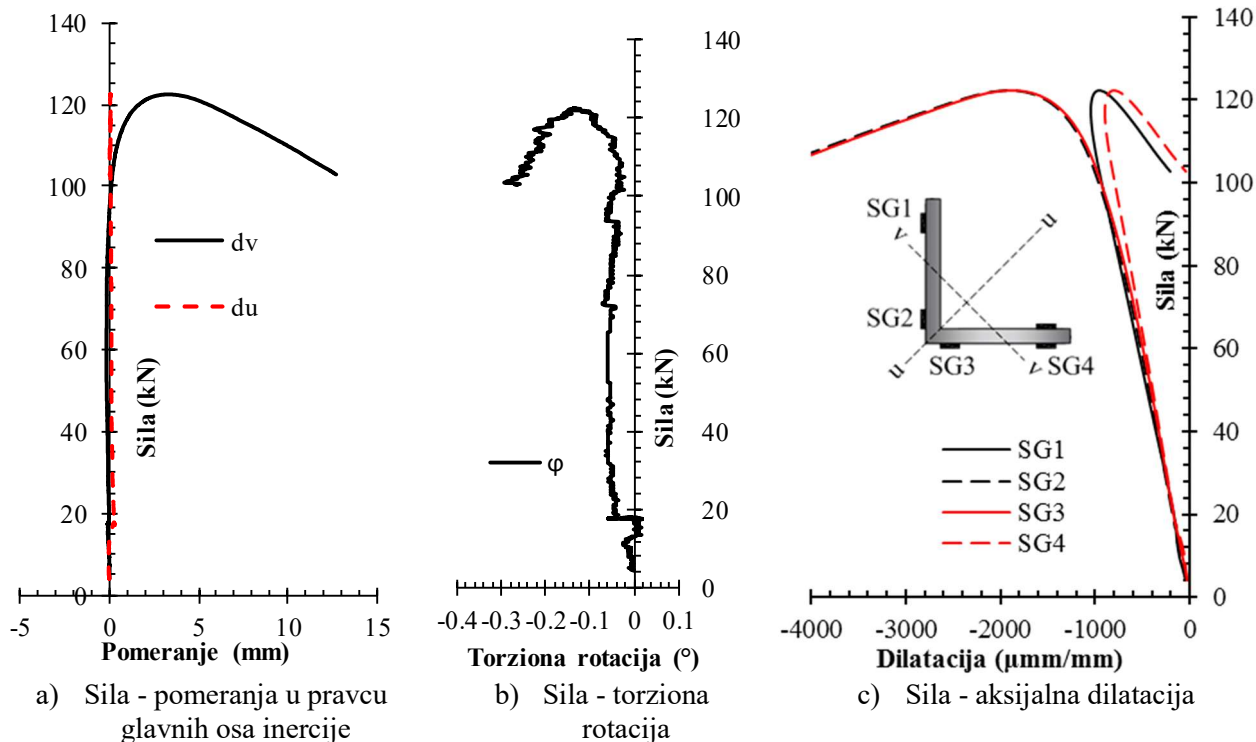


ALW 100 × 100 × 10 – 2500 – 1

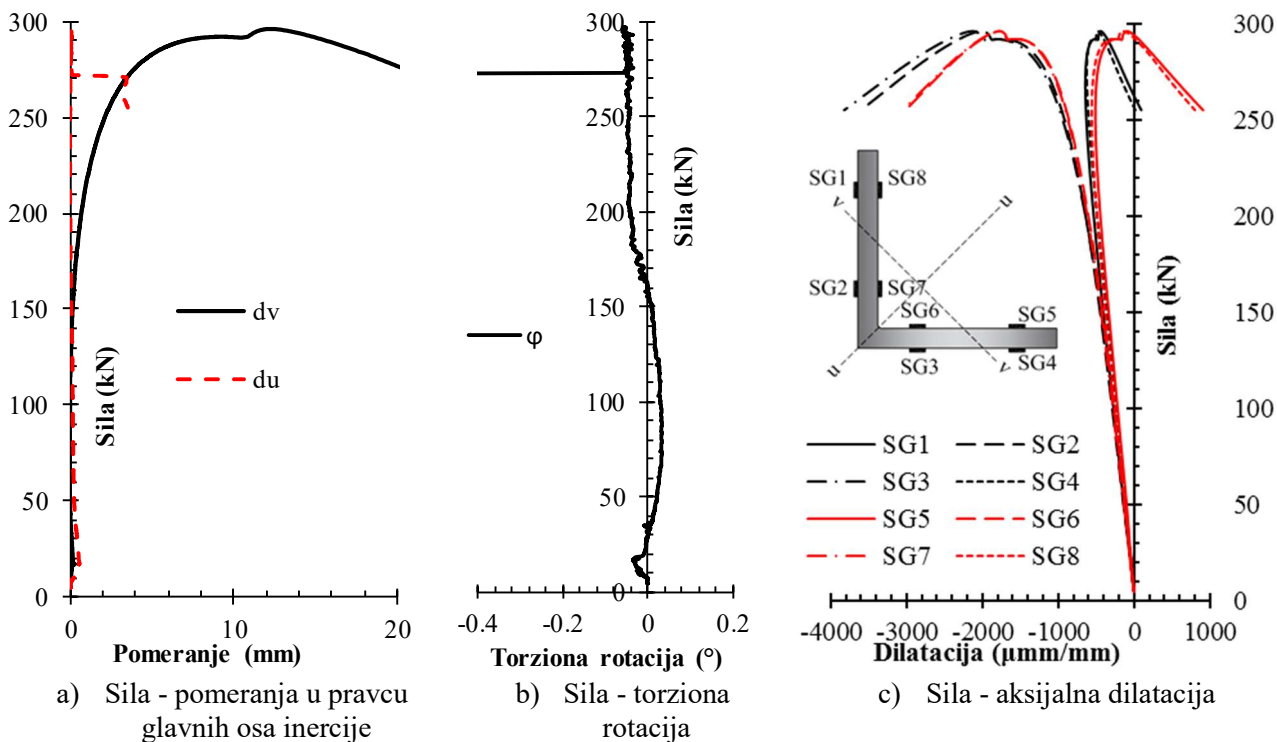
Slika 3.65 – Tipični oblici deformacije vrućevaljanih uzoraka u oblasti visoke vitkosti



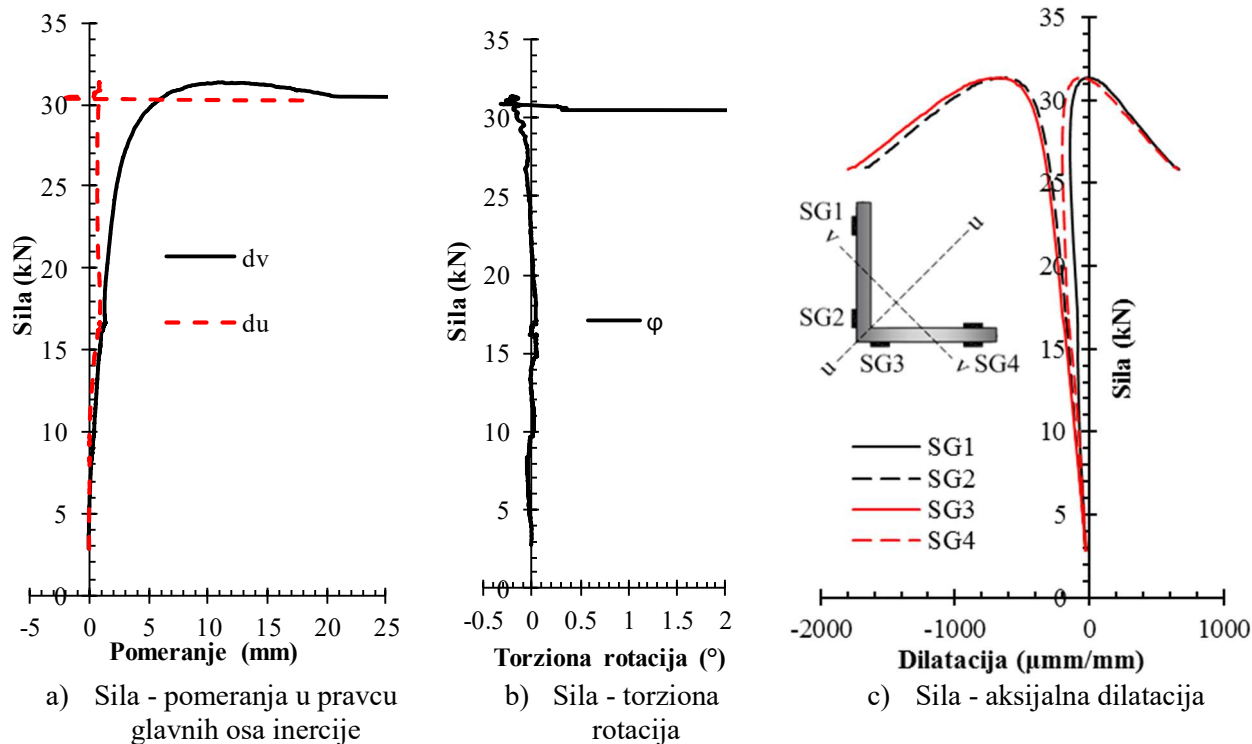
Slika 3.66 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 100 × 100 × 10 – 500 – 4



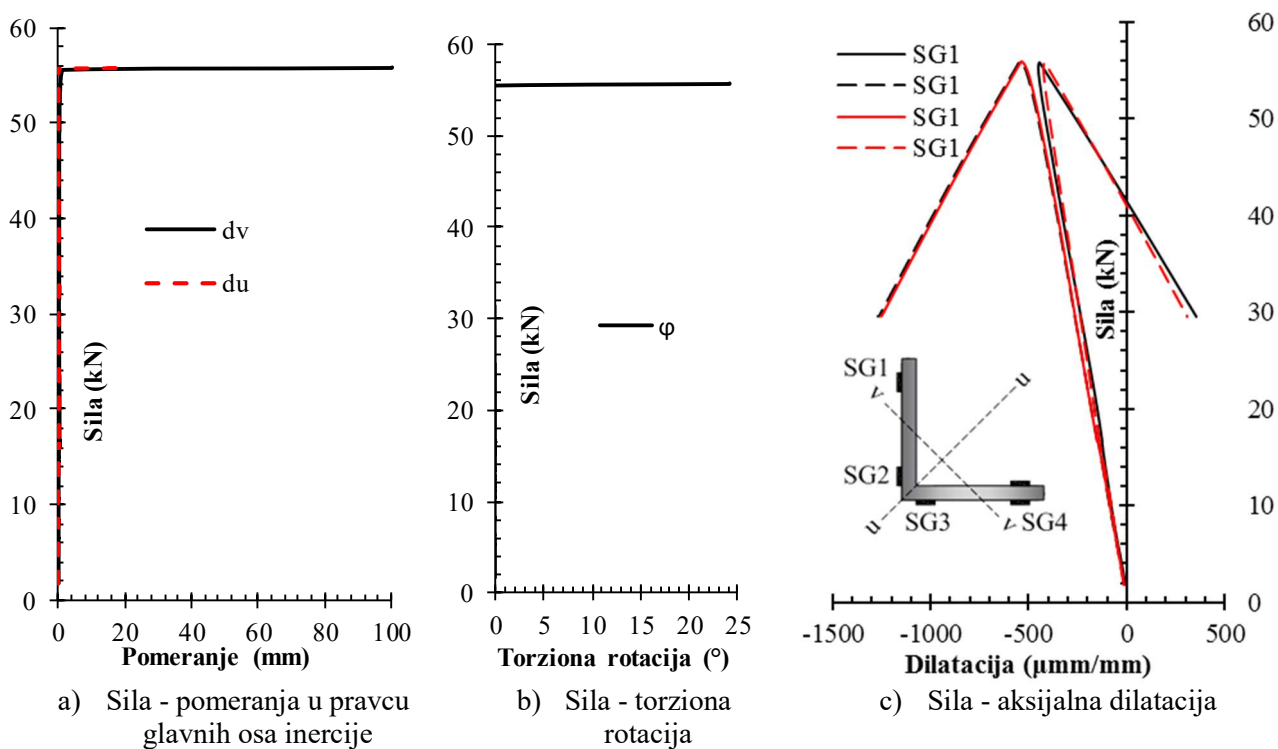
Slika 3.67 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 60 × 60 × 6 – 800 – 3



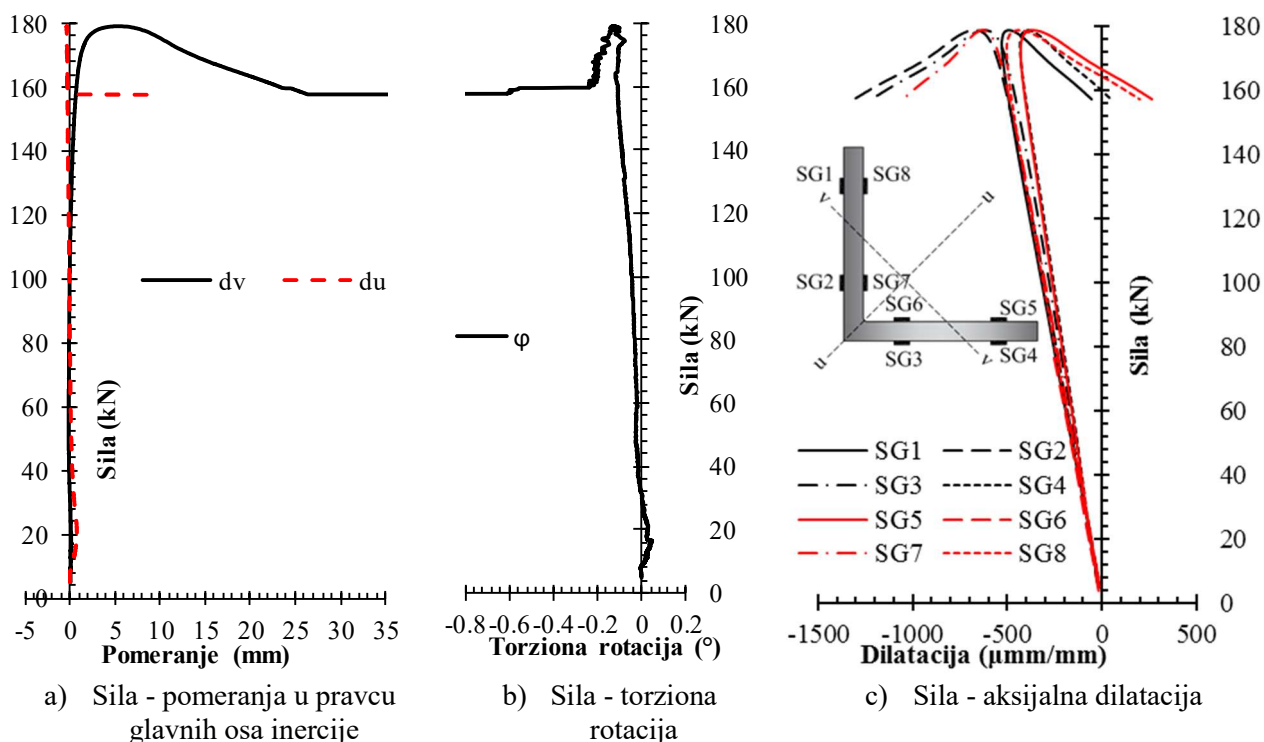
Slika 3.68 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 100 × 100 × 10 – 1500 – 2



Slika 3.69 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 60 × 60 × 6 – 2000 – 2



Slika 3.70 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 60 × 60 × 6 – 2000 – 3



Slika 3.71 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 100 × 100 × 10 – 2500 – 3

Tabela 3-23 Rezultati testa nosivosti na izvijanje elementa laserski zavarenih ugaonika

Uzorak	Oblik izvijanja	$N_{u, \text{test}}$ (kN)	$d_{u, u}$ (mm)	$d_{v, u}$ (mm)	φ_u (°)
ALW 60 × 60 × 6 – 800 – 1	FB	116.6	0.039	3.695	-0.326
ALW 60 × 60 × 6 – 800 – 2	FB	113.3	-0.060	4.541	-0.221
ALW 60 × 60 × 6 – 800 – 3	FB	122.3	0.065	3.299	-0.132
ALW 60 × 60 × 6 – 800 – 4	FB	121.2	-0.076	3.649	-0.307
Srednja vrednost		118.4			
Standardna devijacija		4.1			
V_x (%)		3.5			
R_k (EN 1990 prilog D)		107.5			
ALW 60 × 60 × 6 – 2000 – 1	FB	29.3	0.547	11.816	0.179
ALW 60 × 60 × 6 – 2000 – 2	FB	31.2	0.839	10.063	-0.171
ALW 60 × 60 × 6 – 2000 – 3	FB + TFB	55.9	-4.726	29.246	-9.544
ALW 60 × 60 × 6 – 2000 – 4	FB + TFB	56.6	-9.246	12.386	-14.431
Srednja vrednost		43.3			
Standardna devijacija		15.0			
V_x (%)		34.8			
R_k (EN 1990 prilog D)		3.7			
ALW 100 × 100 × 10 – 500 – 1	FB + TFB	525.3	-0.647	2.532	0.390
ALW 100 × 100 × 10 – 500 – 2	FB + TFB	532.1	-0.670	2.479	0.424
ALW 100 × 100 × 10 – 500 – 3	FB + TFB	520.1	-0.518	2.275	0.304
ALW 100 × 100 × 10 – 500 – 4	FB + TFB	518.8	-0.327	2.821	0.286
Srednja vrednost		524.1			
Standardna devijacija		6.0			
V_x (%)		1.2			
R_k (EN 1990 prilog D)		508.2			

Tabela 3-23 Nastavak

Uzorak	Oblik izvijanja	$N_{u,test}$ (kN)	$d_{u,u}$ (mm)	$d_{v,u}$ (mm)	φ_u (°)
ALW 100 × 100 × 10 – 1500 – 1	FB	311.3	-0.439	7.011	0.043
ALW 100 × 100 × 10 – 1500 – 2	FB	296.5	0.045	12.546	-0.055
ALW 100 × 100 × 10 – 1500 – 3	FB	285.0	-0.378	10.101	0.032
ALW 100 × 100 × 10 – 1500 – 4	FB	284.0	0.046	9.214	-0.074
Srednja vrednost		294.2			
Standardna devijacija		12.7			
V_x (%)		4.3			
R_k (EN 1990 prilog D)		260.7			
ALW 100 × 100 × 10 – 2500 – 1	FB	145.6	-0.104	20.436	-0.801
ALW 100 × 100 × 10 – 2500 – 2	FB	156.2	-0.296	12.851	-0.143
ALW 100 × 100 × 10 – 2500 – 3	FB	178.8	-0.344	5.416	-0.131
ALW 100 × 100 × 10 – 2500 – 4	FB	194.4	-0.419	-6.637	-0.051
Srednja vrednost		168.8			
Standardna devijacija		22.0			
V_x (%)		13.0			
R_k (EN 1990 prilog D)		110.9			

U skladu sa prikazanim rezultatima testa nosivosti elemenata na izvijanje mogu se konstatovati sledeća zapažanja:

1) Uzorci male vitkosti: ALW 100 × 100 × 10 – 500 (L = 500 mm, $\bar{\lambda}_v = 0.407$)

Na osnovu oblika izvijanja prikazanog na slikama 3.63a i 3.63b, kao i rezultata prikazanih u tabeli 3-23 može se zaključiti da je dominantni oblik izvijanja fleksiono izvijanje oko slabije ose inercije sa kombinacijom torziona-fleksionog izvijanja. Pomeranja u ravni upravnoj na slabiju osu inercije (pomeranje d_v) predstavljena su glatkom krivom i imaju značajno veće vrednosti od pomeranja u ravni upravno na jaču osu inercije (pomeranje d_u) i od torziona rotacije poprečnog preseka (slike 3.66a i 3.66b). Postojanje pomeranja koje izaziva savijanje oko jače ose i njegovo povećavanje nakon dostizanja granične sile karakteristično je za elemente koji imaju bliske vrednosti nosivosti na fleksiono i torziona-fleksiono izvijanje. Krive prikazane na slici 3.66c koje predstavljaju zavisnost između sile i aksijalne dilatacije svojim grananjem jasno ukazuju na savijanje oko slabije ose inercije. Međutim, nepoklapanje krivih na istoj grani govori o tome da postoji savijanje i oko jače ose inercije, stoga može se reći da je pored fleksionog izvijanja oko slabije ose inercije prisutno i torziona-fleksiono izvijanje. Tokom celog ispitivanja poprečni presek u sredini na kome su merene dilatacije nalazio se u pritisku.

Nosivost ispitanih uzoraka na izvijanje u ovoj seriji kreće se u opsegu od 518.8 kN do 532.1 kN. Srednja vrednost granične sile iznosi 524.1 kN, sa standardnom devijacijom 6.0 kN i koeficijentom varijacije od 1.2%.

2) Uzorci srednje vitkosti: ALW 60 × 60 × 6 – 800 (L = 800 mm, $\bar{\lambda}_v = 0.978$) i ALW 100 × 100 × 10 – 1500 (L = 1500 mm, $\bar{\lambda}_v = 1.006$)

U obe testirane serije koje pripadaju oblasti srednje vitkosti karakterističan oblik izvijanja uzoraka predstavlja fleksiono izvijanje oko slabije ose inercije, kao što je to prikazano na slici 3.64. Ključni rezultati predstavljeni u obliku dijagrama sila - pomeranje i sila - torziona rotacija prikazani su na slikama 3.67a i 3.67b za uzorak ALW 60 × 60 × 6 – 800 – 3. Na pomenutim dijagramima uočava se glatka kriva u slučaju pomeranja u ravni upravnoj na slabiju osu inercije (pomeranje d_v), dok su pomeranja u drugoj relevantnoj ravni (pomeranje d_u) i torziona deformacija zanemarljivi, što potvrđuju i vrednosti date u tabeli 3-23. Fleksiono izvijanje oko slabije ose inercije evidentno je i na dijagramima sila - podužne dilatacije koji su prikazani na slici 3-23c. Na ovoj slici se vidi postepeno

grananje mernih traka, koje ukazuje na savijanje poprečnog preseka oko slabije ose. U trenutku dostizanja maksimalne vrednosti sile, ceo poprečni presek u polovini visine elementa je pritisnut, da bi se nakon granične sile naponi pritiska povećavali u uglu profila, a smanjivali na krajevima krakova.

Slično kao i u prethodnoj seriji, uzorke serije ALW 100 × 100 × 10 – 1500 karakteriše fleksiono izvijanje oko slabije ose inercije sa izraženim pomeranjima u ravni upravnoj na slabiju osu inercije (pomeranje d_v), zanemarljivim pomeranjima u drugoj relevantnoj ravni (pomeranje d_u) i zanemarljivom torzionom rotacijom, što se može videti u tabeli 3-23 i na slikama 3.68a i 3.68b na kojima su predstavljeni rezultati za uzorak ALW 100 × 100 × 10 – 1500 – 2. Dijagrami zavisnosti između sile i aksijalne dilatacije prikazani su na slici 3.68c, na kojoj se uočava grananje dijagrama kao posledica savijanja oko slabije ose inercije. U trenutku dostizanja graničnog opterećenja ceo poprečni presek u kome su merene dilatacije je u pritisku, da bi se, u silaznoj putanji sile, u uglu preseka povećavao pritisak, a slobodni krajevi postepeno prelazili u zatezanje.

Granična vrednost sile za seriju uzoraka ALW 60 × 60 × 6 – 800 kreće se od 113.3 kN do 122.3 kN, sa aritmetičkom sredinom od 118.4 kN, standardnom devijacijom od 4.1 kN i koeficijentom varijacije koji iznosi svega 3.5%.

Nosivost na izvijanje druge serije u oblasti srednje vitkosti ALW 100 × 100 × 10 – 1500 ima vrednosti od 284.0 kN do 311.3 kN. Srednja vrednost nosivosti ove serije iznosi 294.2 kN, standardna devijacija je 12.7 kN, a koeficijent varijacije 4.3%.

3) Uzorci velike vitkosti: ALW 60 × 60 × 6 – 2000 ($L = 2000$ mm, $\bar{\lambda}_v = 2.176$) i ALW 100 × 100 × 10 – 2500 ($L = 2500$ mm, $\bar{\lambda}_v = 1.605$)

Dva uzorka serije ALW 60 × 60 × 6 – 2000, označenih brojevima 1 i 2 pokazali su oblik izvijanja karakterističan za čisto fleksiono izvijanje oko slabije ose inercije, kao što je prikazano na slici 3.65a. Vrednosti deformacija pri dostizanju granične nosivosti koje su date u tabeli 3-23 ukazuju na zaključak da za ova dva uzorka pomeranje u ravni upravnoj na slabiju osu inercije (pomeranje d_v) ima značajno veće vrednosti u odnosu na ostala relevantne parametre deformacije. Zapisi između sile i deformacije prikazani na slikama 3.69a i 3.69b potvrđuju dominantan prirast deformacije koja izaziva savijanje oko slabije ose u odnosu na ostale deformacije. Rano grananje dijagrama podužnih dilatacija u funkciji sile koji su prikazani na slici 3.69c prouzrokovano je veličinom početnih geometrijskih imperfekcija i postojanjem ekscentriciteta u unosu opterećenja, koje i sa malim vrednostima kod uzoraka velike vitkosti može imati značajan uticaj.

Za razliku od ova dva uzorka, uzorci u istoj seriji koji su označeni brojevima 3 i 4 dostigli su granično opterećenje izvijanjem koje predstavlja kombinaciju fleksionog i torziona-fleksionog izvijanja. Prema vrednostima koje su date u tabeli 3-23, kao i prema dijagramima deformacija u funkciji sile koji su prikazani na slikama 3.70a i 3.70b, može se zaključiti da u trenutku dostizanja granične sile, osim velikih vrednosti pomeranja u ravni upravnoj na slabiju osu inercije (pomeranje d_v), postoje i značajne vrednosti pomeranja koje izaziva savijanja oko jače ose inercije (pomeranje d_u), kao i značajne vrednosti torzione rotacije. Dijagrami deformacija pokazuju izrazito male vrednosti svih parametara deformacije do dostizanja granične sile, da bi u trenutku izvijanja došlo do naglog skoka svih parametara deformacije. Ovakvo ponašanje potvrđuje i zapis podužnih dilatacija u funkciji sile koji su prikazani na slici 3.70c – krive nisu glatke i “lome” se u trenutku dostizanja maksimalne sile bez značajnog grananja pre toga. Ipak, zapis dilatacija nakon dostizanja granične sile ukazuje na dominantno prisustvo fleksionog izvijanja – krajevi L profila prelaze u zatezanje, a u uglu raste pritisak.

Sva četiri uzorka u seriji ALW 100 × 100 × 10 – 2500 dostigla su graničnu vrednost sile fleksionim izvijanjem oko slabije ose inercije. Vrednosti deformacija pri dostizanju granične sile koji su dati u tabeli 3-23, kao i dijagrami deformacija u funkciji sile koji su prikazani na slikama 3.71a i 3.71b pokazuju da je vrednost pomeranja u ravni upravnoj na slabiju osu inercije značajno veća u odnosu na ostale parametre deformacije koji imaju gotovo nultu vrednost. Dijagrami podužnih dilatacija u funkciji nanošenja opterećenja, dati na slici 3.71c, pokazuju da se grananje dijagrama

obavlja neposredno pre dostizanja granične sile, ali da dijagrami ostaju glatki. Nakon dostizanja granične vrednosti sile, krajevi ugaonika prelaze u zatezanje, dok pritisak raste u uglu profila.

Nosivost elemenata na izvijanje uzoraka koji pripadaju seriji ALW 60 × 60 × 6 – 2000 kreće se od 29.3 kN do 56.6 kN, srednja vrednost granične sile iznosi 43.3 kN, sa standardnom devijacijom 15.0 kN i koeficijentom varijacije od 34.8%. Veliko rasipanje rezultata u okviru ove serije može se pripisati različitim vrednostima početnih geometrijskih imperfekcija uzoraka, kao i nepouzdanosti vrednosti ekscentriciteta delovanja opterećenja prilikom ispitivanja, što je dovelo da različitog ponašanja uzoraka.

Kod serije ALW 100 × 100 × 10 – 2500, granična vrednost sile nalazi se u opsegu od 145.6 kN do 194.4 kN, sa aritmetičkom sredinom od 168.8 kN, standardnom devijacijom od 22.0 kN, i koeficijentom varijacije od 13%.

3.6.3.6 Poređenje rezultata ispitivanja sa proračunskim vrednostima za ALW uzorke

U tabeli 3-203-24 prikazano je poređenje srednje vrednosti nosivosti na izvijanje elemenata sa proračunskim vrednostima zasnovanim na odredbama datim u evropskim standardima EN 1993-1-1 [3] i EN 1993-1-4 [2] i američkom standardu *AISC Design Guide 27* [50]. Poređenje je prikazano kao odnos $N_{u,test}$ i $N_{u,pred}$, sa istim značenjem kao kod hladnooblikovanih i vrućevaljanih ugaonika. Obzirom da evropski standardi ne definišu egzaktno krivu izvijanja za proračun laserski zavarenih ugaonika od nerđajućeg čelika, za određivanje proračunske vrednosti nosivosti na fleksiono izvijanja korišćene su četiri kombinacije vrednosti koeficijenta imperfekcije i granične relativne vitkosti, kao što je dato u tabeli 3-24.

Saglasno tabeli 3-24 može se zaključiti da se najbolje poklapanje eksperimentalnih rezultata sa proračunskim vrednostima prema evropskim standardima dobija primenom koeficijenta imperfekcije $\alpha = 0.49$ i granične relativne vitkosti $\bar{\lambda}_0 = 0.2$ za koje se odnos između eksperimentalnih i proračunskih vrednosti kreće od 1.07 do 1.38. Američki standard *AISC Design Guide 27* [50] daje nešto konzervativnije rezultate i ovaj odnos se kreće od 1.16 do 2.07. I kod evropskih i kod američkih standarda primećuje se da konzervativnost raste sa porastom vitkosti.

Tabela 3-24 Poređenje eksperimentalnih rezultatima sa proračunskim vrednostima za ALW

Uzorak	Oblik izvijanja	$\bar{\lambda}_v$	EN 1993-1-1, EN 1993-1-4				AISC Design Guide 27
			$\bar{\lambda}_0 = 0.4$	$\bar{\lambda}_0 = 0.2$	$\bar{\lambda}_0 = 0.2$	$\bar{\lambda}_0 = 0.2$	
			$\alpha = 0.49$	$\alpha = 0.34$	$\alpha = 0.49$	$\alpha = 0.76$	
			$N_{u,test} / N_{u,pred}$	$N_{u,test} / N_{u,pred}$	$N_{u,test} / N_{u,pred}$	$N_{u,test} / N_{u,pred}$	$N_{u,test} / N_{u,pred}$
ALW 60 × 60 × 6 – 800	FB	0.978	1.06	1.06	1.17	1.35	1.25
ALW 60 × 60 × 6 – 2000	FB (+FTB)	2.176	1.35	1.30	1.38	1.52	2.07
ALW 100 × 10 × 10 – 500	FB+FTB	0.407	1.25	1.25	1.25	1.25	1.35
ALW 100 × 10 × 10 – 1500	FB	1.006	0.99	0.97	1.07	1.24	1.16
ALW 100 × 10 × 10 – 2500	FB	1.605	1.12	1.07	1.16	1.31	1.58

4 NUMERIČKA ANALIZA METODOM KONAČNIH ELEMENATA²

4.1 Uvod

Ovo poglavlje prikazuje rezultate i opisuje metodologije numeričkog modeliranja uzoraka u testovima izvijanja pod dejstvom centrične sile pritiska. Nelinearna veza između napona i dilatacija, veličina i raspored početnih geometrijskih imperfekcija, zaostali naponi, granični uslovi oslanjanja, kao i konturni uslovi detaljno su sagledani i modelirani tako da u što većoj mjeri simuliraju odgovarajuće realne uslove. Kalibracija i verifikacija numeričkih modela izvršena je na osnovu rezultata ekvivalentnih eksperimentalnih ispitivanja. Pored kvalitativnog poklapanja dobijenih vrednosti graničnih nosivosti u eksperimentu i numeričkoj simulaciji posebno se vodilo računa o poklapanju oblika izvijanja, bočnih pomeranja i naponskog stanja u poprečnim presecima gde su vršena eksperimentalna merenja. Osim numeričkih simulacija testova globalnog izvijanja, urađena je i numerička simulacija testova kratkih stubova.

Kalibrisani modeli poslužili su kao osnov za opsežne parametarske studije, neophodne za donošenje preporuka za proračun centrično pritisnutih, obostrano zglobno oslonjenih ugaonika od nerđajućeg čelika. U okviru parametarskih studija analiziran je uticaj globalne vitkosti pritisnutog elementa i lokalne vitkosti poprečnog preseka na fleksioni odnosno torziono-fleksioni oblik loma i vrednost granične nosivosti.

Za numeričku analizu metodom konačnih elemenata, kao i za kasniju parametarsku analizu korišćen je program *Abaqus* 6.13-4 [61].

4.2 Opis numeričke analize

U cilju simulacije eksperimentalnog ispitivanja testa stabilnosti elemenata centrično pritisnutih uzoraka, za svaki relevantan uzorak hladnooblikovanog, vrućevaljanog i laserski zavarenog ugaonika napravljen je odgovarajući numerički model pomoću metode konačnih elemenata na kojem su sprovedene sledeće analize:

- linearna analiza sopstvenih oblika izvijanja (LBA - *linear bifurcation analysis*),
- geometrijska i materijalna nelinearna analiza izvijanja (GMNIA - *geometrically and materially non-linear buckling analysis*).

Linearna analiza sopstvenih oblika izvijanja zasnovana je na *Ojlerovoj* linearno elastičnoj teoriji stabilnosti. Primenom ove analize određene su vrednosti elastičnih kritičnih sila i odgovarajući sopstveni oblici izvijanja. Deformisani oblik modela za karakteristični sopstveni oblik izvijanja uzet je kao osnova za definisanje početnih geometrijskih imperfekcija uzoraka u naknadnoj nelinearnoj analizi.

Geometrijska i materijalna nelinearna analiza je sprovedena kao kvazi-statička, eksplicitna dinamička analiza. Povećanje brzine proračuna sa jedne strane i smanjenje inercijalnih efekata dinamičke analize postignuto je skaliranjem mase konačnog elementa (*mass scaling*) i izborom adekvatne glatke funkcije brzine nanošenja opterećenja u funkciji vremena (*smooth amplitude curves*). Ova analiza uspešno je korišćena za simulaciju ponašanja centrično pritisnutih višedelnih elemenata od nerđajućeg čelika u radu [62] i pokazala se kao pouzdanija u odnosu na statički nelinearnu analizu koja ima najširu primenu – metoda Riksa.

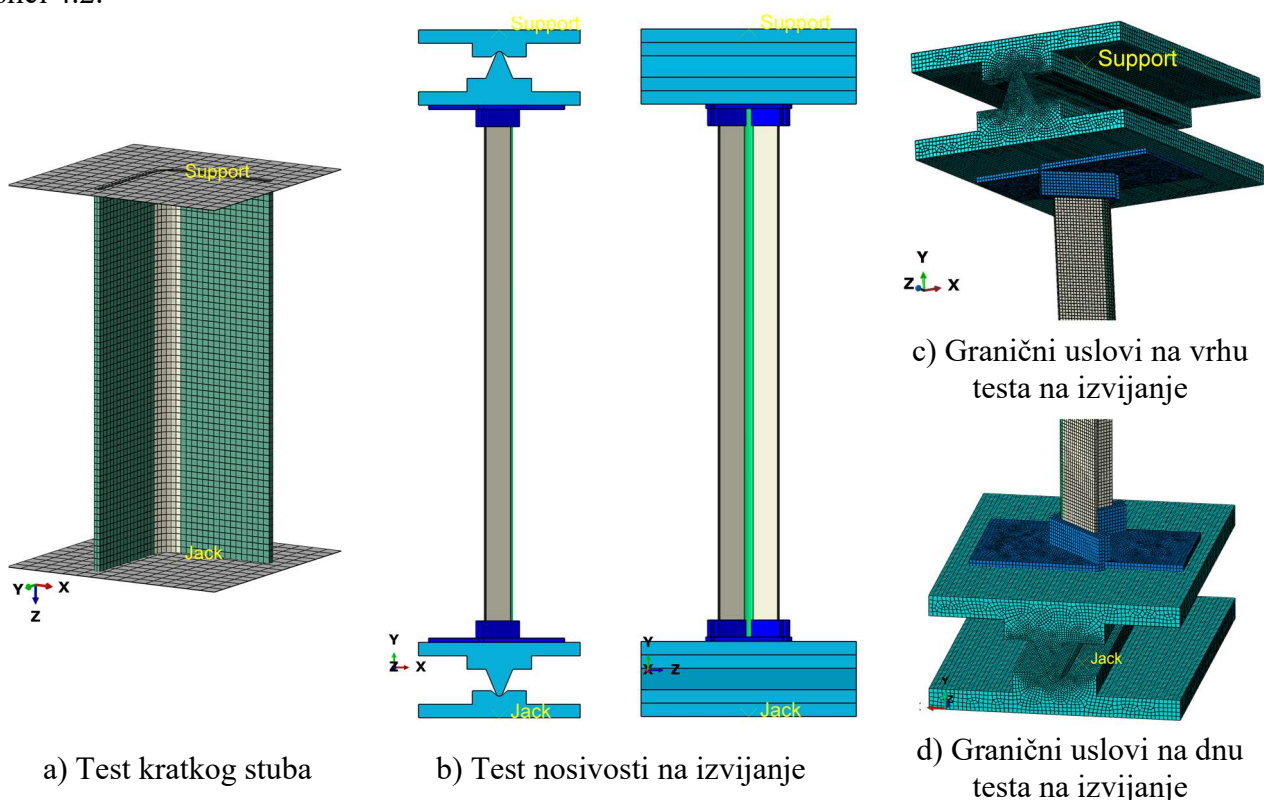
² Deo rezultata prikazanih u ovom i naredna dva poglavlja publikovani su u radu:

J. Dobrić, A. Filipović, N. Baddoo, Z. Marković, D. Buđevac, Design procedures for cold-formed stainless steel equal-leg angle columns, *Thin-Walled Structures* 159 (2021).

Za simulaciju testova sprovedenim na hladnooblikovanim uzorcima korišćen je vremenski inkrement 1×10^{-5} , dok je za simulaciju testova sprovedenim na vrućevaljanim i laserski zavarenim uzorcima korišćen inkrement 3×10^{-6} . Dodatno je primenjena opcija za promenljivo skaliranje – proračunato u svakom koraku integracije i opcija za neuniformno skaliranje – različito za svaki konačni element.

4.2.1 Mreža konačnih elemenata i granični uslovi u modelima

Uzimajući u obzir različito ponašanje centrično pritisnutih stubova od hladnooblikovanih tankozidnih ugaonika u odnosu na stubove od vrućevaljanih i laserski zavarenih ugaonika, za formiranje numeričkih modela su korišćeni različiti tipovi konačnih elementa. Geometrija, granični uslovi i mreža konačnih elemenata za simulaciju testa kratkih stubova i testa izvijanja za hladnooblikovane elemente prikazani su na slici 4.1, odnosno za vrućevaljane i laserski zavarene na slici 4.2.

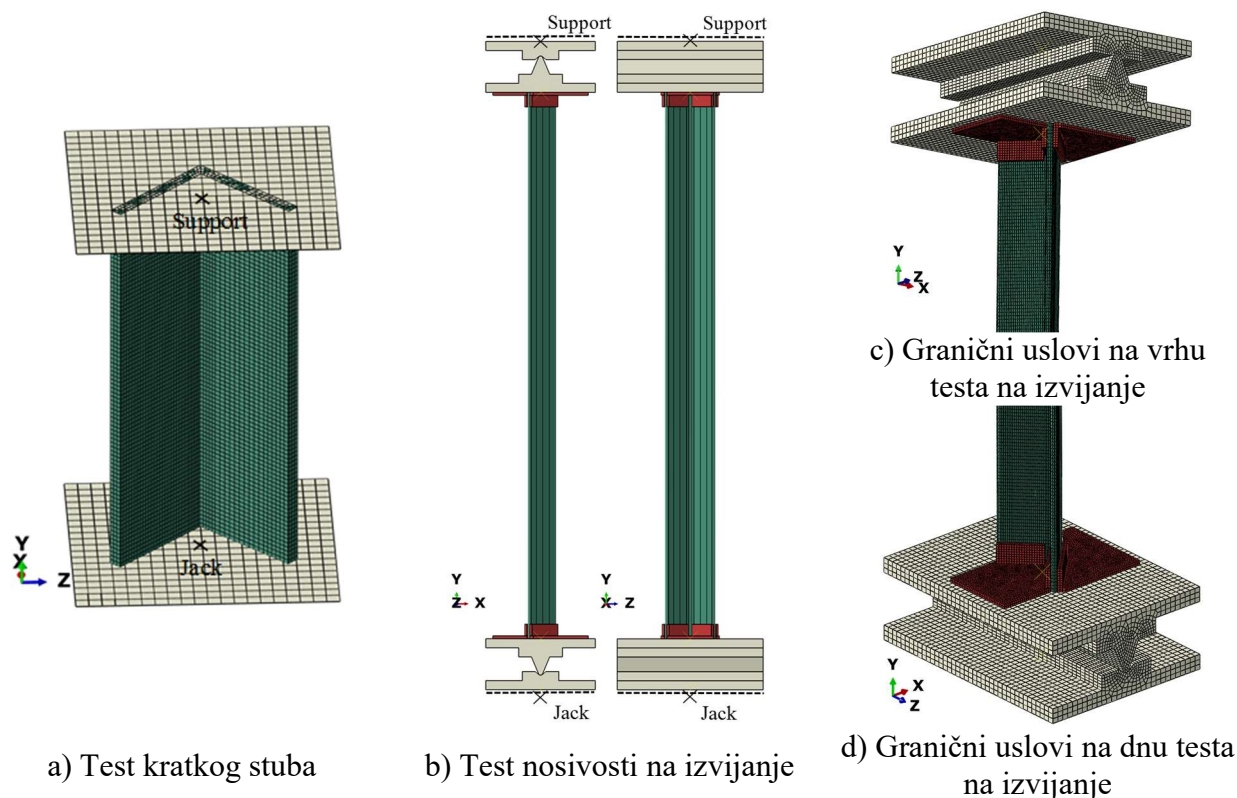


Slika 4.1 – Geometrija, granični uslovi i mreža modela za simulaciju eksperimenta za ACF

Za modeliranje stubova hladnooblikovanih tankozidnih ugaonika korišćeni su pločasti (*shell*) elementi S4R sa četiri čvora i redukovanom integracijom u sedam tačaka po debljini zida dimenzija 4×4 mm.

Za modeliranje stubova vrućevaljanih i laserski zavarenih ugaonika korišćeni su prostorni (*solid*) elementi C3D8R sa 8 čvorova u uglovima i redukovanom integracijom. Po debljini kraka ugaonika usvojena su po tri konačna elementa, tako da je u zavisnosti od dimenzija profila koji je modeliran korišćen konačni element dimenzije 2 ili 3 mm.

U cilju simulacije realnih graničnih uslova pritisnutih uzoraka u test mašini, modelirani su linijski zglobni oslonci, koji uključuju gornju i donju oslonačku ploču zglobnog oslonca, zajedno sa bočnim stegama koje su korišćene za podešavanje centričnog položaja uzorka i njegovo fiksiranje u eksperimentu. Mreža konačnih elemenata modela oslonaca definisana je takođe primenom solid elemenata C3D8R. Dimenzije konačnih elemenata oslonačke ploče su 5 mm, izuzev u neposrednoj okolni linijskog zglobnog ležišta, gde je u cilju povećane tačnosti unosa opterećenja korišćena manja dimenzija konačnih elemenata od 2 mm. Za dimenziju konačnih elemenata na stegama za fiksiranje uzoraka definisana je vrednost od 4 mm.



Slika 4.2 – Geometrija, granični uslovi i mreža modela za simulaciju eksperimenta za AHR i ALW

Kontakt između površine stege i površine oslonačke ploče ostvaren je povezivanjem površina pomoću opcije *tie constraints*. Kontakti između spoljne površine kraka uzorka u krajnjim oslonačkim zonama i stege, odnosno između krajnjih poprečnih preseka uzoraka i oslonačkih ploča modelirani su koristeći karakteristike interakcije površina koje se dodiruju primenom modula *Interaction, General contact*. Na isti način definisani su kontakti između gornje i donje ležišne ploče zglobnog ležišta. Za pomeranja upravna na ravan površine, kontakt je opisan sa *Normal behaviour, hard formulation*, a kada su u pitanju tangencijalna pomeranja sa *Tangential behaviour, Penalty friction formulation*. Vrednost koeficijenta trenja određena je kalibracijom modela tako da se dobije visok stepen podudarnosti graničnih nosivosti elemenata u eksperimentu i u numeričkoj simulaciji. Za vrednost koeficijenta trenja usvojena je vrednost od 0.1 za sve kontaktne površine, osim za segmente linijskog zgloba gde nije zadata vrednost koeficijenta trenja (*frictionless*), imajući u vidu da su kontaktne zone ležišnih ploča test mašine u eksperimentima tretirane mazivnim sredstvima. Dve referentne tačke postavljene su u težištima spoljnih površina gornje i donje oslonačke ploče. Prava koja prolazi kroz ove dve tačke poklapa se sa podužnom osom modela. Spoljne površine oslonačkih ploča povezane su sa referentnim tačkama preko opcije *coupling constraint*. U referentnim tačkama su sprečena sva relevantna pomeranja i rotacije, osim u donjoj ploči u kojoj je bilo dopušteno pomeranje u vertikalnom pravcu gde je generisanjem pomeranja vršen unos sile.

Granični uslovi numeričkih modela uzorka kratkih stubova uključili su modeliranje oslonačkih ploča prese u obliku dvodimenzionalnog krutog tela. Površine krutih ploča povezane su sa referentnim tačkama koje su postavljene u težištima krajnjih poprečnih preseka modela. U referentnim tačkama su sprečena pomeranja i rotacije, izuzev pomeranja na mestu zadavanje opterećenja, slično kao i kod simulacije testova globalnog izvijanja.

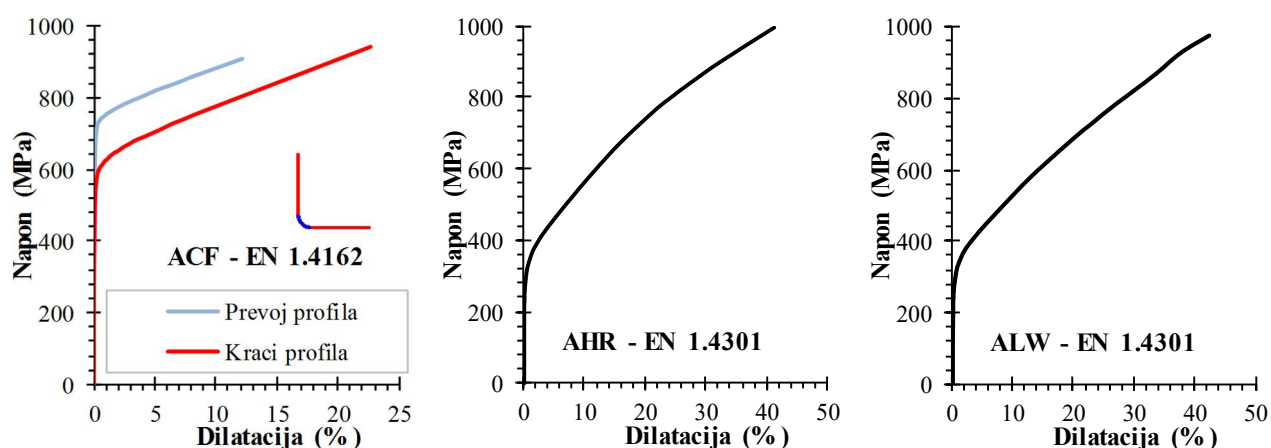
4.2.2 Materijalni modeli

Mehanička svojstva materijala numeričkih modela definisana su na osnovu krivih napon-dilatacija koje su dobijene ispitivanjem mehaničkih karakteristika materijala standardnim testovima pri zatezanju (poglavlje 3.2). Kod tankozidnih hladnooblikovanih stubova definisani su materijalni modeli za ravan deo preseka – krake ugaonika i za deo preseka u delu prevoja odnosno ugla ugaonika

od niskolegiranog dupleks čelika EN 1.4162. Za opisivanje materijalnih karakteristika vrućevaljanih i laserski zavarenih elemenata korišćen je uniformni materijalni model za ceo poprečni presek, dobijen na osnovu ispitivanja materijala iz vrućevaljanog i laserski zavarenog profila od austenitnog nerđajućeg čelika EN 1.4301. Ispitivanjem mehaničkih svojstava materijala epruveta koje su uzete za podužni i poprečni pravac valjanja osnovne čelične trake nisu uočene značajnije razlike u vrednostima granice razvlačenja i modula elastičnosti, odnosno nivoa elastičnih napreznja. Takođe je granica razvlačenja za podužni pravac valjanja za 6% manja u odnosu na ekvivalentnu vrednost za poprečni pravac. Imajući u vidu da se fenomeni lokalne nestabilnosti poprečnih preseka elemenata dešavaju u elastičnoj oblasti napreznja, ispod granice razvlačenja, efekti anizotropije nisu uzeti u obzir u numeričkim modelima. Materijal je definisan kao elastoplastičan, čije se ponašanje u početnom linearnom domenu napreznja opisuje pomoću modula elastičnosti. Vrednost modula elastičnosti je 200000 N/mm². Za vrednost Poasonovog koeficijenta uzeta je vrednost 0.3, dok zapreminska težina materijala iznosi 8000 kg/m³. Stvarne vrednosti napona i dilatacija u plastičnoj oblasti napreznja dobijene su konvertovanjem nominalnih vrednosti napona i dilatacija, dobijenih ispitivanjem mehaničkih karakteristika, pomoću izraza (82) i (83), u kojima σ_{nom} i ε_{nom} predstavljaju nominalne vrednosti napona i dilatacija, a σ_{true} i ε_{true} predstavljaju stvarne vrednosti napona i dilatacija, dok je sa E označen modul elastičnosti. Na slici 4.3 prikazani su dijagrami stvarnih veza između napona i deformacija za hladnooblikovane, vrućevaljane i laserski zavarene profile.

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom} \cdot (1 + \varepsilon_{nom}) \quad (82)$$

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) - \frac{\sigma_{true}}{E} \quad (83)$$



Slika 4.3 – Dijagrami stvarnih veza napon-dilatacija

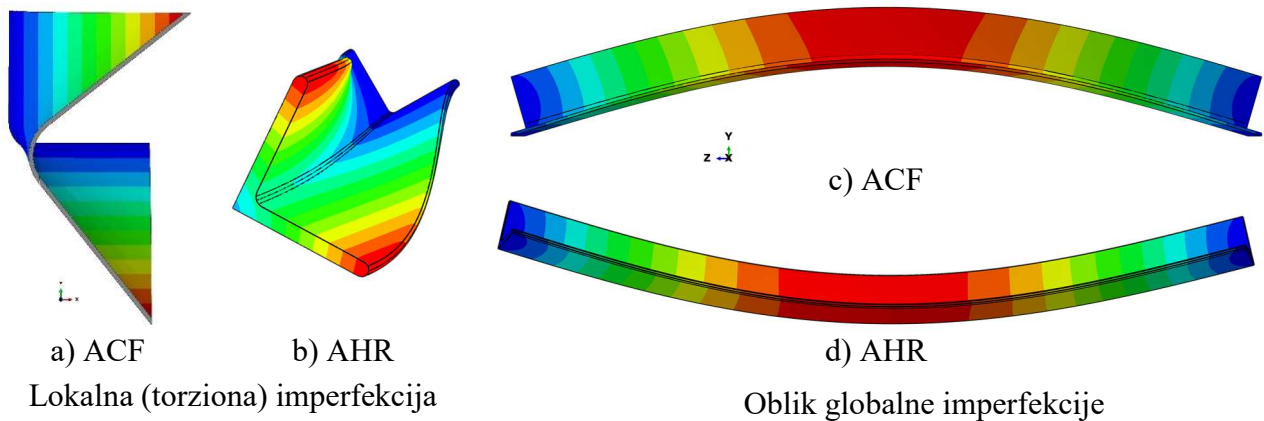
Za opisivanje mehaničkih svojstava oslonačkih ploča i linijskog zgloba usvojene su nominalne vrednosti za materijal S355N, dok su za modeliranje stega koje fiksiraju krajeve profila korišćene nominalne vrednosti za materijal S275JR. Ponašanje ova dva materijala u elastičnoj oblasti opisano je modulom elastičnosti, koji ima vrednost od 210 000 N/mm² i Poasonovim koeficijentom, koji iznosi 0.3.

4.2.3 Početne geometrijske imperfekcije

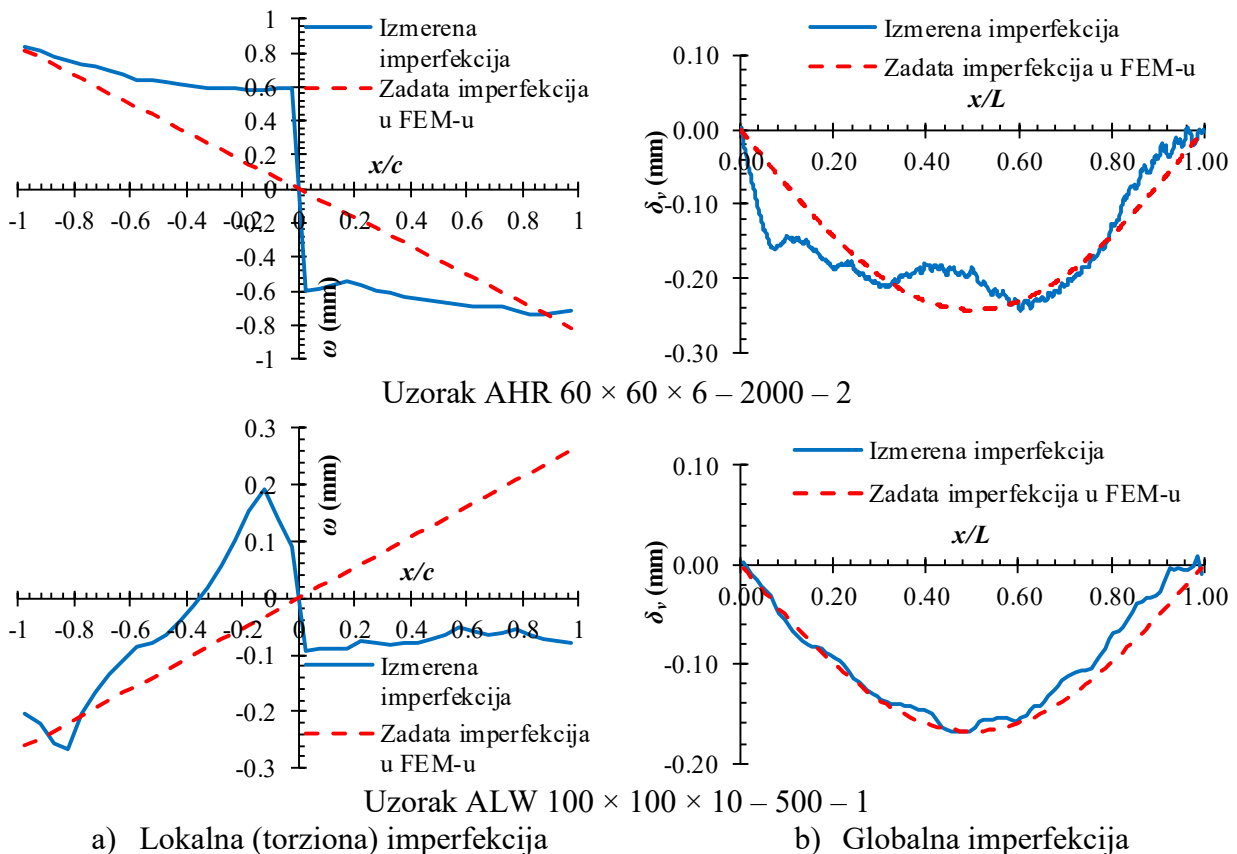
Geometrijske imperfekcije elemenata predstavljene su linearnom superpozicijom karakterističnih sopstvenih oblika izvijanja, koji odgovaraju fleksionom i torzionom obliku izvijanja, sa vrednostima amplitude u skladu sa izmerenim veličinama imperfekcija za svaki uzorak pojedinačno. Sopstveni oblici izvijanja određeni su u prvom koraku numeričke analize u elastičnoj linearnoj analizi *linear bifurcation analysis*.

Na slici 4.4 prikazana su dva oblika izvijanja za hladnooblikovane i vrućevaljane uzorke na osnovu kojih je dobijen oblik početnih geometrijskih imperfekcija. Oblici deformacija prikazani na slikama 4.4a i 4.4b odgovaraju lokalnoj (torzionoj) imperfekciji, dok oblici prikazani na slikama 4.4c i 4.4d predstavljaju oblike globalnih lučnih imperfekcija za odstupanje od pravca oko slabije ose inercije poprečnog preseka.

Na slici 4.5 prikazano je poređenje raspodele početnih geometrijskih imperfekcija dobijene merenjem (saglasno poglavlju 3.3) sa zadatom raspodelom u numeričkoj simulaciji. Poređenje je prikazano za lokalne i globalne imperfekcije za po jedan uzorak iz oblasti male i velike vitkosti.



Slika 4.4 – Sopstveni oblici izvijanja uzoraka u LBA



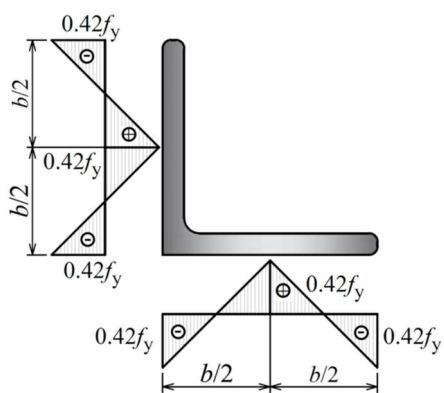
Slika 4.5 – Poređenje izmerene raspodele imperfekcija sa zadatom u numeričkoj simulaciji

4.2.4 Zaostali naponi

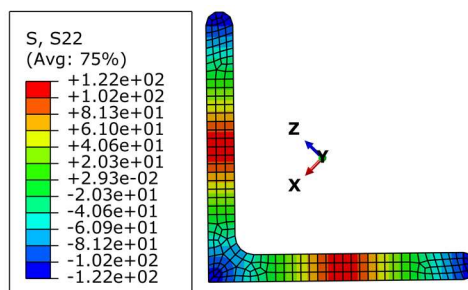
Uzimajući u obzir zanemarljiv uticaj zaostalnih napona u hladnooblikovanim elementima, na osnovu publikovanih istraživanja [63] i [64], zaostali naponi nisu eksplicitno modelirani u simulaciji eksperimenta metodom konačnih elemenata kod hladnooblikovanih ugaonika.

Na osnovu istraživanja koja su u Evropi sprovedena u drugoj polovini dvadesetog veka [22], za opisivanje raspodele zaostalih napona kod vrućevaljanih ugaonika razvijen je model linearne raspodele kroz tri tačke. Ovoj model predstavljen je simetričnom raspodelom zaostalih napona, koja je opisana naponima pritiska u uglu profila i na krajevima krakova, dok je u sredini kraka napon zatezanja istog intenziteta kao napon pritiska na krajevima i u uglu. Zaostali naponi su prema ovom modelu konstantni po debljini kraka ugaonika i međusobno uravnoteženi. Model kroz tri tačke u evropskoj specifikaciji [57], predstavljen je kao prediktivni model za određivanje nosivosti centrično pritisnutih ugaonika od ugljeničnog čelika prema EN 1993-1-1[3].

Zaostali naponi numeričkih modela uzoraka vrućevaljanih i laserski zavarenih ugaonika modelirani su prema prediktivnoj raspodeli napona kroz tri tačke, a na osnovu maksimalnih vrednosti dobijenih eksperimentalnim merenjem zaostalih napona. Na slikama 4.6a i 4.7a prikazani su usvojeni modeli raspodele zaostalih napona u poprečnim presecima vrućevaljanih i laserski zavarenih ugaonika, respektivno. Maksimalne vrednosti zaostalih napona zatezanja javljaju se u sredini krakova i imaju vrednost $0.42 \cdot f_y = 122 \text{ MPa}$ i $0.45 \cdot f_y = 119 \text{ MPa}$ kod vrućevaljanih i laserski zavarenih ugaonika, respektivno, dok se maksimalni naponi pritiska istog intenziteta nalaze u uglu i na slobodnom kraju krakova ugaonika.

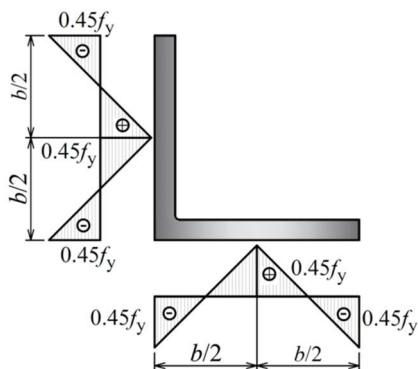


a) Linearni model kroz tri tačke za vrućevaljane ugaonike

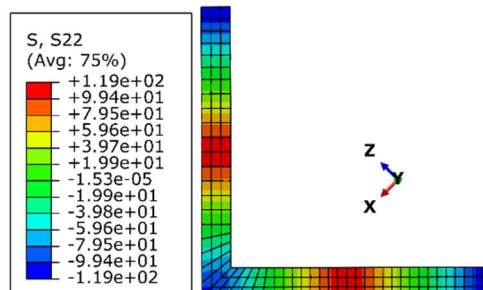


b) Raspodela zaostalih napona u modelima vrućevaljanih ugaonika

Slika 4.6 – Raspodela modeliranih zaostalih napona u vrućevaljanim ugaonicima



a) Linearni model kroz tri tačke za laserski zavarene ugaonike



b) Raspodela zaostalih napona u modelima laserski zavarenih ugaonika

Slika 4.7 – Raspodela modeliranih zaostalih napona u laserski zavarenim ugaonicima

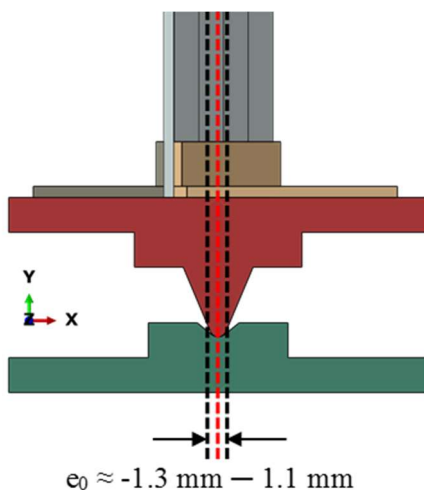
Zaostali naponi prikazani na slikama 4.6a i 4.7a generisani su u numeričkim modelima preko analitičkih formulacija temperaturnih polja unutar definisanih zona poprečnog preseka. Zaostali naponi su zadati u inicijalnom koraku u nelinearnoj analizi izvijanja, koji je prethodio nanošenju opterećenje. Rezultati numeričke analize modela sa generisanim termičkim uticajima nakon izvršenja inicijalnog koraka, prikazani na slikama 4.6b i 4.7b, potvrđuju da raspodela napona odgovara

prediktivnoj raspodeli sa amplitudama koje imaju eksperimentalno utvrđene vrednosti. Zaostali naponi su međusobno uravnoteženi unutar svakog pojedinačnog numeričkog modela.

4.2.5 Uticaj početnog ekscentriciteta delovanja opterećenja

Nakon analize ponašanja centrično pritisnutih elemenata L poprečnog preseka pri testu nosivosti na izvijanje, zaključeno je da je jedan od razloga za različite vrednosti sila i deformacija pri izvijanju elemenata u okviru iste serije, početni ekscentricitet opterećenja na krajevima uzoraka. Iako su u samom eksperimentu preduzete sve mere da unos opterećenja bude centričan, male vrednosti početnog ekscentriciteta su ipak postojale. Na osnovu očitavanja pomeranja ugibomera i zapisa dilatacija u mernim trakama, vrednost početnog ekscentriciteta unosa opterećenja u pravcu slabije ose inercije, sračunata je kao razlika ukupnog ekscentriciteta delovanja opterećenja i amplitude početne geometrijske imperfekcije u sredini visine elementa [65]. Zaključeno je da je se vrednost početnog ekscentriciteta e_0 kreće u opsegu od -1.3 mm do 1.1 mm, kao što je prikazano na slici 4.8.

Simulacija eksperimenta koja uključuje realnu geometriju zglobnih oslonaca uzoraka i postojanje ekscentriciteta opterećenja obezbedila je sofisticiranu simulaciju i validaciju numeričkih modela, čime su objašnjeni različite forme ponašanja, odnosno različiti oblici loma kod ponovljenih uzoraka iste serije.



Slika 4.8 – Početni ekscentricitet delovanja opterećenja na krajevima uzoraka

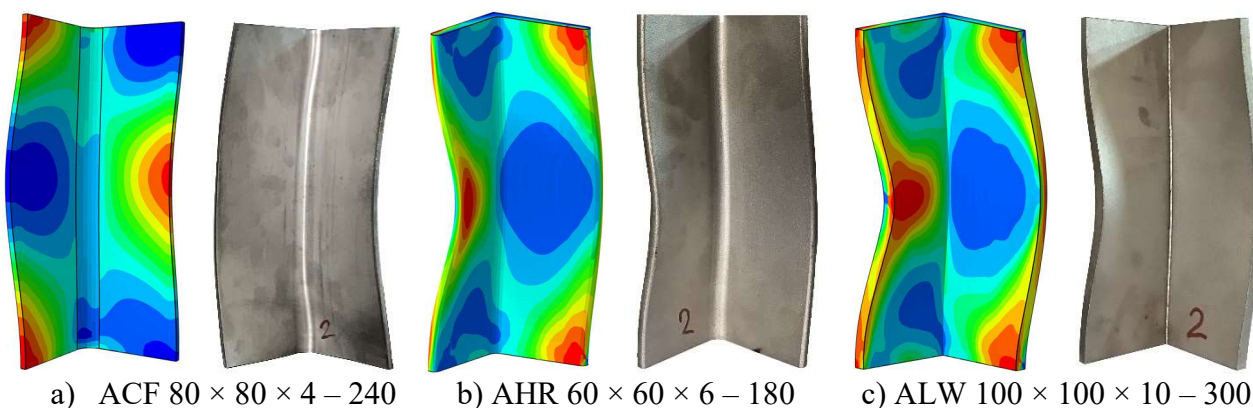
4.3 Rezultati numeričke simulacije i validacije

Nakon definisanja modela, izvršena je simulacija i validacija metodom konačnih elemenata (*FEM - finite element method*) testa kratkih stubova i testa nosivosti elemenata na izvijanje. Sa ciljem verifikacije numeričke simulacije eksperimentalnog ispitivanja, sprovedeno je poređenje ključnih rezultata: deformacije uzoraka pri dostizanju granične sile, vrednost granične sile izvijanja, zapisa sila - pomeranje i zapisa sila - aksijalne dilatacije.

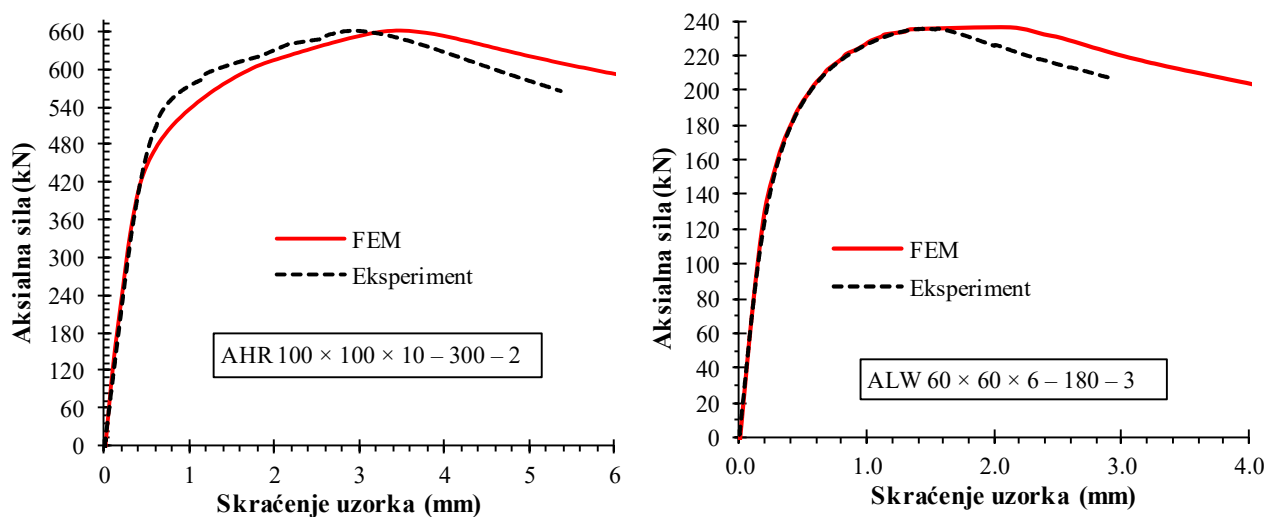
4.3.1 Numerička simulacija i validacija kratkih stubova

Poređenje deformisanog oblika izvijanja kratkog pritisnutog stuba u numeričkoj simulaciji i eksperimentalnom ispitivanju prikazano je na slici 4.9 za po jedan uzorak od svakog tipa ugaonika koji su predmet ovog istraživanja. Može se videti da oblik deformacije u numeričkoj simulaciji jako dobro oslikava oblik deformacije u eksperimentalnom ispitivanju. Poređenje dijagrama skraćenja uzoraka u funkciji nanošenja sile datih na slici 4.10 za uzorke AHR $100 \times 100 \times 10 - 300 - 2$ i ALW $60 \times 60 \times 6 - 180 - 3$, odnosno na slici 4.11 za uzorak ACF $80 \times 80 \times 4 - 240 - 1$ pokazuje vrlo dobro poklapanje rezultata numeričke simulacije i eksperimentalnog ispitivanja. Rekapitulacija nosivosti pojedinačnih uzoraka kratkih stubova dobijenih u eksperimentalnom ispitivanju, njihove srednje vrednosti u okviru ispitne grupe $N_{b,u,test}$ i granične nosivosti dobijene u numeričkoj simulaciji

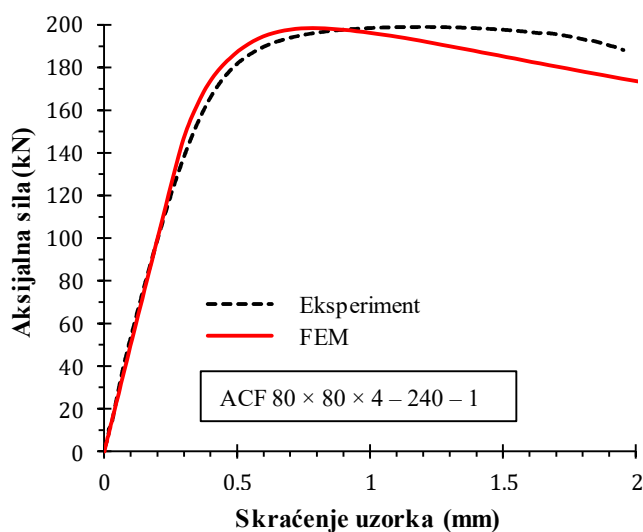
$N_{b,u,FEM}$, kao odgovarajući odnosi $N_{b,u,FEM}/N_{b,u,test}$, data su u tabeli 4-1. Srednja vrednost odnosa $N_{b,u,FEM}/N_{b,u,test}$ iznosi 0.97 sa koeficijentom varijacije od 6.63%.



Slika 4.9 – Poređenje deformisanog oblika numeričke analize i eksperimentalnog ispitivanja za kratke stubove



Slika 4.10 – Poređenje deformisanog oblika numeričke analize i eksperimentalnog ispitivanja za kratke stubove AHR i ALW



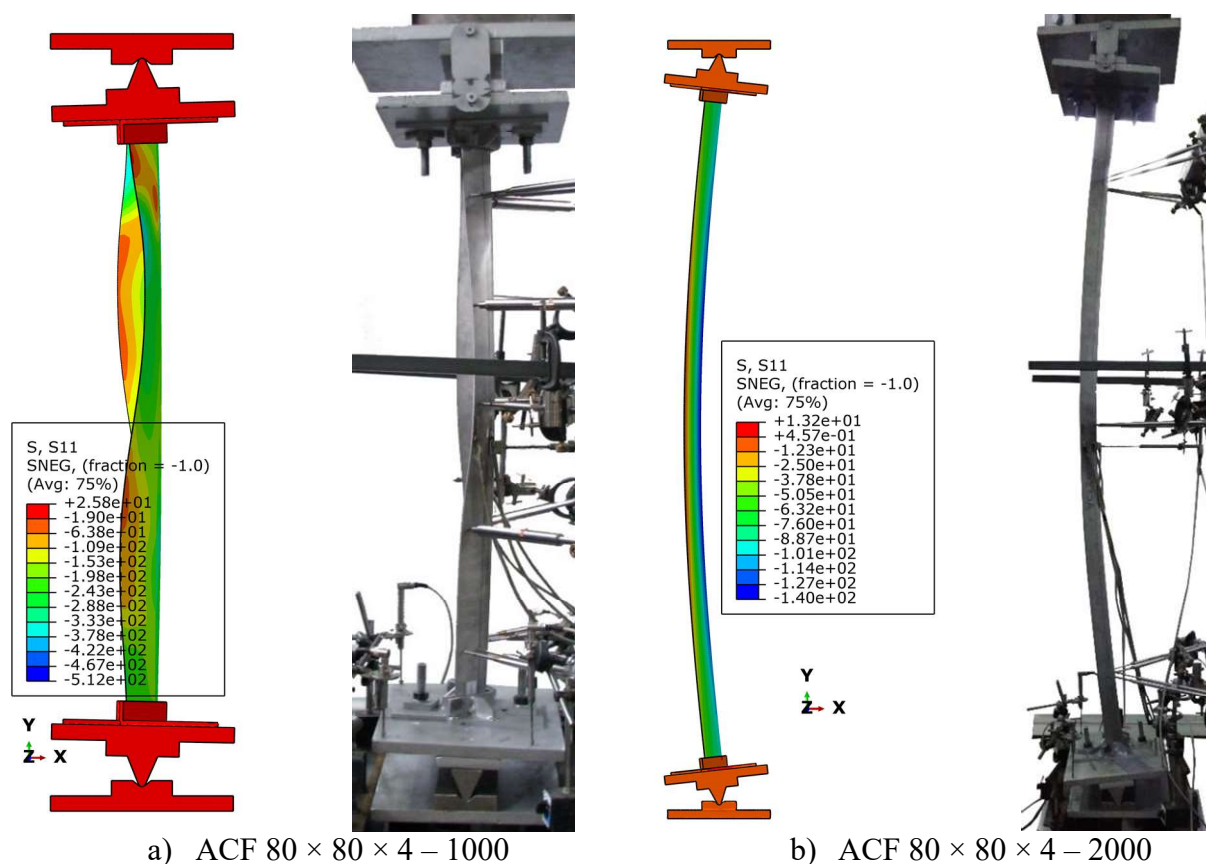
Slika 4.11 – Poređenje deformisanog oblika numeričke analize i eksperimentalnog ispitivanja za kratke stubove ACF

Tabela 4-1 Poređenje eksperimentalne i numeričke granične nosivosti kratkih stubova

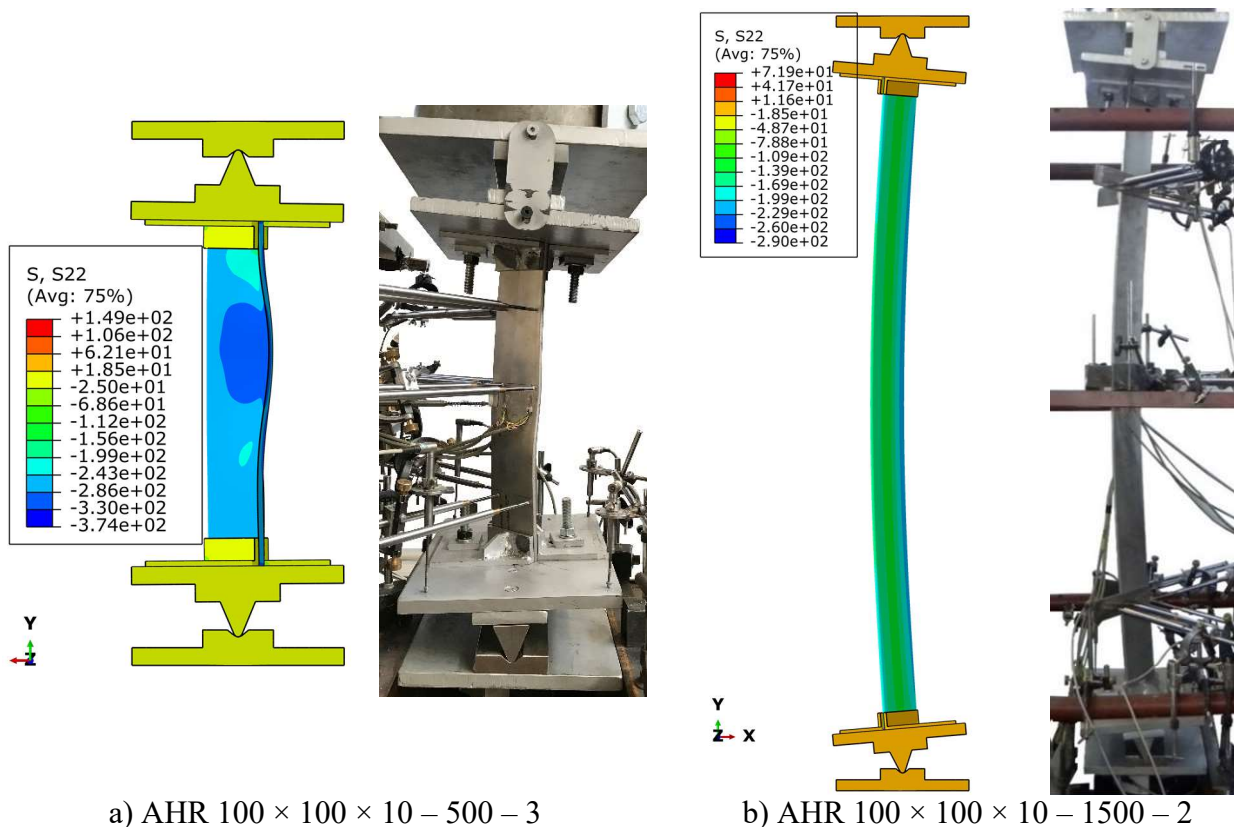
Oznaka uzorka	Eksperimentalni ispitivanje				FEM	Odnos
	Redni broj uzorka u seriji			Srednja vrednost		
	1	2	3	$N_{b,u,test}$	$N_{b,u,FEM}$	$N_{b,u,FEM}/N_{b,u,test}$
ACF $80 \times 80 \times 4 - 240$	199.0	198.2	203.7	200.3	199.5	0.996
AHR $60 \times 60 \times 6 - 180$	301.3	298.2	292.5	297.3	257.1	0.86
AHR $100 \times 100 \times 10 - 300$	659.6	661.7	595.6	638.9	660.4	1.03
ALW $60 \times 60 \times 6 - 180$	250.3	239.0	235.7	241.7	233.9	0.97
ALW $100 \times 100 \times 10 - 300$	671.1	646	630.6	649.2	638.4	0.98
Srednja vrednost						0.97
CoV (%)						6.63

4.3.2 Numerička simulacija i validacija testa nosivosti na izvijanje

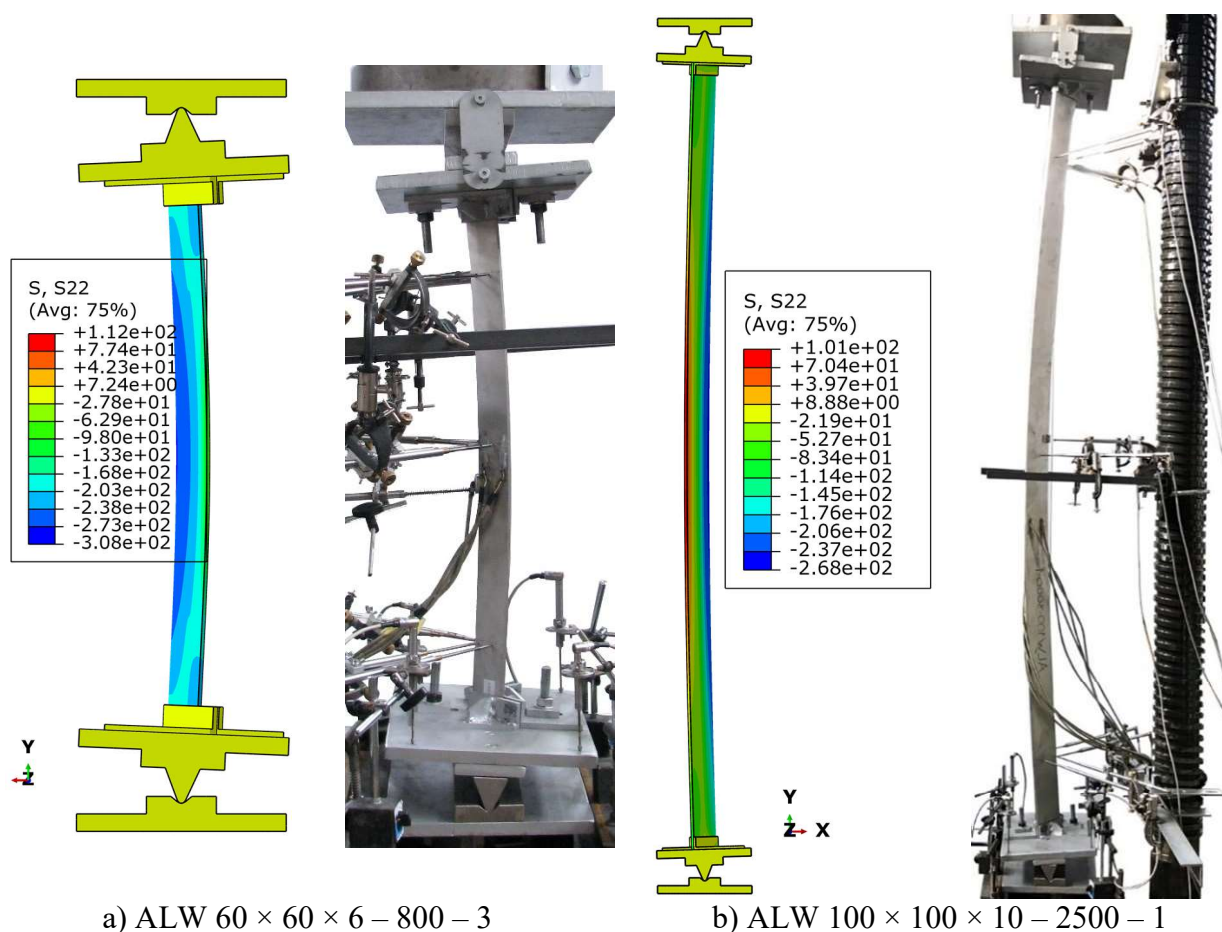
Poređene deformisanih oblika uzoraka nakon dostizanja granične nosivosti na izvijanje u eksperimentalnom ispitivanju i numeričkoj simulaciji dat je na slici 4.12 za karakteristične uzorke od hladnooblikovanih ugaonika, na slici 4.13 za karakteristične uzorke od vrućevaljanih i na slici 4.14 za karakteristične uzorke laserski zavarenih ugaonika. Kao što se na slikama može videti, deformisani oblik u numeričkoj simulaciji verno odslikava deformisani oblik u eksperimentalnom ispitivanju i u slučaju torziono-fleksionog izvijanja (slike 4.12a i 4.13a) i u slučaju fleksionog izvijanja oko slabije ose inercije (slike 4.12b, 4.13b, 4.14a i 4.14b).



Slika 4.12 – Poređenje deformisanog oblika numeričke analize i eksperimentalnog ispitivanja nosivosti na izvijanje za ACF uzorke



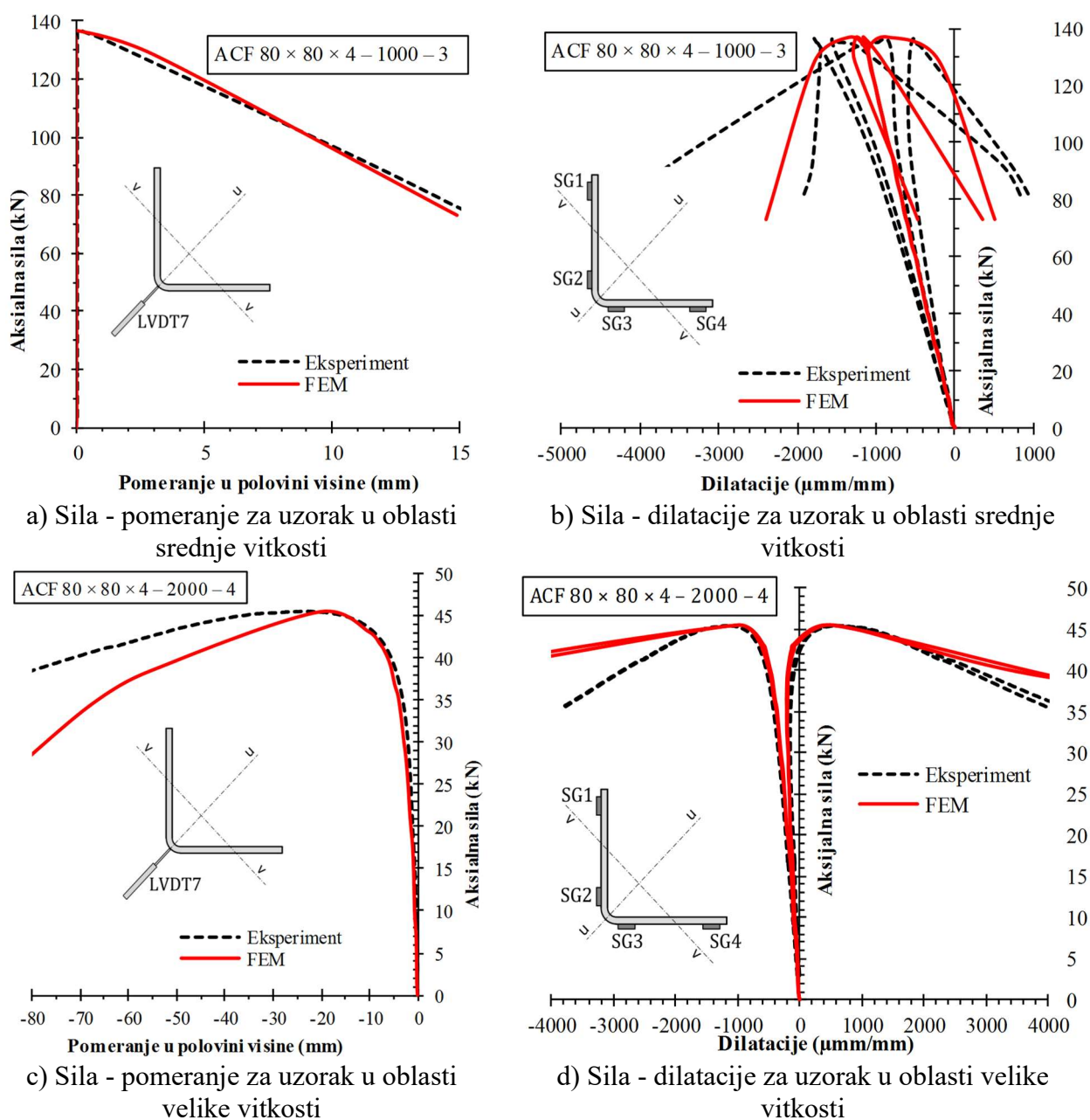
Slika 4.13 – Poređenje deformisanog oblika numeričke analize i eksperimentalnog ispitivanja nosivosti na izvijanje za AHR uzorke



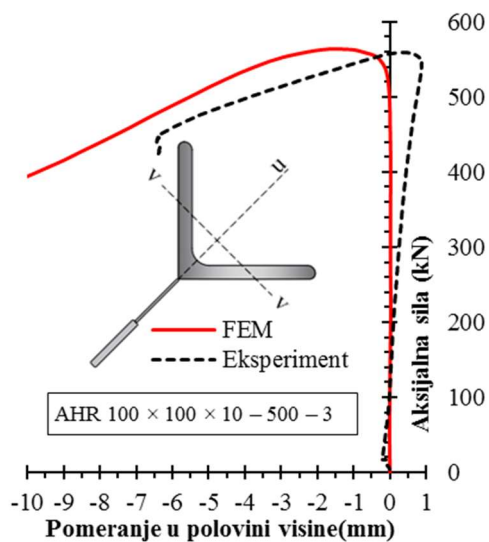
Slika 4.14 – Poređenje deformisanog oblika numeričke analize i eksperimentalnog ispitivanja nosivosti na izvijanje za ALW uzorke

Poređenje ključnih eksperimentalnih rezultata sa rezultatima numeričke simulacije prezentovanih u obliku dijagrama pomeranja u polovini visine elementa u pravcu glavne ose inercije i sile, odnosno zapisa aksijalne dilatacije i sile, prikazani su na slikama 4.15, 4.16 i 4.17 za karakteristične uzorke hladnooblikovanih, vrućevaljanih i laserski zavarenih ugaonika. Očitavanje dilatacija u modelima za simulaciju eksperimenta vršeno je u sredini visine elementa na položaju mernih traka kako je to bilo predviđeno eksperimentom. U numeričkim modelima očitana su i bočna pomeranja u ravni upravnoj na pravac slabije ose inercije koja odgovaraju pomeranjima očitanim u testovima globalnog izvijanja ugibomerom LVDT 7. Na prikazanim slikama vidi se dobro poklapanje oblika krivih, početne krutosti, kapaciteta deformacije, granične nosivosti elementa na izvijanje, kao i ponašanja uzoraka nakon dostizanja granične sile dobijenih u numeričkoj simulaciji i eksperimentalnom ispitivanju.

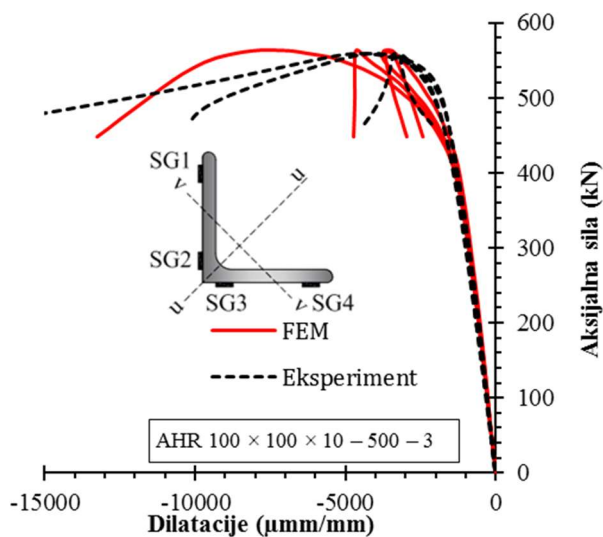
Dodatna potvrda dobre simulacije i validacije numeričkih modela pokazana je i u tabelama 4-2, 4-3 i 4-4 u kojima je dato poređenje nosivosti elemenata na izvijanje dobijeno u numeričkoj simulaciji $N_{b,u,FEM}$ i u eksperimentu $N_{b,u,exp}$ sa odgovarajućom statističkom obradom rezultata za uzorke hladnooblikovanih, vrućevaljanih i laserski zavarenih ugaonika, respektivno.



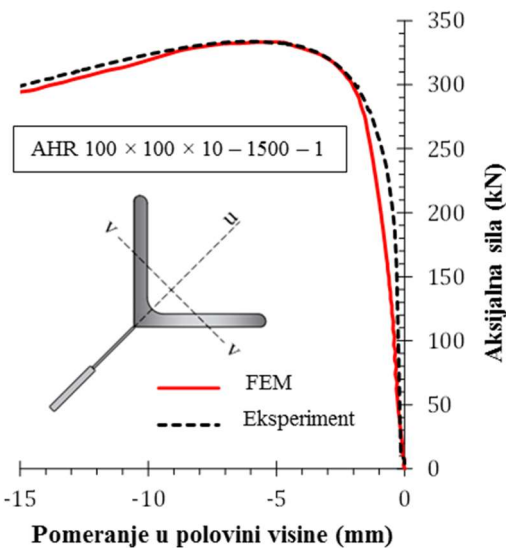
Slika 4.15 – Poređenje ključnih rezultata eksperimenta i numeričke simulacije ispitivanja nosivosti na izvijanje za ACF uzorke



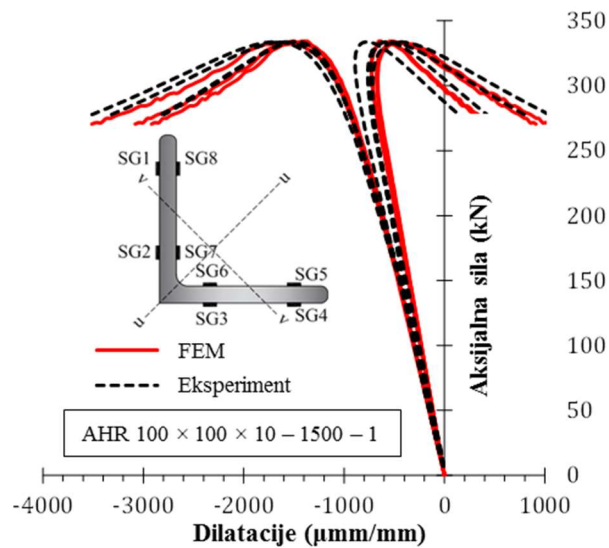
a) Sila - pomeranje za uzorak u oblasti male vitkosti



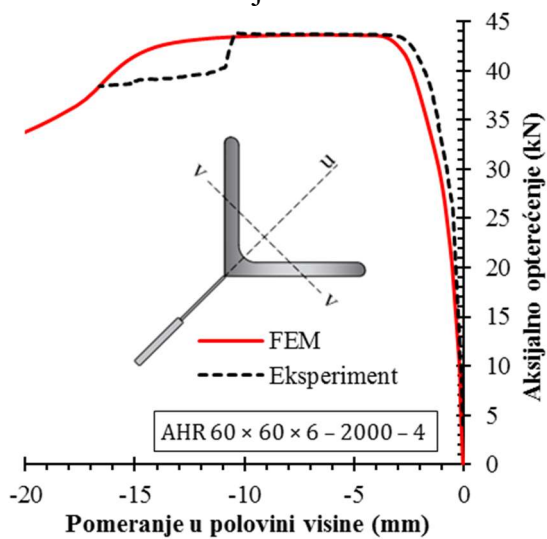
b) Sila - dilatacije za uzorak u oblasti male vitkosti



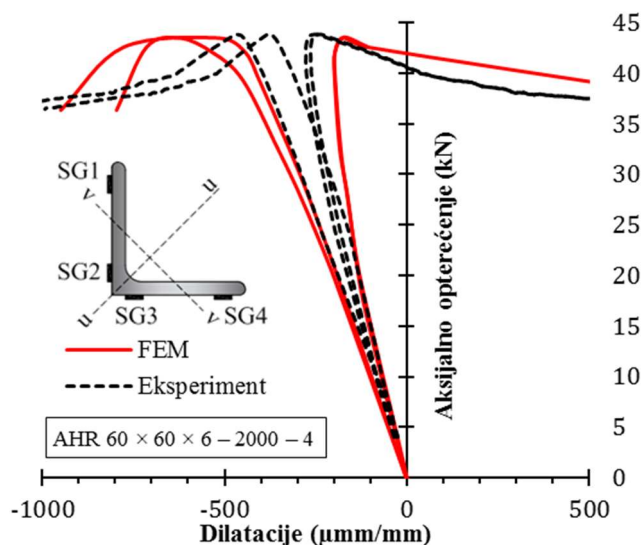
c) Sila - pomeranje za uzorak u oblasti srednje vitkosti



d) Sila - dilatacije za uzorak u oblasti srednje vitkosti

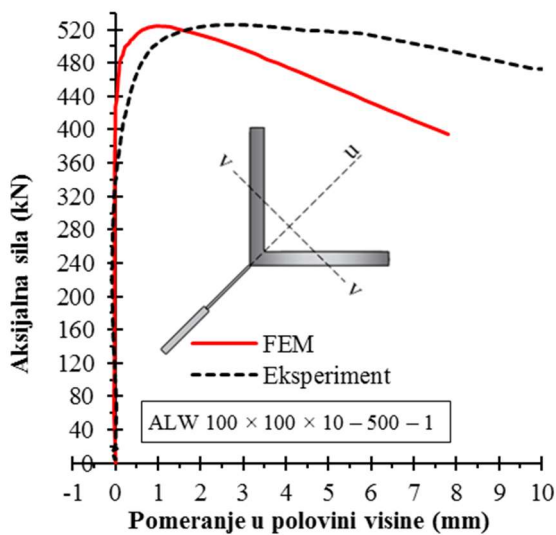


e) Sila - pomeranje za uzorak u oblasti velike vitkosti

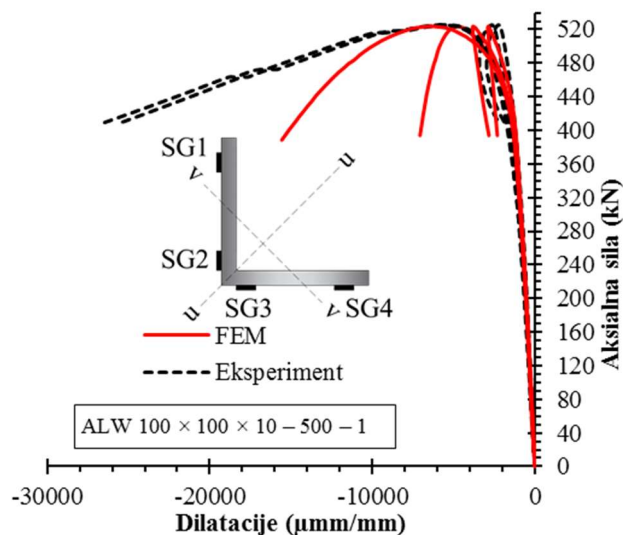


f) Sila - dilatacije za uzorak u oblasti velike vitkosti

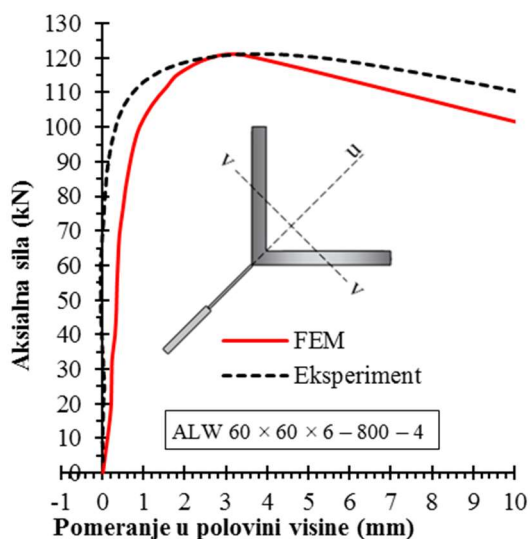
Slika 4.16 – Poređenje ključnih rezultata eksperimenta i numeričke simulacije ispitivanja nosivosti na izvjanje za AHR uzorke



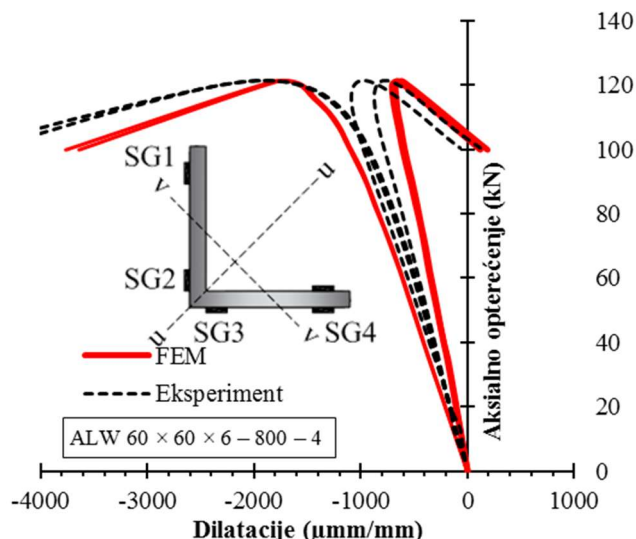
a) Sila - pomeranje za uzorak u oblasti male vitkosti



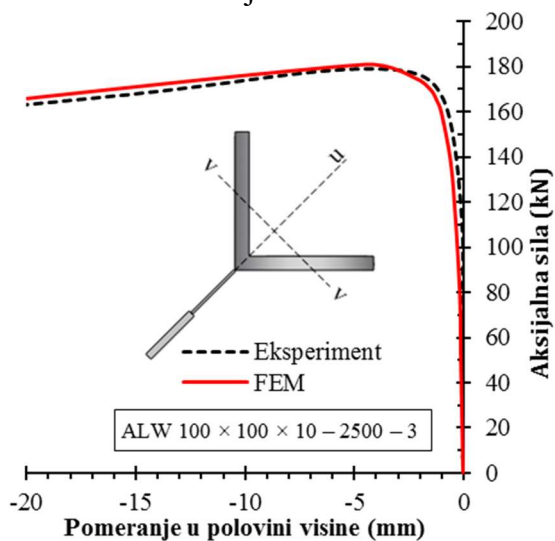
b) Sila - dilatacije za uzorak u oblasti male vitkosti



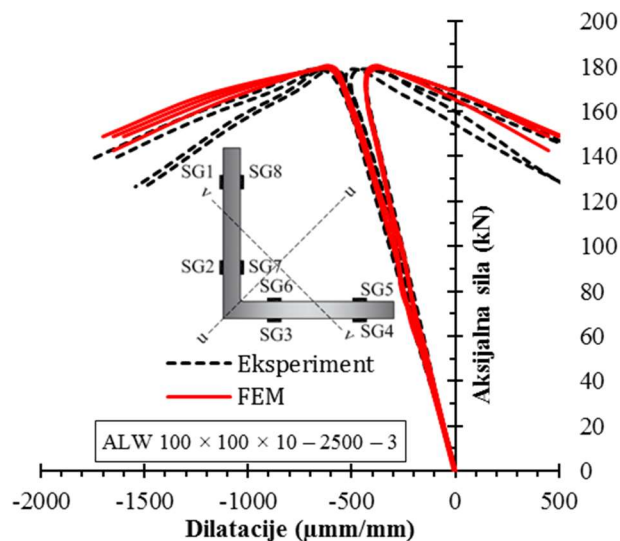
c) Sila - pomeranje za uzorak u oblasti srednje vitkosti



d) Sila - dilatacije za uzorak u oblasti srednje vitkosti



e) Sila - pomeranje za uzorak u oblasti velike vitkosti



f) Sila - dilatacije za uzorak u oblasti velike vitkosti

Slika 4.17 – Poređenje ključnih rezultata eksperimenta i numeričke simulacije ispitivanja nosivosti na izvijanju za ALW uzorke

Tabela 4-2 Poređenje eksperimentalne i numeričke nosivosti na izvijanje za ACF

Naziv uzorka	Eksperimentalni ispitivanje				Srednja vrednost	FEM	Odnos
	Redni broj uzoraka u seriji						
	1	2	3	4			
				$N_{b,u,exp}$	$N_{b,u,FEM}$	$N_{b,u,FEM}/N_{b,u,exp}$	
ACF $80 \times 80 \times 4 - 1000$	132.5	139.5	136.6	135.5	136.0	136.8	1.005
ACF $80 \times 80 \times 4 - 2000$	44.3	45.8	46.8	45.5	45.6	45.8	1.004
Srednja vrednost							1.005
CoV (%)							0.07

Tabela 4-3 Poređenje eksperimentalne i numeričke nosivosti na izvijanje za AHR

Naziv uzorka	Eksperimentalni ispitivanje				Srednja vrednost	FEM	Odnos
	Redni broj uzoraka u seriji						
	1	2	3	4			
				$N_{b,u,exp}$	$N_{b,u,FEM}$	$N_{b,u,FEM}/N_{b,u,exp}$	
AHR $60 \times 60 \times 6 - 800$	163.9	145.1	172.2	151.6	158.2	159.6	1.01
AHR $60 \times 60 \times 6 - 2000$	38.0	47.1	64.4	43.8	48.3	43.5	0.90
AHR $100 \times 100 \times 10 - 500$	466	671.7	558.7	595.2	572.9	563.4	0.98
AHR $100 \times 100 \times 10 - 1500$	333.7	290.2	423.0	289.4	334.1	334.0	1.00
AHR $100 \times 100 \times 10 - 2500$	182.9	188.9	181.8	204.7	186.5	190.2	1.02
Srednja vrednost							0.98
CoV (%)							4.9

Tabela 4-4 Poređenje eksperimentalne i numeričke nosivosti na izvijanje za ALW

Naziv uzorka	Eksperimentalni ispitivanje				Srednja vrednost	FEM	Odnos
	Redni broj uzoraka u seriji						
	1	2	3	4			
				$N_{b,u,exp}$	$N_{b,u,FEM}$	$N_{b,u,FEM}/N_{b,u,exp}$	
ALW $60 \times 60 \times 6 - 800$	116.6	113.3	122.3	121.2	118.4	120.9	1.02
ALW $60 \times 60 \times 6 - 2000$	29.3	31.2	55.9	56.6	43.3	35.9	0.83
ALW $100 \times 100 \times 10 - 500$	525.3	532.1	520.1	518.8	524.1	523.8	1.00
ALW $100 \times 100 \times 10 - 1500$	311.3	296.5	285.0	284.0	294.2	302.5	1.03
ALW $100 \times 100 \times 10 - 2500$	145.6	156.2	178.8	194.4	168.8	179.8	1.07
Srednja vrednost							0.99
CoV (%)							9.4

Kod poređenja rezultata za hladnooblikovane ugaonike nailazimo na gotovo identične vrednosti aritmetičke sredine nosivosti uzoraka na izvijanje u eksperimentu i vrednosti nosivosti u numeričkoj analizi. Srednja vrednost odnosa nosivosti iznosi 1.005 sa koeficijentom varijacije od 0.07%. Kod vrućevaljanih i laserski zavarenih modela srednja vrednost odnosa nosivosti na izvijanje u eksperimentu i numeričkoj analizi iznosi 0.98 i 0.99, sa koeficijentima varijacije od 4.9% i 9.4%, respektivno.

5 PARAMETARSKA ANALIZA

5.1 Uvod

Na osnovu kalibrisanih numeričkih modela koji verno opisuju ponašanje centrično pritisnutih uzoraka u eksperimentalnom ispitivanju razvijana je parametarska analiza sa ciljem dobijanja velikog broja rezultata neophodnog za definisanje proračunskih preporuka. Parametarska analiza sprovedena je za hladnooblikovane ugaonike od niskolegirano dupleks nerđajućeg čelika EN 1.4162, odnosno vrućevaljane i laserski zavarene ugaonike od austenitne legure nerđajućeg čelika EN 1.4301.

Za razliku od uslova oslanjanja koji opisuju realne oslonce numeričkih modela koji su opisani u prethodnom poglavlju, u numeričkim modelima parametarske analize, granični uslovi na krajevima elemenata su modelirani kao idealizovani zglobni oslonac. U referentnim tačkama koje se nalaze u težištima krajnjih poprečnih preseka sprečena su pomeranja u pravcu glavnih osa inercije i na jednom kraju pomeranje u podužnom pravcu, dok je dozvoljena rotacija u svim pravcima. Referentne tačke su povezane sa površinama krajnjih poprečnih preseka preko opcije *constraint coupling*. Primenjena metoda analize, brzina nanošenja opterećenja, vrsta i dimenzija konačnih elemenata i materijalni modeli za niskolegirani dupleks nerđajući čelik i austenitni nerđajući čelik, odgovaraju onim korišćenim u simulaciji eksperimentalnog ispitivanja.

Razvoj krivih izvijanja za proračun pritisnutih elemenata čelične konstrukcije, koje implicitno uzimaju u obzir uticaj strukturnih imperfekcija, zasnovan je na pretpostavci da su vrednosti zaostalih napona i početnih geometrijskih imperfekcija jednake maksimalnim tolerancijama izrade čeličnih proizvoda. Dakle, veličina, raspored i oblik strukturnih imperfekcija imaju značajnu ulogu u određivanju nosivosti centrično pritisnutih ugaonika od nerđajućeg čelika. U cilju analize uticaja početnih strukturnih imperfekcija: raspodele i znaka (smera) geometrijskih imperfekcija i uticaja zaostalih napona (načina proizvodnje) na oblik loma centrično pritisnutog ugaonika i vrednost granične nosivosti, sprovedena je studija osetljivosti na imperfekcije za sva tri različita tipa ugaonika koji su predmet ovog istraživanja. U studiji osetljivosti razmatrano je pojedinačno i zajedničko delovanje lokalnih i globalnih početnih geometrijskih imperfekcija i zaostalih napona.

5.2 Studija osetljivosti na imperfekcije

Za svaki od tri različita tipa ugaonika koji su predmet ovog istraživanja sprovedena je studija osetljivosti na pojedinačna i kombinovana dejstva strukturnih imperfekcija. U ovoj studiji za jedan poprečni presek ugaonika varirana je dužina elementa tako da uključi opseg male, srednje i velike vitkosti. Određena je nosivost na izvijanje: (i) idealizovano pravog štapa bez zaostalih napona (ii) realnog štapa koji uključuje (ii) samo zaostale napone (iii) samo geometrijske imperfekcije – lokalne i globalne – uzimajući u obzir različite kombinacije njihovog znaka (smera) i (iv) istovremeno delovanje geometrijskih imperfekcija i zaostalih napona. Rezultati su prikazani u vidu odnosa vrednosti graničnih nosivosti razmatranih modela koji uključuju uticaj imperfekcija i vrednosti granične nosivosti ekvivalentnog idealizovanog modela bez strukturnih imperfekcija. Studija osetljivosti predstavlja osnovu za uključivanje relevantne kombinacije geometrijskih imperfekcija i zaostalih napona u numeričke modele koji su predmet parametarske analize.

5.2.1 Studija osetljivosti za hladnooblikovane ugaonike

Studija osetljivosti na imperfekcije kod hladnooblikovanih ugaonika sprovedena je na elementima čiji poprečni presek ima nominalne dimenzije $80 \times 80 \times 4$ mm, sa različitim dužinama koje pokrivaju opseg bezdimenzionalne vitkosti od 0.236 do 2.671. Materijalni modeli razvijeni su prema rezultatima standardnog testa pri zatezanju za niskolegirani dupleks nerđajući čelik EN 1.4162 (poglavlje 3.2.1), kao što je to opisano u poglavlju 4.2.2.

Svim modelima dodeljena je početna imperfekcija dobijena superpozicijom lučne globalne imperfekcije koja odgovara prvom sopstvenom obliku fleksionog izvijanja oko slabije ose inercije, sa amplitudom od $\delta_0 = L/1000$ (gde je sa L označena dužina uzorka) i prvog sopstvenog oblika torzionog izvijanja sa amplitudom ω_0 . Amplituda fleksione imperfekcije vrednosti $L/1000$ predstavlja 75% maksimalne proizvodne tolerancije prema EN 1090-2 [16] i u saglasnosti je sa prilogom C standarda EN 1993-1-5 [66]. Za amplitudu torziona imperfekcije korišćene su dve različite vrednosti: $\omega_0 = t/10$ (gde t predstavlja debljinu kraka ugaonika) prema istraživanjima [36] i [39] i $\omega_0 = b/50$ (gde b predstavlja širinu kraka ugaonika) saglasno sa prilogom C standarda EN 1993-1-5 [66]. Obzirom da znak početnih geometrijskih imperfekcija nije eksplicitno definisan u proizvodnim tolerancijama [16], oba pravca početne nesavršenosti su razmatrana u studiji osetljivosti. Pozitivni smer globalne imperfekcije odgovara smeru deformacije fleksiono izvijenog elemenata u linearnoj bifurkacionoj analizi, dok negativni smer odgovara suprotnom smeru u odnosu na deformaciju dobijenu u linearnoj bifurkacionoj analizi. Pozitivna torziona imperfekcija predstavljena je rotacijom poprečnog preseka u smeru kazaljke na satu i prikazana je na slici 4.4a, dok pozitivan znak globalne (fleksione) deformacije znači da deformacija elementa ima oblik savijanja oko slabije ose inercije usled koga u uglu L profila dolazi do pritiska, kao što je prikazano na slici 4.4c.

Vrednosti nosivosti realnih numeričkih modela koji uključuju geometrijske imperfekcije (označene $N_{u,imper}$) normirane su sa nosivošću idealno pravih elementa bez imperfekcija (označene $N_{u,straight}$) i prikazani u tabeli 5-1. Značenje oznake numeričkih modela u parametarskoj analizi su ista kao u eksperimentalnom ispitivanju. Oznaka $\bar{\lambda}_v$ u tabeli predstavlja vrednost bezdimenzionalne vitkosti elementa. Kombinacija imperfekcija prezentovana je oznakama LI i GI , gde LI ima značenje lokalne (torziona) imperfekcije i ima vrednost i znak lokalne imperfekcije ($\pm t/10$ ili $\pm b/50$), a GI ima značenje globalne (fleksione) imperfekcije i ima vrednost $L/1000$, sa odgovarajućim znakom.

Tabela 5-1 Rezultati studije osetljivosti na imperfekcije za hladnooblikovane ugaonike

Naziv elementa	$\bar{\lambda}_v$	+t/10	+t/10	-t/10	-t/10	+b/50	+b/50	-b/50	-b/50
		i	i	i	i	i	i	i	i
		+GI	-GI	+GI	-GI	+GI	-GI	+GI	-GI
$N_{u,imperfect} / N_{u,straight}$									
ACF 80 × 80 × 4 – 300	0.236	0.852	0.863	0.852	0.863	0.741	0.751	0.741	0.751
ACF 80 × 80 × 4 – 400	0.314	0.822	0.815	0.822	0.815	0.712	0.705	0.712	0.706
ACF 80 × 80 × 4 – 500	0.393	0.813	0.797	0.813	0.797	0.699	0.687	0.699	0.688
ACF 80 × 80 × 4 – 600	0.471	0.799	0.769	0.799	0.770	0.692	0.672	0.692	0.672
ACF 80 × 80 × 4 – 700	0.550	0.789	0.748	0.788	0.747	0.692	0.653	0.692	0.653
ACF 80 × 80 × 4 – 800	0.629	0.816	0.752	0.816	0.752	0.707	0.658	0.707	0.659
ACF 80 × 80 × 4 – 900	0.707	0.813	0.726	0.812	0.726	0.705	0.639	0.705	0.640
ACF 80 × 80 × 4 – 1000	0.786	0.822	0.715	0.823	0.715	0.713	0.632	0.713	0.632
ACF 80 × 80 × 4 – 1200	0.943	0.858	0.691	0.860	0.690	0.744	0.608	0.745	0.608
ACF 80 × 80 × 4 – 1400	1.100	0.747	0.647	0.746	0.647	0.758	0.587	0.756	0.587
ACF 80 × 80 × 4 – 1500	1.179	0.683	0.620	0.682	0.620	0.687	0.568	0.686	0.568
ACF 80 × 80 × 4 – 1600	1.257	0.655	0.607	0.656	0.607	0.656	0.571	0.657	0.571
ACF 80 × 80 × 4 – 1800	1.414	0.613	0.579	0.613	0.579	0.613	0.561	0.613	0.561
ACF 80 × 80 × 4 – 2000	1.571	0.566	0.551	0.566	0.551	0.566	0.542	0.566	0.542
ACF 80 × 80 × 4 – 2200	1.729	0.519	0.515	0.519	0.519	0.519	0.513	0.519	0.513
ACF 80 × 80 × 4 – 2400	1.886	0.477	0.476	0.477	0.476	0.477	0.475	0.477	0.475
ACF 80 × 80 × 4 – 2500	1.964	0.458	0.457	0.458	0.457	0.458	0.457	0.458	0.457
ACF 80 × 80 × 4 – 2600	2.043	0.441	0.440	0.441	0.440	0.441	0.440	0.441	0.440
ACF 80 × 80 × 4 – 2800	2.200	0.402	0.401	0.402	0.401	0.401	0.401	0.401	0.402
ACF 80 × 80 × 4 – 3000	2.357	0.372	0.372	0.372	0.372	0.372	0.372	0.372	0.372
ACF 80 × 80 × 4 – 3200	2.514	0.343	0.343	0.343	0.343	0.342	0.342	0.342	0.343
ACF 80 × 80 × 4 – 3400	2.671	0.320	0.320	0.320	0.320	0.319	0.320	0.319	0.320

Analizirajući rezultate prikazane u tabeli 5-1 može se zaključiti da torziona imperfekcija intenziteta $b/50$ daje niže vrednosti graničnih nosivosti u odnosu na torzionu imperfekciju sa amplitudom $t/10$ u oblasti male i srednje vitkosti, dok u oblasti velike vitkosti veličina i oblik torzione imperfekcije nemaju značajan uticaj na graničnu nosivost elementa na izvijanje. Znak torzione imperfekcije takođe nema značajan uticaj na vrednost sile pri kojoj dolazi do izvijanja. Početne geometrijske imperfekcije u obliku superpozicije lokalne imperfekcije sa amplitudom $+b/50$ i negativne globalne imperfekcije $-L/1000$ koje prouzrokuju najveće smanjenje nosivosti idealno pravih elementa, koriste se u parametarskoj analizi. Redukcija nosivosti usled ovakve kombinacije geometrijskih imperfekcija u oblasti male vitkosti iznosi 25%, dok u oblasti velike vitkosti dostiže vrednost od 68%.

5.2.2 Studija osetljivosti za vrućevaljane ugaonike

Numerički model ugaonika nominalnih dimenzija poprečnog preseka $100 \times 100 \times 10$ mm korišćen je za studiju osetljivosti na imperfekcije za vrućevaljane ugaonike. Variranjem dužina elemenata studija je obuhvatila opseg bezdimenzionalne vitkosti od 0.305 do 2.441. U numeričkim modelima korišćen je materijalni model razvijen prema eksperimentalno određenim mehaničkim svojstvima austenitnog nerđajućeg čelika EN 1.4301 (poglavlje 4.2.2).

Zaostali naponi indukovani su u numeričkim modelima pomoću analitičkih funkcija temperaturnog polja u različitim delovima poprečnog preseka prema prediktivnoj raspodeli napona kroz tri tačke koja je prikazana na slici 4.7a, na način objašnjen u poglavlju 0.

Početne geometrijske imperfekcije zadate su linearnom superpozicijom lokalne torzione imperfekcije i globalne imperfekcije – fleksione imperfekcije oko slabije ose preseka, čiji oblik odgovara obliku polutalasa sinusne funkcije (lučna imperfekcija) sa amplitudom od $\delta_0 = L/1000$. U slučaju torzione imperfekcije, najniži sopstveni oblik torzionog izvijanja numeričkog modela skaliran je tako da maksimalno odstupanje ω_0 ima vrednost koja odgovara 80% proizvodne tolerancije prema EN 10056-2 [54]. Prema ovom standardu, proizvodna tolerancija odstupanja kraka poprečnog preseka od upravnosti data je u funkciji širine kraka ugaonika b i iznosi 1 mm za $b \leq 100$ mm, 1.5 mm za $100 < b \leq 150$, 2 mm za $150 < b \leq 200$ i 3 mm za $b > 200$ mm.

Obzirom da u proizvodnim tolerancijama znak imperfekcija nije definisan, sprovedena je studija osetljivosti uticaja znaka imperfekcije na oblik loma i graničnu nosivost vrućevaljanog ugaonika. Pozitivna torziona imperfekcija predstavljena je rotacijom u smeru kazaljke na satu i prikazana je na slici 4.4b, dok pozitivan predznak globalne (fleksione) deformacije znači da deformacija ima oblik savijanja oko slabije ose inercije usled koga u uglu poprečnog preseka ugaonika dolazi do zatezanja, kao što je to prikazano na slici 4.4d.

U studiji osetljivosti razmatrani su (i) pojedinačni uticaji zaostalih napona, (ii) pojedinačni uticaji početnih geometrijskih imperfekcija uzimajući u obzir različite smerove (znak) globalnih deformacija (iii) kombinovani uticaji zaostalih napona i geometrijskih imperfekcija. U tabeli 5-2 prikazane su vrednosti nosivosti elemenata koji uključuju pojedinačne i kombinovane uticaje strukturnih imperfekcija (označene $N_{u,imper}$) normirane sa nosivošću idealno pravih elementa bez imperfekcija (označene $N_{u,straight}$). Oznaka $\bar{\lambda}_v$ u tabeli predstavlja vrednost bezdimenzionalne vitkosti elementa. U tabeli 5-2, skraćenica RS se odnosi na uticaj zaostalih napona (*residual stress*) dok se skraćenica GI odnosi na uticaj geometrijskih imperfekcija.

Saglasno rezultatima studije osetljivosti prikazanim u tabeli 5-2 može se zaključiti da početne geometrijske imperfekcije (pojedinačno dejstvo) u znatno većoj vrednosti redukuju graničnu nosivost idealizovano pravog elemenata u odnosu na pojedinačno dejstvo zaostalih napona. Redukcija nosivosti usled geometrijskih imperfekcija je do 50% u oblasti velike vitkosti, dok je redukcija nosivosti usled zaostalih napona do 28% u oblasti velike vitkosti. Granične nosivosti pritisnutih vrućevaljanih ugaonika izloženih kombinovanih dejstvima početnih geometrijskih imperfekcija i zaostalih napona nisu jednake superpoziciji graničnih nosivosti elemenata izloženih pojedinačnim dejstvima razmatranih imperfekcija. Najveća redukcija nosivosti na izvijanje idealizovanog elementa

od 53% je usled kombinovanog dejstva zaostalih napona i geometrijskih imperfekcija u kojima globalna imperfekcija ima negativan znak.

Tabela 5-2 Rezultati studije osetljivosti na imperfekcije za vrućevaljane ugaonike

Naziv elementa	$\bar{\lambda}_v$	$N_{u,imperfect} / N_{u,straight}$				
		Individualni uticaji GI i RS			Kombinovan uticaj GI i RS	
		bez GI i sa RS	Bez RS i sa +GI	Bez RS i sa -GI	Sa +GI i RS	Sa -GI i RS
AHR 100 × 100 × 10 – 500	0.305	1.00	0.96	1.00	0.96	1.00
AHR 100 × 100 × 10 – 600	0.366	1.00	0.96	0.99	0.96	0.98
AHR 100 × 100 × 10 – 700	0.427	1.00	0.98	0.98	0.98	0.98
AHR 100 × 100 × 10 – 800	0.488	1.00	0.95	0.97	0.95	0.96
AHR 100 × 100 × 10 – 900	0.549	1.00	0.95	0.96	0.94	0.94
AHR 100 × 100 × 10 – 1000	0.610	1.00	0.94	0.95	0.93	0.93
AHR 100 × 100 × 10 – 1200	0.732	1.00	0.92	0.93	0.90	0.90
AHR 100 × 100 × 10 – 1300	0.793	0.98	0.90	0.92	0.87	0.87
AHR 100 × 100 × 10 – 1400	0.854	0.95	0.86	0.88	0.84	0.83
AHR 100 × 100 × 10 – 1500	0.915	0.93	0.82	0.84	0.80	0.79
AHR 100 × 100 × 10 – 1600	0.976	0.92	0.80	0.81	0.77	0.76
AHR 100 × 100 × 10 – 1700	1.037	0.92	0.79	0.80	0.76	0.75
AHR 100 × 100 × 10 – 1800	1.098	0.96	0.80	0.81	0.77	0.75
AHR 100 × 100 × 10 – 2000	1.220	0.94	0.82	0.84	0.79	0.78
AHR 100 × 100 × 10 – 2200	1.342	0.93	0.83	0.84	0.79	0.78
AHR 100 × 100 × 10 – 2400	1.464	0.89	0.78	0.79	0.77	0.72
AHR 100 × 100 × 10 – 2500	1.525	0.85	0.74	0.76	0.72	0.70
AHR 100 × 100 × 10 – 2600	1.586	0.82	0.70	0.72	0.71	0.69
AHR 100 × 100 × 10 – 2800	1.708	0.83	0.67	0.68	0.67	0.62
AHR 100 × 100 × 10 – 3000	1.831	0.79	0.63	0.65	0.65	0.62
AHR 100 × 100 × 10 – 3200	1.953	0.74	0.61	0.62	0.66	0.60
AHR 100 × 100 × 10 – 3400	2.075	0.75	0.59	0.60	0.63	0.52
AHR 100 × 100 × 10 – 3500	2.136	0.76	0.57	0.58	0.61	0.53
AHR 100 × 100 × 10 – 3600	2.197	0.76	0.56	0.57	0.59	0.52
AHR 100 × 100 × 10 – 3800	2.319	0.75	0.53	0.54	0.56	0.50
AHR 100 × 100 × 10 – 4000	2.441	0.72	0.50	0.51	0.55	0.47

5.2.3 Studija osetljivosti za laserski zavarene ugaonike

Analogno studiji osetljivosti za vrućevaljane ugaonike, sprovedena je studija osetljivosti za laserski zavarene ugaonike na poprečnom preseku nominalnih dimenzija 100 × 100 × 10 mm. Mehanička svojstva materijala i raspodela zaostalih napona modelirani su na osnovu rezultata eksperimentalnih ispitivanja prikazanih u tabeli 3-8 (poglavlje 3.2.2), odnosno na slici 3.30 (poglavlje 3.4), respektivno.

Na osnovu rezultata studije osetljivosti na imperfekcije za laserski zavarene ugaonike prikazanih u tabeli 5-3 može se zaključiti da redukcija nosivosti idealizovano pravog elemenata usled pojedinačnih dejstava zaostalih napona i početnih geometrijskih imperfekcija u oblasti velike vitkosti dostiže vrednost od 50% i 61%, respektivno. Kao što je to bio slučaj i sa vrućevaljanim ugaonicima, najmanja granična nosivost dobijena je za kombinovano dejstvo zaostalih napona i negativne vrednosti globalne imperfekcije. Redukcija nosivosti pritisnutog laserski zavarenog ugaonika velike vitkosti u ovom slučaju dostiže vrednost od 64%.

Poredeći tabelu 5-3 i tabelu 5-2 zaključuje se da su laserski zavareni ugaonici osetljiviji kako na pojedinačne uticaje zaostalih napona i početnih geometrijskih imperfekcija, tako i na njihov

kombinovani uticaj. Zaostali naponi smanjuju nosivosti laserski zavarenih ugaonika idealizovane geometrije za 22% manje u odnosu na ekvivalentne vrućevaljane ugaonike u oblasti velike vitkosti. Početne geometrijske imperfekcije smanjuju nosivost idealizovano pravog laserski zavarenih ugaonika za 11% više u odnosu na vrućevaljani ugaonik ekvivalentne nominalne geometrije. Takođe, kombinacija zaostalih napona i početnih geometrijskih imperfekcija smanjuje nosivost idealizovano pravog laserski zavarenog ugaonika za 11% više u odnosu na ekvivalentni vrućevaljani ugaonik u oblasti velike vitkosti.

Tabela 5-3 Rezultati studije osetljivosti na imperfekcije za laserski zavarene ugaonike

Naziv elementa	$\bar{\lambda}_v$	$N_{u,imperfect} / N_{u,straight}$				
		Individualni uticaji GI i RS			Kombinovan uticaj GI i RS	
		Bez GI i sa RS	Bez RS i sa +GI	Bez RS i sa -GI	Sa +GI i RS	Sa -GI i RS
ALW 100 × 100 × 10 – 500	0.295	1.00	0.94	0.98	0.94	0.98
ALW 100 × 100 × 10 – 600	0.354	1.00	0.95	0.97	0.95	0.96
ALW 100 × 100 × 10 – 700	0.413	0.99	0.95	0.96	0.95	0.95
ALW 100 × 100 × 10 – 800	0.472	0.98	0.94	0.92	0.93	0.93
ALW 100 × 100 × 10 – 900	0.531	0.97	0.94	0.94	0.93	0.92
ALW 100 × 100 × 10 – 1000	0.591	0.97	0.94	0.94	0.93	0.92
ALW 100 × 100 × 10 – 1200	0.709	0.95	0.91	0.91	0.89	0.87
ALW 100 × 100 × 10 – 1300	0.768	0.92	0.88	0.88	0.86	0.83
ALW 100 × 100 × 10 – 1400	0.827	0.89	0.84	0.84	0.82	0.79
ALW 100 × 100 × 10 – 1500	0.886	0.86	0.79	0.80	0.78	0.75
ALW 100 × 100 × 10 – 1600	0.945	0.82	0.76	0.76	0.74	0.71
ALW 100 × 100 × 10 – 1700	1.004	0.81	0.74	0.74	0.73	0.69
ALW 100 × 100 × 10 – 1800	1.063	0.81	0.75	0.75	0.72	0.69
ALW 100 × 100 × 10 – 2000	1.181	0.81	0.78	0.76	0.77	0.68
ALW 100 × 100 × 10 – 2200	1.299	0.78	0.75	0.75	0.76	0.67
ALW 100 × 100 × 10 – 2400	1.417	0.73	0.72	0.72	0.71	0.66
ALW 100 × 100 × 10 – 2500	1.476	0.73	0.69	0.69	0.69	0.60
ALW 100 × 100 × 10 – 2600	1.535	0.70	0.64	0.64	0.64	0.60
ALW 100 × 100 × 10 – 2800	1.653	0.64	0.59	0.59	0.62	0.50
ALW 100 × 100 × 10 – 3000	1.772	0.64	0.55	0.55	0.56	0.50
ALW 100 × 100 × 10 – 3200	1.890	0.57	0.51	0.51	0.57	0.47
ALW 100 × 100 × 10 – 3400	2.008	0.52	0.47	0.47	0.56	0.45
ALW 100 × 100 × 10 – 3500	2.067	0.52	0.46	0.46	0.54	0.38
ALW 100 × 100 × 10 – 3600	2.126	0.52	0.45	0.45	0.52	0.38
ALW 100 × 100 × 10 – 3800	2.244	0.52	0.43	0.42	0.48	0.38
ALW 100 × 100 × 10 – 4000	2.362	0.50	0.39	0.39	0.45	0.36

5.3 Numerička parametarska analiza

U ovom poglavlju prikazani su rezultati numeričke parametarske analize. Formirana je opsežna baza podataka na osnovu koje je urađena procena tačnosti postojećih standardizovanih metoda za proračun nosivosti pritisnutih elemenata analizirajući različite krive izvijanja i definisane nove smernice za centrično pritisnute ugaonike od nerđajućeg čelika. Analiza je obuhvatila sva tri tipa ugaonika koji su predmet ove disertacije. Variranjem poprečnih preseka i dužina elemenata napravljeno je ukupno 891 numeričkih modela i to 258 modela za hladnooblikovane, 296 modela za vrućevaljane i 337 modela za laserski zavarene ugaonika.

Osim simulacije ponašanja centrično pritisnutih, zglobno oslonjenih stubova, sprovedena analiza je uključila simulaciju ponašanja kratkih stubova sa sprečenim pomeranjima i rotacijama na krajevima. Dužina kratkih stubova je odabrana da bude jednaka trostrukoj širini kraka ugaonika.

Analiza rezultata numeričke studije je uključila utvrđivanje granične nosivosti i oblika loma - torziona-fleksiono i fleksiono izvijanje oko slabije ose preseka za svaki pojedinačni model. Osim globalnih oblika izvijanja analizirana je i nosivost kratkih stubova na izbočavanje u cilju utvrđivanja klase preseka i eventualnih interakcija lokalne i globalne nestabilnosti kod modela sa efektivnim poprečnim preseccima klase 4.

5.3.1 Parametarska analiza za hladnooblikovane ugaonike

Parametarska analiza za hladnooblikovane ugaonike sprovedena je sa materijalnim modelima razvijenim za dupleks nerđajući čelik EN 1.4162 na osnovu eksperimentalnog ispitivanja mehaničkih karakteristika (poglavlje 3.2.1). Na osnovu prethodne studije osetljivosti na imperfekcije, za početne geometrijske imperfekcije korišćena je linearna superpozicija prvog sopstvenog oblika fleksionog izvijanja skalirana sa amplitudom jednakoj 0.1% od dužine uzorka ($L/1000$) negativnog predznaka i prvog sopstvenog oblika lokalnog izvijanja sa amplitudom jednakoj 2% od širine kraka ugaonika ($b/50$).

Ukupno 27 različitih poprečnih preseka hladnooblikovanih ugaonika je analizirano. Tabela 5-4 prikazuje nominalne dimenzije poprečnih preseka i opseg analiziranih dužina numeričkih modela.

Tabela 5-4 Geometrija poprečnih preseka i dužine uzoraka u parametarskoj analizi za hladnooblikovane ugaonike

Poprečni presek ugaonika	Dužine stubova L (mm)	Širina kraka b (mm)	Debljina kraka t (mm)	Unutrašnji radijus r_i (mm)
ACF 50 × 50 × 2	150 – 2200	50	2	4
ACF 50 × 50 × 4	150 – 2200	50	4	8
ACF 50 × 50 × 5	150 – 1500	50	5	10
ACF 60 × 60 × 2	180 – 2400	60	2	4
ACF 60 × 60 × 3	180	60	3	6
ACF 60 × 60 × 4	180 – 2800	60	4	8
ACF 60 × 60 × 6	180 – 2000	60	6	12
ACF 65 × 65 × 2.5	195	65	2.5	5
ACF 65 × 65 × 3	195	65	3	6
ACF 70 × 70 × 6	210 – 2600	70	6	12
ACF 70 × 70 × 8	210 – 2200	70	8	16
ACF 70 × 70 × 10	210 – 2200	70	10	20
ACF 75 × 75 × 3	225	75	3	6
ACF 75 × 75 × 3.5	225	75	3.5	7
ACF 80 × 80 × 4	240 – 3200	80	4	12
ACF 80 × 80 × 6	240 – 3200	80	6	12
ACF 80 × 80 × 10	240 – 2500	80	10	20
ACF 90 × 90 × 4	270	90	4	8
ACF 100 × 100 × 4	300 – 3600	100	4	8
ACF 100 × 100 × 6	300 – 3600	100	6	12
ACF 100 × 100 × 8	100 – 3300	100	8	16
ACF 150 × 150 × 4	450 – 3000	150	4	8
ACF 150 × 150 × 6	450 – 3800	150	6	12
ACF 150 × 150 × 8	450 – 4000	150	8	16
ACF 200 × 200 × 4	600 – 3300	200	4	8
ACF 200 × 200 × 6	600 – 3300	200	6	12
ACF 200 × 200 × 8	600 – 3300	200	8	16

Tabela 5-5 sadrži sažetak rezultata numeričke simulacije kratkih stubova za sve poprečne preseke koji su predmet parametarske analize. Napon pri kome dolazi do izvijanja označen sa $\sigma_{lb,FE}$ prikazan je u tabeli i dobija se kao količnik granične sile $N_{c,u,FE}$ u numeričkim modelima i površine poprečnog preseka A . Ovaj napon upoređen je sa prosečnom granicom razvlačenja f_{ya} , koja uzima u obzir ojačanje materijala u prevoju ugaonika, sa ciljem da se ustanovi da li se radi o kompaktnim / polukompaktnim (poprečni preseki kod kojih je ceo poprečni presek efektivan) ili vitkim poprečnim presecima. U tabeli je takođe prikazana i klasifikacija poprečnog preseka prema standardima EN 1993-1-4 [2] i AS/NZS 4673 [43]. U tabeli 5-5 uočava se dobro poklapanje rezultata numeričke analize i pomenutih standarda u smislu klasifikacije poprečnog preseka – tamo gde je odnos $\sigma_{lb,FE} / f_{ya} \geq 1$ presek je kompaktan / polukompaktan [43] i može se klasifikovati kao presek klase 3 prema [2], dok u slučaju kada je $\sigma_{lb,FE} / f_{ya} < 1$ presek je vitak [43] i može se klasifikovati kao poprečni presek klase 4 prema [2].

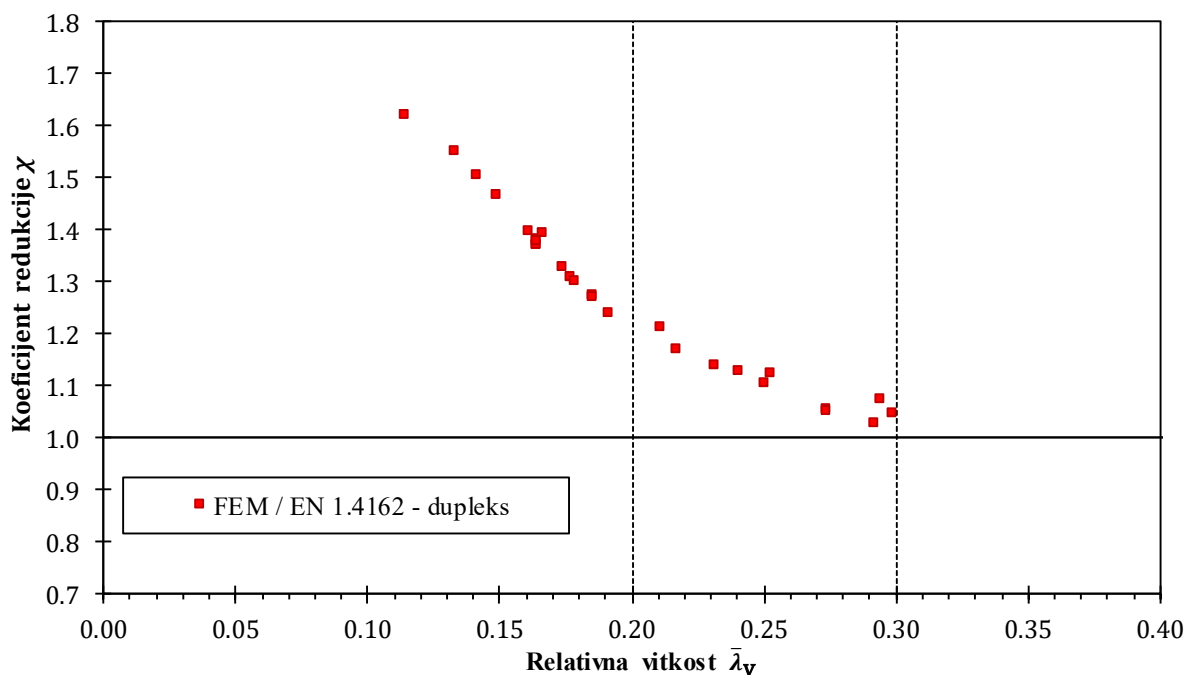
Tabela 5-5 Nosivost poprečnih preseka korišćenih u parametarskoj analizi za hladnooblikovane ugaonike

Naziv elementa	$\sigma_{lb,FE} = N_{c,u,FE}/A$ (N/mm ²)	$\sigma_{lb,FE}/f_{ya}$	Klasifikacija poprečnog preseka	
			EN 1993-1-4	AS/NZS 4673
ACF 50 × 50 × 2 – 150	310	0.58	Klasa 4	Vitak
ACF 50 × 50 × 4 – 150	484	0.88	Klasa 4	Vitak
ACF 50 × 50 × 5 – 150	551	0.99	Klasa 4	Vitak
ACF 60 × 60 × 2 – 180	276	0.52	Klasa 4	Vitak
ACF 60 × 60 × 3 – 180	353	0.66	Klasa 4	Vitak
ACF 60 × 60 × 4 – 180	425	0.78	Klasa 4	Vitak
ACF 60 × 60 × 6 – 180	550	0.98	Klasa 4	Vitak
ACF 65 × 65 × 2.5 – 195	302	0.57	Klasa 4	Vitak
ACF 65 × 65 × 3 – 195	337	0.63	Klasa 4	Vitak
ACF 70 × 70 × 6 – 210	505	0.91	Klasa 4	Vitak
ACF 70 × 70 × 8 – 210	582	1.03	Klasa 3	Kompaktan / polukompaktan
ACF 70 × 70 × 10 – 210	608	1.07	Klasa 3	Kompaktan / polukompaktan
ACF 80 × 80 × 4 – 240	354	0.66	Klasa 4	Vitak
ACF 75 × 75 × 3 – 225	309	0.58	Klasa 4	Vitak
ACF 75 × 75 × 3.5 – 225	339	0.63	Klasa 4	Vitak
ACF 80 × 80 × 6 – 240	461	0.84	Klasa 4	Vitak
ACF 80 × 80 × 10 – 240	599	1.05	Klasa 3	Kompaktan / polukompaktan
ACF 90 × 90 × 4 – 270	329	0.61	Klasa 4	Vitak
ACF 100 × 100 × 4 – 300	312	0.58	Klasa 4	Vitak
ACF 100 × 100 × 6 – 300	403	0.73	Klasa 4	Vitak
ACF 100 × 100 × 8 – 300	492	0.87	Klasa 4	Vitak
ACF 150 × 150 × 4 – 450	235	0.44	Klasa 4	Vitak
ACF 150 × 150 × 6 – 450	308	0.58	Klasa 4	Vitak
ACF 150 × 150 × 8 – 450	366	0.68	Klasa 4	Vitak
ACF 200 × 200 × 4 – 600	185	0.35	Klasa 4	Vitak
ACF 200 × 200 × 6 – 600	255	0.48	Klasa 4	Vitak
ACF 200 × 200 × 8 – 600	307	0.57	Klasa 4	Vitak

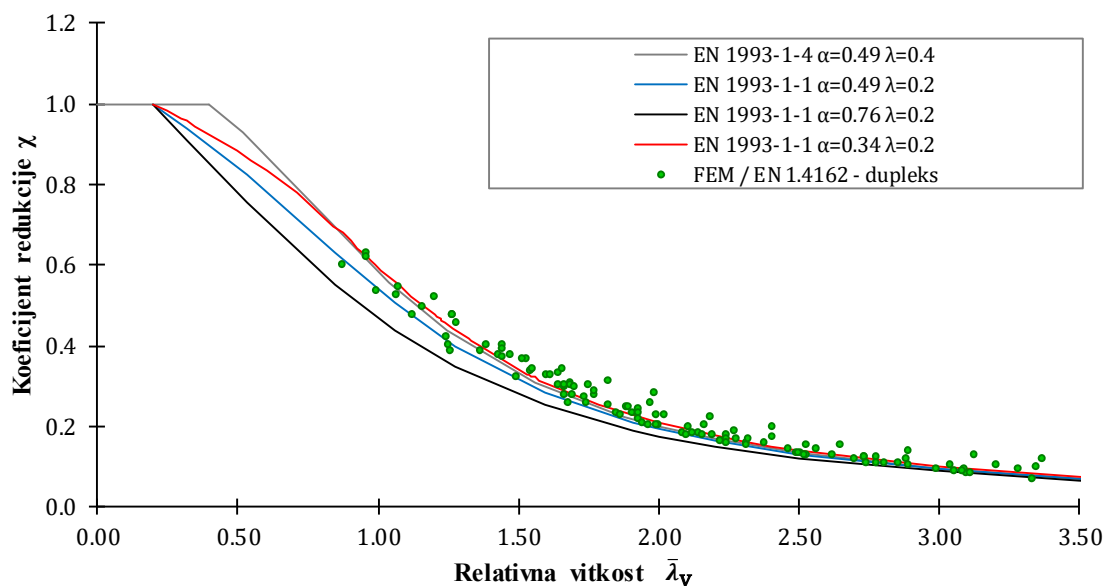
Koeficijent redukcije određen kao količnik granične sile dobijene numeričkom analizom i nosivosti poprečnog preseka prema [2] u funkciji relativne vitkosti za izvijanje oko slabije ose inercije prikazan je na slici 5.1. Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da vrednost početne granične vitkosti $\bar{\lambda}_0$ treba da ima manju vrednost od 0.4 koja je definisana kao granična vitkost u EN 1993-1-4 [2].

Rezultati parametarske analize za modele kod kojih je nosivost određena fleksionim izvijanjem oko slabije ose inercije prikazani su grafikom na slici 5.2, koji daje zavisnost između koeficijenta

redukcije χ i relativne vitkosti za fleksiono izvijanje oko slabije ose inercije $\bar{\lambda}_v$. Koeficijent redukcije χ za poprečne preseke koji se prema EN 1993-1-4 [2] klasifikuju kao poprečni preseki klase 4 sračunat je koristeći efektivnu površinu poprečnog preseka A_{eff} . Efektivna površina poprečnih preseka klase 4 određena je saglasno poglavlju 5.2.3 standarda EN 1993-1-4 [2]. Na dijagramu je prikazana kriva izvijanja koju predviđa standard EN 1993-1-4 [2] za određivanje nosivosti hladnooblikovanih elemenata na fleksiono izvijanje, kao i krive b , c i d koje su definisane standardom EN 1993-1-1 [3] za dimenzionisanje centrično pritisnutih elemenata od ugljeničnog čelika. Prilikom poređenja rezultata numeričke studije sa proračunskim vrednostima za poprečne preseke koji se klasifikuju kao poprečni preseki klase 4 prema EN 1993-1-4 [2] neophodno je uzeti u obzir interakciju između lokalnog izbočavanja poprečnog preseka i globalne nestabilnosti elementa. Proračunska vrednost za poprečne preseke klase 4 određuje se uzimajući u obzir dopunski moment savijanja koji se javlja usled pomeranja težišta efektivnog poprečnog preseka u odnosu na težište bruto poprečnog preseka. Proračunska nosivost za ove elemente određuje se uz ispunjenja uslova ekscentrično opterećenih elemenata prikazanih jednačinama (54) i (55) u poglavlju 2.6.

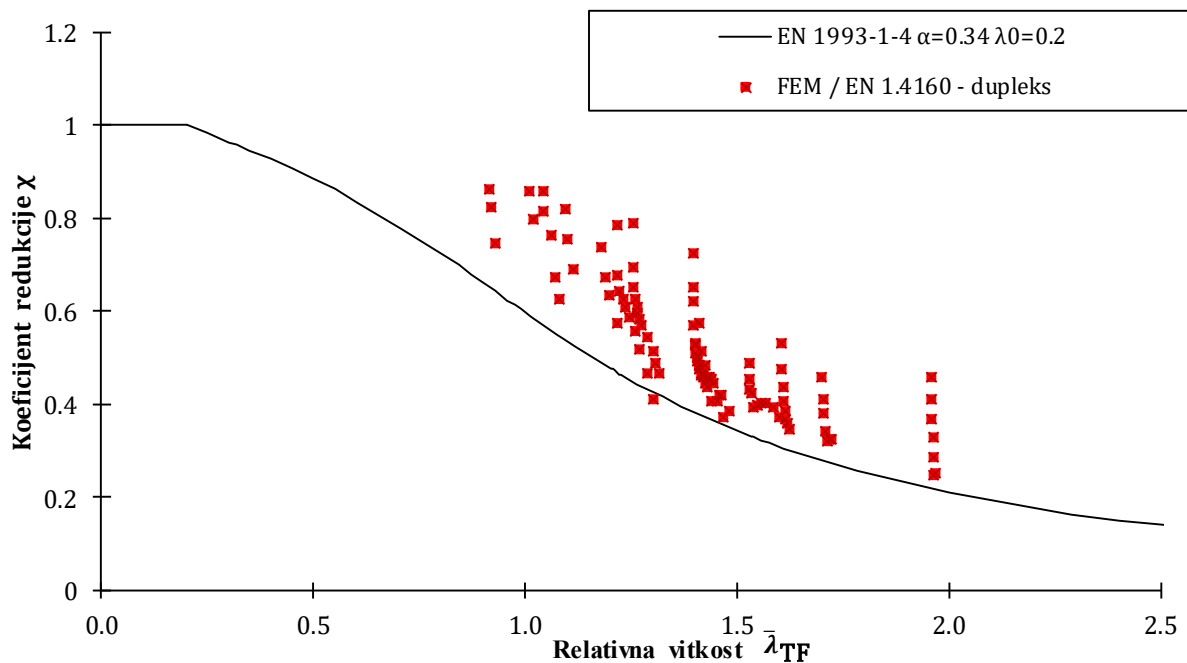


Slika 5.1 – Procena dužine platoa krive izvijanja za ACF uzorke



Slika 5.2 – Krive izvijanja sa raspodelom rezultata numeričke analize za fleksiono izvijanje za ACF

Rezultati parametarske analize za modele u kojima je granična sila određena torziono-fleksionim izvijanjem prikazani su na slici 5.3, na kojoj je dat grafik zavisnosti između koeficijenta redukcije χ i relativne vitkosti za torziono-fleksiono izvijanje $\bar{\lambda}_{TF}$. Na grafiku je prikazana kriva izvijanja b , koju standard EN 1993-1-4 [2] definiše za određivanje nosivosti elemenata na torziono-fleksiono izvijanje.



Slika 5.3 – Kriva izvijanja sa raspodelom rezultata numeričke analize za torziono-fleksiono izvijanje za ACF

5.3.2 Parametarska analiza za vrućevaljane ugaonike

Koristeći materijalni model razvijen za austenitni nerđajući čelik EN 1.4301 na osnovu eksperimentalnog ispitivanja mehaničkih karakteristika (poglavlje 3.2.2), sprovedena je parametarska analiza za vrućevaljane ugaonike. Za početne geometrijske imperfekcije korišćena je linearna superpozicija prvog sopstvenog oblika fleksionog izvijanja skalirana amplitudom jednakoj 0.1% od dužine uzorka ($L/1000$) negativnog predznaka i prvog sopstvenog oblika lokalnog izvijanja sa amplitudom jednakoj 80% proizvodne tolerancije. Saglasno EN 10056 [54] proizvodna tolerancija odstupanja kraka poprečnog preseka od upravnosti u zavisnosti od širine kraka ugaonika b iznosi 1 mm za $b \leq 100$ mm, 1.5 mm za $100 < b \leq 150$, 2 mm za $150 < b \leq 200$ i 3 mm za $b > 200$ mm. Zaostali naponi definisani su u skladu sa rezultatima sopstvenog eksperimentalnog ispitivanja (poglavlje 3.4), kao što je to prikazano u poglavlju 0.

Numerički modeli dobijeni su variranjem dužina 15 različitih poprečnih preseka vrućevaljanih ugaonika. Poprečni preseki koji su korišćeni u parametarskoj analizi sa geometrijskim karakteristikama i opsegom analiziranih dužina prikazani su u tabeli 5-6. Poprečni preseki AHR $90 \times 90 \times 6$ i AHR $130 \times 130 \times 10$ prema standardu EN 1993-1-4 [2] klasifikovani su kao poprečni preseki klase 4, dok su svi ostali razmatrani poprečni preseki klase 3, što je pokazala i numerička simulacija kratkih stubova za pet poprečnih preseka, čija se vitkost nalazila blisko vitkosti za poprečne preseke klase 3.

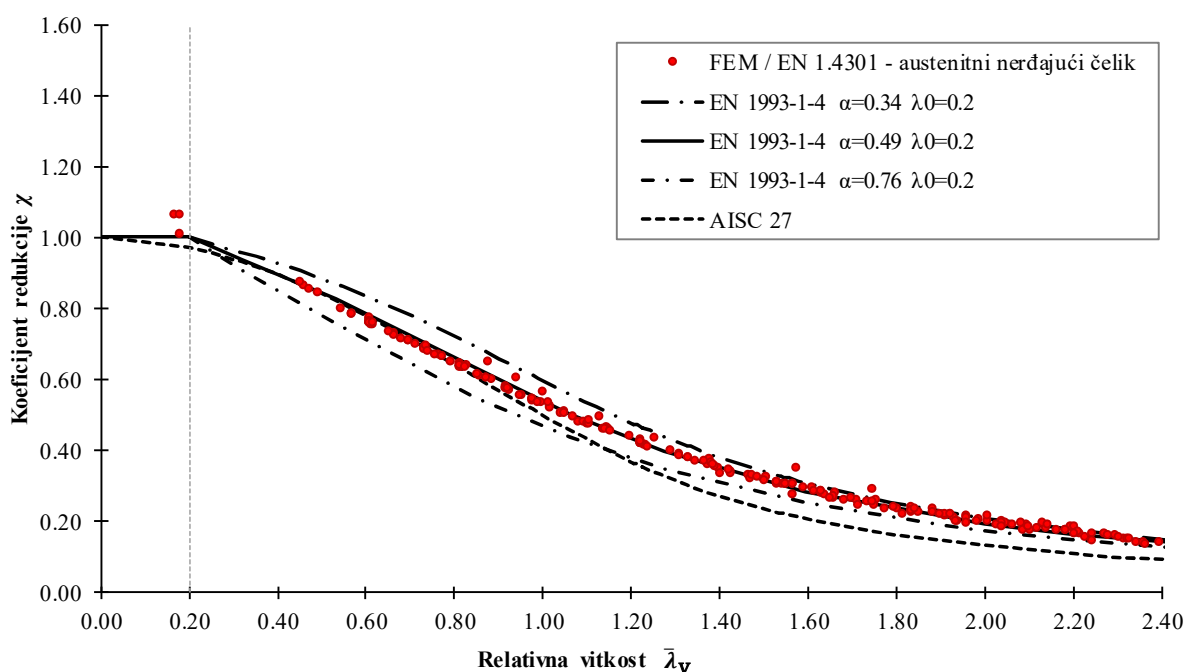
Na slici 5.4 prikazani su rezultati parametarske analize za modele kod kojih je nosivost određena fleksionim izvijanjem oko slabije ose inercije. Rezultati su prikazani na grafiku koji daje zavisnost između koeficijenta redukcije χ i relativne vitkosti za fleksiono izvijanje oko slabije ose inercije $\bar{\lambda}_v$. Krive izvijanja b , c i d koje su definisane standardom EN 1993-1-1 [3] za dimenzionisanje centrično pritisnutih elemenata od ugljeničnog čelika, kao i kriva izvijanja definisana standardom

AISC 27 [50] (za kompaktne / polukompaktne poprečne preseke) prikazane su na dijagramu zajedno sa rezultatima.

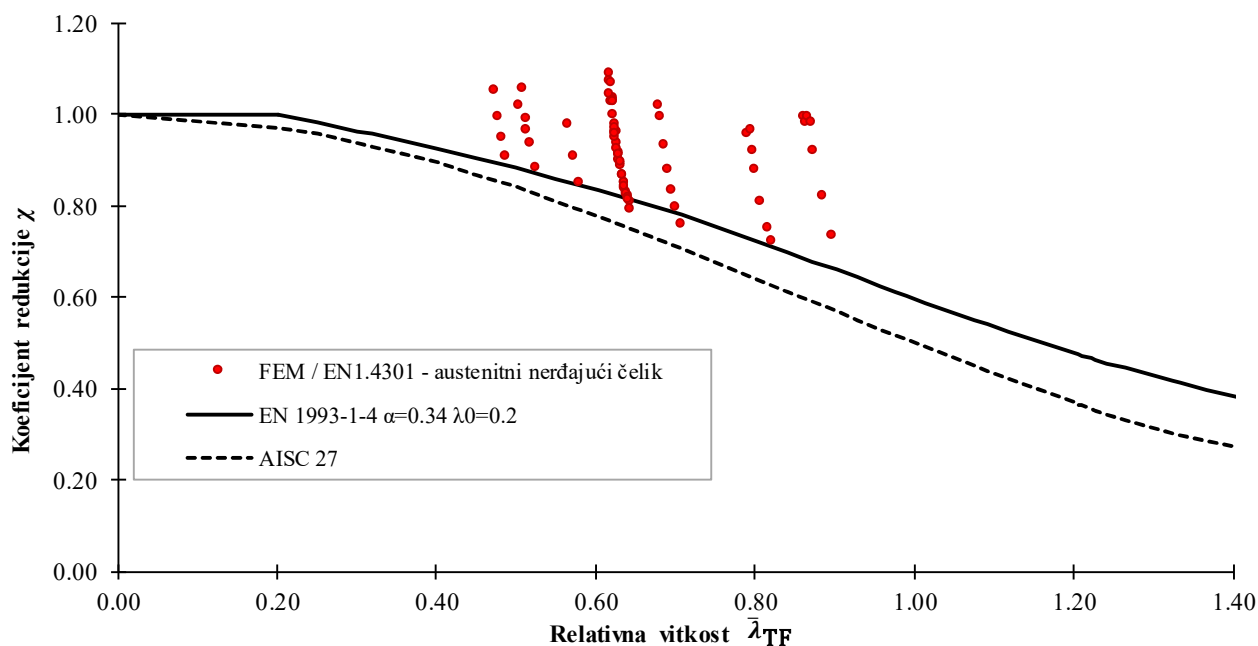
Na slici 5.5 prezentovani su rezultati parametarske analize za modele u kojima je granična sila određena torziono-fleksionim izvijanjem. Rezultati su prezentovani grafikom koji prikazuje zavisnosti između koeficijenta redukcije χ i relativne vitkosti za torziono-fleksiono izvijanje $\bar{\lambda}_{TF}$. Na grafiku je prikazana i kriva izvijanja b , koju standard EN 1993-1-4 [2] definiše za određivanje nosivosti elemenata na torziono-fleksiono izvijanje.

Tabela 5-6 Geometrija poprečnih preseka i dužine uzoraka u parametarskoj analizi za vrućevaljane ugaonike

Poprečni presek ugaonika	Dužine stubova L (mm)	Širina kraka b (mm)	Debljina kraka t (mm)	Unutrašnji radijus r_i (mm)
AHR 50 × 50 × 5	200 – 2000	50	5	7
AHR 60 × 60 × 6	180 – 2200	60	6	7
AHR 70 × 70 × 7	400 – 2800	70	7	9
AHR 80 × 80 × 8	400 – 3200	80	8	10
AHR 80 × 80 × 10	400 – 3000	80	10	9
AHR 90 × 90 × 6	270 – 3500	90	6	10
AHR 90 × 90 × 10	500 – 3400	90	10	11
AHR 100 × 100 × 10	300 – 4000	100	10	7.5
AHR 110 × 110 × 10	330 – 4400	110	10	13
AHR 120 × 120 × 12	500 – 4600	120	12	13
AHR 130 × 130 × 10	390 – 5000	130	13	14
AHR 130 × 130 × 16	600 – 4800	130	16	14
AHR 140 × 140 × 14	600 – 5400	140	14	15
AHR 150 × 150 × 15	700 – 5800	150	15	16
AHR 150 × 150 × 20	700 – 5800	150	20	16



Slika 5.4 – Krive izvijanja sa raspodelom rezultata numeričke analize za fleksiono izvijanje za AHR



Slika 5.5 – Krive izvijanja sa raspodelom rezultata numeričke analize za torziono-fleksiono izvijanje za AHR

5.3.3 Parametarska analiza za laserski zavarene ugaonike

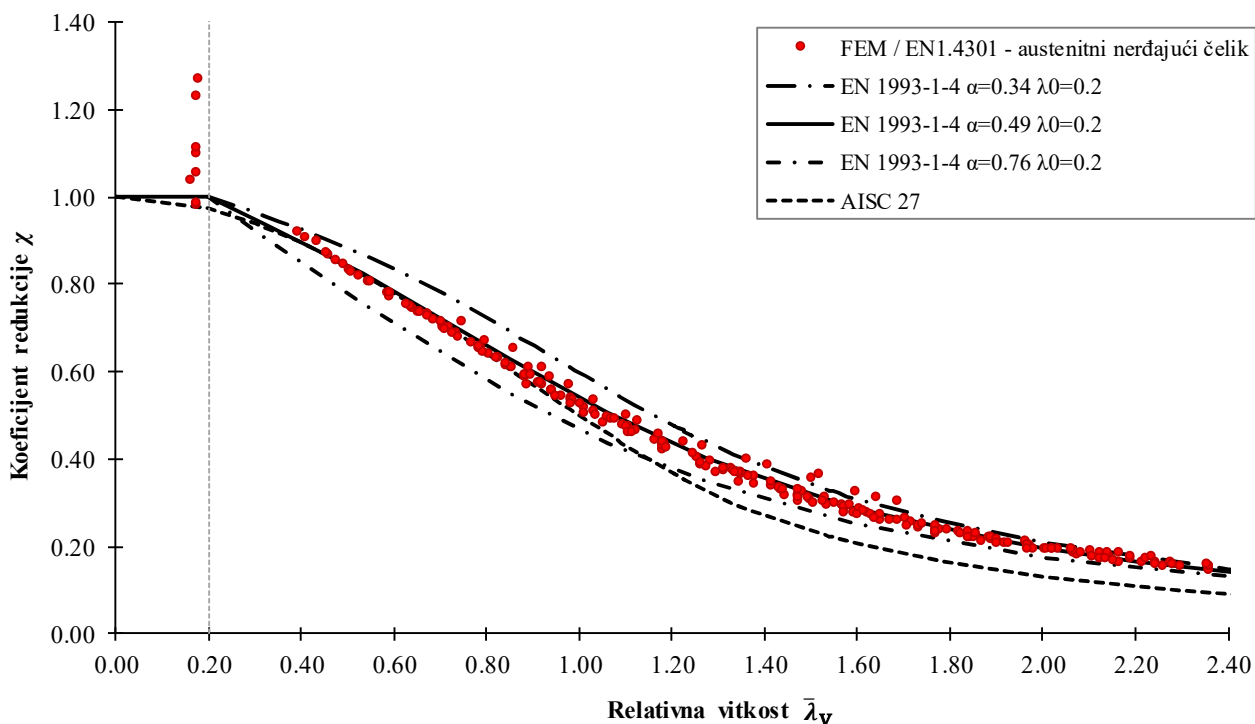
Koristeći rezultate eksperimentalnih ispitivanja – mehaničke karakteristike materijala laserski zavarenog ugaonika za austenitni nerđajući čelik EN 1.4301 (poglavljje 3.2.2) i vrednosti zaostalih napona (poglavljje 3.4), slično kao i kod vrućevaljanih ugaonika sprovedena je parametarska analiza za laserski zavarene ugaonike.

Tabela 5-7 Geometrija poprečnih preseka i dužine uzoraka u parametarskoj analizi za laserski zavarene ugaonike

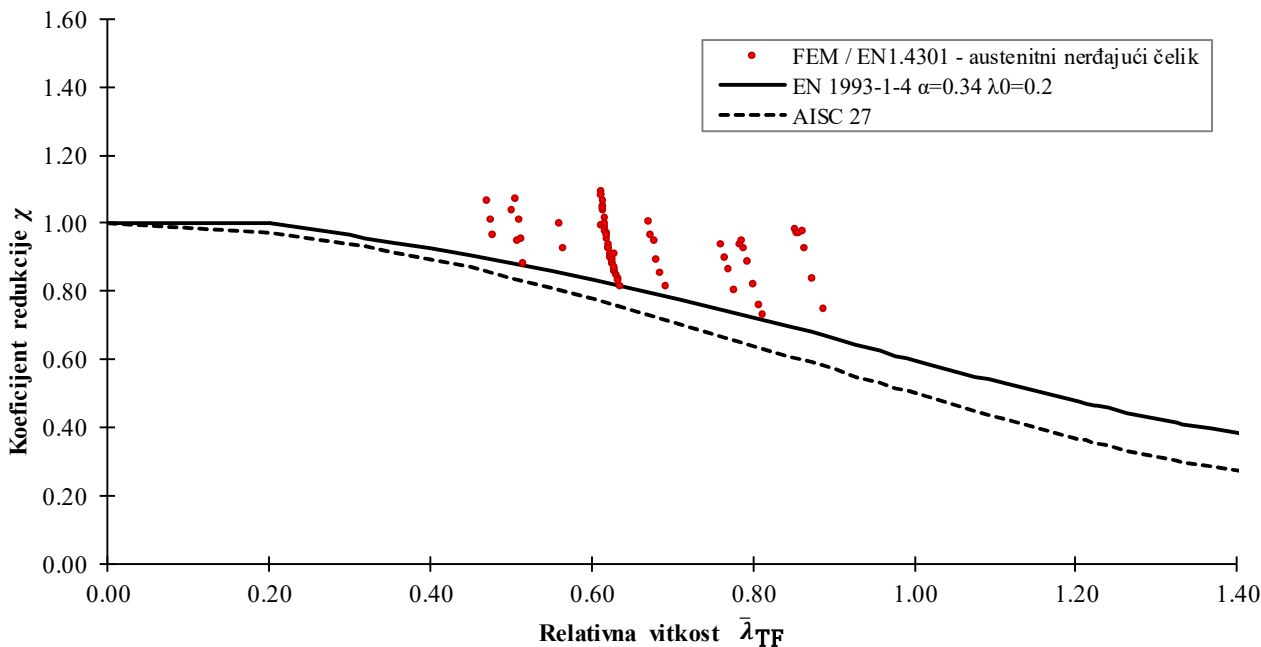
Poprečni presek ugaonika	Dužine stubova L (mm)	Širina kraka b (mm)	Debljina kraka t (mm)	Unutrašnji radijus r_i (mm)
ALW 50 × 50 × 5	150 – 2000	50	5	-
ALW 60 × 60 × 6	180 – 2200	60	6	-
ALW 70 × 70 × 7	400 – 2800	70	7	-
ALW 80 × 80 × 8	400 – 3200	80	8	-
ALW 80 × 80 × 10	400 – 3000	80	10	-
ALW 90 × 90 × 6	270 – 3500	90	6	-
ALW 90 × 90 × 10	500 – 3400	90	10	-
ALW 100 × 100 × 10	300 – 4000	100	10	-
ALW 110 × 110 × 10	500 – 4400	110	10	-
ALW 120 × 120 × 12	360 – 4600	120	12	-
ALW 130 × 130 × 10	390 – 5000	130	13	-
ALW 130 × 130 × 16	390 – 4800	130	16	-
ALW 140 × 140 × 14	600 – 5400	140	14	-
ALW 150 × 150 × 15	700 – 5800	150	15	-
ALW 150 × 150 × 20	450 – 5800	150	20	-
ALW 180 × 180 × 18	540 – 6000	180	18	-
ALW 250 × 250 × 20	750 – 7000	250	20	-

Rekapitulacija 17 različitih poprečnih preseka koji su korišćeni u parametarskoj analizi prikazana je u tabeli 5-7, dok su rezultati numeričke analize za fleksiono izvijanje oko slabije ose

preseka i torziono-fleksiono izvijanje dati na slikama 5.6 i 5.7, respektivno. Relativna vitkost oko slabije ose preseka analiziranih kratkih stubova blisko odgovara graničnoj bezdimezionalnoj vitkosti $\bar{\lambda}_0 = 0.2$, koja je definisana kod krivih izvijanja datih u EN 1993-1-1 [3]. Poprečni preseći ALW 90 × 90 × 6 i ALW 130 × 130 × 10 klasifikovani su kao poprečni preseći klase 4 prema EN 1993-1-4 [2], dok su svi ostali razmatrani poprečni preseći klase 3.



Slika 5.6 – Krive izvijanja sa raspodelom rezultata numeričke analize za fleksiono izvijanje za ALW



Slika 5.7 – Krive izvijanja sa raspodelom rezultata numeričke analize za torziono-fleksiono izvijanje za ALW

6 PREPORUKE ZA PRORAČUN

6.1 Uvod

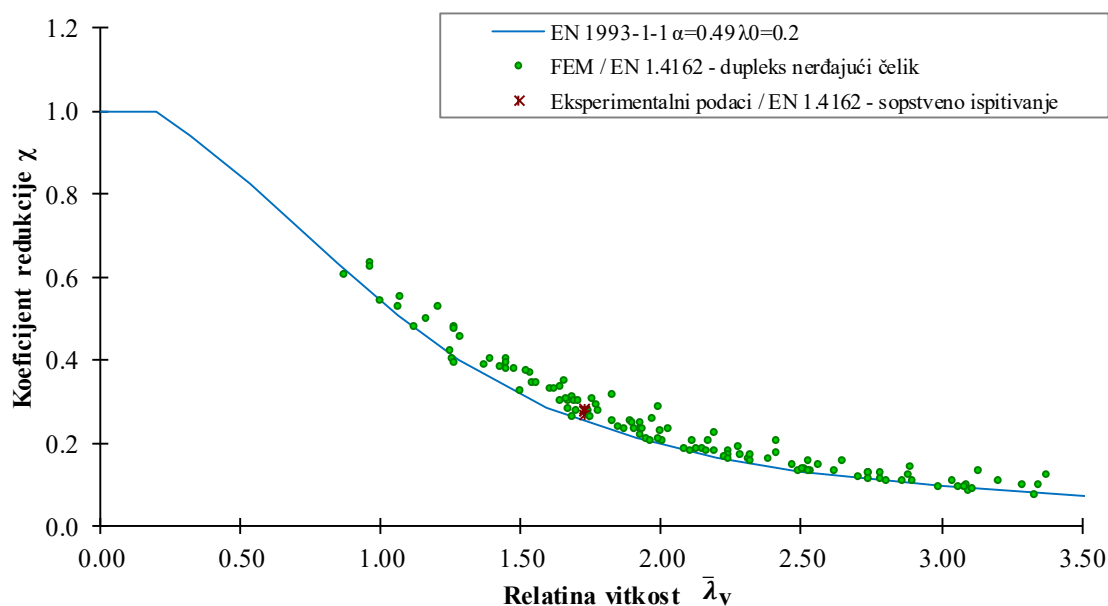
U cilju procene tačnosti metoda za proračun nosivosti centrično pritisnutih elemenata koje su date u standardima [2] i [3] za hladnooblikovane profile od nerđajućeg čelika, odnosno vrućevaljane profile od ugljeničnog čelika, i njihove prilagodljivosti za slučaj pritisnutih hladnooblikovanih, vrućevaljanih i laserski zavarenih ravnokrakih ugaonika od nerđajućih čelika, u prethodnom poglavlju sprovedeno je poređenje graničnih nosivosti centrično pritisnutih ugaonika dobijenih u eksperimentu (poglavljje 4.3.2), odnosno u parametarskoj analizi (poglavljje 5.3) sa ekvivalentnim graničnim nosivostima koje su dobijene proračunom, prema pomenutim standardima.

Na osnovu dobijenih rezultata komparativne analize i odgovarajućih zaključaka, u ovom poglavlju su definisane preporuke za proračun posebno za hladnooblikovane ravnokrake ugaonike od niskolegiranog dupleks čelika EN 1.4162, vrućevaljane i laserski zavarene ravnokrake ugaonike od austenitnog nerđajućeg čelika EN 1.4301.

6.2 Preporuke za proračun hladnooblikovanih ugaonika

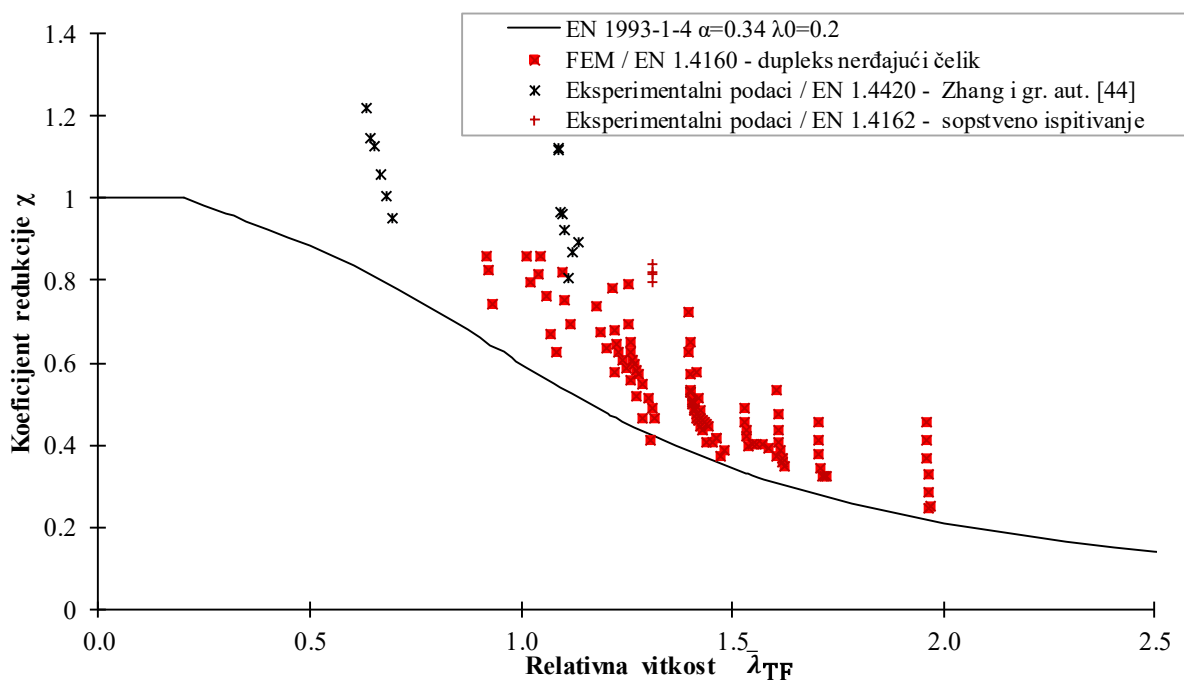
Na osnovu rezultata parametarske analize, eksperimentalnih rezultata i rezultata ranijih istraživanja predlaže se da se za postupak proračuna nosivosti na fleksiono izvijanje centrično pritisnutih hladnooblikovanih ugaonika od dupleks nerđajućeg čelika EN 1.4162 koji je dat u EN 1993-1-4 [2] koristi kriva izvijanja određena vrednostima bezdimenzionalne granične vitkosti $\bar{\lambda}_0 = 0.2$ i koeficijenta imperfekcije $\alpha = 0.49$ (kriva izvijanja *c*). Za postupak proračuna nosivosti centrično pritisnutih elemenata na torziono-fleksiono izvijanje, saglasno standardu EN 1993-1-4 [2], predlaže se primena krive izvijanja određena vrednostima bezdimenzionalne granične vitkosti $\bar{\lambda}_0 = 0.2$ i koeficijenta imperfekcije $\alpha = 0.34$ (kriva izvijanja *b*).

Na slici 6.1 prikazano je poređenje predložene krive izvijanja za fleksiono izvijanje sa rezultatima parametarske analize (poglavljje 5.3.1) i rezultatima sopstvenog eksperimentalnog ispitivanja (poglavljje 3.6.3.1).



Slika 6.1 – Poređenje numeričkih i eksperimentalnih istraživanja sa predloženom krivom izvijanja za hladnooblikovane ugaonike za fleksiono izvijanje

Slika 6.2 prikazuje poređenje predložene krive izvijanja za proračun nosivosti na torziono-fleksiono izvijanje sa rezultatima parametarske analize (poglavlje 5.3.1), sopstvenim eksperimentalnim ispitivanjem (poglavlje 3.6.3.1) i rezultatima eksperimentalnog ispitivanja drugih autora [44].



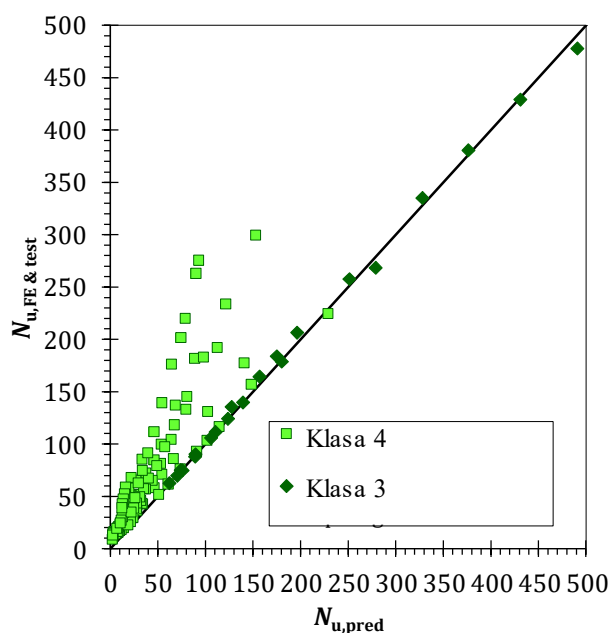
Slika 6.2 – Poređenje numeričkih i eksperimentalnih istraživanja sa predloženom krivom izvijanja za hladnooblikovane ugaonike za torziono-fleksiono izvijanje

U tabeli 6-1 prikazano je poređenje eksperimentalnih rezultata i rezultata dobijenih parametarskom analizom sa proračunskim vrednostima saglasno datim preporukama (kriva izvijanja b $\bar{\lambda}_0 = 0.2$ i $\alpha = 0.34$). Poređenje je dato kroz srednju vrednost i koeficijent varijacije količnika nosivosti na izvijanje $N_{u,FE \& test}$ i proračunske vrednosti nosivosti na izvijanje $N_{u,pred}$ prema EN 1993-1-4 [2] sa predloženom krivom izvijanja. Posebno su analizirani i prikazani rezultati za poprečne preseke koji se klasifikuju kao poprečni preseki klase 3 i za poprečne preseke klase 4. Određivanje proračunskih vrednosti za poprečne preseke koji se klasifikuju kao poprečni preseki klase 4 prema EN 1993-1-4 [2], vrši se sa efektivnim karakteristikama poprečnog preseka određenim saglasno poglavljju 5.2.3 standarda EN 1993-1-4 [2] i uzimajući u obzir dopunski moment savijanja koji se javlja usled pomeranja težišta efektivnog poprečnog preseka u odnosu na težište bruto poprečnog preseka. Proračunska nosivost za ove elemente određuje se uz ispunjenja uslova ekscentrično opterećenih elementa prikazanih jednačinama (54) i (55) u poglavljju 2.6. Saglasno tabeli 6-1, srednja vrednost odnosa $N_{u,FE \& test}/N_{u,pred}$ za fleksiono izvijanje iznosi 1.007 sa koeficijentom varijacije 2.6% za preseke klase 3, dok za preseke koji su klasifikovani kao poprečni preseki klase 4 iznosi 2.054 sa koeficijentom varijacije 39.2%. Svi poprečni preseki čija je nosivost određena torziono-fleksionim izvijanjem pripadaju klasi 4. Srednja vrednost odnosa $N_{u,FE \& test}/N_{u,pred}$ za torziono-fleksiono izvijanje iznosi 3.779 sa koeficijentom varijacije 28.2 %.

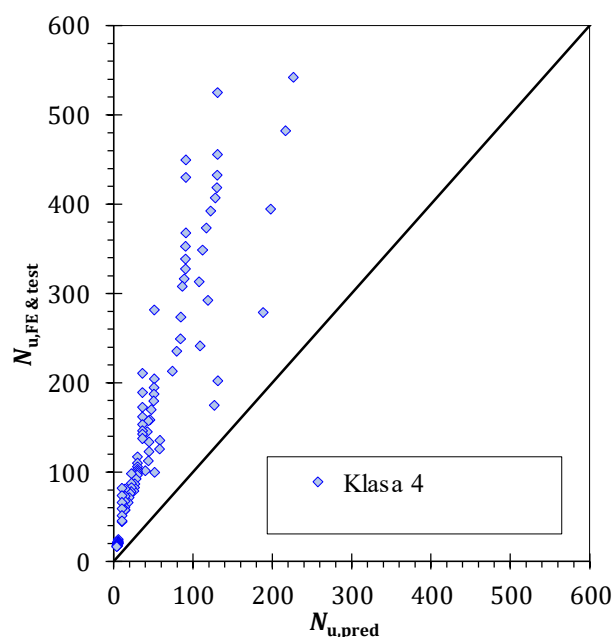
Tačke čije koordinate predstavljaju vrednosti graničnih sila dobijenih u parametarskoj analizi i eksperimentalnom ispitivanju ($N_{u,FE \& test}$) i vrednosti proračunskih graničnih sila prema preporučenim krivama izvijanja ($N_{u,pred}$) prikazane su na dijagramima datim na slikama 6.3a i 6.3b za fleksiono i torziono-fleksiono izvijanje, respektivno.

Tabela 6-1 Poređenje eksperimentalnih i numeričkih rezultata sa proračunskim vrednostima za ACF prema preporučenim parametrima za EN 1993-1-4

	Preporuke za proračun prema EN 1993-1-4 [2]	Br. podataka $\bar{\lambda} > 0.2$	$N_{u,FE \& test} / N_{u,pred}$	
			Srednja vrednost	CoV (%)
Nosivost na fleksiono izvijanje				
Klasa 3	$\alpha = 0.49 \bar{\lambda}_0 = 0.2$	21	1.007	2.6
Klasa 4	$\alpha = 0.49 \bar{\lambda}_0 = 0.2$	119	2.054	39.2
Nosivost na torziono-fleksiono izvijanje				
Klasa 4	$\alpha = 0.34 \bar{\lambda}_0 = 0.2$	104	3.779	28.2



a) Fleksiono izvijanje oko slabije ose inercije



b) Torziono - fleksiono izvijanje

Slika 6.3 – Poređenje numeričkih i eksperimentalnih istraživanja sa proračunskim vrednostima nosivosti prema EN 1993-1-4 sa predloženom krivom izvijanja za ACF

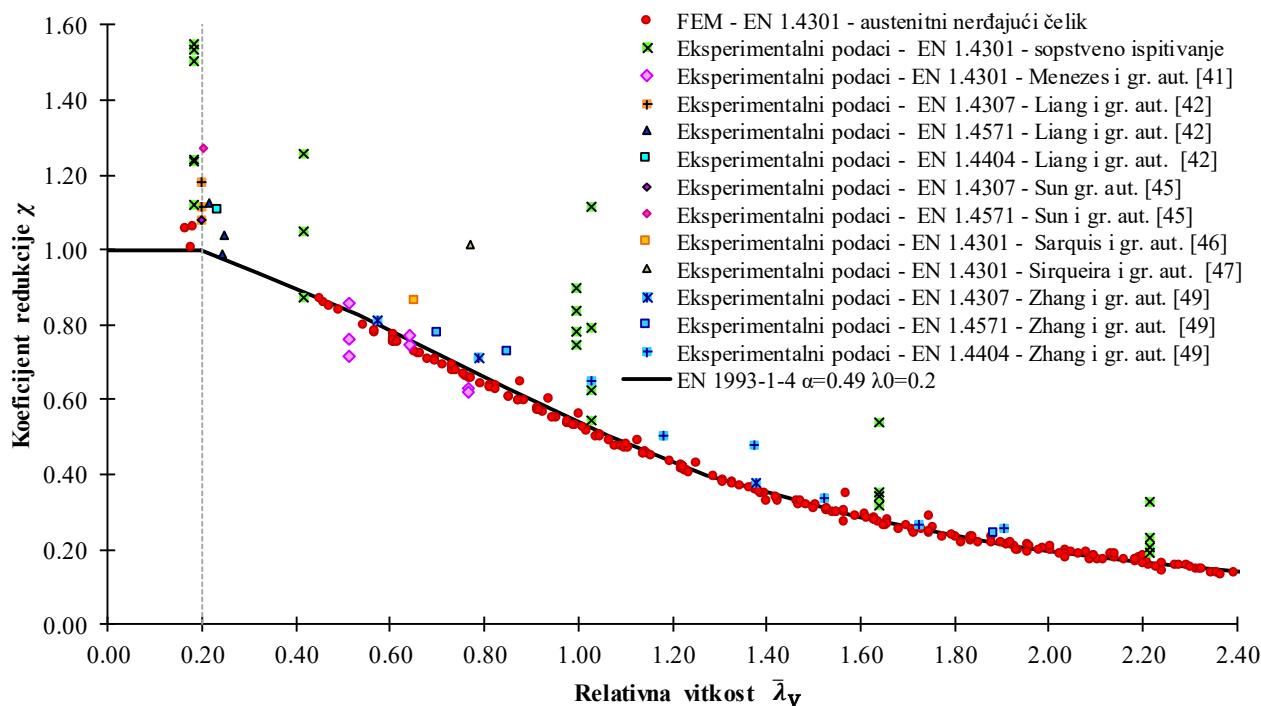
6.3 Preporuke za proračun vrućevaljanih ugaonika

Analizirajući rezultate parametarske analize, eksperimentalne rezultate i rezultate publikovanih istraživanja [41], [42], [45], [46], [47], [49] predlaže se primena krive izvijanja definisana vrednostima bezdimenzionalne granične vitkosti $\bar{\lambda}_0 = 0.2$ i koeficijenta imperfekcije $\alpha = 0.49$ (kriva izvijanja *c*) za postupak proračuna nosivosti na fleksiono izvijanje centrično pritisnutih vrućevaljanih ugaonika od austenitnog nerđajućeg čelika EN 1.4301 koji je definisan u EN 1993-1-4 [2]. Kriva izvijanja definisana vrednostima bezdimenzionalne granične vitkosti $\bar{\lambda}_0 = 0.2$ i koeficijenta imperfekcije $\alpha = 0.34$ (kriva izvijanja *b*) predlaže se za postupak proračuna nosivosti centrično pritisnutih elemenata na torziono-fleksiono izvijanje saglasno standardu EN 1993-1-4 [2].

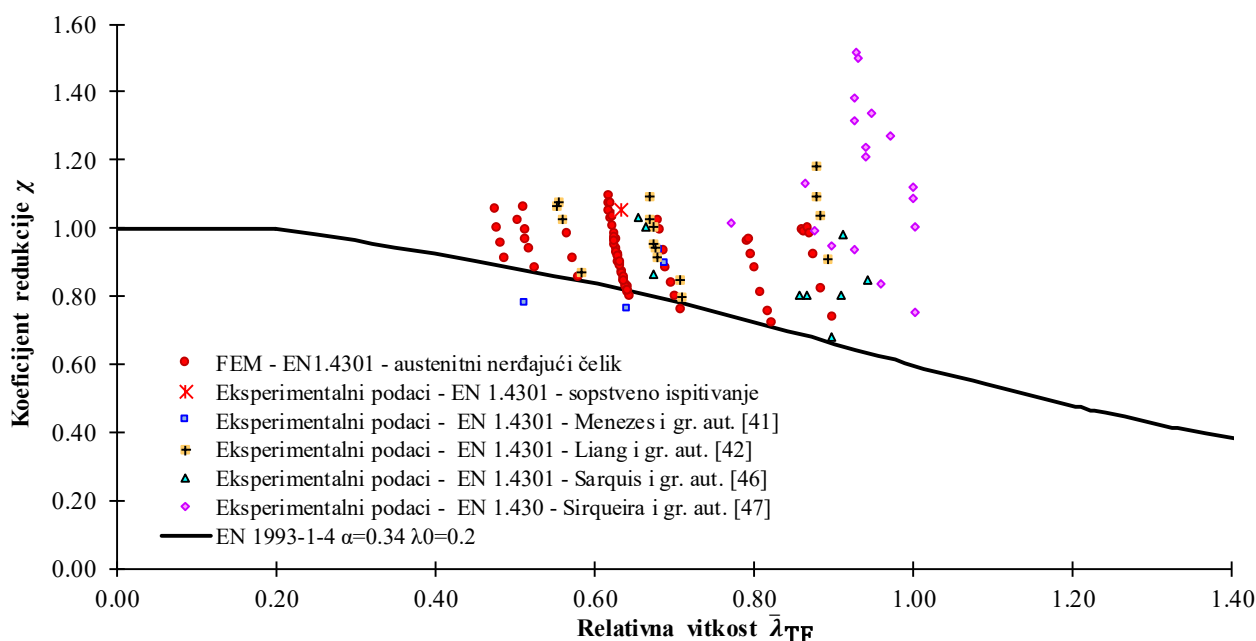
Slika 6.4 prikazuje poređenje predložene krive izvijanja za fleksiono izvijanje sa rezultatima parametarske analize (poglavlje 5.3.2), rezultatima eksperimentalnih ispitivanja (poglavlje 3.6.3.3) i rezultate publikovanih istraživanja [41], [42], [45], [46], [47], [49]. Poređenje predložene krive izvijanja za proračun nosivosti na torziono-fleksiono izvijanje sa rezultatima parametarske analize i eksperimentalnim ispitivanjem prikazano je na slici 6.5.

Tabela 6-2 prikazuje poređenje eksperimentalnih rezultata i rezultata dobijenih parametarskom analizom sa proračunskim vrednostima prema predloženoj krivi izvijanja. U tabeli je prikazana srednja vrednost i koeficijent varijacije količnika nosivosti na izvijanje $N_{u,FE \& test}$ i proračunske

vrednosti nosivosti na izvijanje $N_{u,pred}$ prema EN 1993-1-4 [2] sa predloženom krivom izvijanja. Za nosivost na fleksiono izvijanje srednja vrednost odnosa $N_{u,FE \& test} / N_{u,pred}$ iznosi 1.009 sa koeficijentom varijacije od 8.2% za poprečne preseke klase 3, dok za poprečne preseke klase 4 srednja vrednost odnosa $N_{u,FE \& test} / N_{u,pred}$ iznosi 1.213 sa koeficijentom varijacije od 15.1%. Za torziono-fleksiono izvijanje odnos $N_{u,FE \& test} / N_{u,pred}$ iznosi 1.308 sa koeficijentom varijacije od 25.3% za poprečne preseke koji se klasifikuju kao poprečni presezi klase 3, dok za vitke poprečne preseke klase 4 ovaj odnos iznosi 1.563 sa koeficijentom varijacije od 22%.



Slika 6.4 – Poređenje numeričkih i eksperimentalnih istraživanja sa predloženom krivom izvijanja za vrućevaljane ugaonike za fleksiono izvijanje

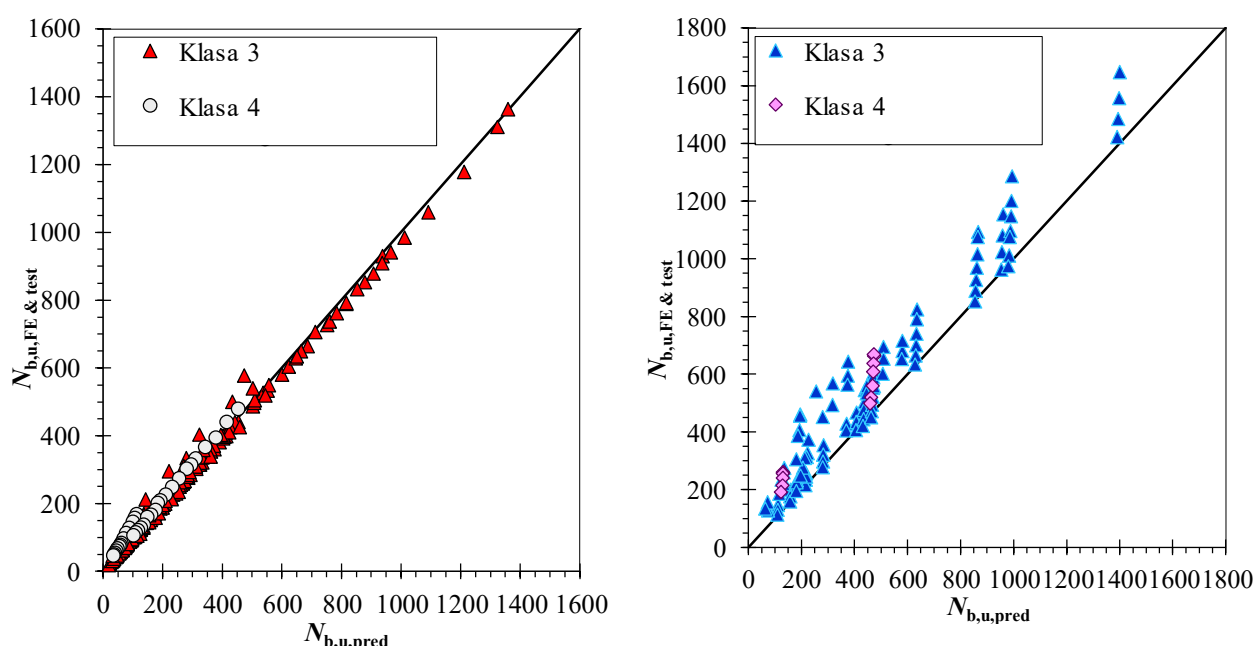


Slika 6.5 – Poređenje numeričkih i eksperimentalnih istraživanja sa predloženom krivom izvijanja za vrućevaljane ugaonike za torziono-fleksiono izvijanje

Tabela 6-2 Poređenje eksperimentalnih i numeričkih rezultata sa proračunskim vrednostima za AHR prema preporučenim parametrima za EN 1993 – 1 – 4

	Preporuke za proračun prema EN 1993-1-4 [2]	Br. podataka $\bar{\lambda} > 0.2$	$N_{u,FE \& test} / N_{u,pred}$	
			Srednja vrednost	CoV (%)
Nosivost na fleksiono izvijanje				
Klasa 3	$\alpha = 0.49 \bar{\lambda}_0 = 0.2$	203	1.009	8.2
Klasa 4	$\alpha = 0.49 \bar{\lambda}_0 = 0.2$	34	1.213	15.1
Nosivost na torziono-fleksiono izvijanje				
Klasa 3	$\alpha = 0.34 \bar{\lambda}_0 = 0.2$	100	1.308	25.3
Klasa 4	$\alpha = 0.34 \bar{\lambda}_0 = 0.2$	14	1.563	22.0

Na slikama 6.6a i 6.6b prikazano je grafičko poređenje vrednosti graničnih sila dobijenih u parametarskoj analizi i eksperimentalnom ispitivanju sa vrednostima proračunskih graničnih sila prema preporučenim krivama izvijanja za fleksiono i torziono-fleksiono izvijanje, respektivno.



a) Fleksiono izvijanje oko slabije ose inercije

b) Torziono - fleksiono izvijanje

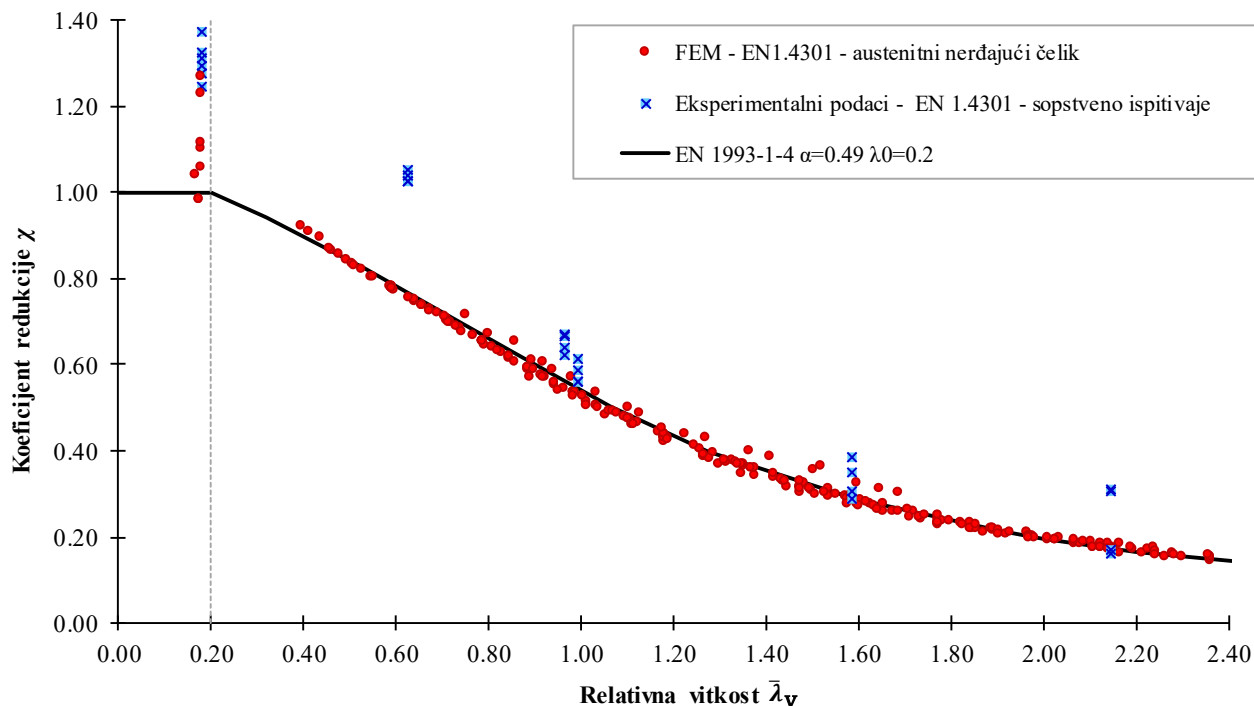
Slika 6.6 – Poređenje numeričkih i eksperimentalnih istraživanja sa proračunskim vrednostima nosivosti prema EN 1993-1-4 sa predloženom krivom izvijanja za AHR

6.4 Preporuke za proračun laserski zavarenih ugaonika

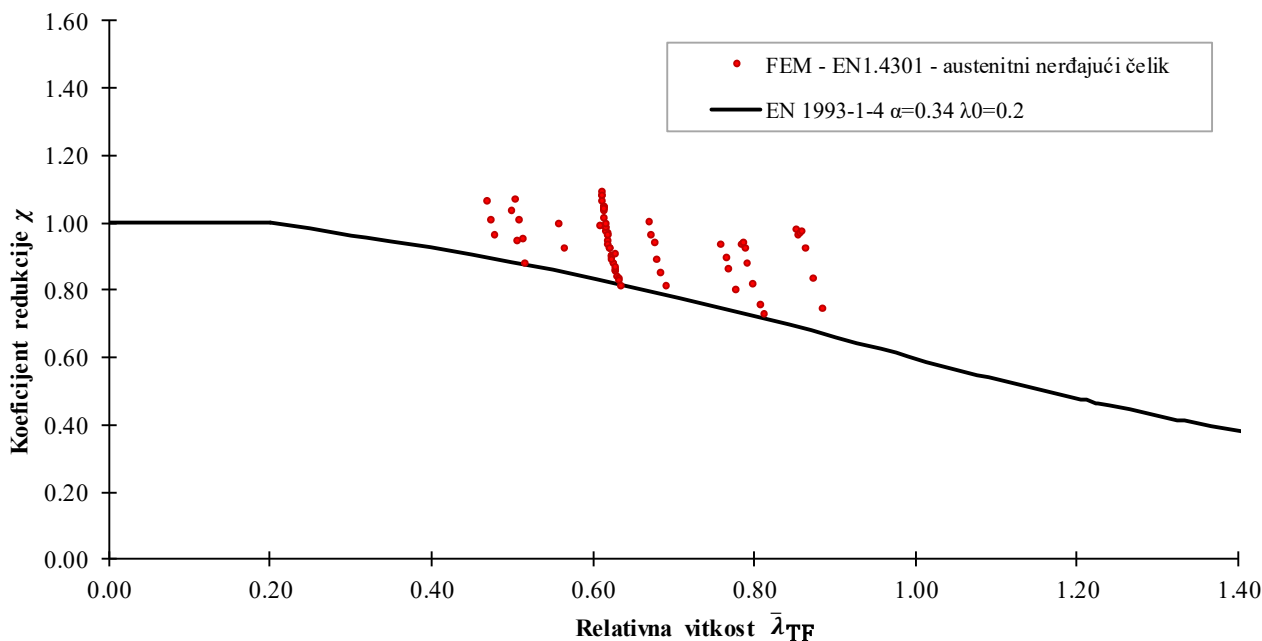
Na osnovu rezultata parametarske analize i rezultata sopstvenih eksperimentalnih ispitivanja predlaže se primena krive izvijanja određene vrednostima bezdimenzionalne granične vitkosti $\bar{\lambda}_0 = 0.2$ i koeficijenta imperfekcije $\alpha = 0.49$ (kriva izvijanja *c*) za postupak proračuna nosivosti na fleksiono izvijanje centrično pritisnutih laserski zavarenih ugaonika od austenitnog nerđajućeg čelika EN 1.4301 prema standardu EN 1993-1-4 [2]. Kao što je to slučaj i sa prethodna dva tipa proizvoda, kriva izvijanja definisana vrednostima bezdimenzionalne granične vitkosti $\bar{\lambda}_0 = 0.2$ i koeficijenta imperfekcije $\alpha = 0.34$ (kriva izvijanja *b*) predlaže se za postupak proračuna nosivosti centrično pritisnutih elemenata na torziono-fleksiono izvijanje prema standardu EN 1993-1-4 [2].

Poređenje predložene krive izvijanja za fleksiono izvijanje oko slabije ose inercije sa rezultatima parametarske analize (poglavlje 5.3.3) i rezultatima eksperimentalnih ispitivanja (poglavlje 3.6.3.5) prikazano je na slici 6.7. Poređenje proračunskih vrednosti saglasno predloženoj

krivoj izvijanja za proračun nosivosti na torziono-fleksiono izvijanje sa rezultatima parametarske analize prezentovano je na slici 6.8.



Slika 6.7 – Poređenje numeričkih i eksperimentalnih istraživanja sa predloženom krivom izvijanja za laserski zavarene ugaonike za fleksiono izvijanje



Slika 6.8 – Poređenje numeričkih i eksperimentalnih istraživanja sa predloženom krivom izvijanja za laserski zavarene ugaonike za torziono-fleksiono izvijanje

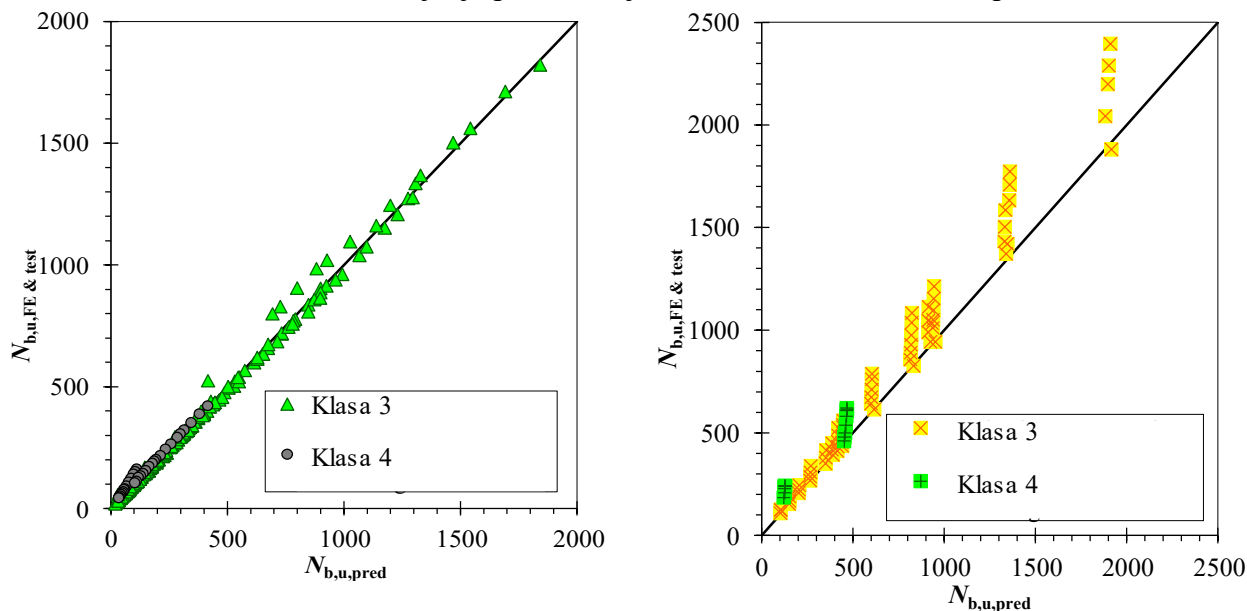
Poređenje eksperimentalnih rezultata i rezultata dobijenih parametarskom analizom sa proračunskim vrednostima saglasno predloženim krivama izvijanja prikazano je u tabeli 6-3 u kojoj su prikazani srednja vrednost i koeficijent varijacije količnika nosivosti na izvijanje $N_{u,FE}$ & test i proračunske vrednosti nosivosti na izvijanje $N_{u,pred}$ prema predloženim preporukama. Srednja vrednost odnosa $N_{u,FE}$ & test/ $N_{u,pred}$ za nosivost na fleksiono izvijanje iznosi 1.001 i 1.173 sa koeficijentom varijacije od 6.7% i 14.6% za poprečne preseke klase 3 i klase 4, respektivno. Za

nosivost na torziono-fleksiono izvijanje srednja vrednost odnosa $N_{u,FE \& test}/N_{u,pred}$ iznosi 1.140 i 1.484 sa koeficijentom varijacije od 7.3% i 22.1% za poprečne preseke klase 3 i klase 4, respektivno.

Tabela 6-3 Poređenje eksperimentalnih i numeričkih rezultata sa proračunskim vrednostima za ALW prema preporučenim parametrima za EN 1993 – 1 – 4

	Preporuke za proračun prema EN 1993-1-4 [2]	Br. podataka $\bar{\lambda} > 0.2$	$N_{u,FE \& test}/N_{u,pred}$	
			Srednja vrednost	CoV (%)
Nosivost na fleksiono izvijanje				
Klasa 3	$\alpha = 0.49 \bar{\lambda}_0 = 0.2$	213	1.001	6.7
Klasa 4	$\alpha = 0.49 \bar{\lambda}_0 = 0.2$	33	1.173	14.6
Nosivost na torziono-fleksiono izvijanje				
Klasa 3	$\alpha = 0.34 \bar{\lambda}_0 = 0.2$	68	1.140	7.3
Klasa 4	$\alpha = 0.34 \bar{\lambda}_0 = 0.2$	15	1.484	22.1

Grafičko poređenje vrednosti rezultata parametarske analize i rezultata eksperimentalnog ispitivanja sa vrednostima proračunskih graničnih sila prema preporučenim krivama izvijanja za fleksiono i torziono-fleksiono izvijanje prikazano je na slikama 6.9a i 6.9b, respektivno.



a) Fleksiono izvijanje oko slabije ose inercije

b) Torziono - fleksiono izvijanje

Slika 6.9 – Poređenje numeričkih i eksperimentalnih istraživanja sa proračunskim vrednostima nosivosti prema EN 1993-1-4 sa predloženom krivom izvijanja za ALW

7 ZAKLJUČCI I PREPORUKE ZA BUDUĆA ISTRAŽIVANJA

Osnovni cilj ove doktorske disertacije je da se primenom različitih naučnih metoda u analizi ponašanja centrično pritisnutih ugaonika od nerđajućih čelika dobijenih postupcima hladnog oblikovanja, vrućeg valjanja i laserskog zavarivanja, upotpune, prošire i reviduju postojeća znanja, razviju krive izvijanja i definišu preporuke za proračun u cilju racionalne i ekonomski opravdane afirmacije ovog materijala u konvencionalnim konstrukcijama u zgradarstvu. Rezultati koji su dobijeni u istraživanju su relevantni, pouzdani i validni jer su utemeljeni na velikoj bazi podataka dobijenih iz sopstvenih eksperimentalnih ispitivanja. Ispitivanjem su obuhvaćeni realni konstruktivni elementi različitih dužina, čime je pokriven opseg male, srednje i velike vitkosti. Pored eksperimentalnog ispitivanja, značajan deo istraživanja predstavlja numerička analiza koja je omogućila proširenje eksperimentalne baze podataka i sagledavanje uticaja mehaničkih i geometrijskih parametara kao i početnih strukturnih imperfekcija – geometrijskih imperfekcija i zaostalih napona na kapacitete nosivosti razmatranih pritisnutih ugaonika. Takođe je od posebnog značaja procena tačnosti postojećih standardizovanih metoda za proračun stubova poprečnog preseka ravnokrakog ugaonika od nerđajućih čelika.

Na osnovu svih analiza mogu se izneti sledeći zaključci:

1. Ispitivanjem mehaničkih karakteristika niskolegiriranog dupleks nerđajućeg čelika EN 1.4162 potvrđeno je da je ovaj materijal izrazito nelinearan, bez jasno izražene granice proporcionalnosti, te da poseduje značajan kapacitet duktilnosti sa izduženjem pri lomu od 43 %. Materijal pokazuje umerena svojstva anizotropnosti – granica razvlačenja osnovnog materijala upravno na pravac valjanja je za 6% veća u odnosu na granicu razvlačenja osnovnog materijala u pravcu valjanja. Utvrđeno je da su izmerene vrednosti konvencionalne granice razvlačenja veće od nominalne vrednosti za 12.5%. Potvrđeno je da postupkom hladnog oblikovanja dolazi do poboljšanja mehaničkih karakteristika materijala u zoni prevoja. Izmerena vrednost konvencionalne granice razvlačenja u zoni prevoja ugaonika je za 38% veća od ekvivalentne vrednosti materijala čelične trake od koje su postupkom hladnog oblikovanja formirani eksperimentalni uzorci. Na osnovu ispitivanja mehaničkih karakteristika austenitnog nerđajućeg čelika EN 1.4301 vrućevaljanih i laserski zavarenih ugaonika može se zaključiti da materijal pokazuje izrazita svojstva nelinearnosti sa izduženjem pri lomu od preko 70%. Izmerene vrednosti konvencionalne granice razvlačenja veće su za 52% kod vrućevaljanih uzoraka, odnosno 30% kod laserski zavarenih uzoraka u odnosu na odgovarajuće nominalne vrednosti za vrućevaljane profile odnosno vrućevaljane limove od austenitnog nerđajućeg čelika EN 1.4301 (EN 10088-4 [51]), respektivno.
2. Prilikom ispitivanja kratkih stubova na pritisak do gubitka nosivosti poprečnog preseka kod svih ispitanih uzoraka došlo je usled torziona-fleksionog izvijanja. Pokazano je da ovaj oblik loma, karakterističan za kratke stubove (oblast male vitkosti), po obliku deformisanog elementa liči na lokalni oblik nestabilnosti (izbočavanje) poprečnog preseka. Do iscrpljenja nosivosti poprečnih preseka hladnooblikovanih ugaonika EN 1.4162, koji se prema EN 1993-1-4 [2] klasifikuju kao poprečni preseki klase 4 došlo je pri vrednostima napona koji su manji od napona na granici razvlačenja. Uzorci kratkih stubova vrućevaljanih i laserski zavarenih ugaonika EN 1.4301, poprečnih preseka klase 3 prema EN 1993-1-4 [2] dostigli su graničnu nosivost u plastičnoj oblasti naprezanja, pri vrednostima napona koji su veći od napona na granici razvlačenja.
3. Maksimalna vrednost zaostalih napona zatezanja kod vrućevaljanih ugaonika iznosi $-0.42 \cdot f_y = -122$ MPa, dok maksimalna vrednost zaostalih napona pritiska iznosi $0.36 \cdot f_y = 104$ MPa. Maksimalna vrednost zaostalih napona pritiska kod laserski zavarenih ugaonika

iznosi $-0.36 \cdot f_y = -96$ MPa, dok maksimalna vrednost zaostalih napona zatezanja iznosi $0.45 \cdot f_y = 119$ MPa. Raspodelu zaostalih napona kod laserski zavarenih ugaonika karakterišu izraženi maksimumi u tri karakteristične tačke: na krajevima krakova, na sredinama širine krakova i temenu ugaonika.

4. Dominantan oblik izvijanja hladnooblikovanih stubova ACF $80 \times 80 \times 4$ u oblasti srednje vitkosti je interakcija torziono-fleksionog izvijanja, fleksionog izvijanja oko slabije ose preseka i izbočavanja poprečnog preseka. Kod uzoraka velike vitkosti, iste ispitne serije, dominantan oblik loma je fleksiono izvijanje oko slabije ose inercije uz izrazito ujednačene vrednosti graničnog opterećenja. Rezultati eksperimenta ukazuju na to da je do gubitka stabilnosti kod ovih uzoraka došlo pre izbočavanja poprečnog preseka, u elastičnoj oblasti naprezanja.
5. Dominantan oblik izvijanja uzoraka male vitkosti vrućevaljanih ugaonika AHR $100 \times 100 \times 10 - 500$ predstavlja torziono-fleksiono izvijanje u kombinaciji sa fleksionim izvijanjem oko slabije ose inercije. Kod dva uzorka su takođe uočene značajnije torzione deformacije i pomeranja oko jače ose preseka, kao posledica početnih imperfekcija. U oblasti srednje i velike vitkosti uzoraka, AHR $60 \times 60 \times 6 - 800$, AHR $100 \times 100 \times 10 - 1500$, AHR $60 \times 60 \times 6 - 2000$ i AHR $100 \times 100 \times 10 - 2500$, dominantan oblik loma je fleksiono izvijanje oko slabije ose inercije.
6. Fleksiono izvijanje u kombinaciji sa torziono-fleksionim izvijanjem predstavlja karakterističan oblik izvijanja za laserski zavarene uzorke ALW $100 \times 100 \times 10 - 500$ u oblasti male vitkosti. Slično vrućevaljanim uzorcima, dominantan oblik izvijanja laserski zavarenih uzoraka srednje i velike vitkosti ALW $60 \times 60 \times 6 - 800$, ALW $100 \times 100 \times 10 - 1500$, ALW $60 \times 60 \times 6 - 2000$ i ALW $100 \times 100 \times 10 - 2500$, je fleksiono izvijanje oko slabije ose inercije. U oblasti velike vitkosti, odgovor dva uzorka u stanju granične nosivosti uključio je interakciju sa torziono-fleksionim izvijanjem kao i primetno veće vrednosti graničnih sila, kao posledica početnih imperfekcija pri ispitivanju.
7. Na osnovu eksperimentalnih i numeričkih istraživanja za proračun nosivosti elemenata na fleksiono izvijanje oko slabije ose inercije za hladnooblikovane ugaonike od dupleks nerđajućeg čelika EN 1.4162, prema proceduri opisanoj u standardu EN 1993-1-4 [2], preporučuje se primena krive izvijanja c koja je definisana koeficijentom imperfekcije $\alpha = 0.49$, uz korišćenje vrednosti za bezdimenzionalnu graničnu vitkost $\bar{\lambda}_0 = 0.2$. Za proračun nosivosti na torziono-fleksiono izvijanje prema standardu EN 1993-1-4 [2] hladnooblikovanih ugaonika od dupleks nerđajućeg čelika EN 1.4162 preporučuje se primena krive izvijanja b ($\alpha = 0.34$ i $\bar{\lambda}_0 = 0.2$).
8. Za proračun nosivosti vrućevaljanih i laserski zavarenih ugaonika od austenitnog nerđajućeg čelika EN 1.4301 na fleksiono izvijanje oko slabije ose inercije preporučuje se primena krive izvijanja c ($\alpha = 0.49$ i $\bar{\lambda}_0 = 0.2$). Za proračun nosivosti vrućevaljanih i laserski zavarenih ugaonika od austenitnog nerđajućeg čelika EN 1.4301 na torziono-fleksiono izvijanje preporučuje se primena krive izvijanja b ($\alpha = 0.34$ i $\bar{\lambda}_0 = 0.2$).

Sagledavajući nedostatak istraživanja u oblasti pritisnutih ugaonika od nerđajućeg čelika, a sa ciljem proširenja postojećih saznanja, mogu se definisati smernice za buduća istraživanja:

- Analiza ponašanja centrično pritisnutih ugaonika raznokrakog poprečnog preseka.
- Analiza ponašanja pritisnutih ugaonika koji su na krajevima ekscentrično povezani zavrtnjevima ili šavovima preko jednog kraka.
- Analiza ponašanja pritisnutih elemenata višedelnog poprečnog preseka formiranog od dva unakrsno postavljena ili leđima okrenuta ugaonika.

Literatura

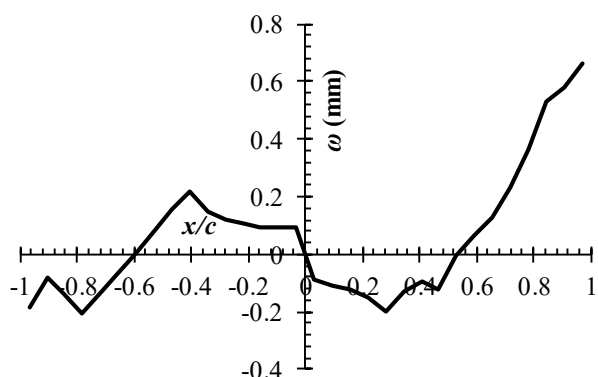
- [1] B. Rossi, Discussion on the use of stainless steel in constructions in view of sustainability, *Thin-Walled Structures* 83 (2014) 182–189.
- [2] Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-4: General rules – supplementary rules for stainless steels, including amendment A1 (2015), EN 1993-1-4:2006+A1:2015, Brussels, Belgium, CEN 2015.
- [3] Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings EN 1993-1-1, Brussels, Belgium, CEN 2005.
- [4] Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting EN 1993-1-3, Brussels, Belgium, CEN 2006.
- [5] Specification for the Design of Light Gauge Cold-Formed Stainless Steel Structural Members, American Iron and Steel Institute, 1968.
- [6] W. Ramberg, W. R. Osgood, Description of stress-strain curves by three parameters, Technical note No 902 (1943).
- [7] H.N. Hill, Determination of stress–strain relations from offset yield strength values, Technical Note No. 927 (1944).
- [8] E. Mirambell, E. Real, On the calculation of deflections in structural stainless steel beams: An experimental and numerical investigation, *Journal Constructional Steel Research* 54 (2000) 109–133.
- [9] K. J. R. Rasmussen, Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys, *Journal Constructional Steel Research* 59 (2003) 47–61.
- [10] I. Arrayago, E. Real, L. Gardner, Description of stress-strain curves for stainless steel alloys, *Materials and Design* 87 (2015) 540–552.
- [11] L. Gardner, R. B. Cruise, Modeling of Residual Stresses in Structural Stainless Steel Sections, *Journal of Structures Engineering* 135 (2009) 42–53.
- [12] R. B. Cruise, L. Gardner, Residual stress analysis of structural stainless steel sections, *Journal of Constructional Steel Research* 64 (2008) 352–366.
- [13] L. Gardner, Y. Bu, M. Theofanous, Laser-welded stainless steel I-sections: Residual stress measurements and column buckling tests, *Engineering Structures* 127 (2016) 536–548.
- [14] R.G. Dawson, A.C. Walker, Post-buckling of geometrically imperfect plates. *Journal Structures Engineering (ASCE)* 98 (1972) 75–94.
- [15] R. B. Cruise, L. Gardner, Measurement and prediction of geometric imperfections in structural stainless steel members, *Structural Engineering and Mechanics* 24 (2006) 63–89.
- [16] EN 1090-2: Execution of steel structures and aluminium structures – Part 2: Technical requirements for steel structures. Brussels, Belgium, CEN 2008.
- [17] G. J. Van Den Berg, The effect of the non-linear stress-strain behaviour of stainless steels on member capacity, *Journal of Construction Steel Research* 54 (2000) 135–160.
- [18] T. V. Galambos, *Structural Members and Frames*, 1968.
- [19] SEI/ASCE 8-02: Specification for the Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural Members, American Society of Civil Engineers, 2003.
- [20] A. H. Stang, L.R. Strickenberg, Results of some compression tests of structural steel angles, *Technologic Papers of the Bureau of Standards* 16 (1922) 651–657.
- [21] M. Wakabayashi, T. Nonaka, On the Buckling Strength of Angles in Transmission Towers, *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute* 15 (1965) 1-18.

- [22] S. Kitipornchai, H.W. Lee, Inelastic experiments on angle and tee struts, *Journal of Constructional Steel Research* 6 (1986) 219–236.
- [23] AS 1250-1981 SAA Steel Structures Code, Standards Association of Australia, Sydney, Australia, 1981.
- [24] ANSI/AISC 360-10 Specification for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction, 2010.
- [25] S. H. Al-Sayed, R. Bjorhovde, Experimental study of single angle columns, *Journal of Constructional Steel Research* 12 (1989) 83–102.
- [26] S. M. R. Adluri, M. K. S. Madugula, Development of column curve for steel angles, *J. Struct. Eng.* 122 (1996) 318-325.
- [27] S. M. R. Adluri, M. K. S. Madugula, Flexural Buckling of Steel Angles, *Experimental Investigation*, *J. Struct. Eng.* 122 (1996) 309–317.
- [28] D. Popovic, G.J. Hancock, K.J.R. Rasmussen, Axial compression tests of cold-formed angles, *Journal Structures Engineering (ASCE)* 125 (1999) 515–523.
- [29] B. Young, Tests and design of fixed-ended cold-formed steel plain angle columns. *Journal Structures Engineering (ASCE)* 130 (2004) 31–40.
- [30] G. Shi, Z. Liu, H.Y. Ban, Y. Zhang, Y.J. Shi, Y.Q. Wang, Tests and finite element analysis on the local buckling of 420 MPa steel equal angle columns under axial compression, *Steel and Composite Structures*, 12 (2011) 31-51
- [31] K. Cao, Y. J. Guo, D. W. Zeng, Buckling behavior of large-section and 420 MPa high-strength angle steel columns, *Journal of Constructional Steel Research* 111 (2015) 11–20.
- [32] GB50017-2003. Code for design of steel structures. Beijing: China Architecture & Building Press; 2003.
- [33] K.J.R Rasmussen, Design of angle columns with locally unstable legs, *Journal Structures Engineering (ASCE)* 131 (2005) 53–60.
- [34] G.M.B. Chodraui, Y. Shifferaw, M. Malite, B.W. Schafer, Cold-formed steel angles under axial compression, *Proceedings of 18th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures (Orlando, Florida, USA, October 27 & 28, 2006)*: 285–300.
- [35] B. W. Schafer, Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design, *Journal of Constructional Steel Research*, 64 (2008) 766–778.
- [36] P.B. Dinis, D. Camotim, A novel DSM-based approach for the rational design of fixed-ended and pin-ended short-to-intermediate thin-walled angle columns, *Thin-Walled Structures* 87 (2015).
- [37] J.V. Bhilawe, L.M. Gupta, Experimental investigation of steel equal angle subjected to compression, *Engineering Structures and Technologies*, 7 (2015) 55–66.
- [38] IS 800: 2007. General Construction in Steel-Code of Practice. Bu-reau of Indian Standard, New Delhi.
- [39] A. Landesmann, D. Camotim, P.B. Dinis, R. Cruz, Short-to-intermediate slender pinended cold-formed steel equal-leg angle columns: experimental investigation, numerical simulations and DSM design. *Engineering Structures* 132 (2017) 471–93.
- [40] H. Kuwamura, Local Buckling of Thin-Walled Stainless Steel Members, *Steel Structures*, 191 (2003) 191-201.
- [41] A. A. de Menezes, P. C. G. Pedro, L. R. O. de Lima, A. T. da Silva, Experimental and numerical investigation of austenitic stainless steel hot-rolled angles under compression, *Journal of Constructional Steel Research* 152 (2019) 42–56.

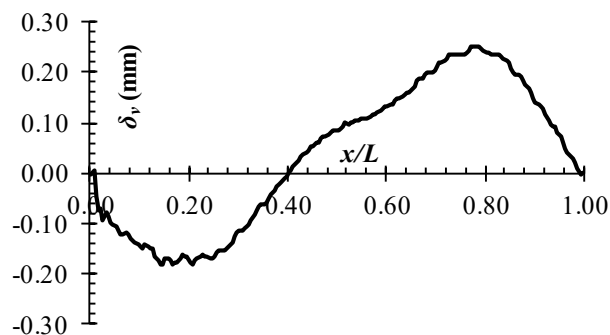
- [42] Y. Liang, V.V.K. Jeyapragasam, L. Zhang, O. Zhao, Flexural-torsional buckling behaviour of fixed-ended hot-rolled austenitic stainless steel equal-leg angle section columns. *Journal of Constructional Steel Research* 154 (2019) 43–54.
- [43] AS/NZS 4673:2001: Cold-formed stainless steel structures. Australian – New Zealand Standard. Standards Australia, 2001.
- [44] L. Zhang, K. Hai Tan, O. Zhao, Experimental and numerical studies of fixed-ended cold-formed stainless steel equal-leg angle section columns, *Engineering Structures* 184 (2019) 134–144.
- [45] Y. Sun, Z. Liu, Y. Liang, O. Zhao, Experimental and numerical investigations of hot-rolled austenitic stainless steel equal-leg angle sections, *Thin-Walled Structures* 144 (2019) 1–12.
- [46] F.R. Sarquis, L.R.O. de Lima, P.C.G. da S Vellasco, M.C. Rodrigues, Experimental and numerical investigation of hot-rolled stainless steel equal leg angles under compression. *Thin-Walled Structures* 151 (2020) 2–22.
- [47] A. da S. Sirqueira, P.C.G. da S. Vellasco, L.R.O. de Lima, F.R. Sarquis, Experimental assessment of stainless steel hot-rolled equal legs angles in compression, *Journal of Constructional Steel Research* 169 (2020) 1-11.
- [48] S. Afshan, L. Gardner, The continuous strength method for structural stainless steel design, *Thin-Walled Structures* 68 (2013) 42–49.
- [49] L. Zhang, Y. Liang, O. Zhao, Experimental and numerical investigations of pin-ended hot-rolled stainless steel angle section columns failing by flexural buckling, *Thin-Walled Structures* 156 (2020) 1-11.
- [50] AISC Design Guide 27: Structural Stainless Steel, Am. Institute of Steel Construction, 2013.
- [51] EN 10088-4: Stainless steels - Part 4: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for construction purposes. Brussels, Belgium, CEN 2009.
- [52] EN ISO 6892-1. Metallic materials – Tensile testing. Part 1: Method of test at room temperature. Brussels, Belgium, CEN 2009.
- [53] EN 10162: Cold rolled steel sections – Technical delivery conditions – Dimensional and cross-sectional tolerances. Brussels, Belgium, CEN 2003.
- [54] EN 10056-2: Structural steel equal and unequal leg angles – Part 2: Tolerances on shape and dimensions. Brussels, Belgium, CEN 1998.
- [55] P. Može, L. G. Cajot, F. Sinur, K. Rejec, D. Beg, Residual stress distribution of large steel equal leg angles, *Engineering Structures* 7 (2014) 35–47.
- [56] Y. W. H. Ban, G. Shi, Y. Shi, Residual Stress Tests of High-Strength Steel Equal Angles, *Journal of Structures Engineering* 138 (2012) 1446–1454.
- [57] ECCS. Manual on stability of steel structures. European Convention for Constructional Steelwork; 1976.
- [58] Montanstahl AG. (2021) <https://www.montanstahl.com>
- [59] Design Manual for Structural Stainless Steel, fourth ed., Steel Construction Institute (SCI) P413, 2017.
- [60] Eurocode: Basis of structural design EN 1990, Brussels, Belgium, CEN 2002.
- [61] ABAQUS User Manual. Version 6.14. Providence, RI, USA: DS SIMULIA Corp; 2014.
- [62] J. Dobrić, M. Pavlović, Z. Marković, D. Buđevac, and M. Spremić, Resistance of cold-formed built-up stainless steel columns – Part II: Numerical simulation, *Journal of constructional steel research* 140 (2018) 247–260.
- [63] K. J. R. Rasmussen, G.J. Hancock, Design of Cold-Formed Stainless Steel Tubular Members. I: Columns, *Journal of Structural Engineering* 119 (1993) 2349-2367.

- [64] L. Gardner, D.A. Nethercot, Numerical Modeling of Stainless Steel Structural Components—
A Consistent Approach, *Journal of Structural Engineering* 130 (2004) 1586–601.
- [65] Y. Huang, B. Young, Experimental investigation of cold-formed lean duplex stainless steel
beam-columns, *Thin-Walled Structures* 76 (2014) 105–117.
- [66] Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-5: Plated structural elements EN 1993-1-5,
Brussels, Belgium, CEN 2006.

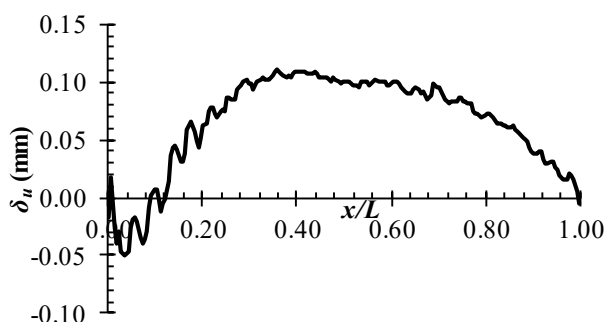
Prilog A – početne geometrijske imperfekcije uzoraka



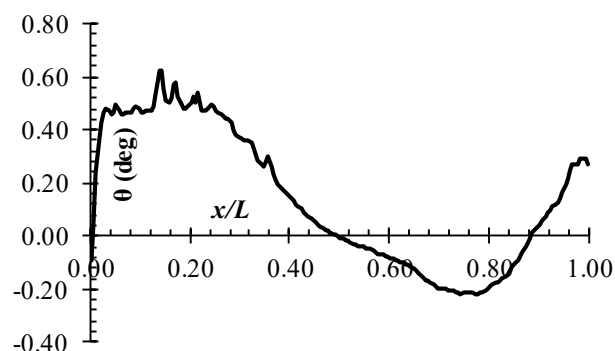
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

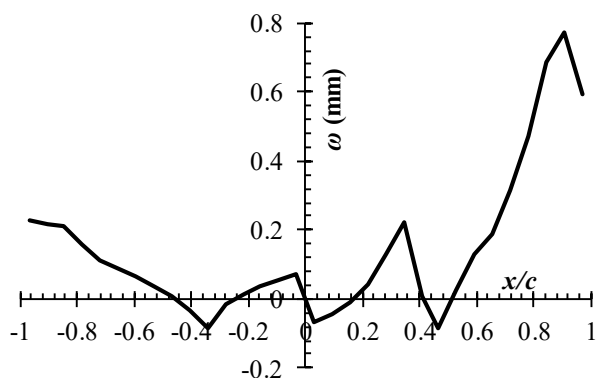


(c) Imperfekcija δ_u

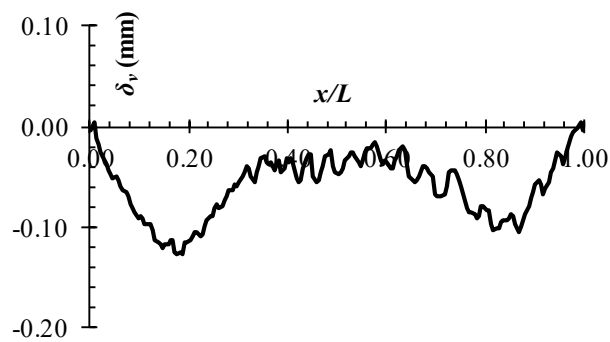


(d) Rotacija poprečnog preseka

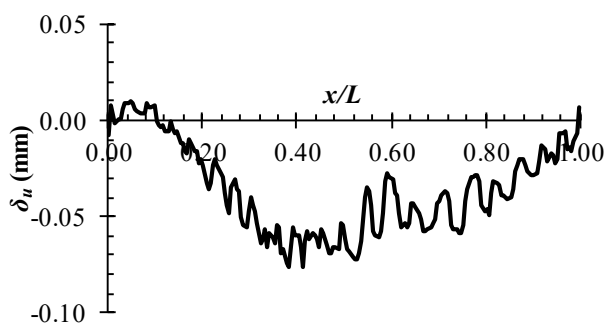
Slika A.1 – Geometrijske imperfekcije uzorka ACF $80 \times 80 \times 4 - 1000 - 1$



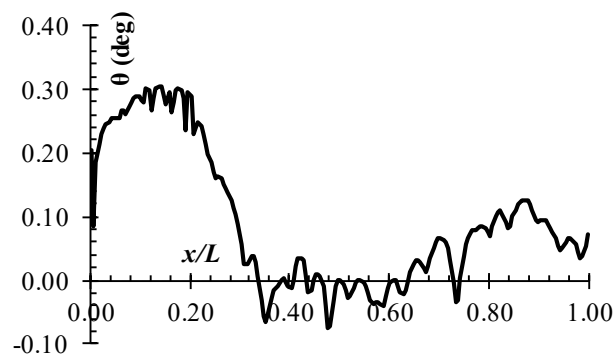
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

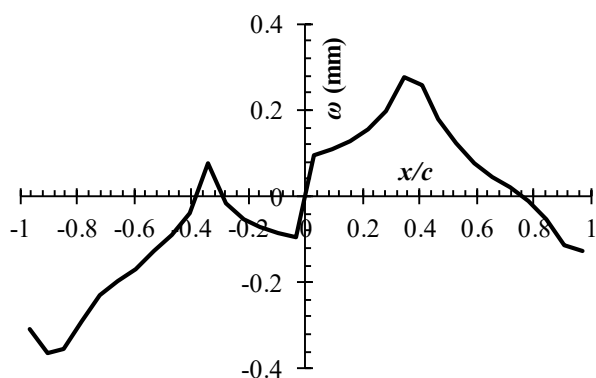


(c) Imperfekcija δ_u

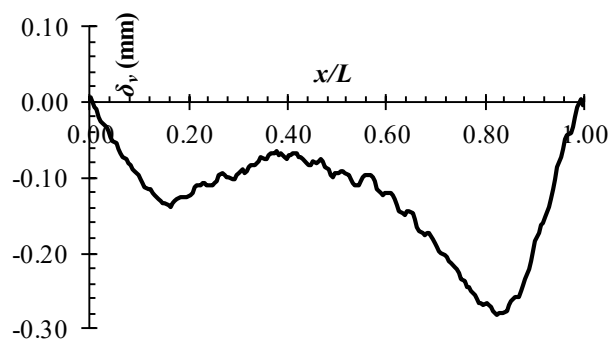


(d) Rotacija poprečnog preseka

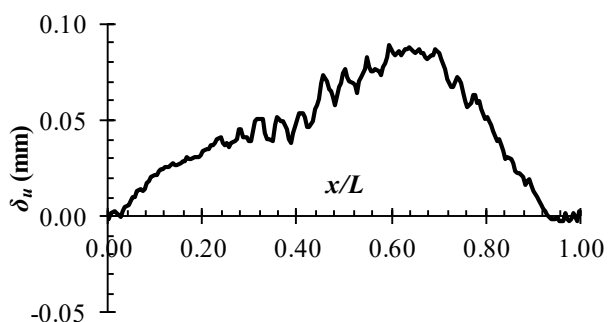
Slika A.2 – Geometrijske imperfekcije uzorka ACF $80 \times 80 \times 4 - 1000 - 2$



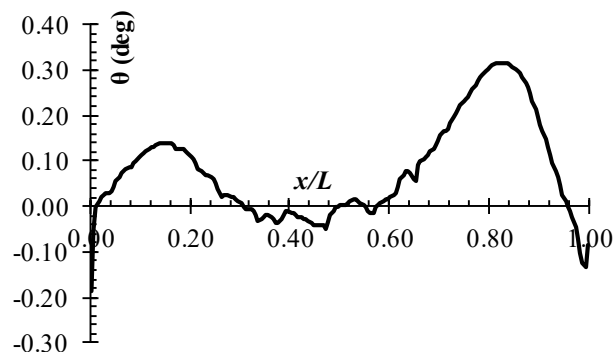
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

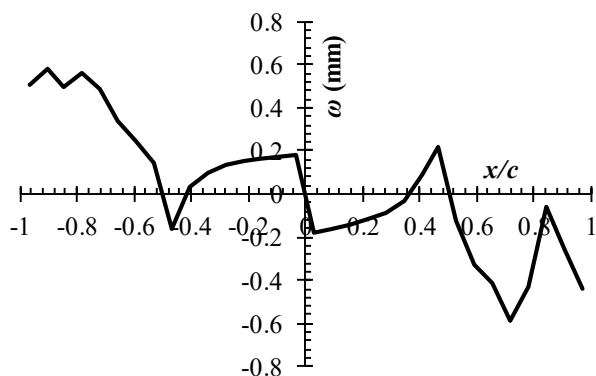


(c) Imperfekcija δ_u

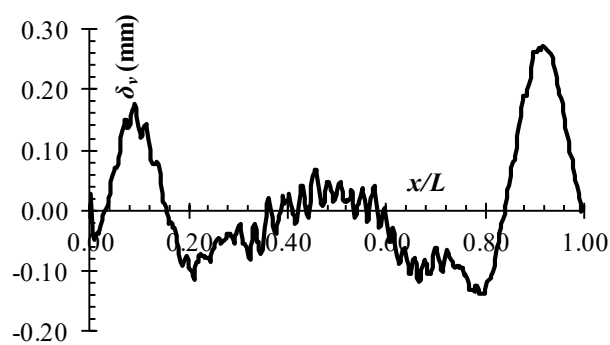


(d) Rotacija poprečnog preseka

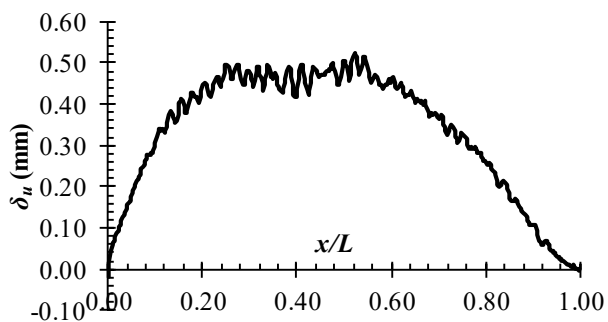
Slika A.3 – Geometrijske imperfekcije uzorka ACF $80 \times 80 \times 4 - 1000 - 3$



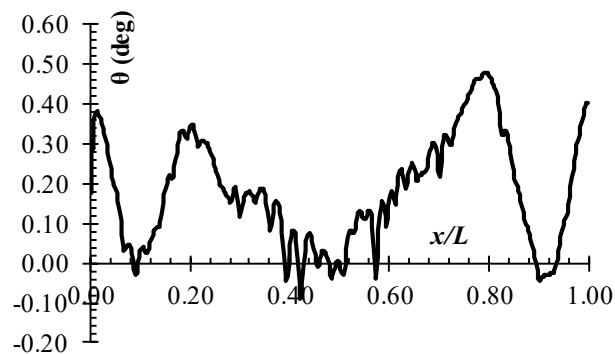
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

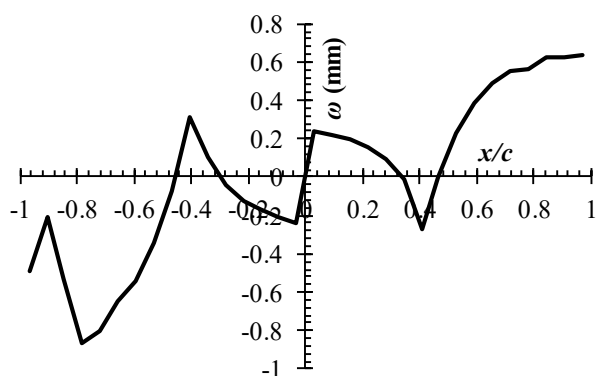


(c) Imperfekcija δ_u

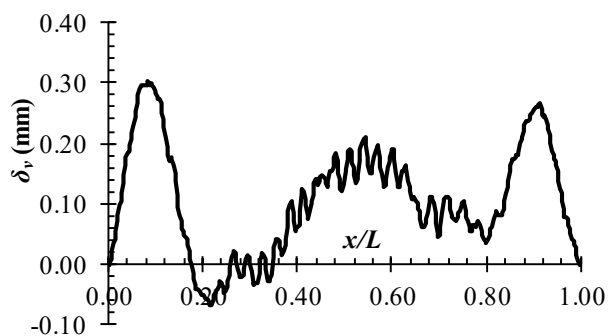


(d) Rotacija poprečnog preseka

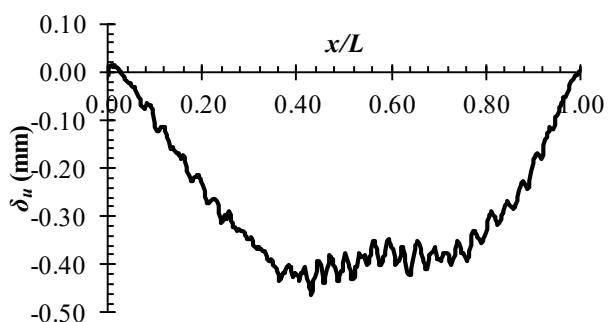
Slika A.4 – Geometrijske imperfekcije uzorka ACF $80 \times 80 \times 4 - 2000 - 1$



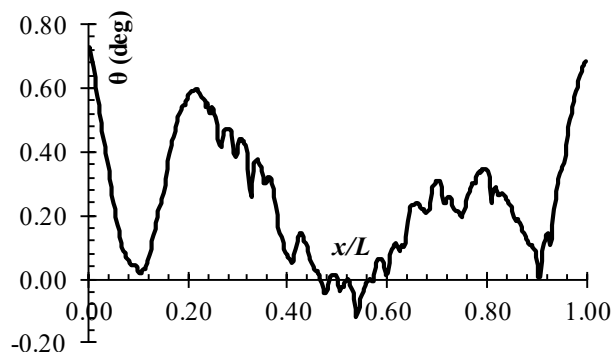
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

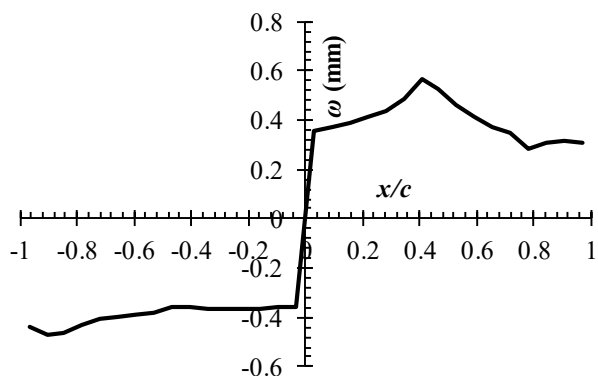


(c) Imperfekcija δ_u

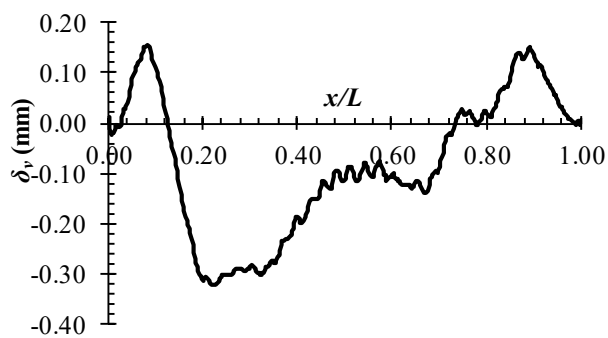


(d) Rotacija poprečnog preseka

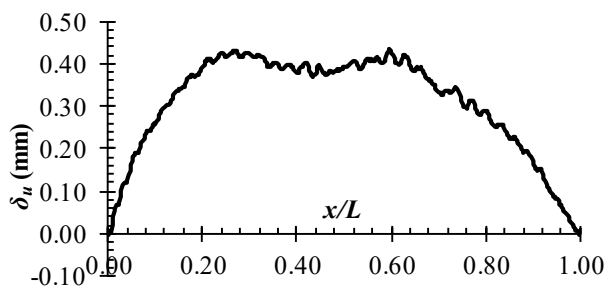
Slika A.5 – Geometrijske imperfekcije uzorka ACF $80 \times 80 \times 4 - 2000 - 2$



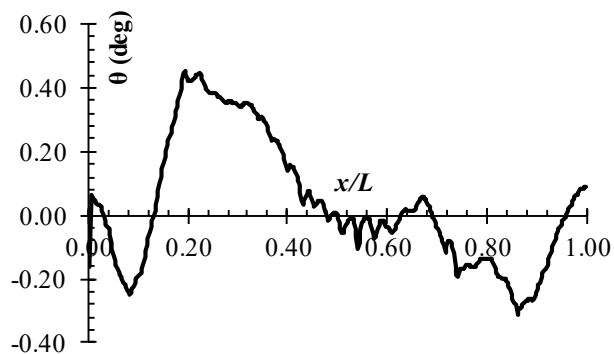
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

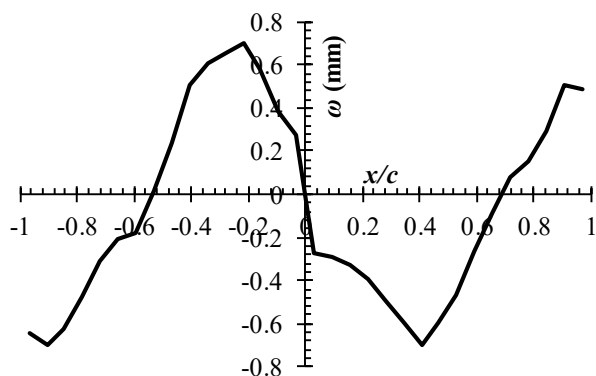


(c) Imperfekcija δ_u

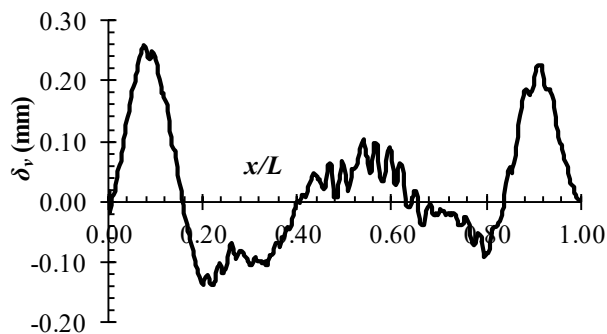


(d) Rotacija poprečnog preseka

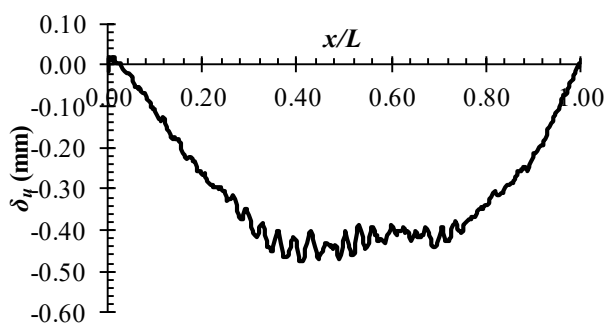
Slika A.6 – Geometrijske imperfekcije uzorka ACF $80 \times 80 \times 4 - 2000 - 3$



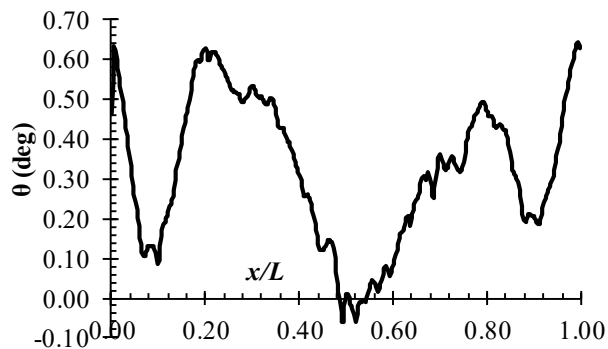
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

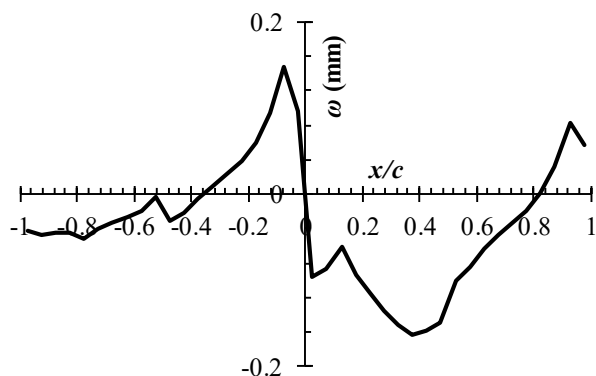


(c) Imperfekcija δ_u

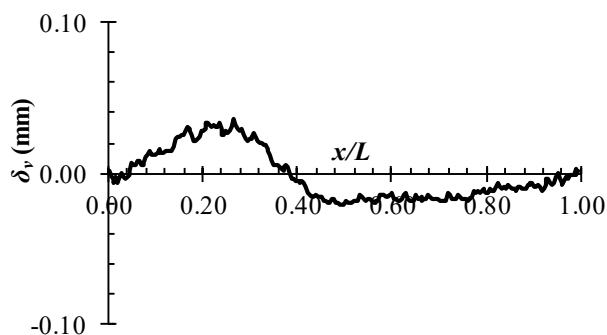


(d) Rotacija poprečnog preseka

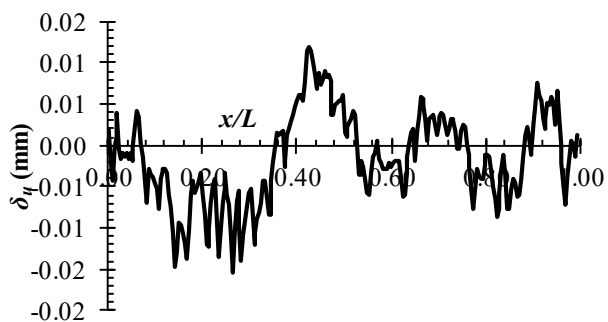
Slika A.7 – Geometrijske imperfekcije uzorka ACF $80 \times 80 \times 4 - 2000 - 4$



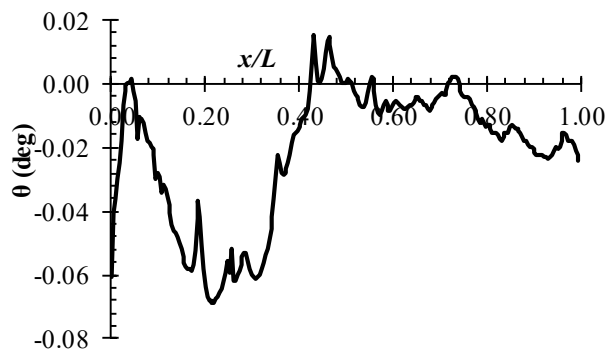
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

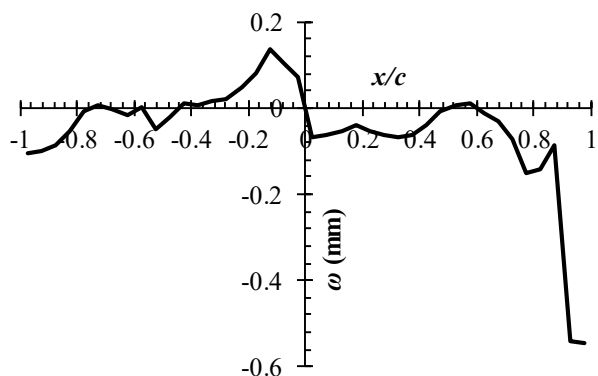


(c) Imperfekcija δ_u

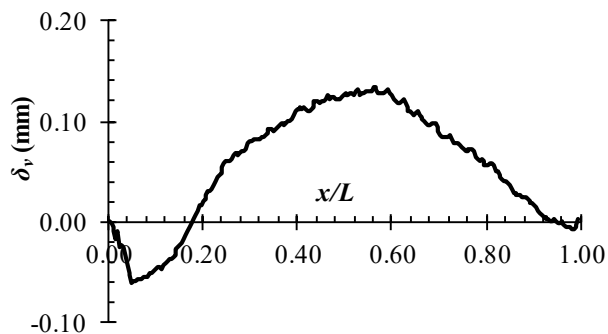


(d) Rotacija poprečnog preseka

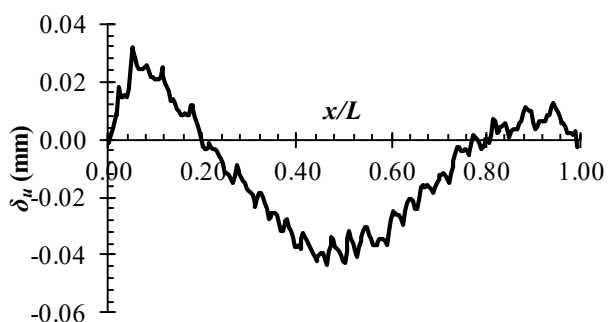
Slika A.8 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $60 \times 60 \times 6 - 800 - 1$



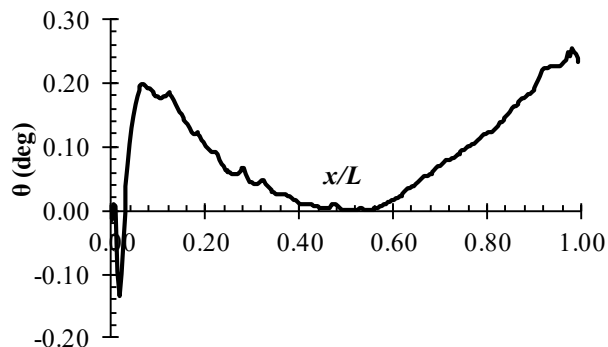
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

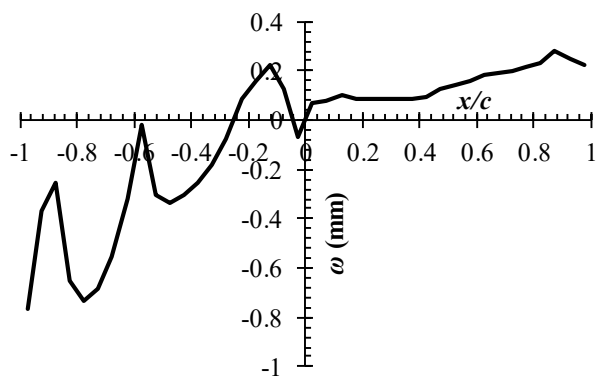


(c) Imperfekcija δ_u

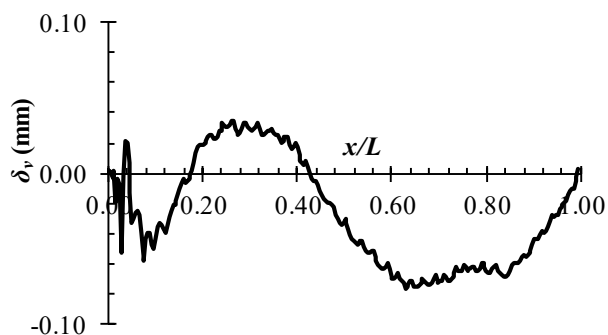


(d) Rotacija poprečnog preseka

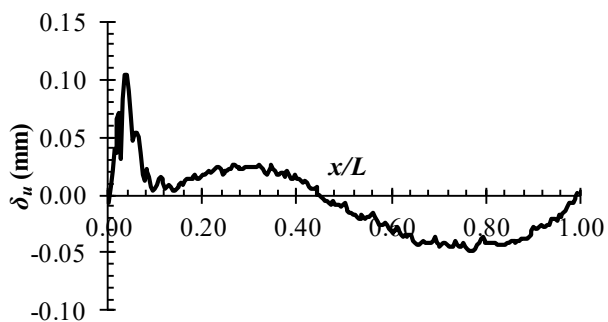
Slika A.9 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $60 \times 60 \times 6 - 800 - 2$



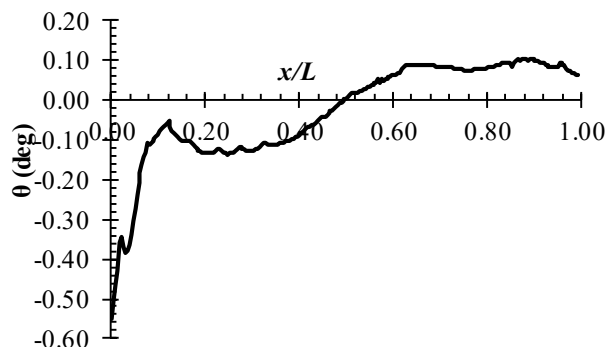
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

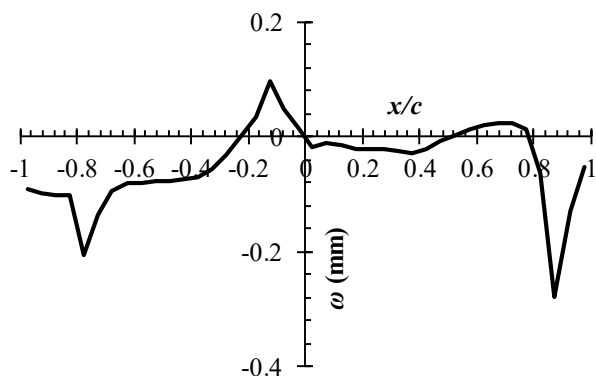


(c) Imperfekcija δ_u

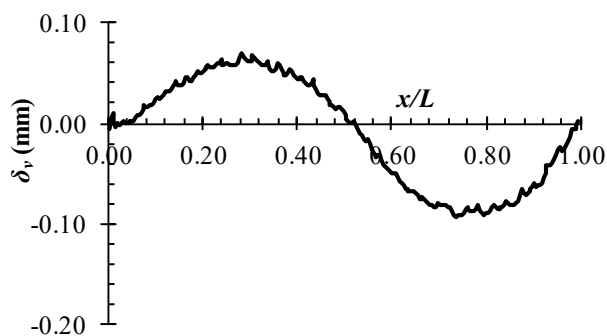


(d) Rotacija poprečnog preseka

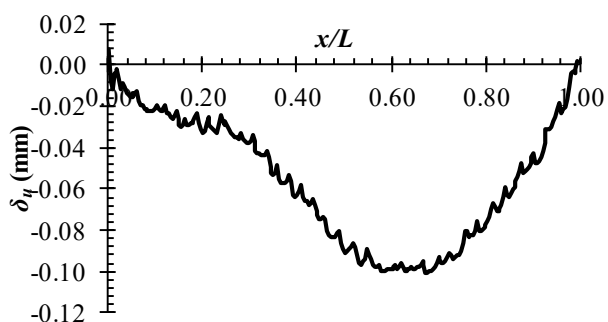
Slika A.10 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $60 \times 60 \times 6 - 800 - 3$



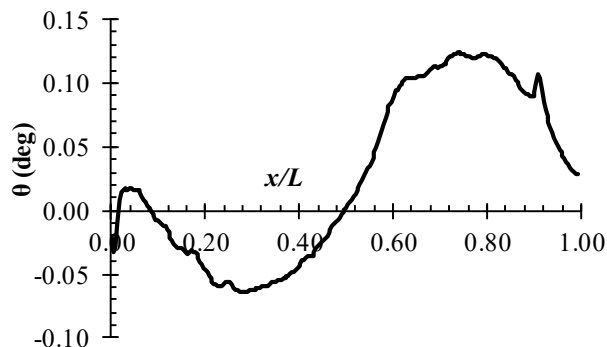
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

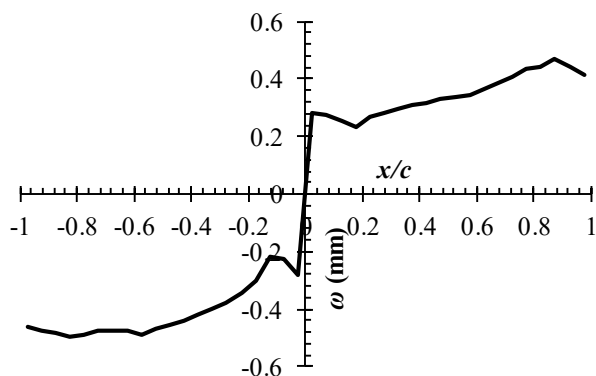


(c) Imperfekcija δ_u

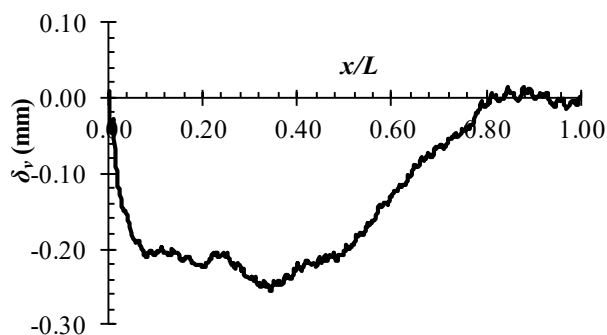


(d) Rotacija poprečnog preseka

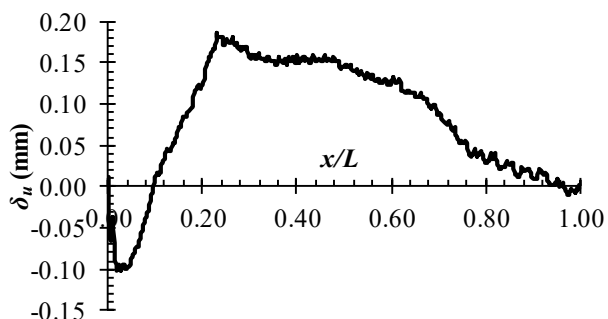
Slika A.11 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $60 \times 60 \times 6 - 800 - 4$



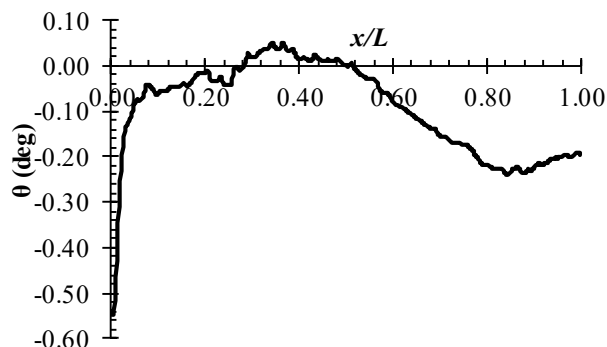
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

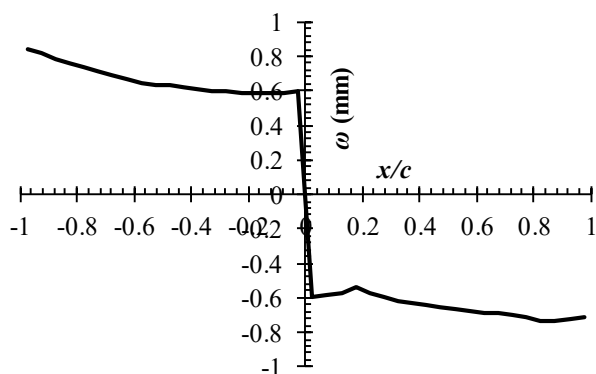


(c) Imperfekcija δ_u

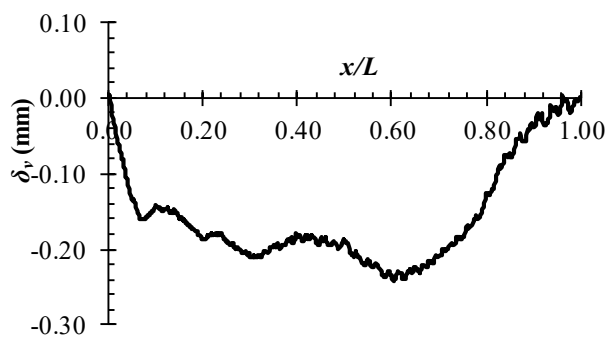


(d) Rotacija poprečnog preseka

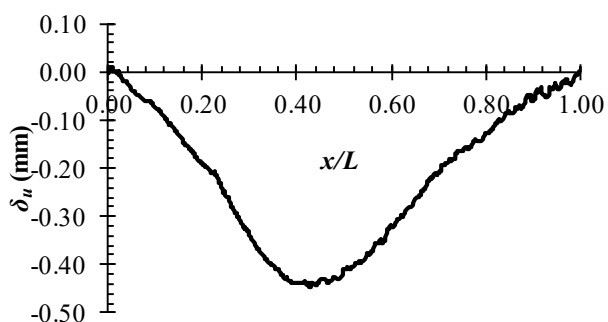
Slika A.12 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $60 \times 60 \times 6 - 2000 - 1$



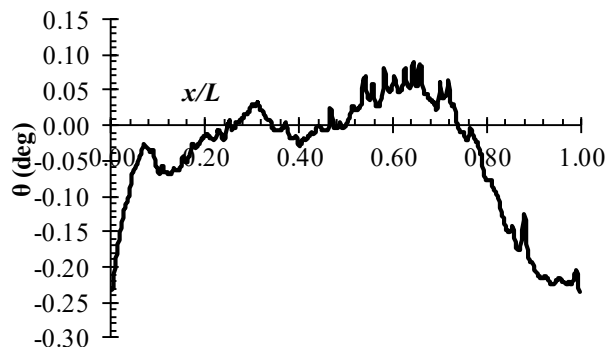
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

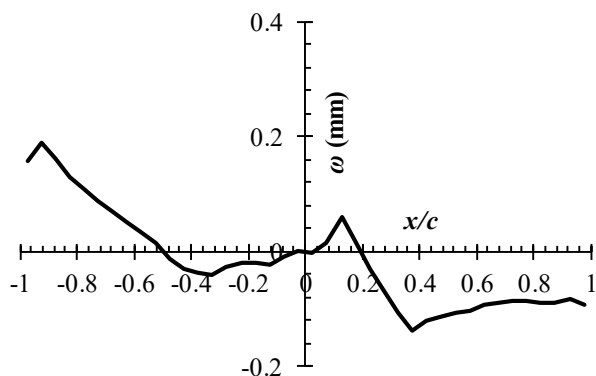


(c) Imperfekcija δ_u

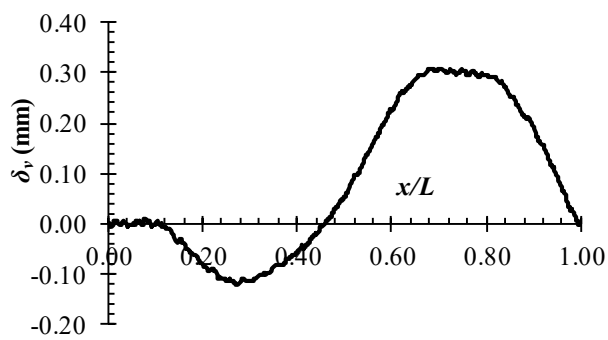


(d) Rotacija poprečnog preseka

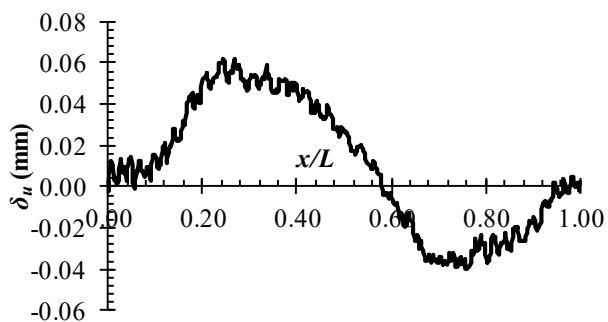
Slika A.13 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $60 \times 60 \times 6 - 2000 - 2$



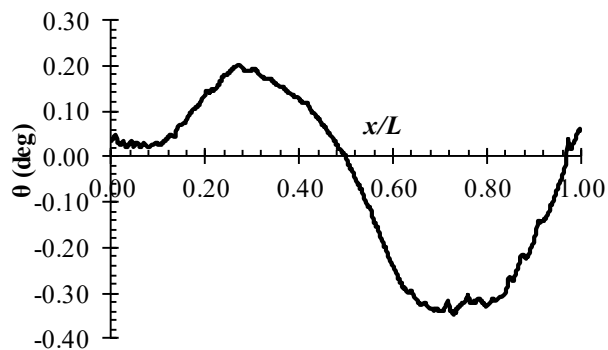
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

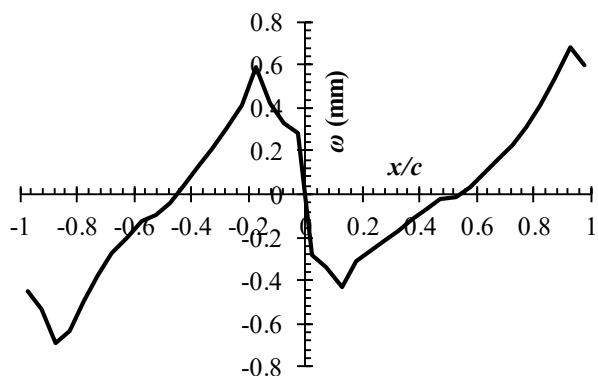


(c) Imperfekcija δ_u

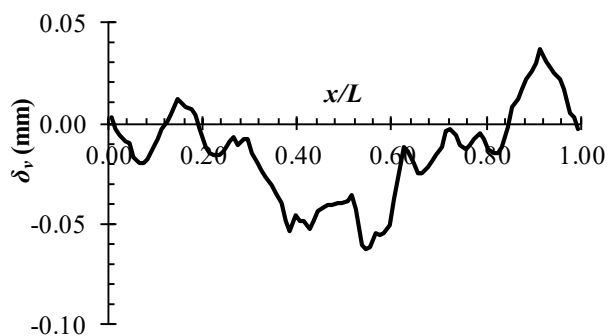


(d) Rotacija poprečnog preseka

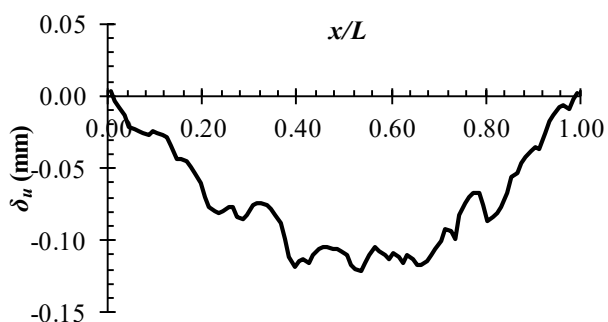
Slika A.14 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $60 \times 60 \times 6 - 2000 - 4$



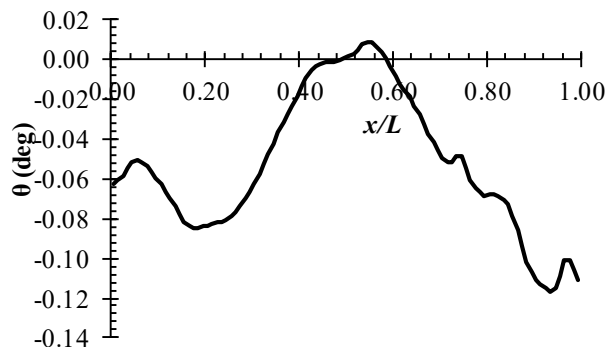
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

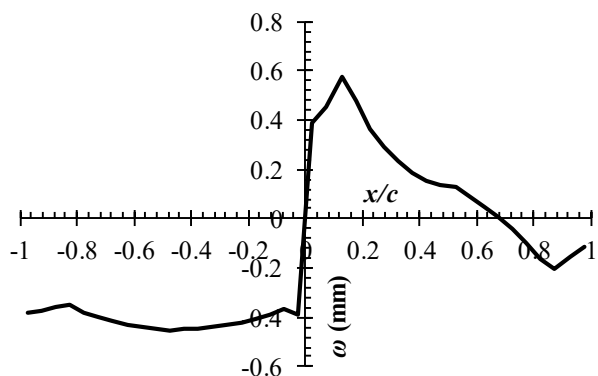


(c) Imperfekcija δ_u

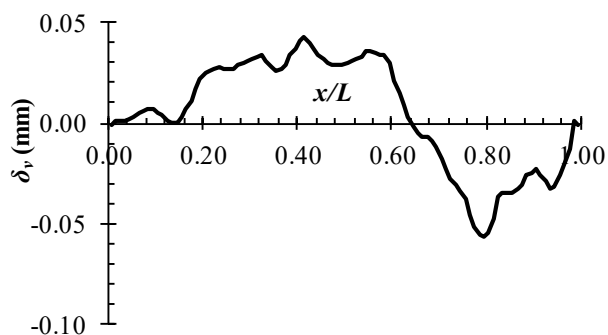


(d) Rotacija poprečnog preseka

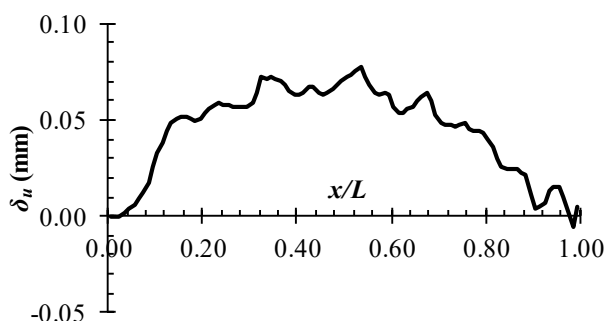
Slika A.15 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $100 \times 100 \times 10 - 500 - 1$



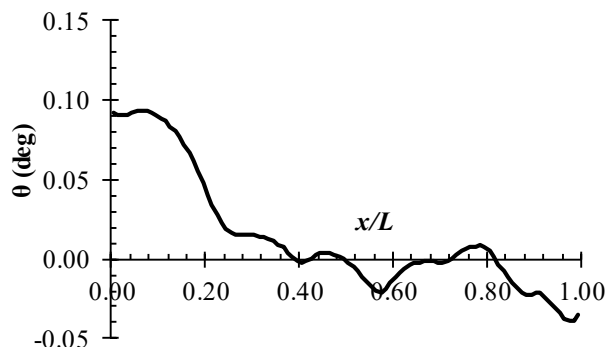
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

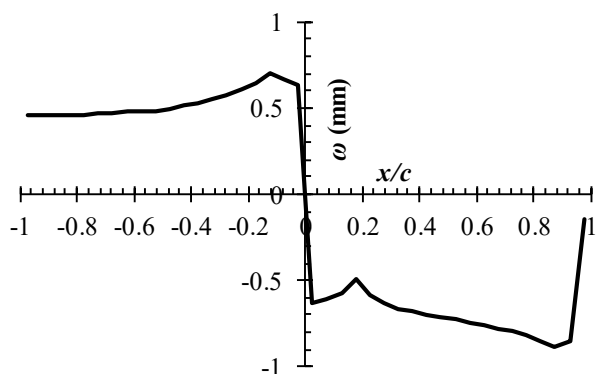


(c) Imperfekcija δ_u

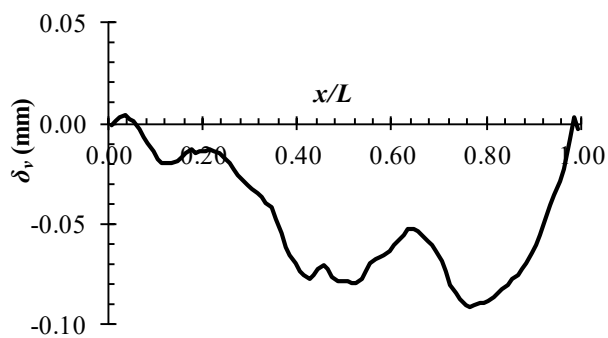


(d) Rotacija poprečnog preseka

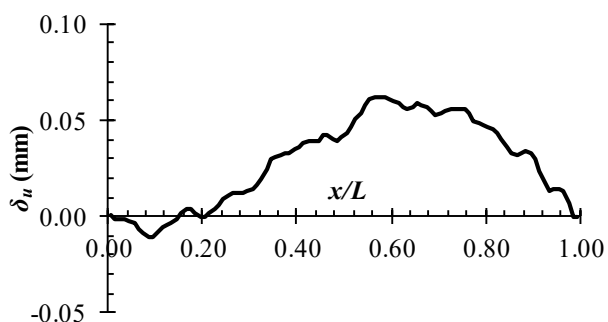
Slika A.16 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $100 \times 100 \times 10 - 500 - 2$



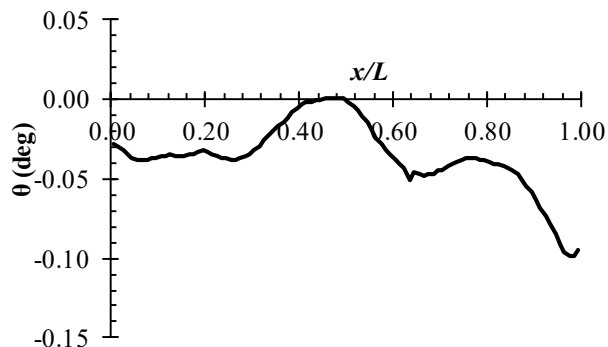
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

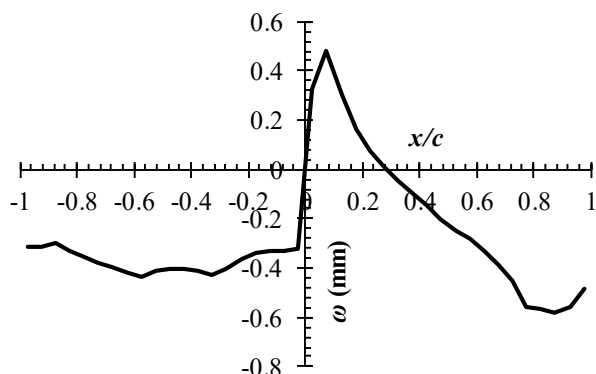


(c) Imperfekcija δ_u

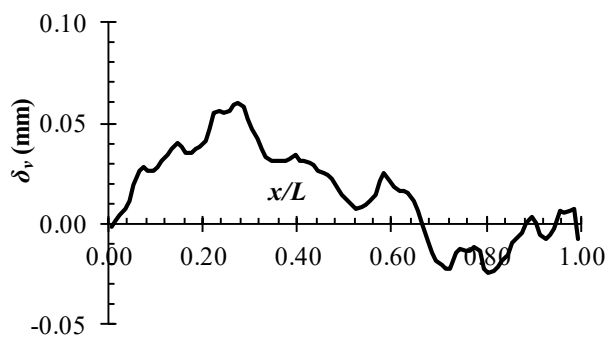


(d) Rotacija poprečnog preseka

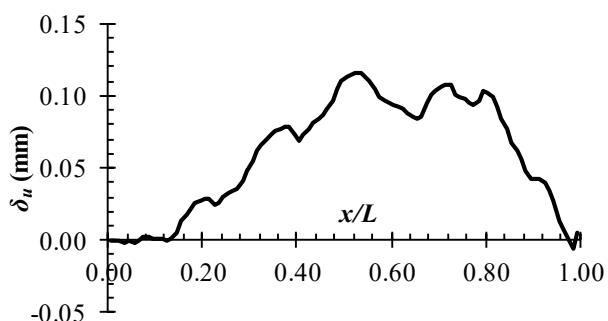
Slika A.17 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $100 \times 100 \times 10 - 500 - 3$



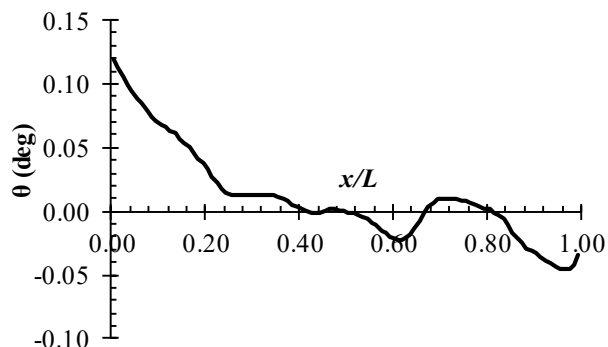
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

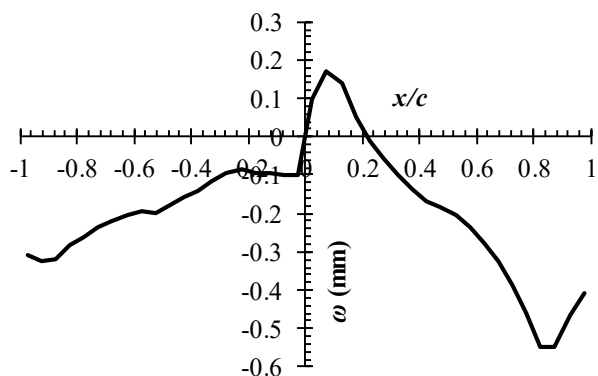


(c) Imperfekcija δ_u

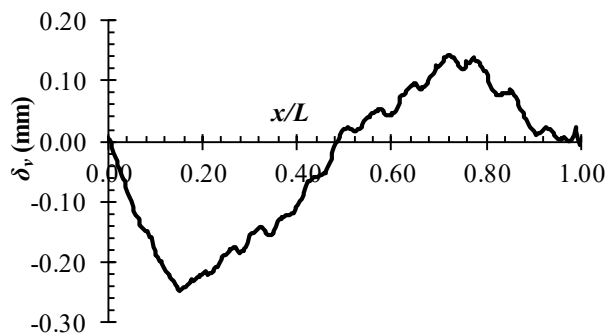


(d) Rotacija poprečnog preseka

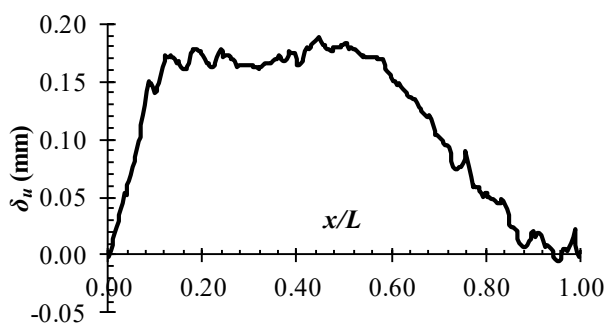
Slika A.18 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $100 \times 100 \times 10 - 500 - 4$



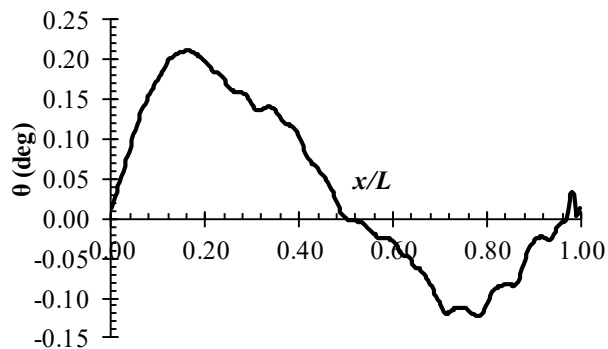
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

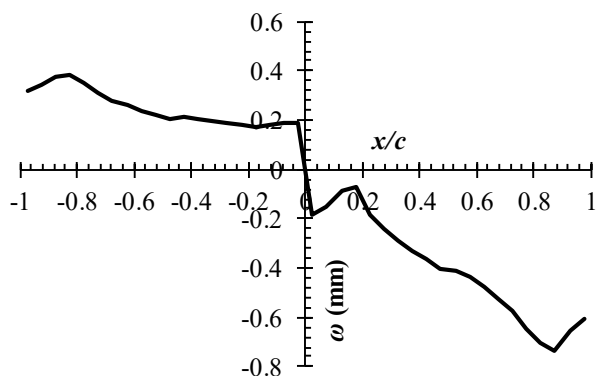


(c) Imperfekcija δ_u

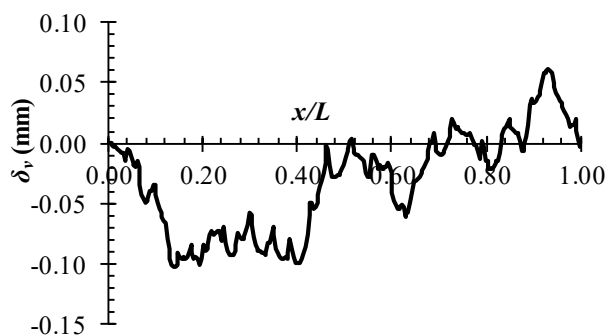


(d) Rotacija poprečnog preseka

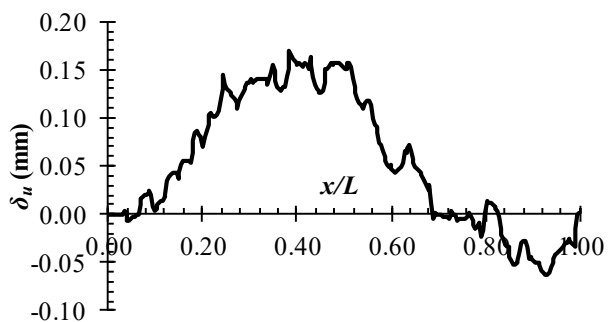
Slika A.19 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 1$



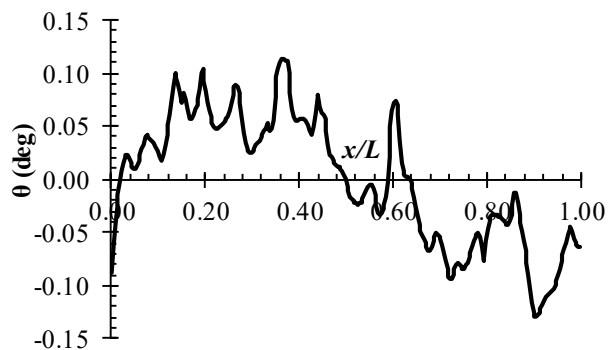
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

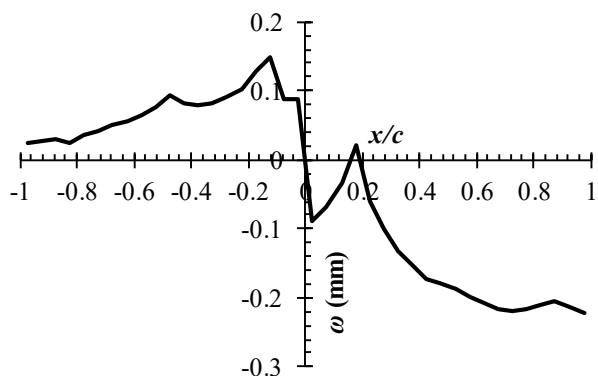


(c) Imperfekcija δ_u

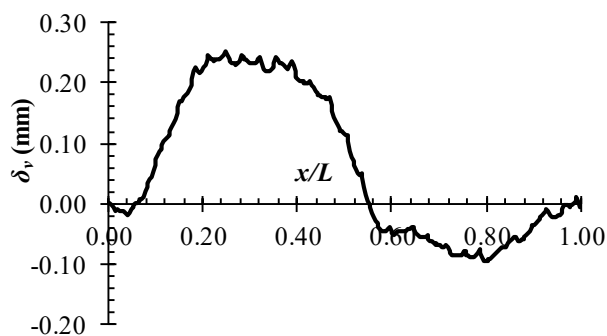


(d) Rotacija poprečnog preseka

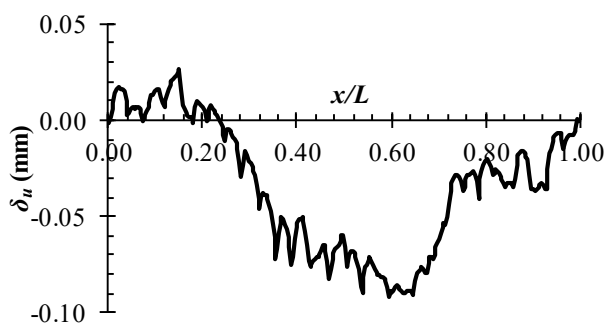
Slika A.20 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 3$



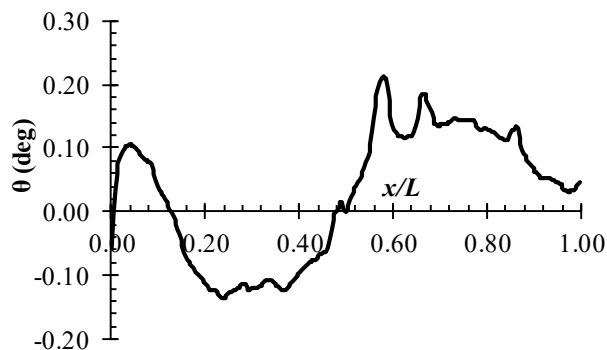
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

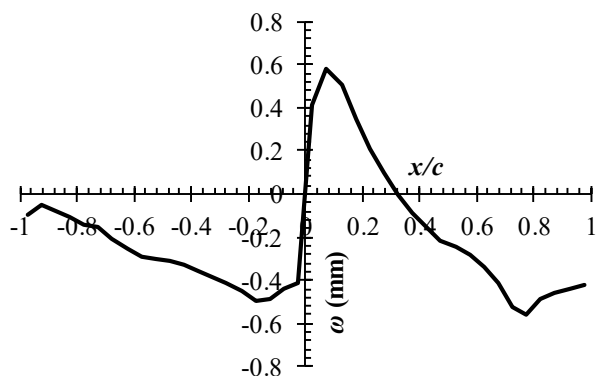


(c) Imperfekcija δ_u

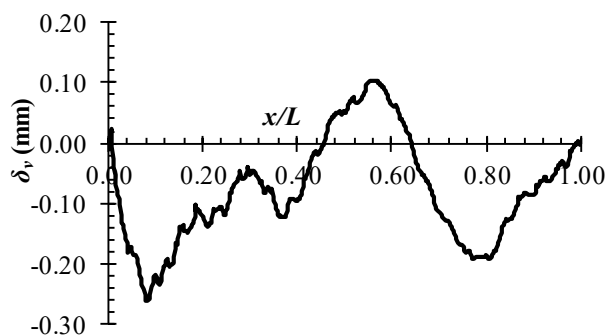


(d) Rotacija poprečnog preseka

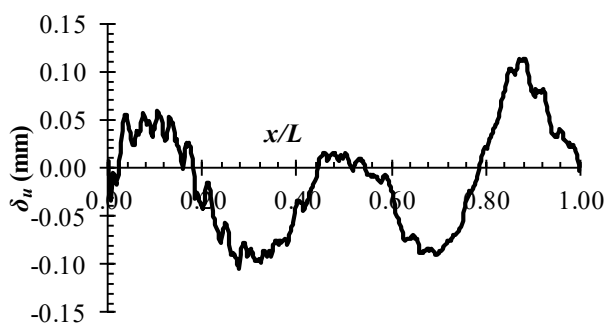
Slika A.21 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 4$



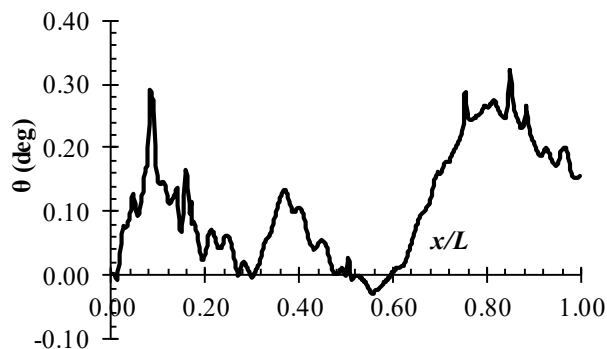
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

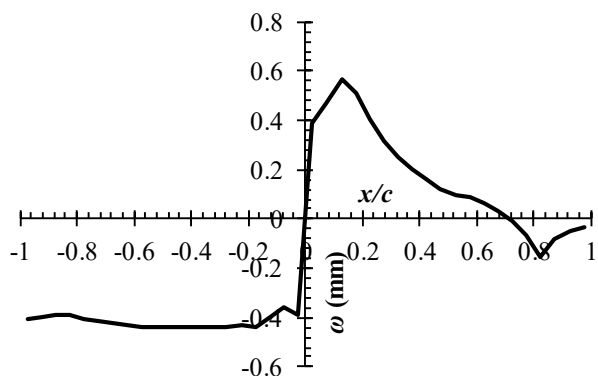


(c) Imperfekcija δ_u

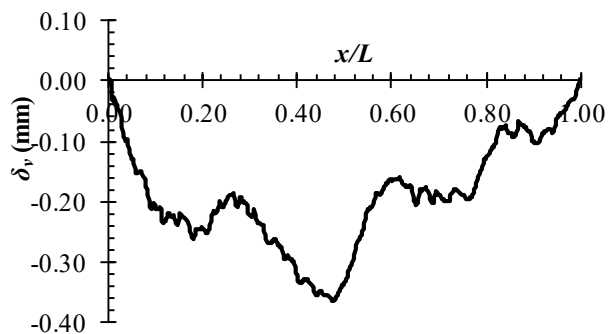


(d) Rotacija poprečnog preseka

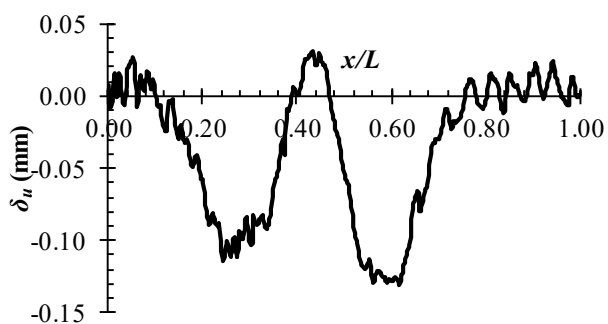
Slika A.22 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $100 \times 100 \times 10 - 2500 - 1$



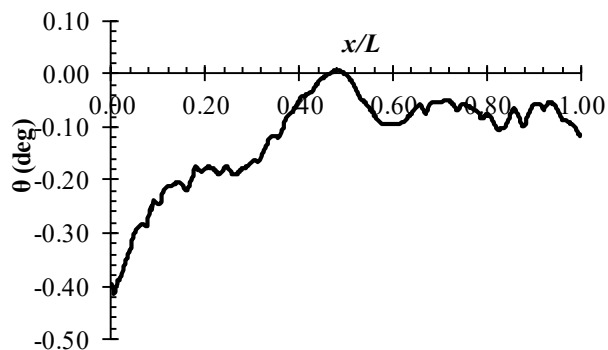
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

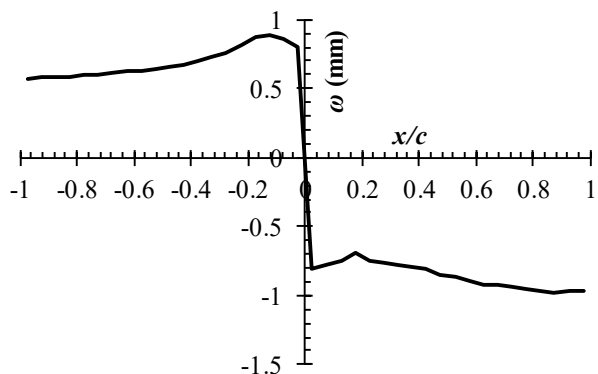


(c) Imperfekcija δ_u

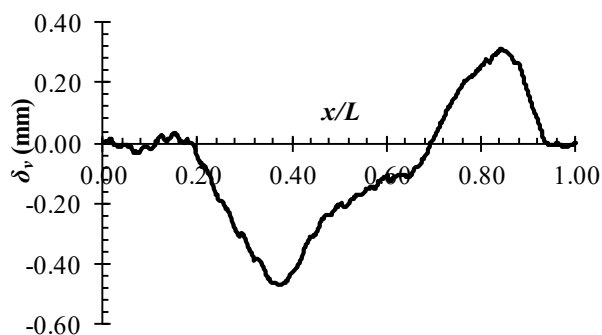


(d) Rotacija poprečnog preseka

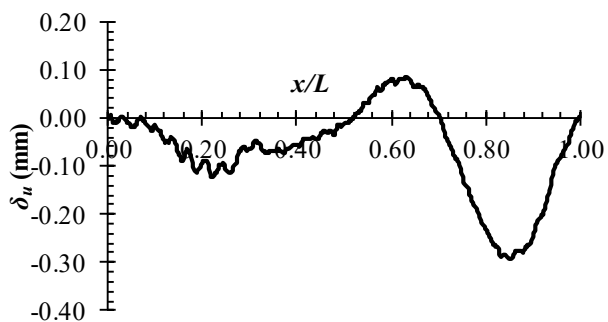
Slika A.23 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $100 \times 100 \times 10 - 2500 - 2$



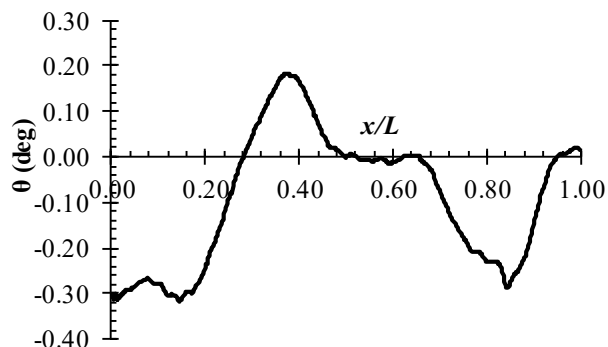
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

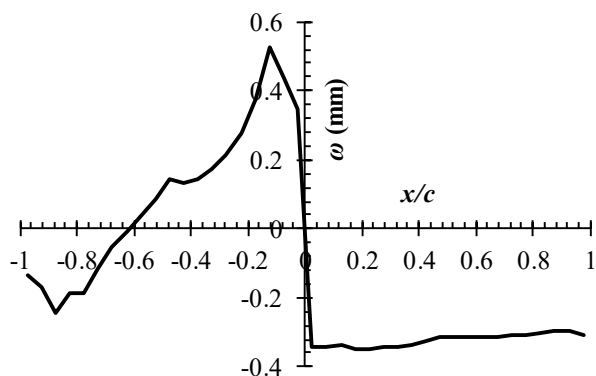


(c) Imperfekcija δ_u

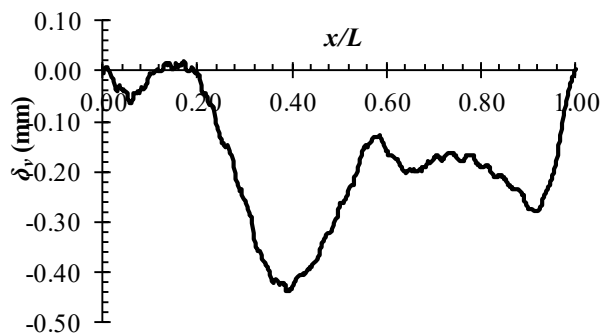


(d) Rotacija poprečnog preseka

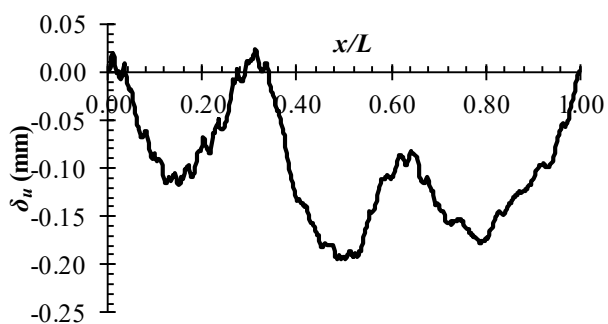
Slika A.24 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $100 \times 100 \times 10 - 2500 - 3$



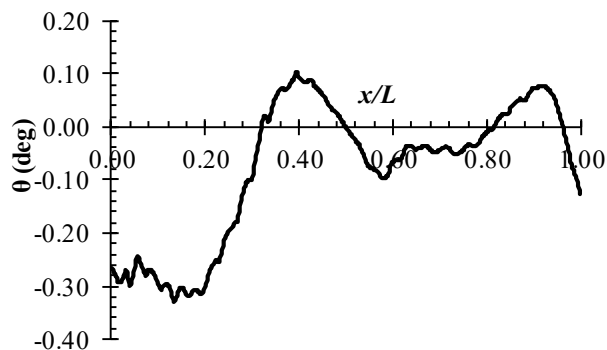
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

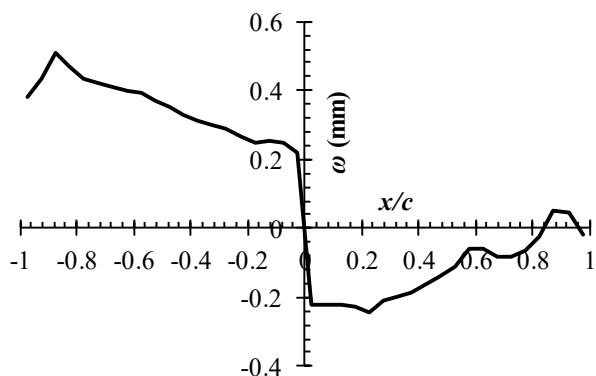


(c) Imperfekcija δ_u

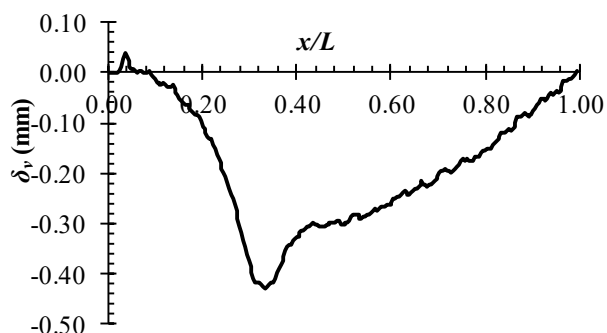


(d) Rotacija poprečnog preseka

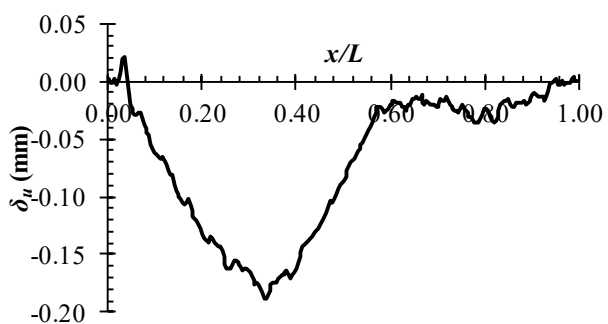
Slika A.25 – Geometrijske imperfekcije uzorka AHR $100 \times 100 \times 10 - 2500 - 4$



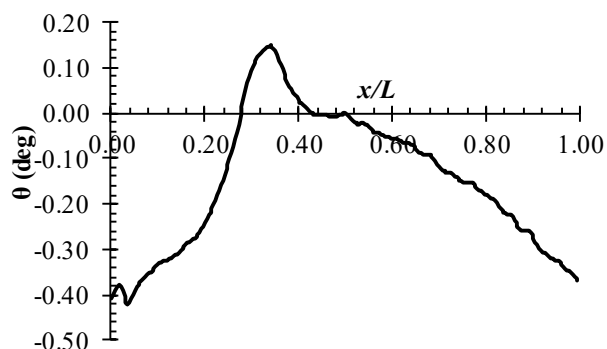
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

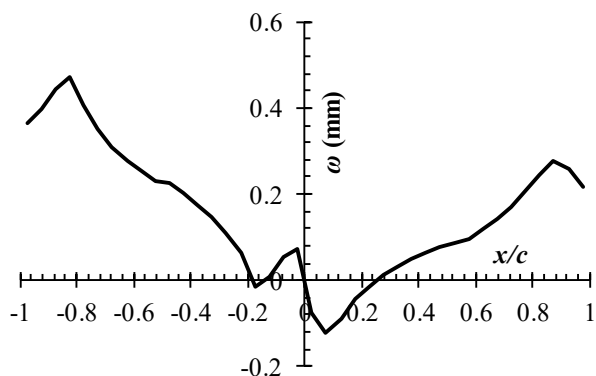


(c) Imperfekcija δ_u

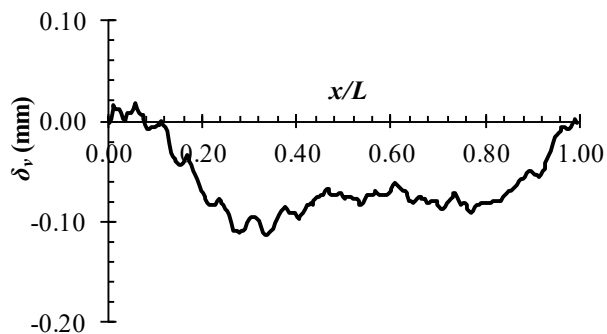


(d) Rotacija poprečnog preseka

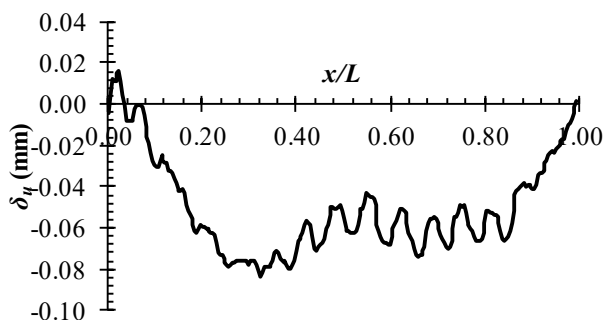
Slika A.26 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW $60 \times 60 \times 6 - 800 - 2$



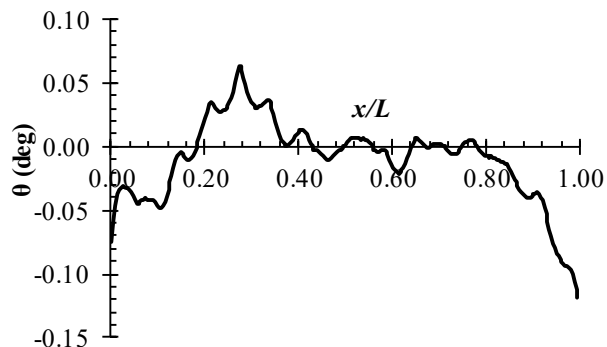
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

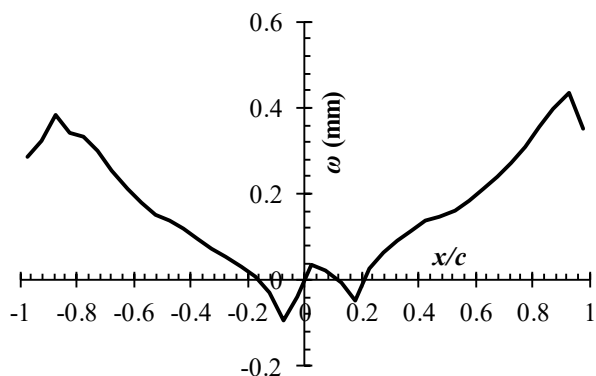


(c) Imperfekcija δ_u

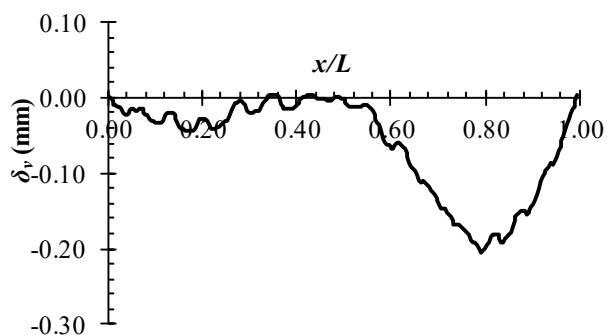


(d) Rotacija poprečnog preseka

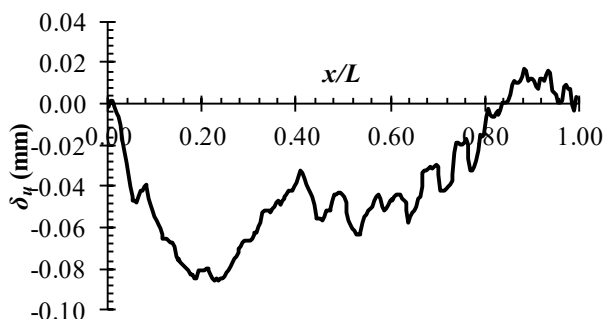
Slika A.27 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW 60 × 60 × 6 – 800 – 3



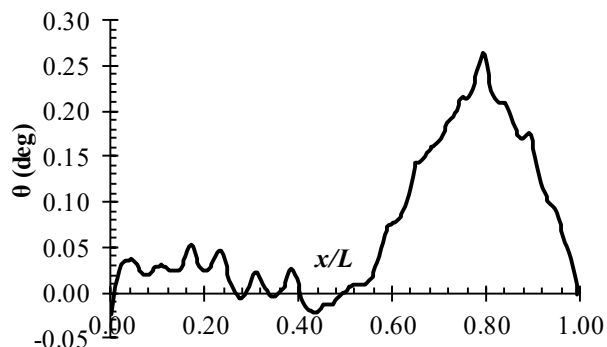
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

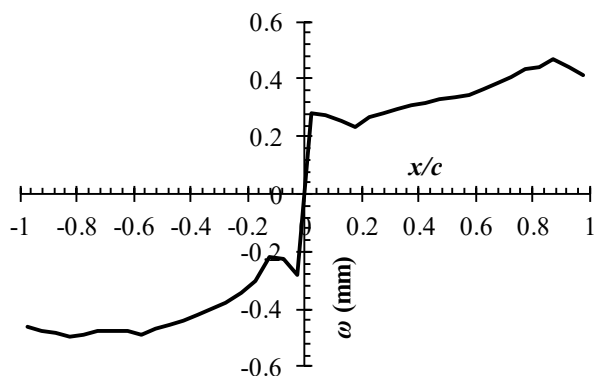


(c) Imperfekcija δ_u

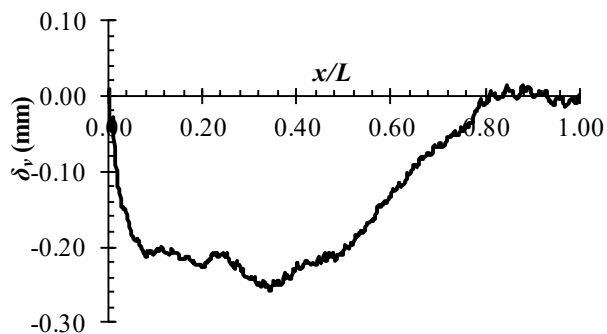


(d) Rotacija poprečnog preseka

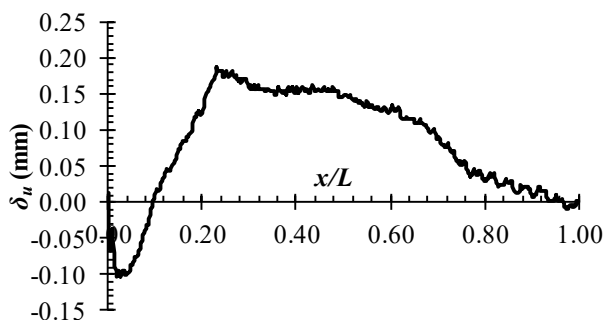
Slika A.28 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW 60 × 60 × 6 – 800 – 4



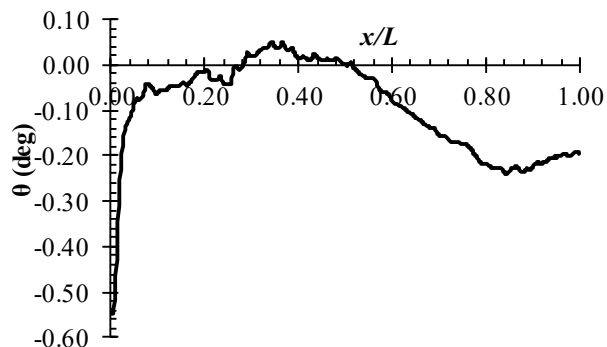
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

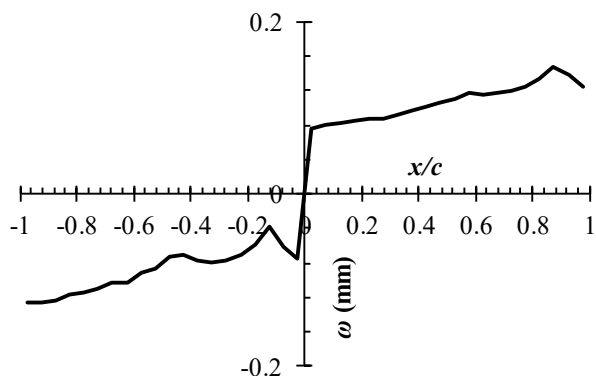


(c) Imperfekcija δ_u

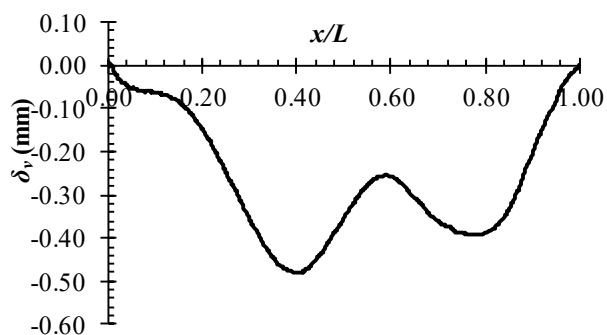


(d) Rotacija poprečnog preseka

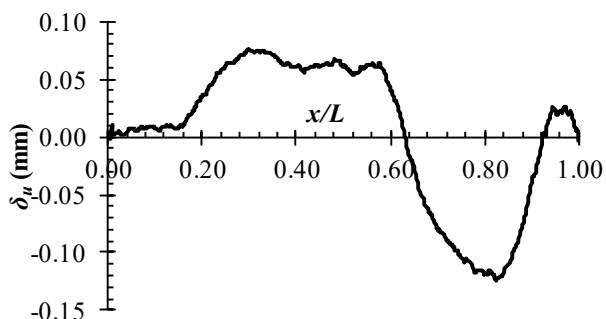
Slika A.29 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW 60 × 60 × 6 – 2000 – 1



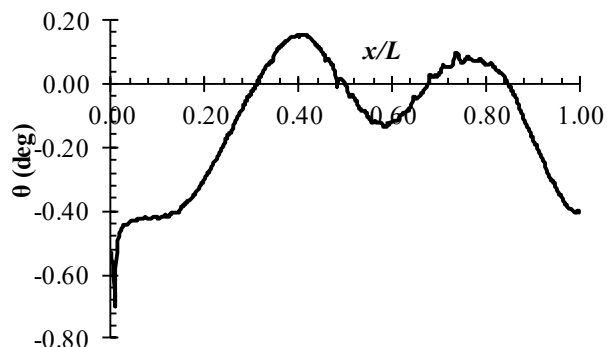
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

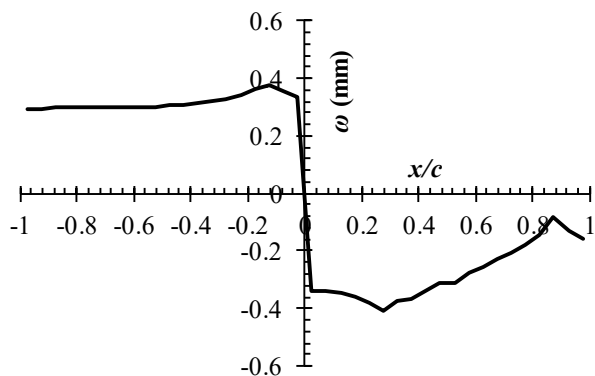


(c) Imperfekcija δ_u

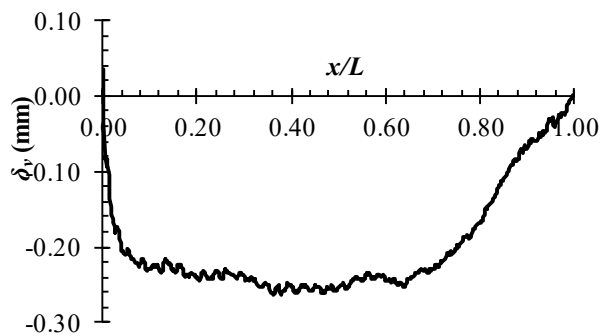


(d) Rotacija poprečnog preseka

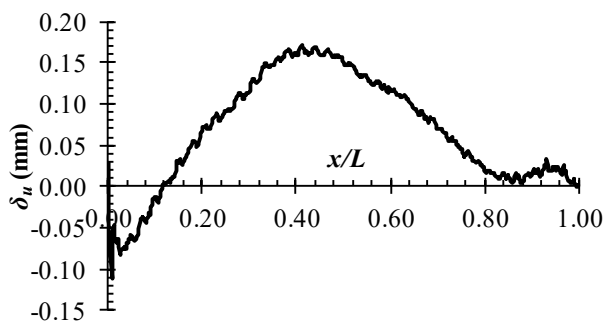
Slika A.30 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW 60 × 60 × 6 – 2000 – 2



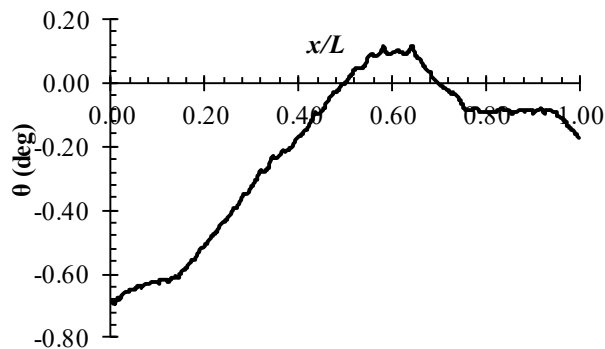
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

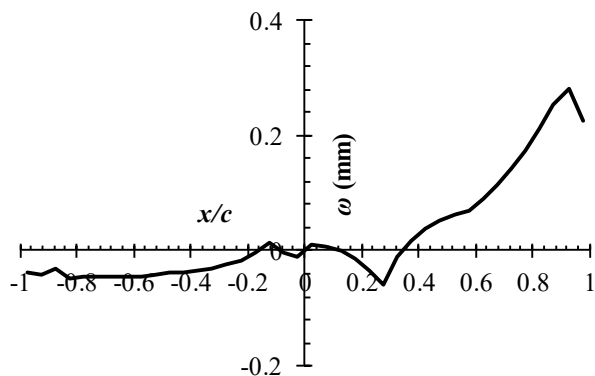


(c) Imperfekcija δ_u

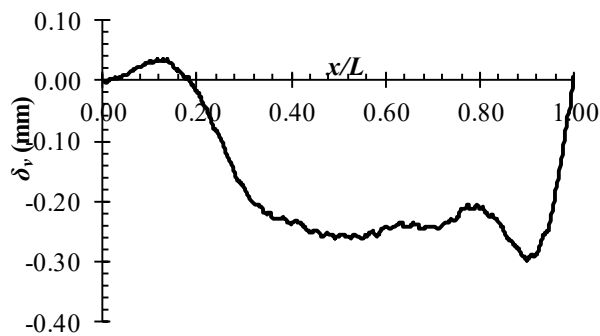


(d) Rotacija poprečnog preseka

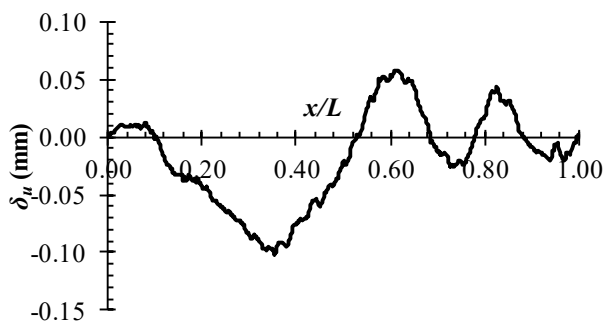
Slika A.31 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW 60 × 60 × 6 – 2000 – 3



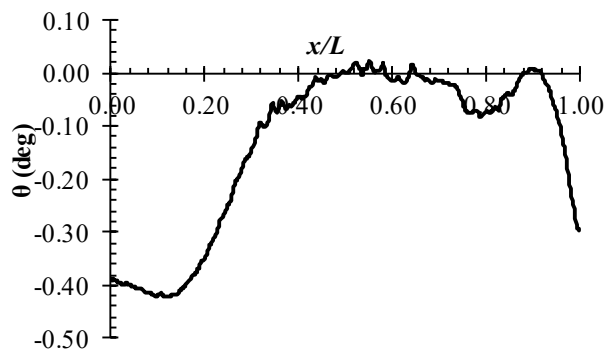
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

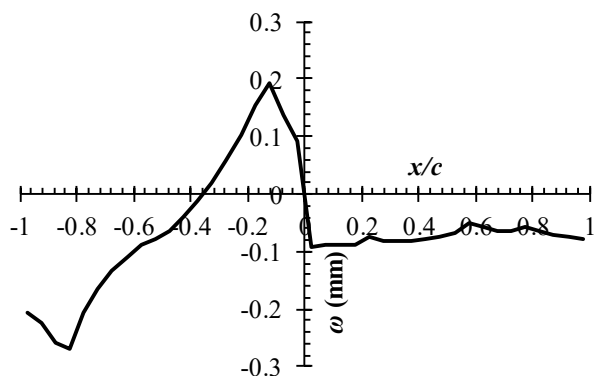


(c) Imperfekcija δ_u

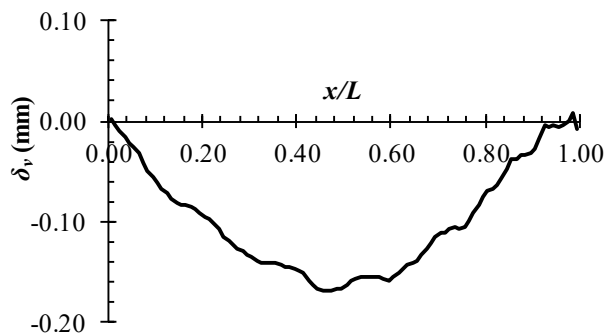


(d) Rotacija poprečnog preseka

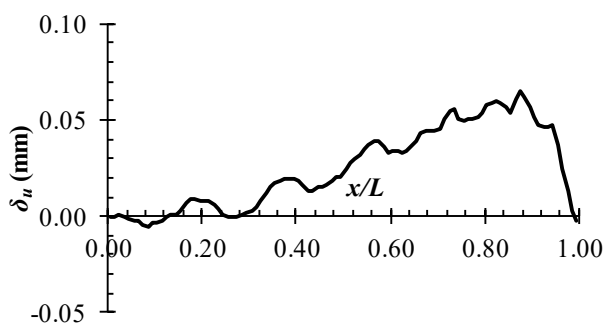
Slika A.32 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW 60 × 60 × 6 – 2000 – 4



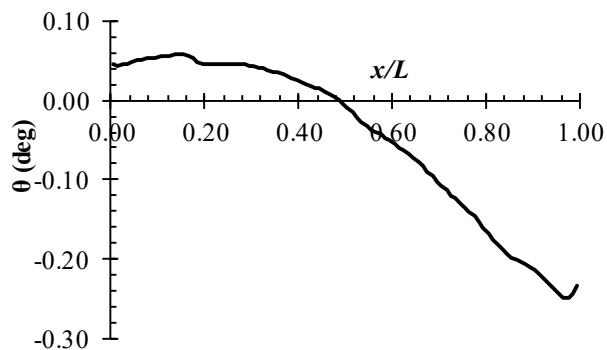
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

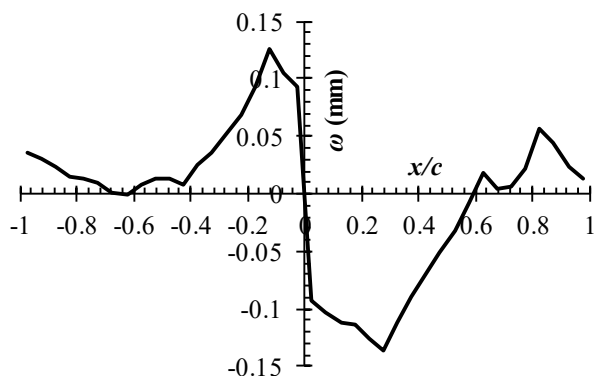


(c) Imperfekcija δ_u

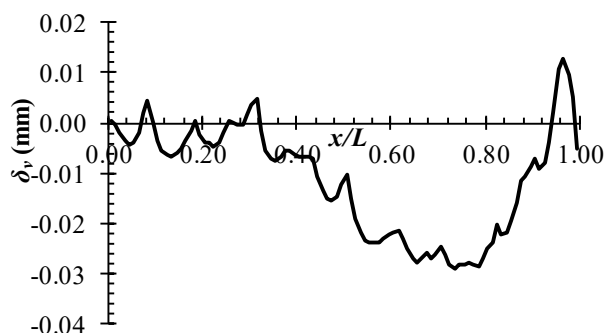


(d) Rotacija poprečnog preseka

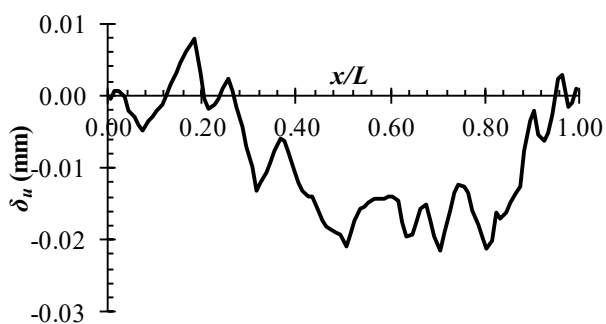
Slika A.33 – Geometrijske imperfekcije uzorka $ALW 100 \times 100 \times 10 - 500 - 1$



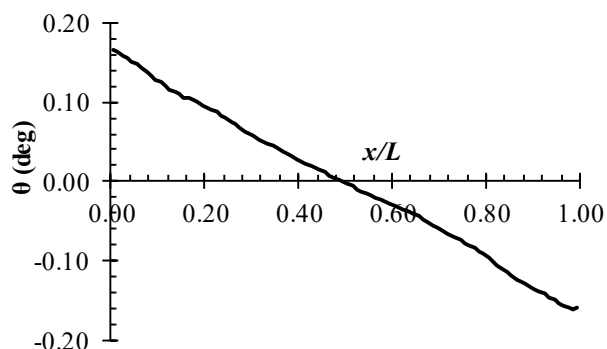
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

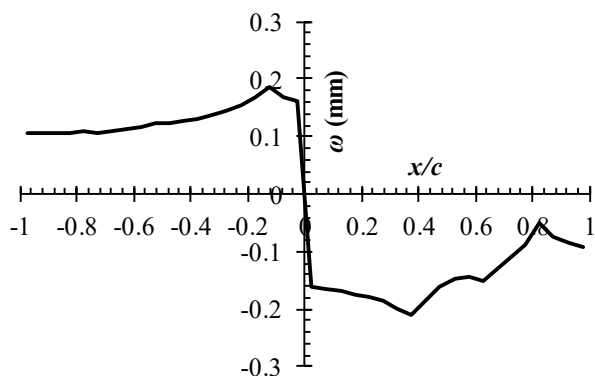


(c) Imperfekcija δ_u

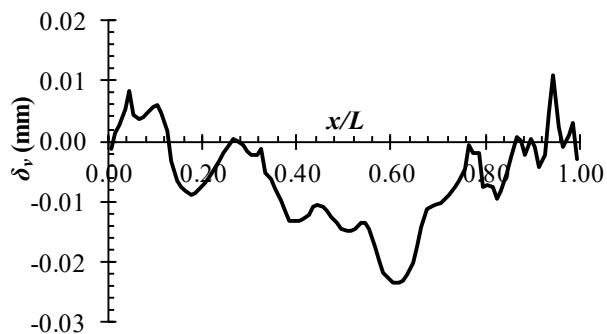


(d) Rotacija poprečnog preseka

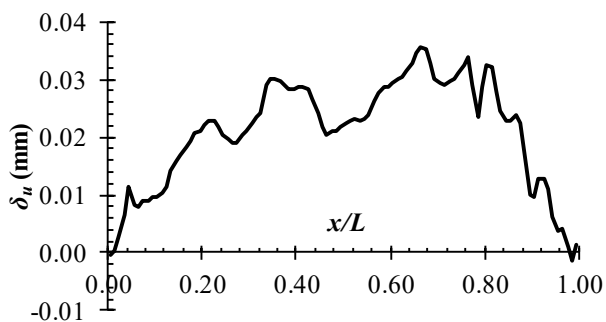
Slika A.34 – Geometrijske imperfekcije uzorka $ALW 100 \times 100 \times 10 - 500 - 2$



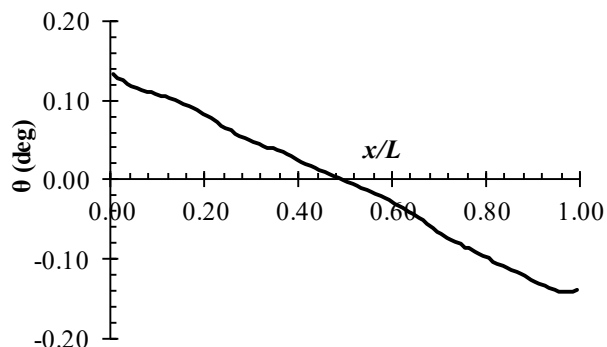
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

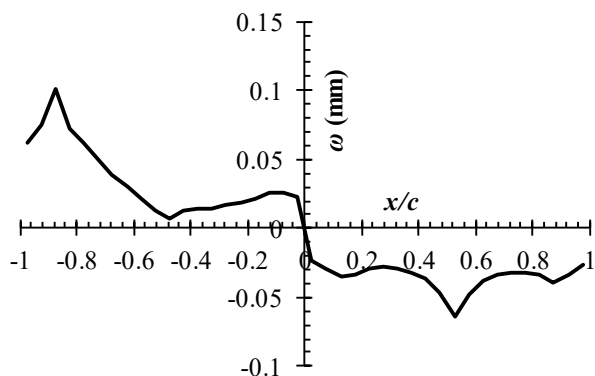


(c) Imperfekcija δ_u

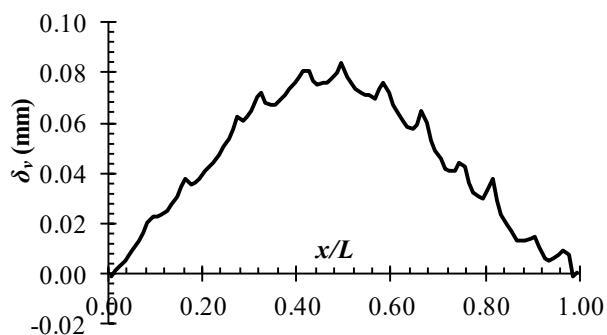


(d) Rotacija poprečnog preseka

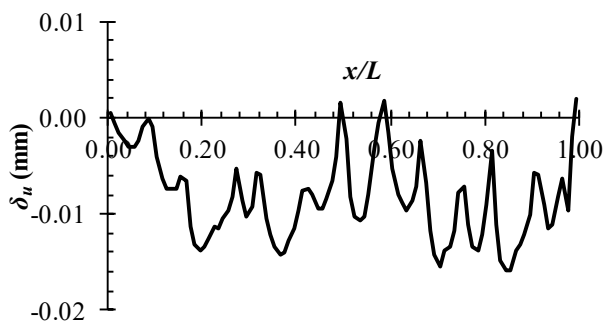
Slika A.35 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW 100 × 100 × 10 – 500 – 3



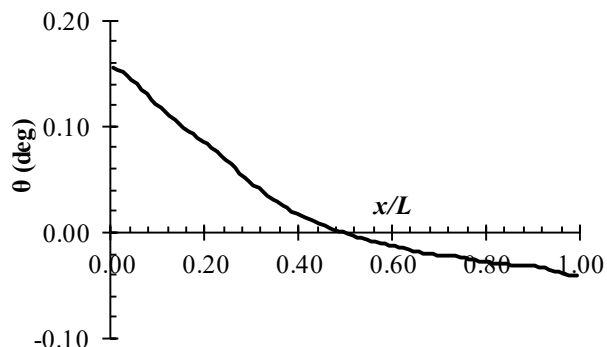
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

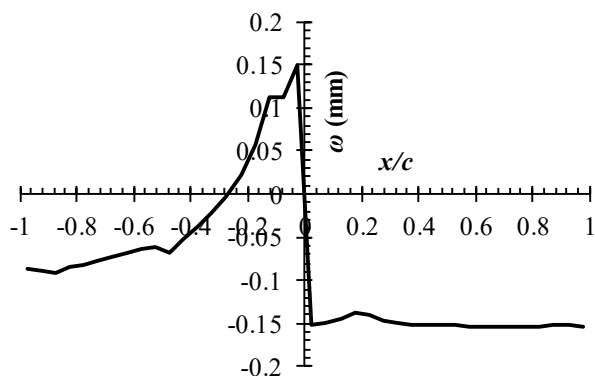


(c) Imperfekcija δ_u

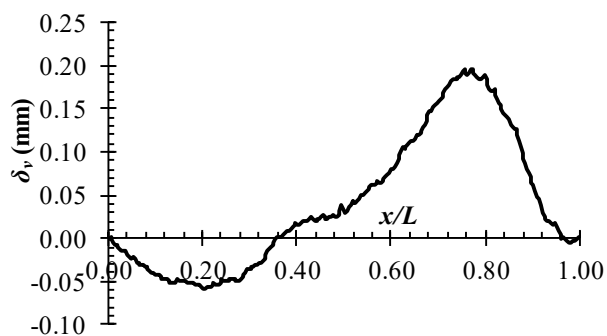


(d) Rotacija poprečnog preseka

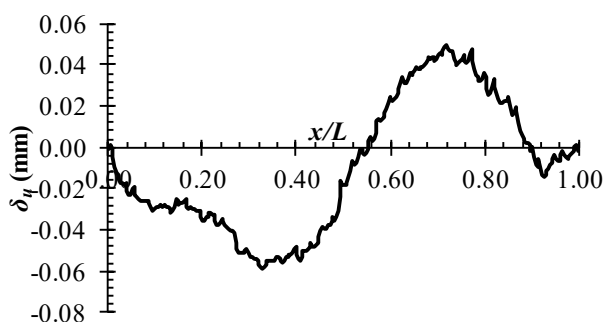
Slika A.36 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW 100 × 100 × 10 – 500 – 4



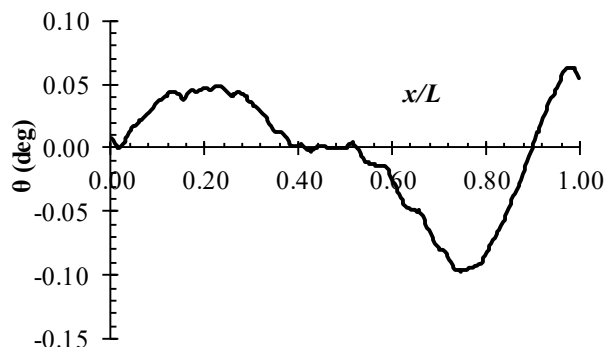
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

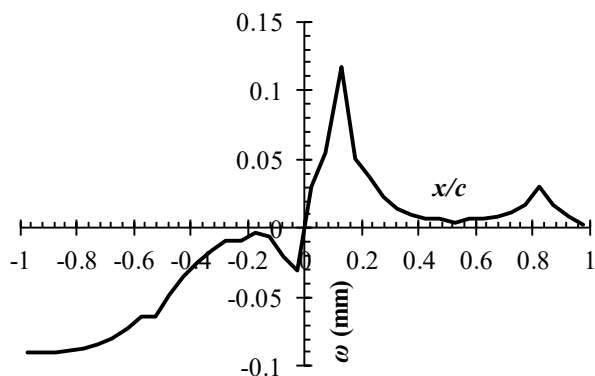


(c) Imperfekcija δ_u

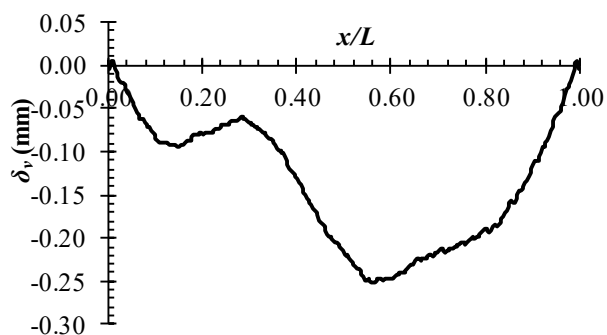


(d) Rotacija poprečnog preseka

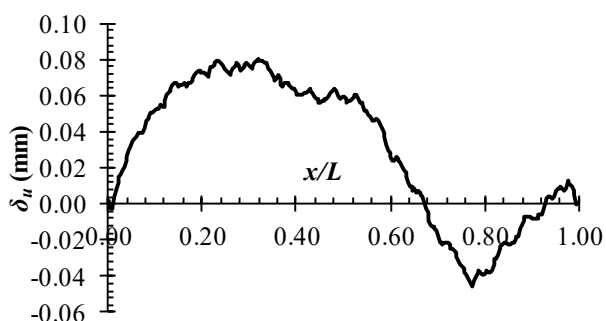
Slika A.37 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW 100 × 100 × 10 – 1500 – 1



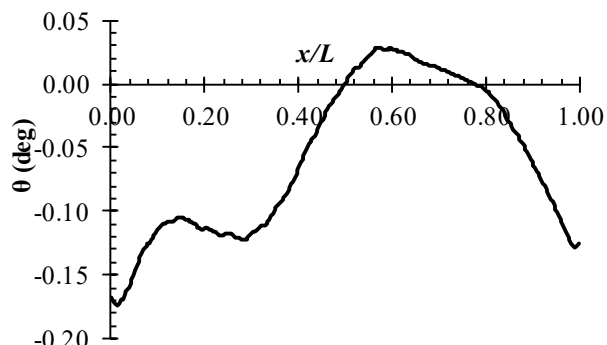
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

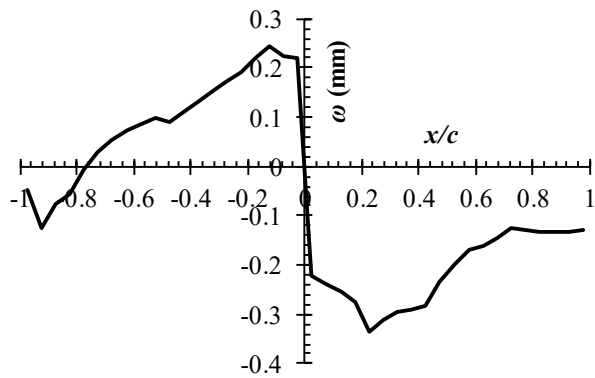


(c) Imperfekcija δ_u

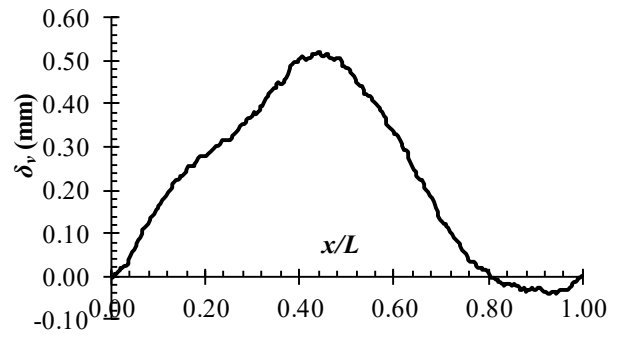


(d) Rotacija poprečnog preseka

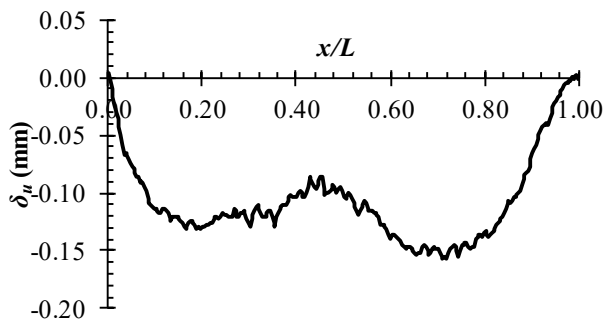
Slika A.38 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW 100 × 100 × 10 – 1500 – 2



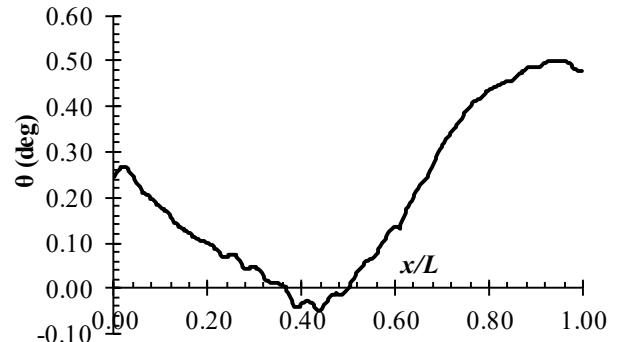
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

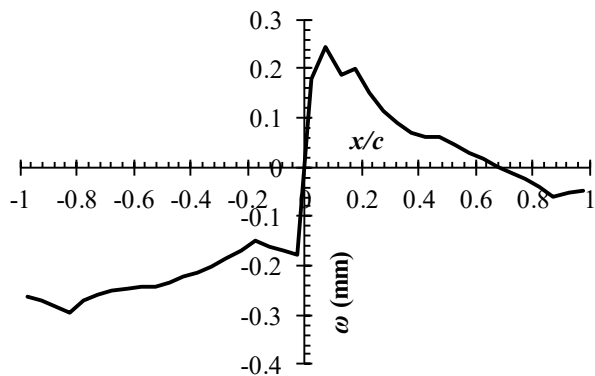


(c) Imperfekcija δ_u

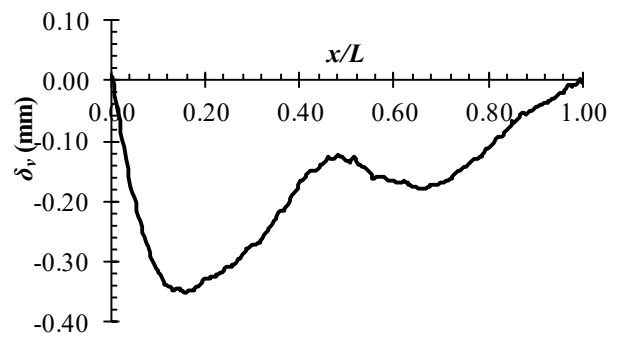


(d) Rotacija poprečnog preseka

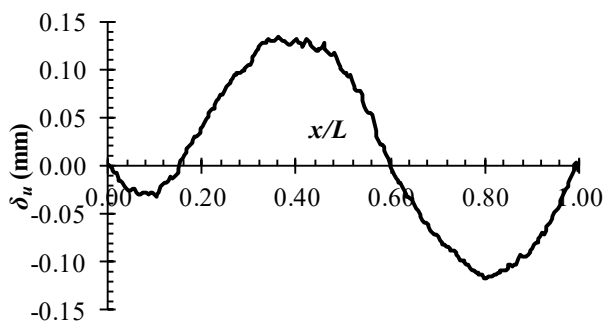
Slika A.39 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW 100 × 100 × 10 – 1500 – 3



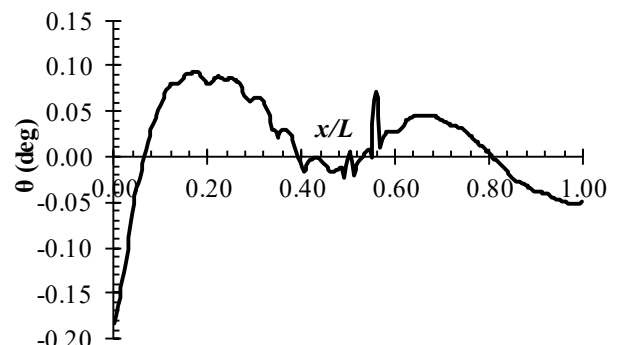
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

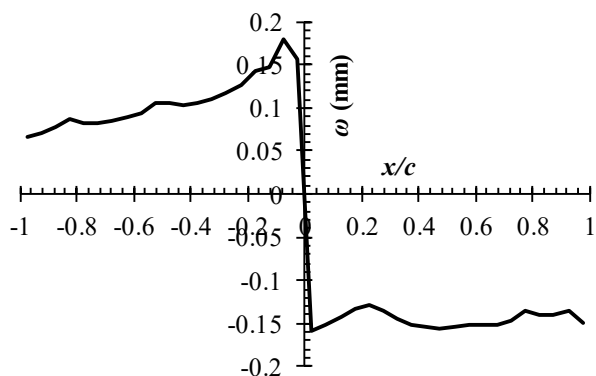


(c) Imperfekcija δ_u

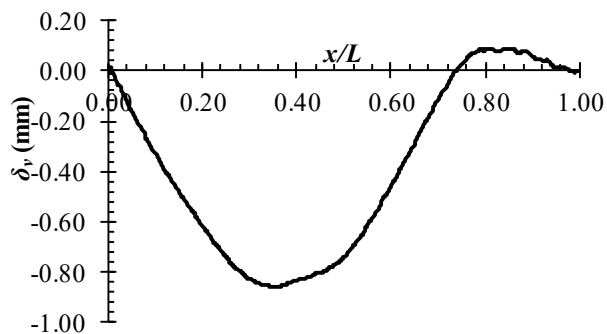


(d) Rotacija poprečnog preseka

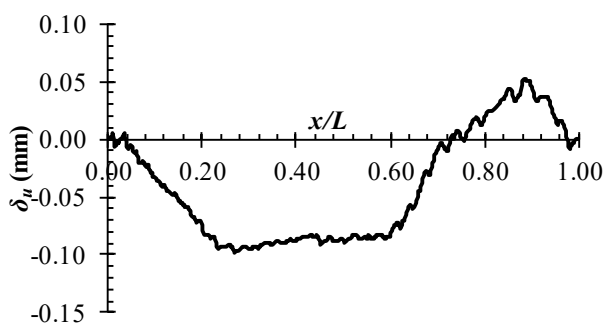
Slika A.40 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW 100 × 100 × 10 – 1500 – 4



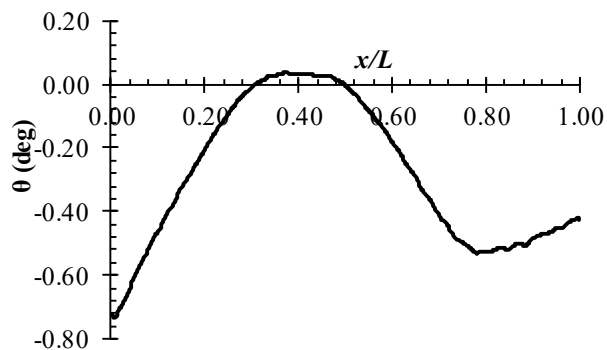
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

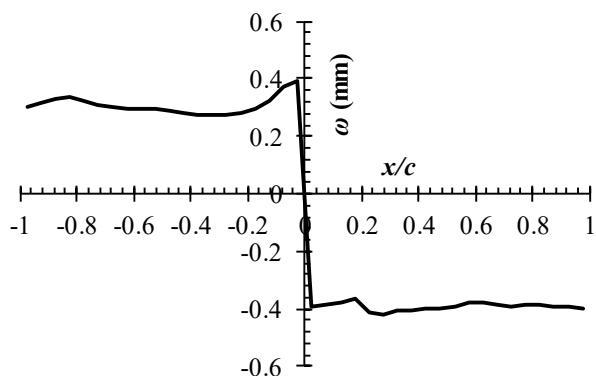


(c) Imperfekcija δ_u

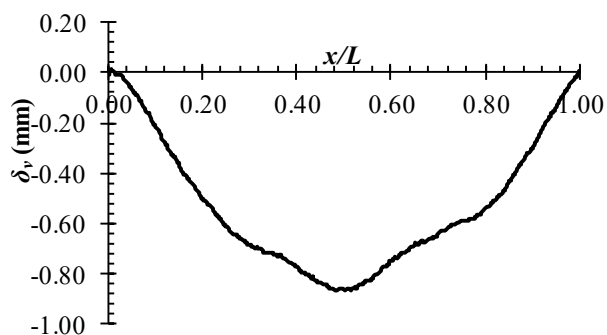


(d) Rotacija poprečnog preseka

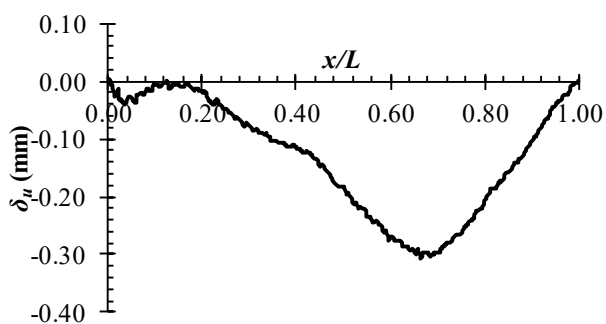
Slika A.41 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW 100 × 100 × 10 – 2500 – 1



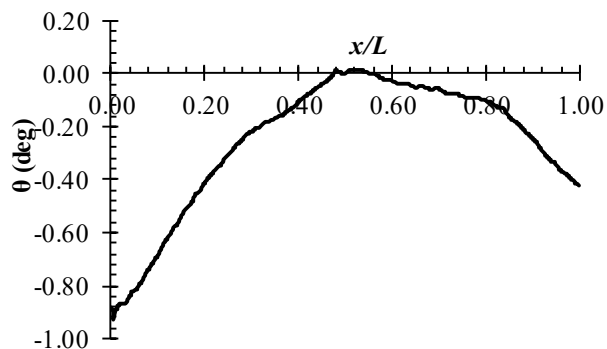
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v

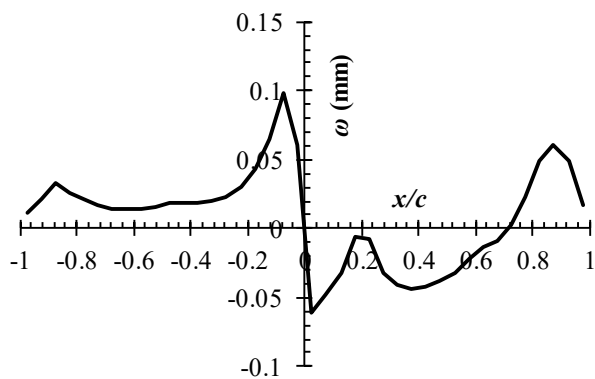


(c) Imperfekcija δ_u

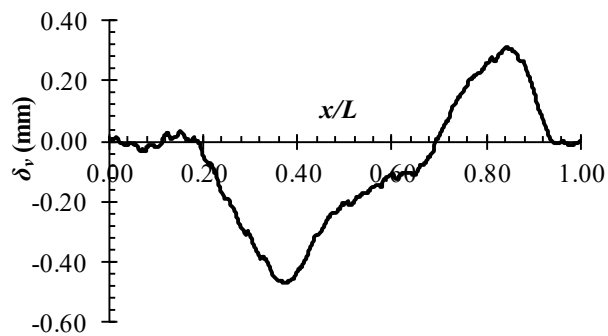


(d) Rotacija poprečnog preseka

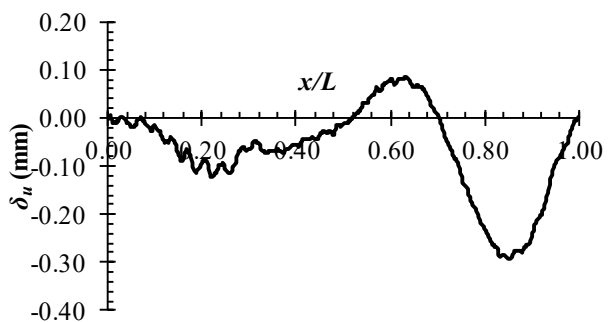
Slika A.42 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW 100 × 100 × 10 – 2500 – 2



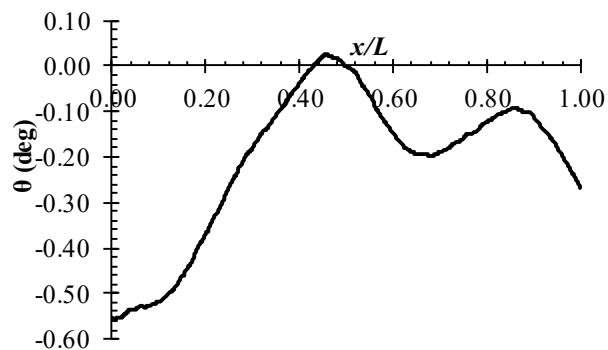
(a) Imperfekcija poprečnog preseka



(b) Imperfekcija δ_v



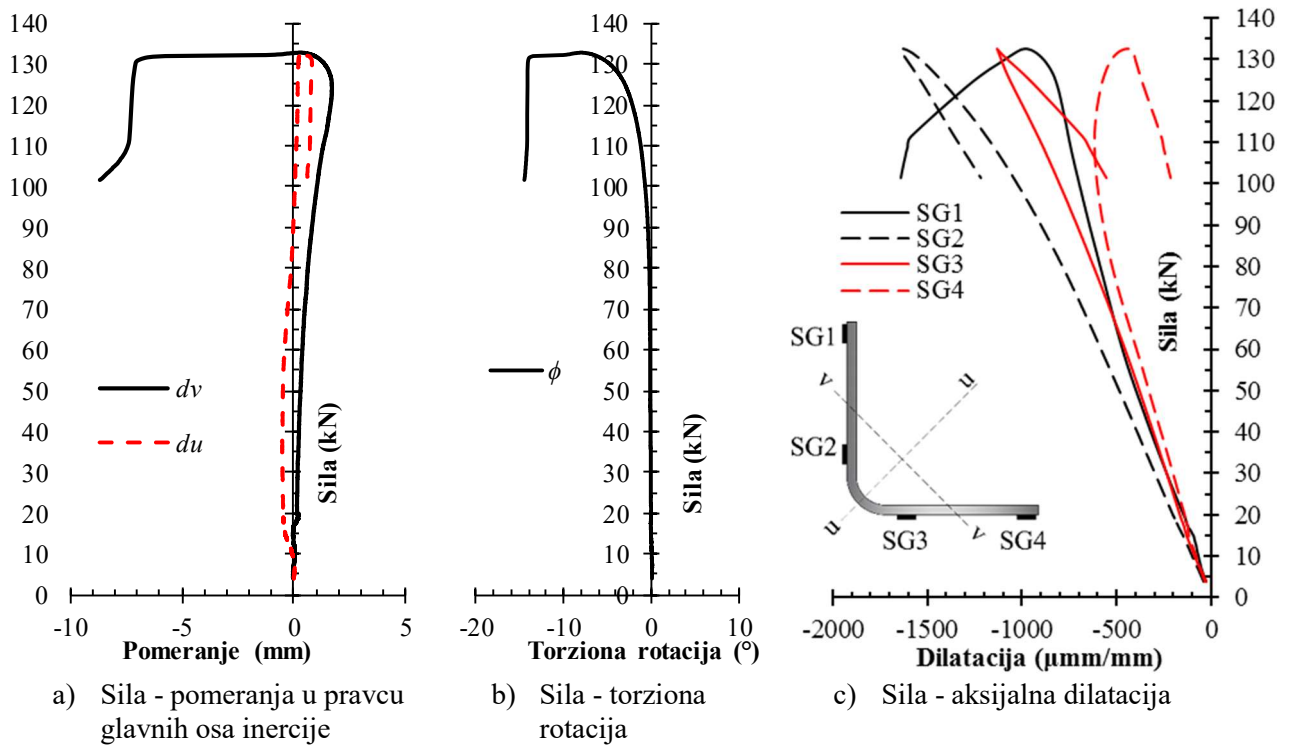
(c) Imperfekcija δ_u



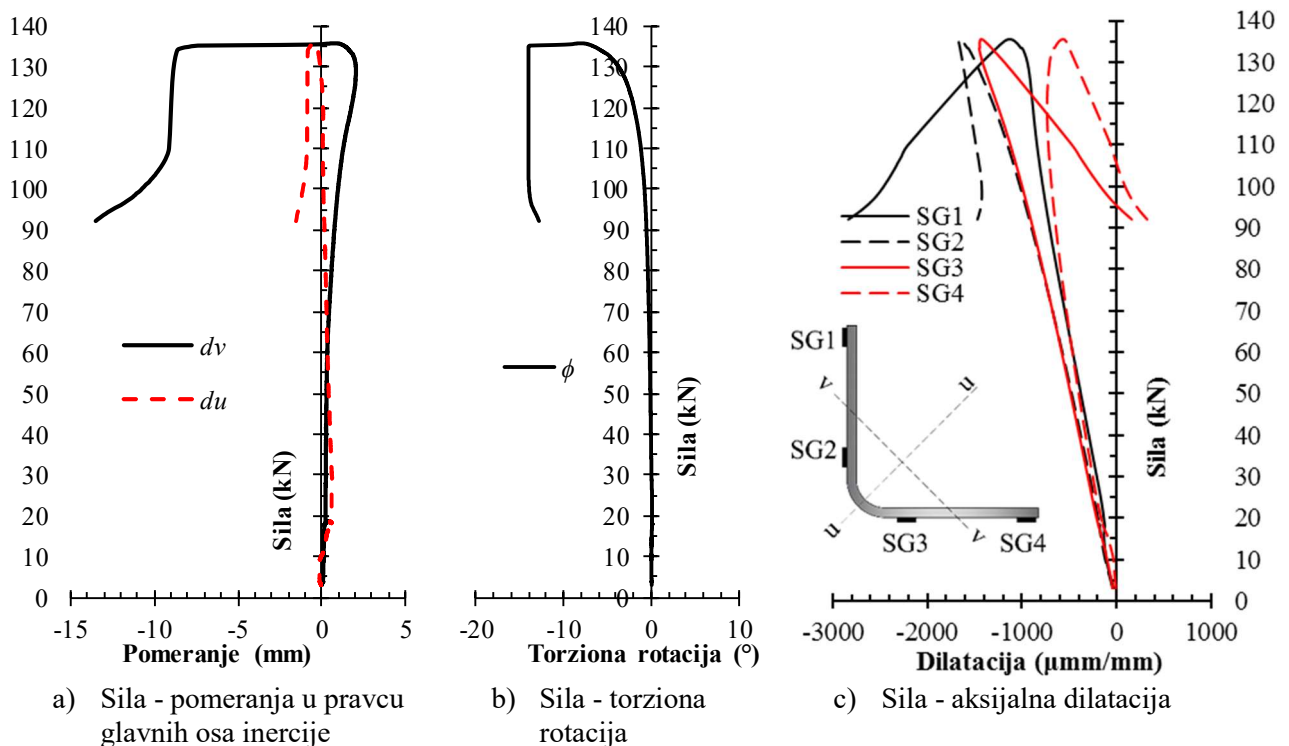
(d) Rotacija poprečnog preseka

Slika A.43 – Geometrijske imperfekcije uzorka ALW 100 × 100 × 10 – 2500 – 3

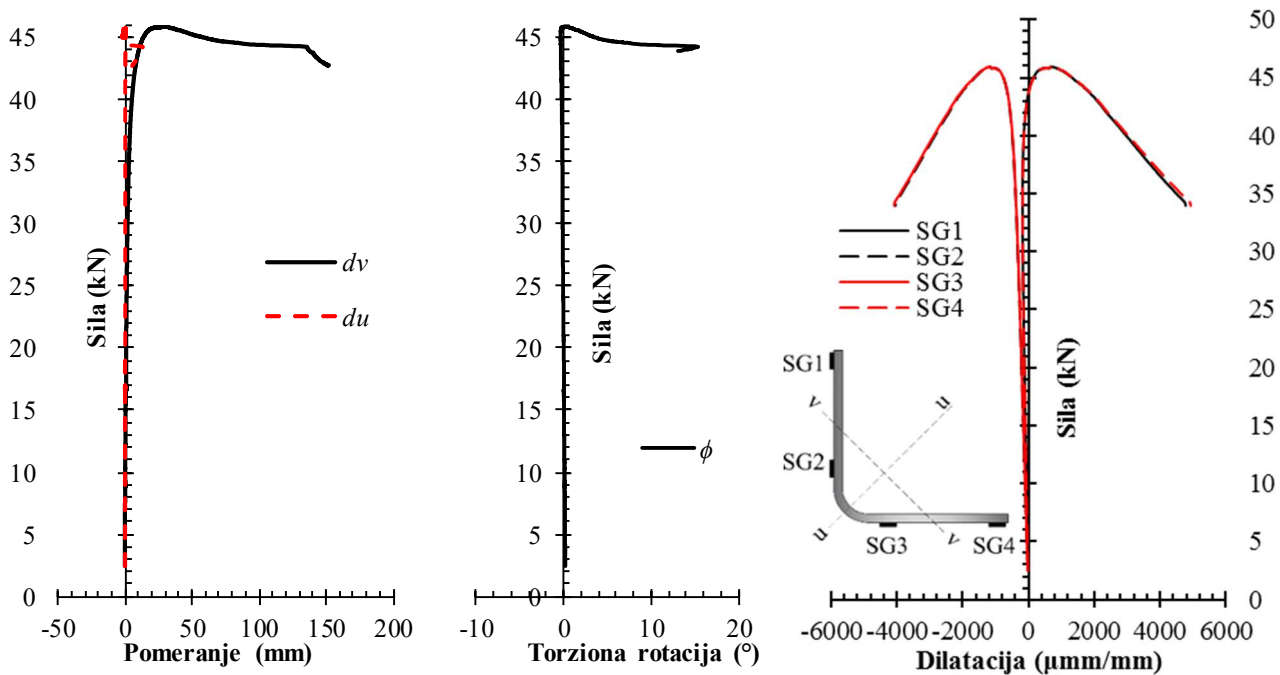
Prilog B – rezultati testa nosivosti elemenata na izvijanje



Slika B.1 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ACF 80 × 80 × 4 – 1000 – 1



Slika B.2 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ACF 80 × 80 × 4 – 1000 – 4

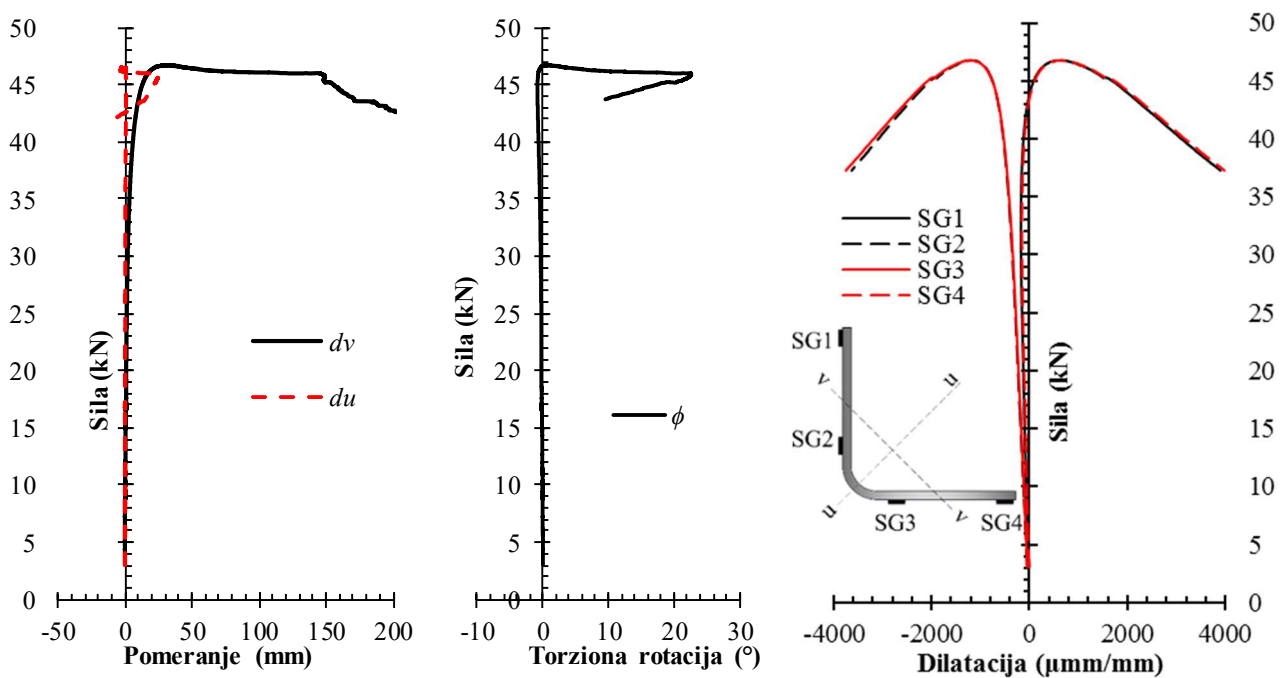


a) Sila - pomeranja u pravcu glavnih osa inercije

b) Sila - torziona rotacija

c) Sila - aksijalna dilatacija

Slika B.3 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ACF 80 × 80 × 4 – 2000 – 2

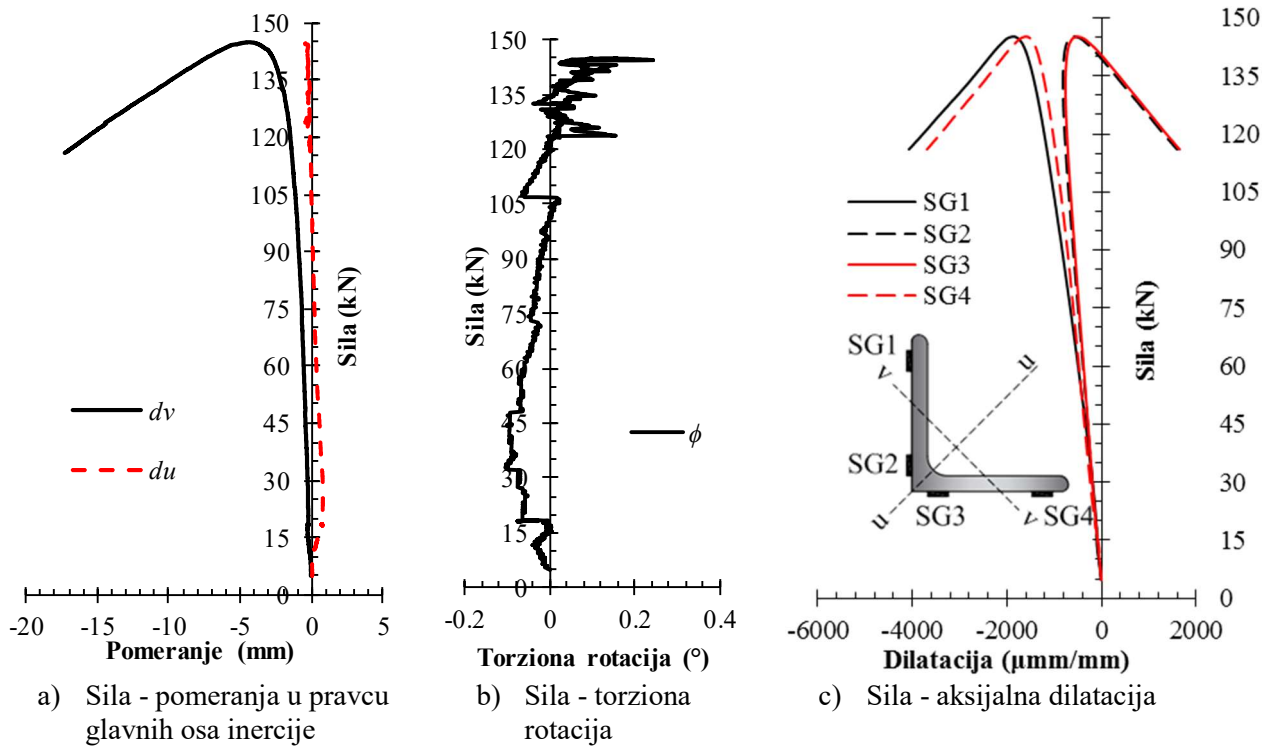


a) Sila - pomeranja u pravcu glavnih osa inercije

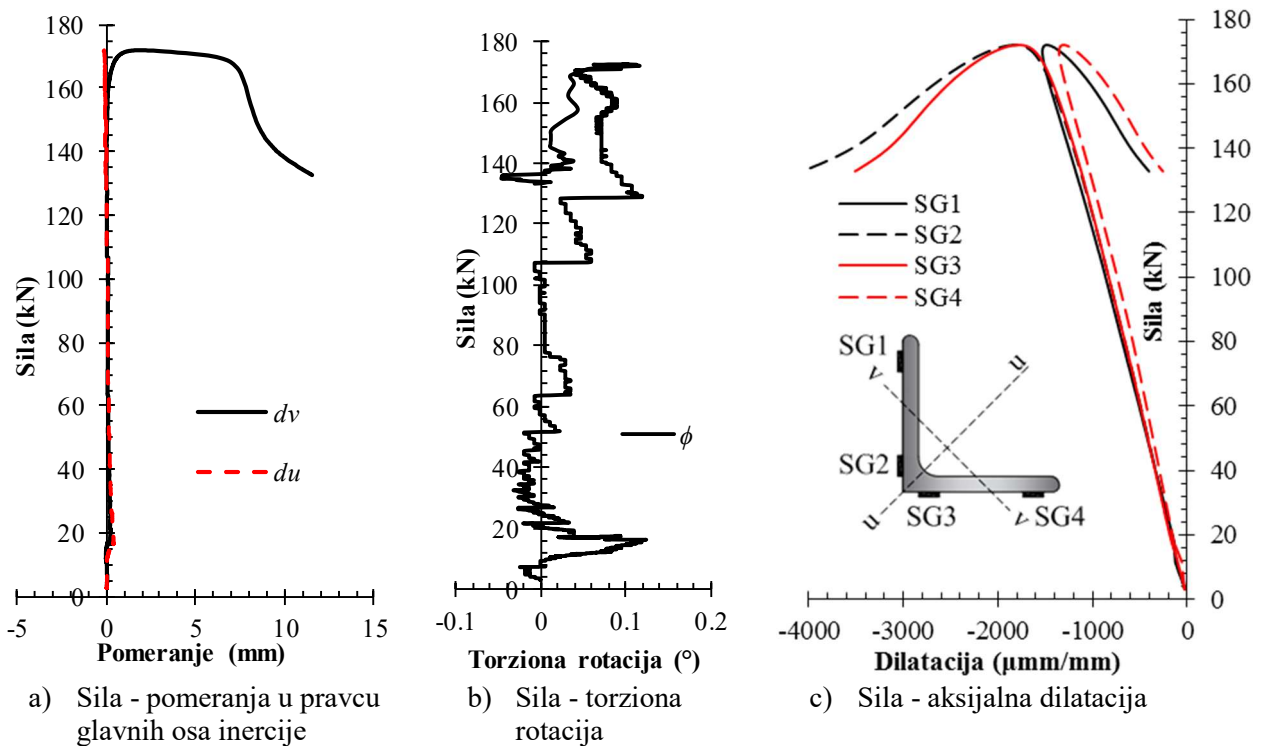
b) Sila - torziona rotacija

c) Sila - aksijalna dilatacija

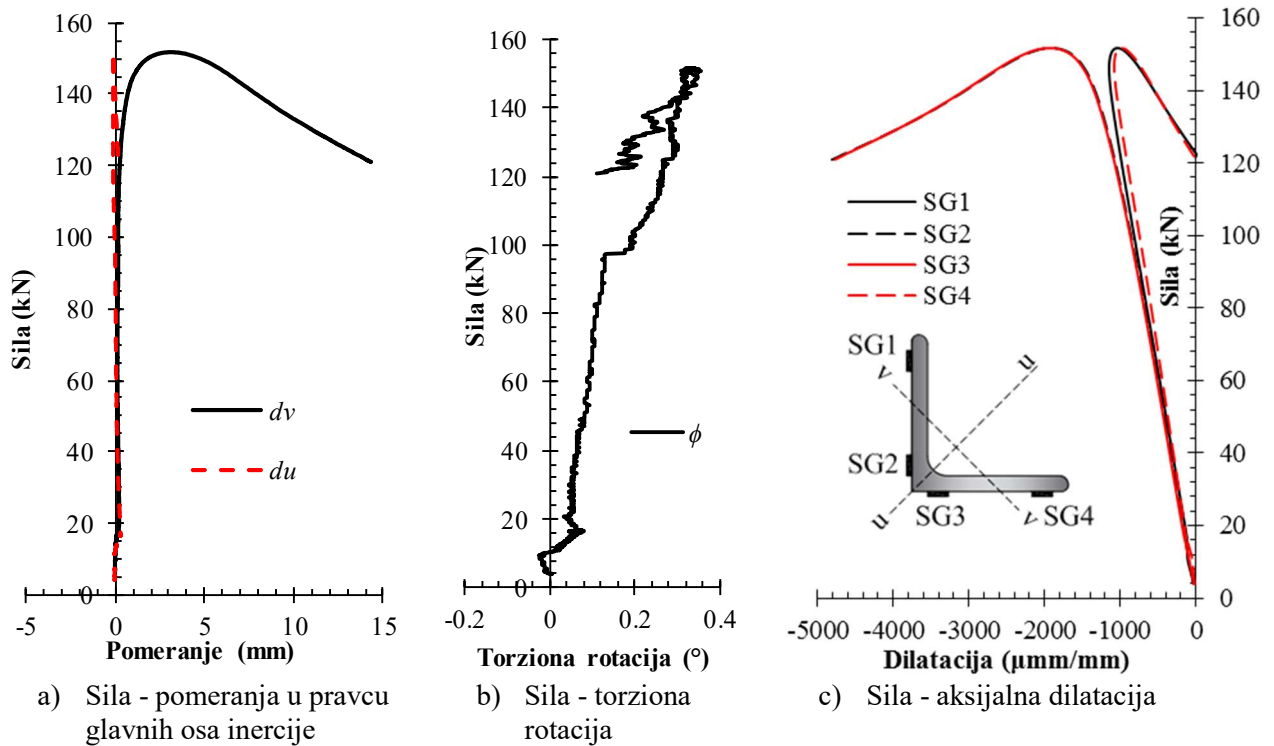
Slika B.4 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ACF 80 × 80 × 4 – 2000 – 3



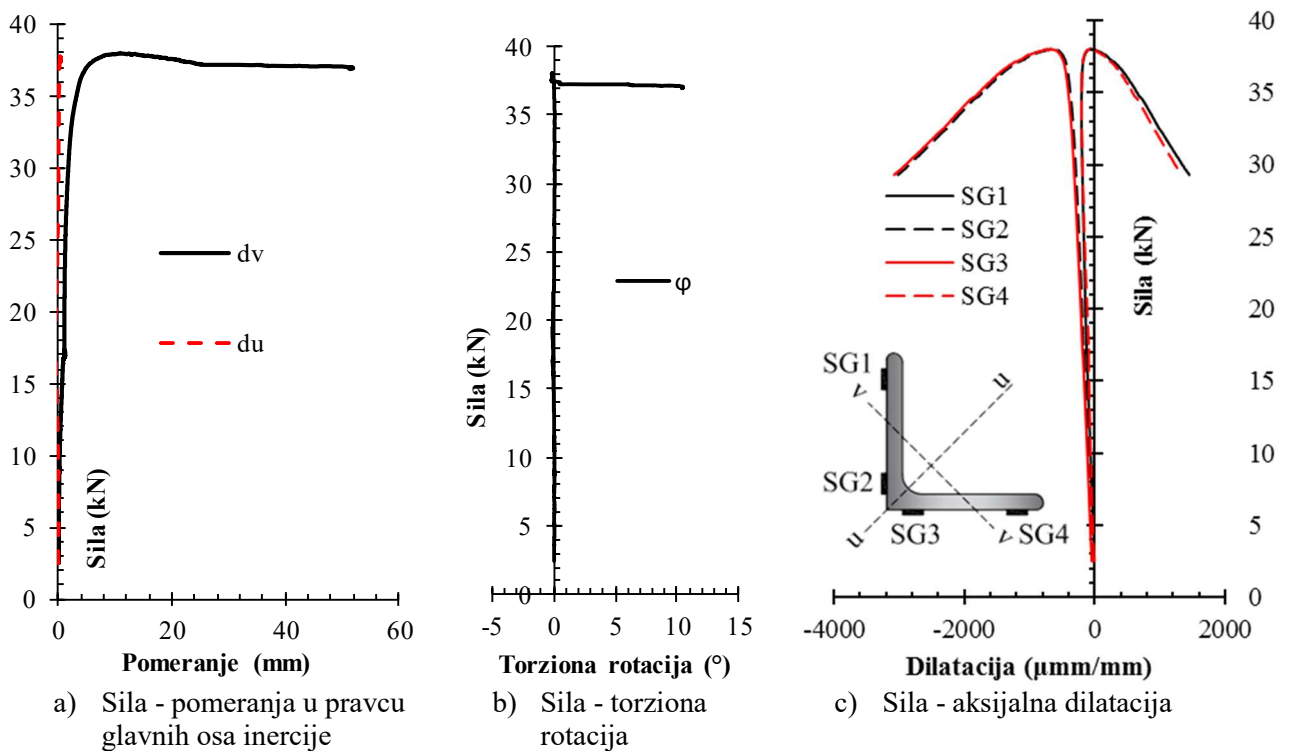
Slika B.5 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR 60 × 60 × 6 – 800 – 2



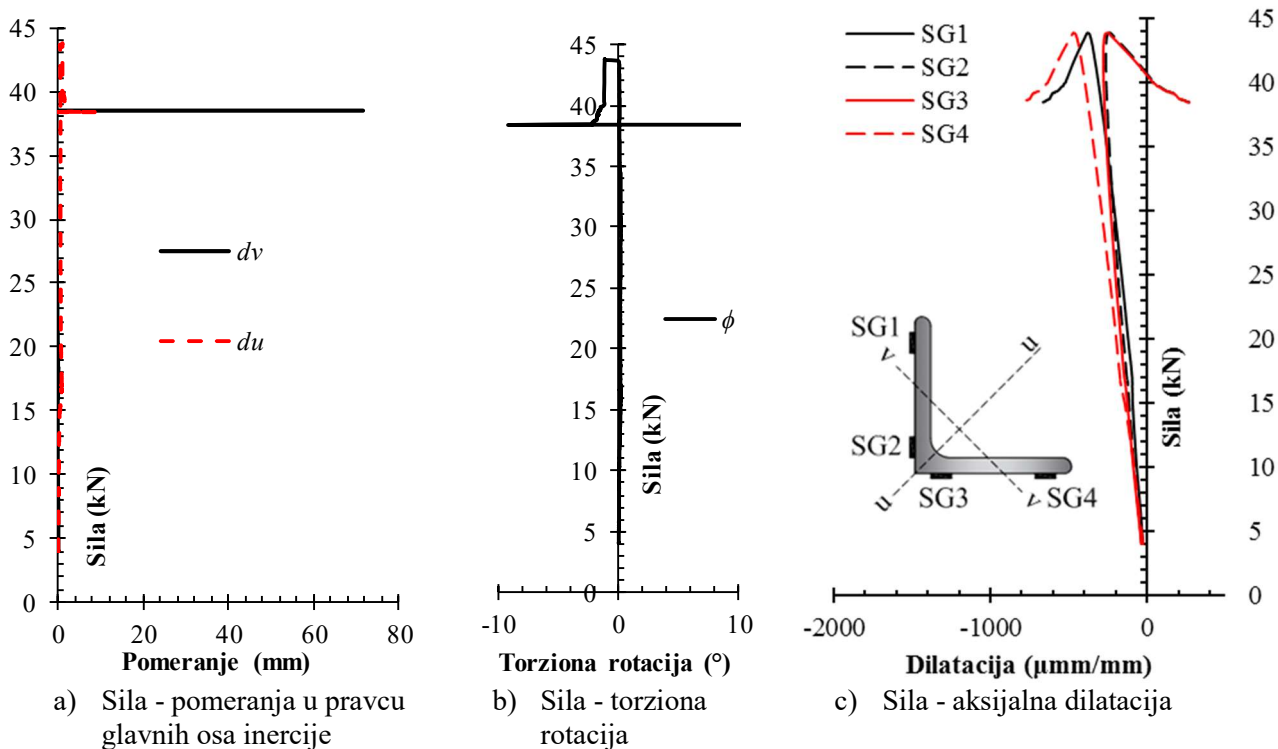
Slika B.6 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR 60 × 60 × 6 – 800 – 3



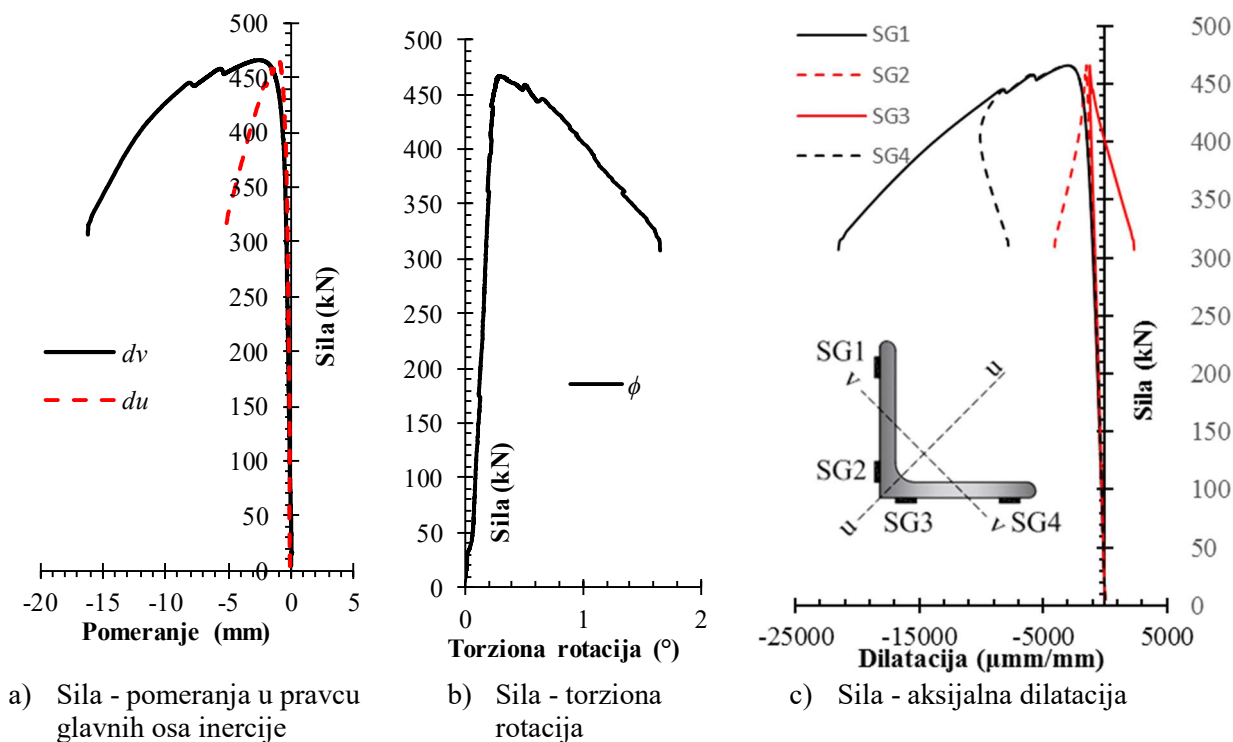
Slika B.7 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR 60 × 60 × 6 – 800 – 4



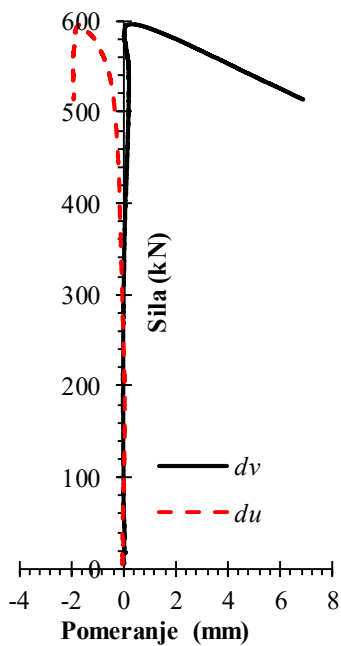
Slika B.8 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR 60 × 60 × 6 – 2000 – 1



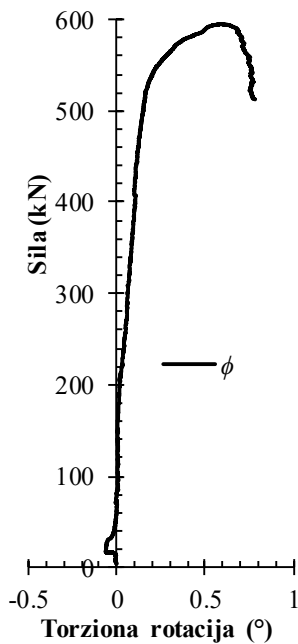
Slika B.9 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR 60 × 60 × 6 – 2000 – 4



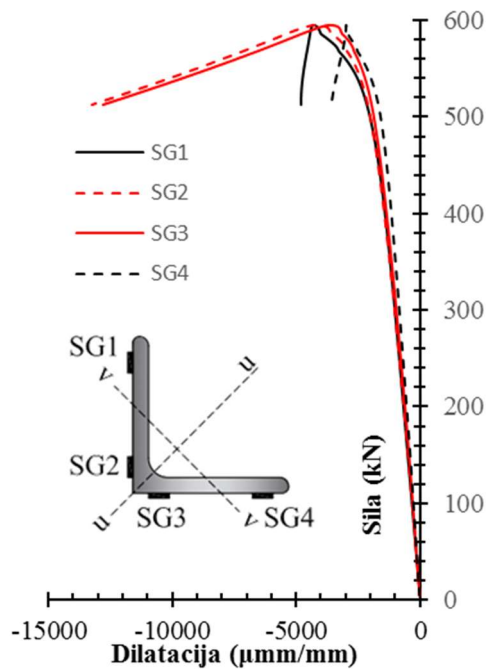
Slika B.10 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR 100 × 100 × 10 – 500 – 1



a) Sila - pomeranja u pravcu glavnih osa inercije

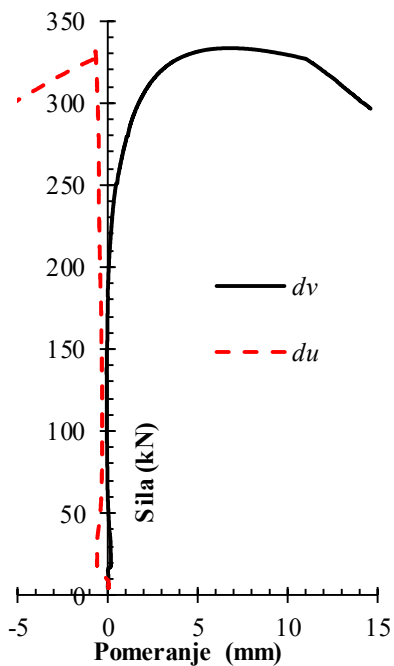


b) Sila - torziona rotacija

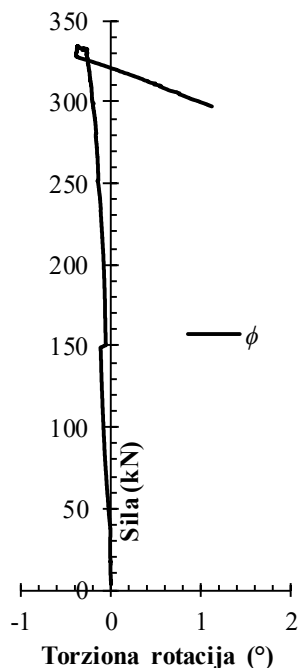


c) Sila - aksijalna dilatacija

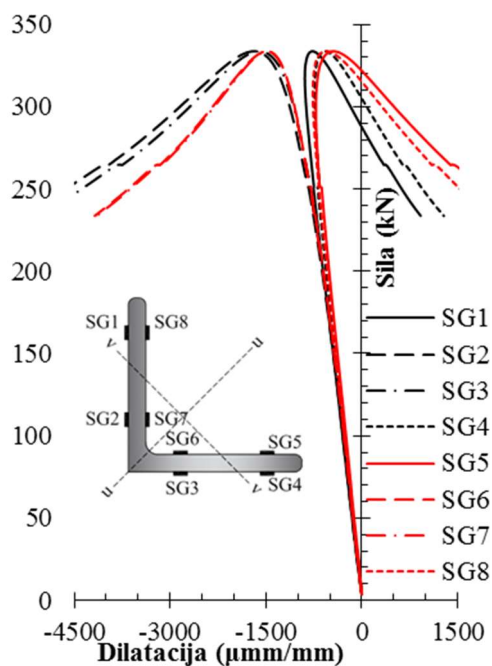
Slika B.11 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR $100 \times 100 \times 10 - 500 - 4$



a) Sila - pomeranja u pravcu glavnih osa inercije

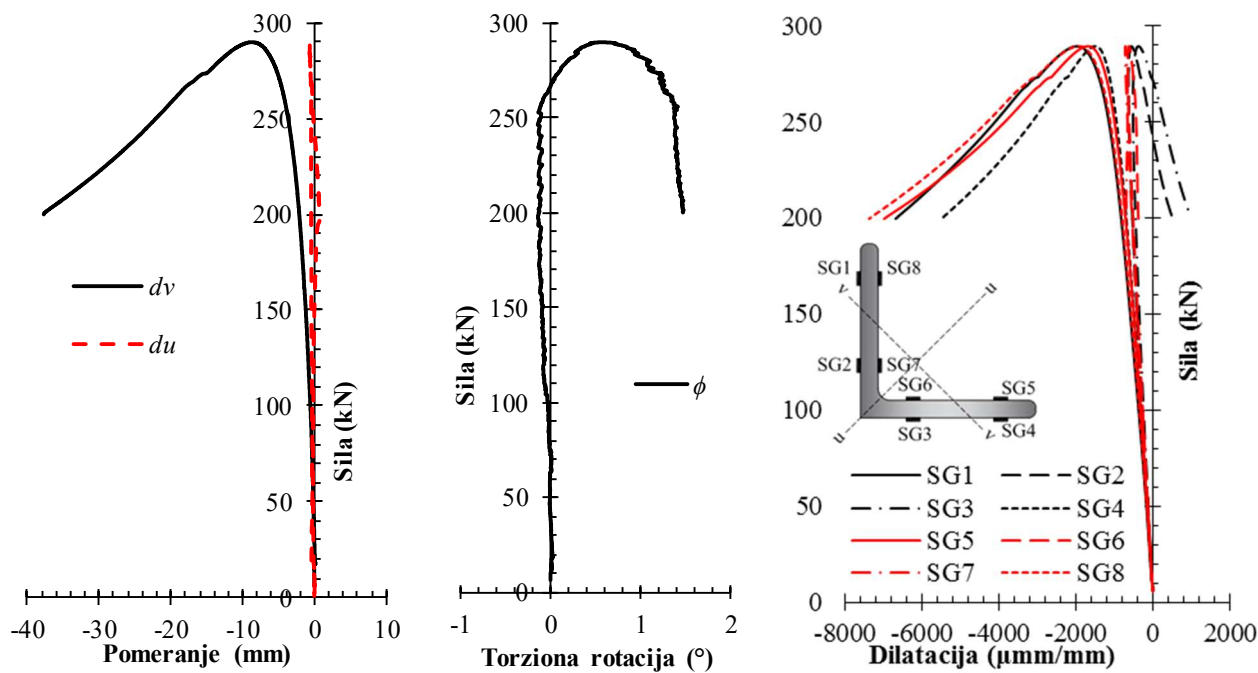


b) Sila - torziona rotacija



c) Sila - aksijalna dilatacija

Slika B.12 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR $100 \times 100 \times 10 - 1500 - 1$

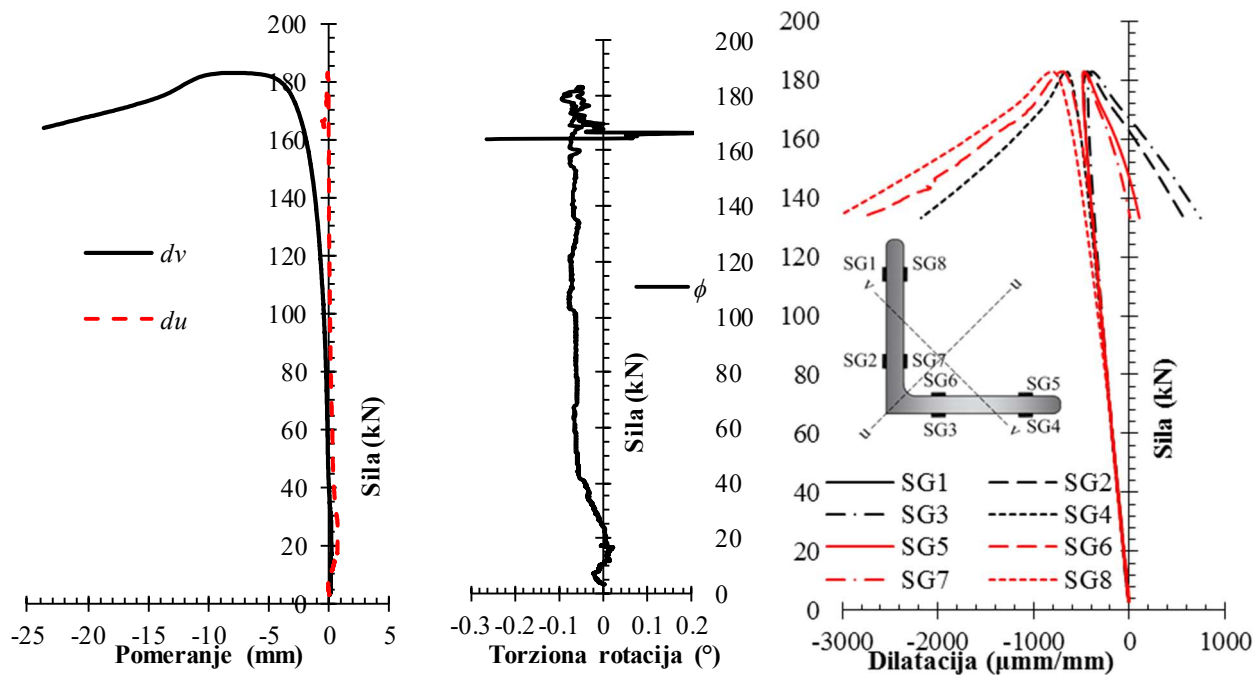


a) Sila - pomeranja u pravcu glavnih osa inercije

b) Sila - torziona rotacija

c) Sila - aksijalna dilatacija

Slika B.13 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR 100 × 100 × 10 – 1500 – 4

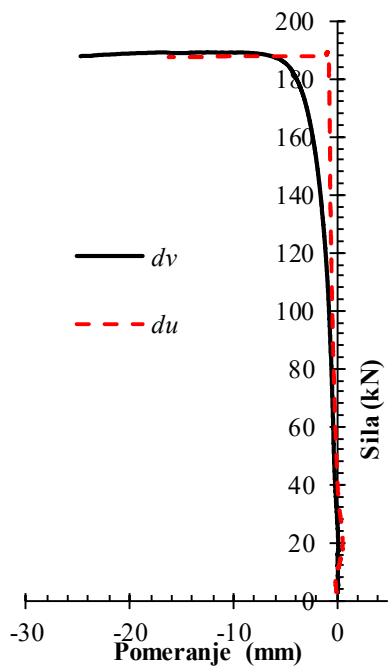


a) Sila - pomeranja u pravcu glavnih osa inercije

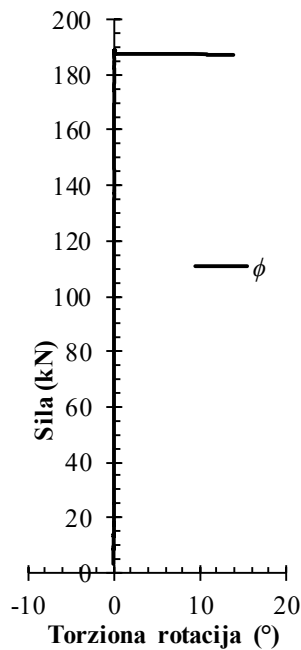
b) Sila - torziona rotacija

c) Sila - aksijalna dilatacija

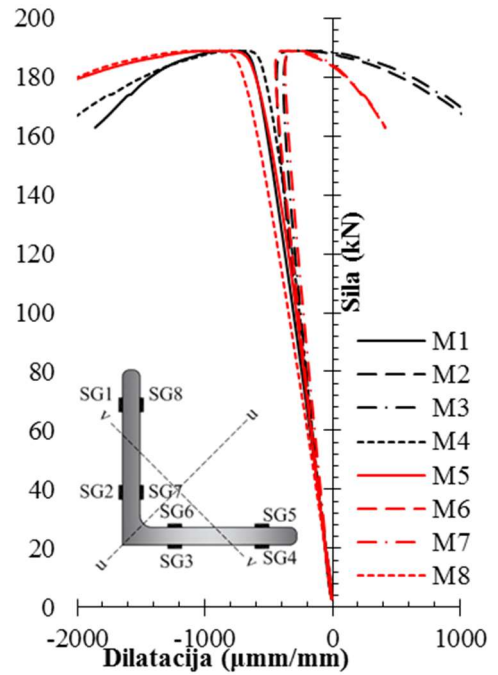
Slika B.14 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR 100 × 100 × 10 – 2500 – 1



a) Sila - pomeranja u pravcu glavnih osa inercije

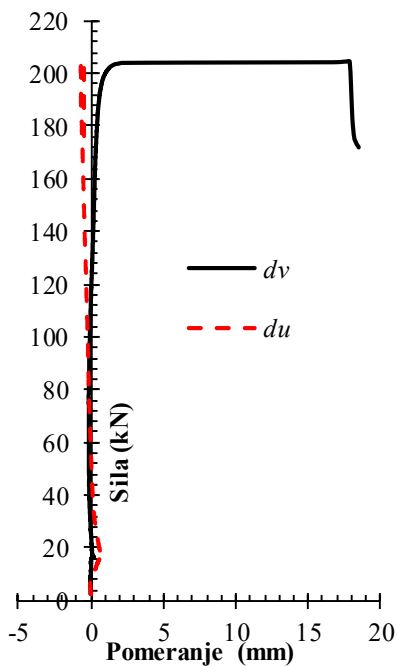


b) Sila - torziona rotacija

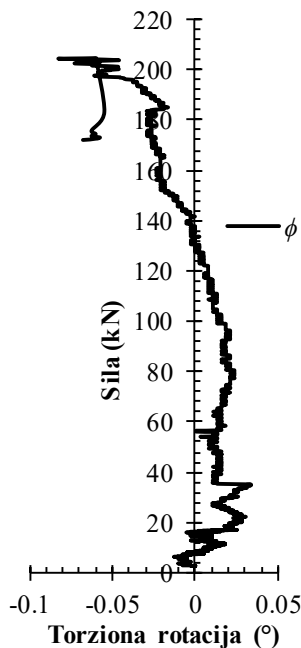


c) Sila - aksijalna dilatacija

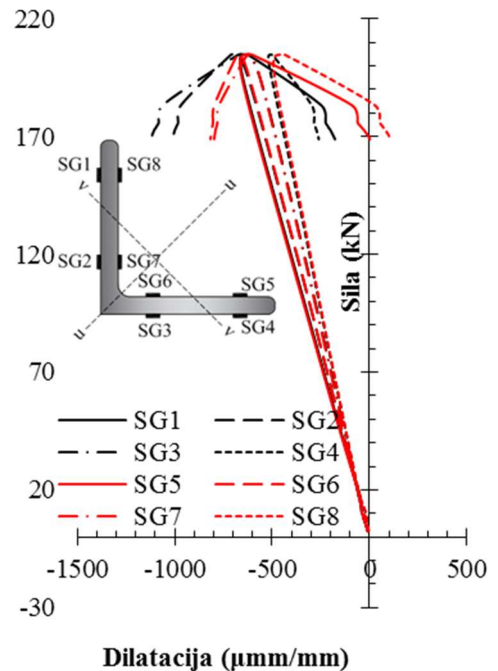
Slika B.15 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR $100 \times 100 \times 10 - 2500 - 2$



a) Sila - pomeranja u pravcu glavnih osa inercije

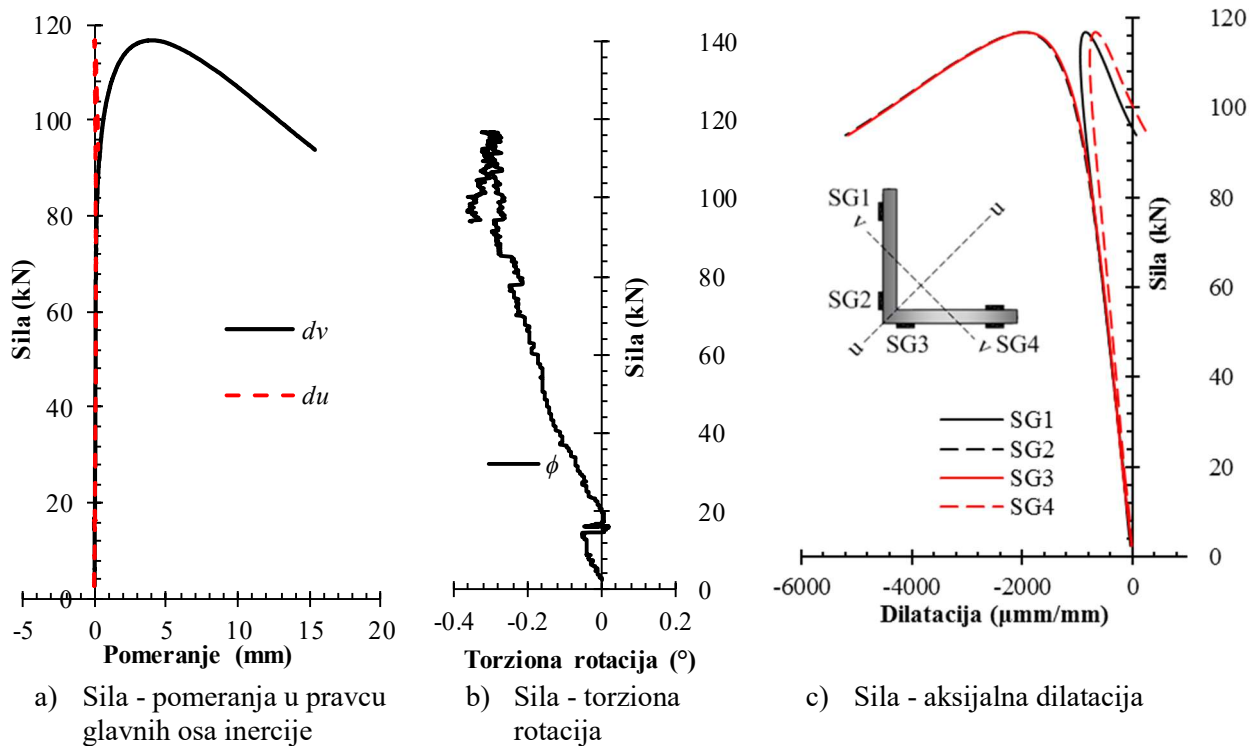


b) Sila - torziona rotacija

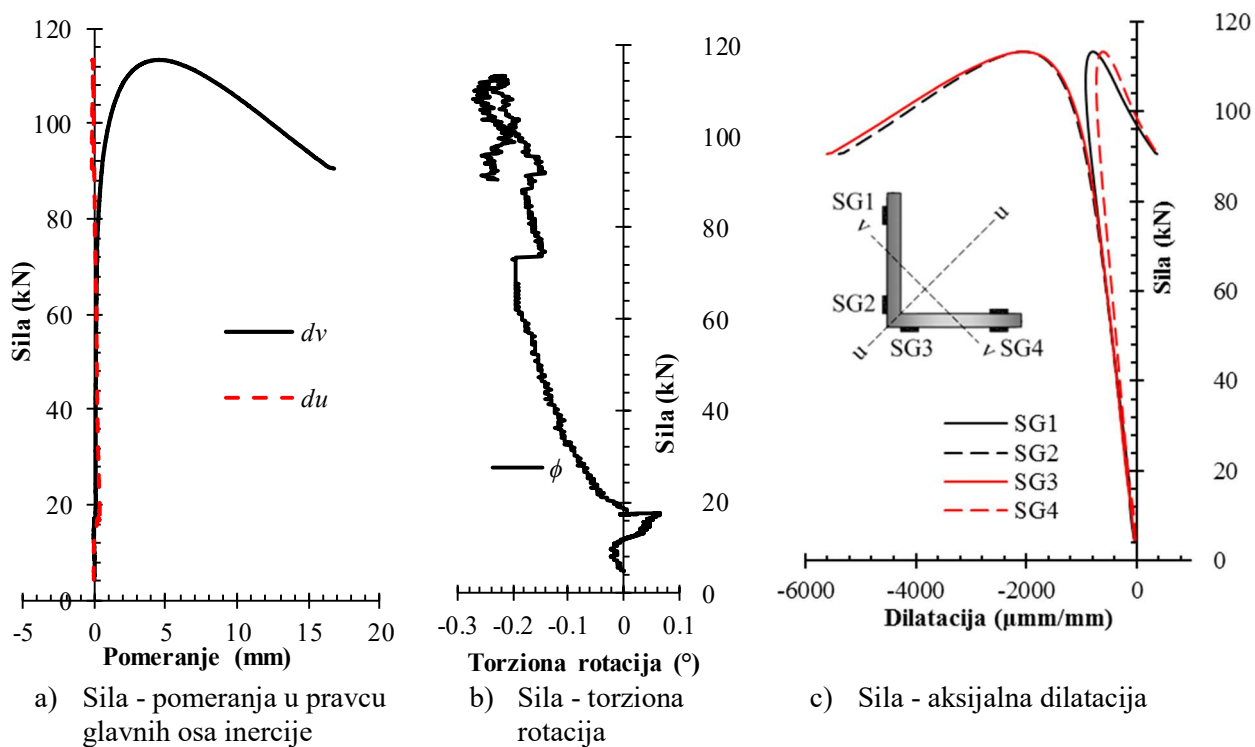


c) Sila - aksijalna dilatacija

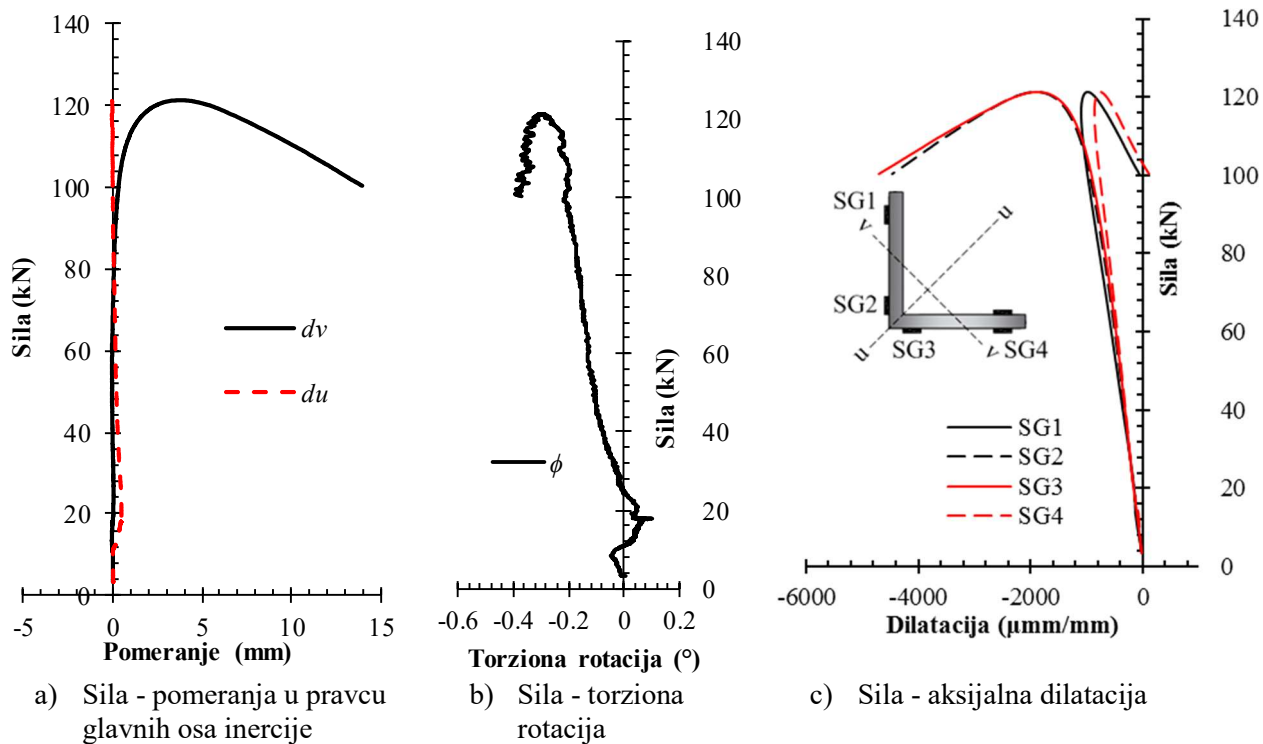
Slika B.16 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak AHR $100 \times 100 \times 10 - 2500 - 4$



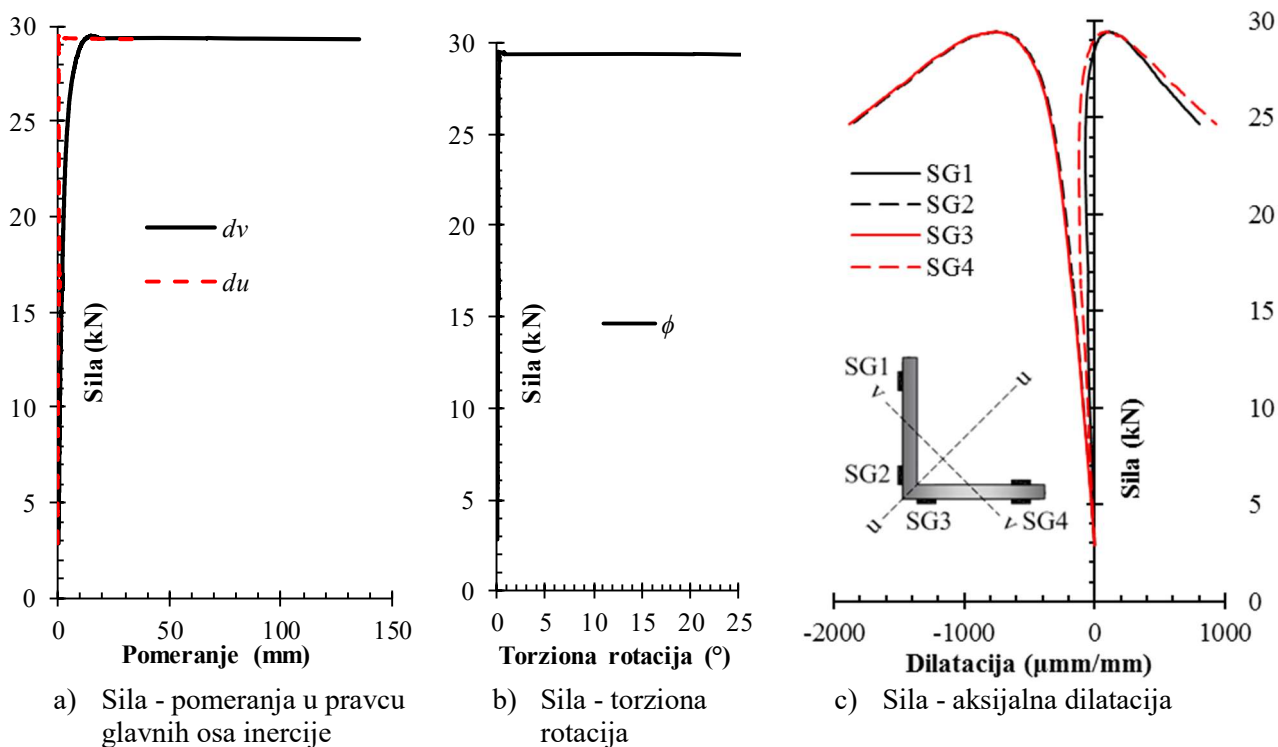
Slika B.17 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 60 × 60 × 6 – 800 – 1



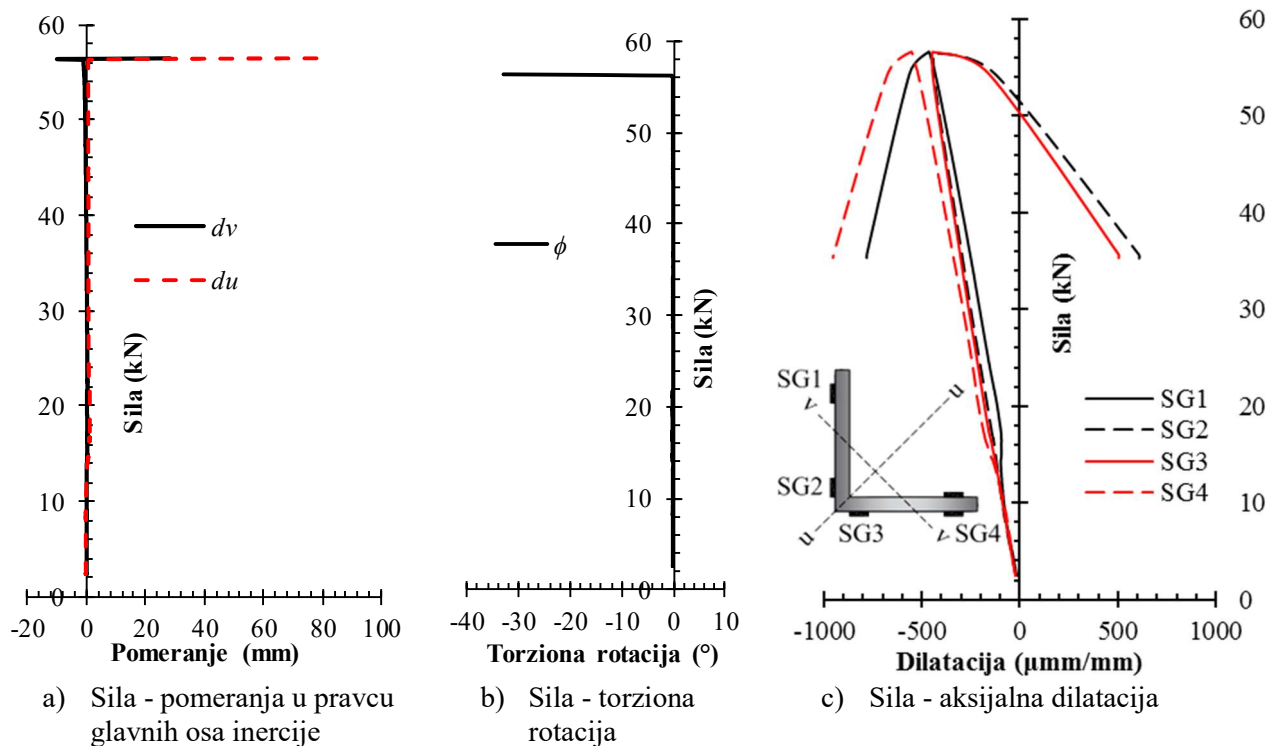
Slika B.18 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 60 × 60 × 6 – 800 – 2



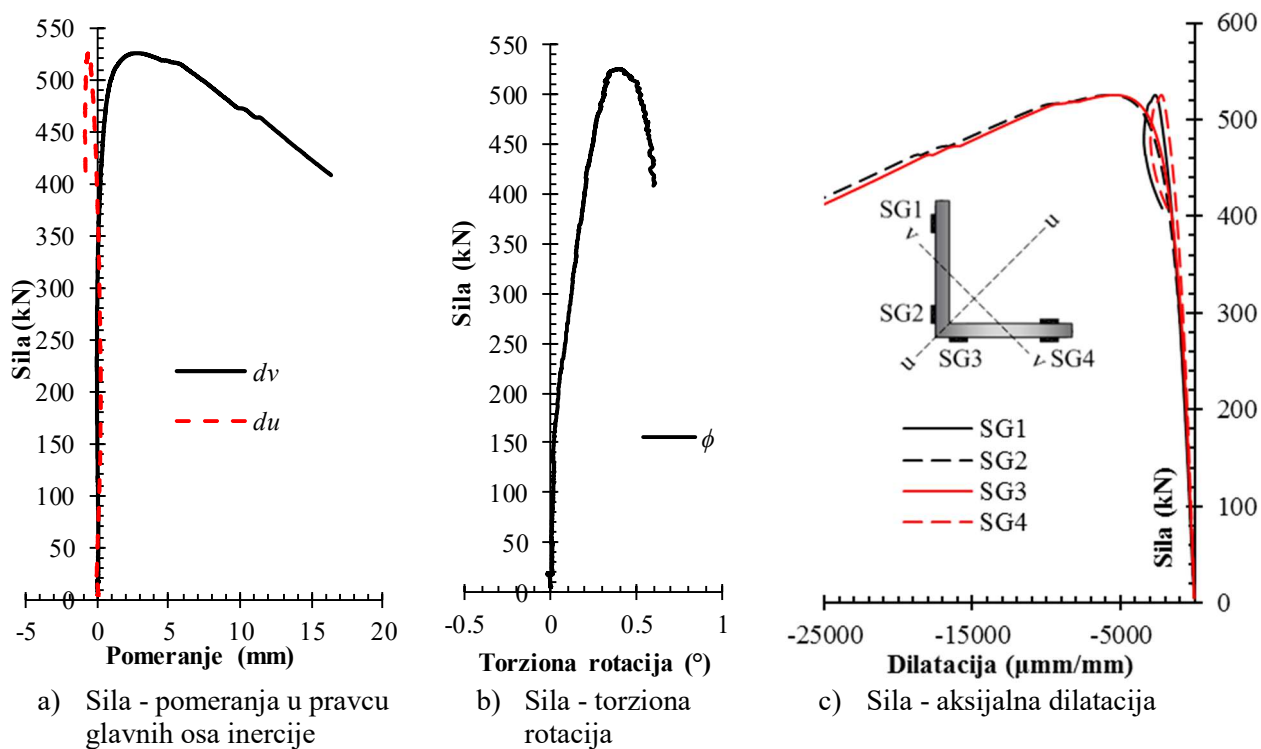
Slika B.19 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 60 × 60 × 6 – 800 – 4



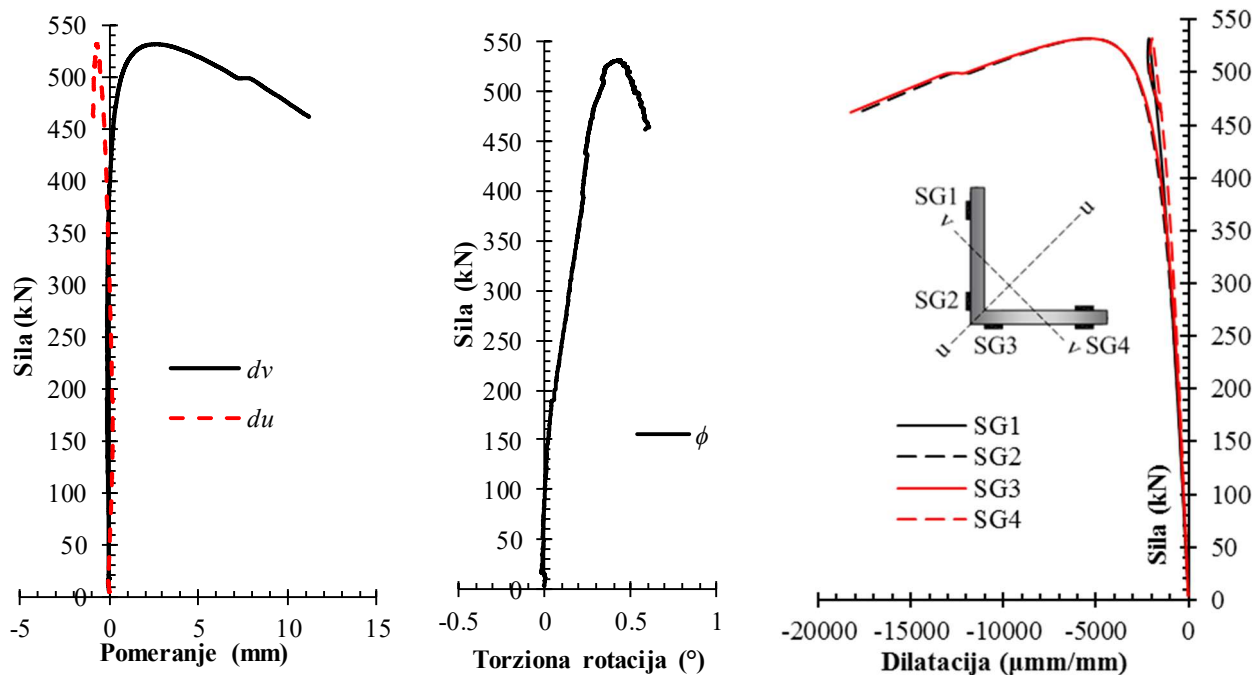
Slika B.20 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 60 × 60 × 6 – 2000 – 1



Slika B.21 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 60 × 60 × 6 – 2000 – 4



Slika B.22 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 100 × 100 × 10 – 500 – 1

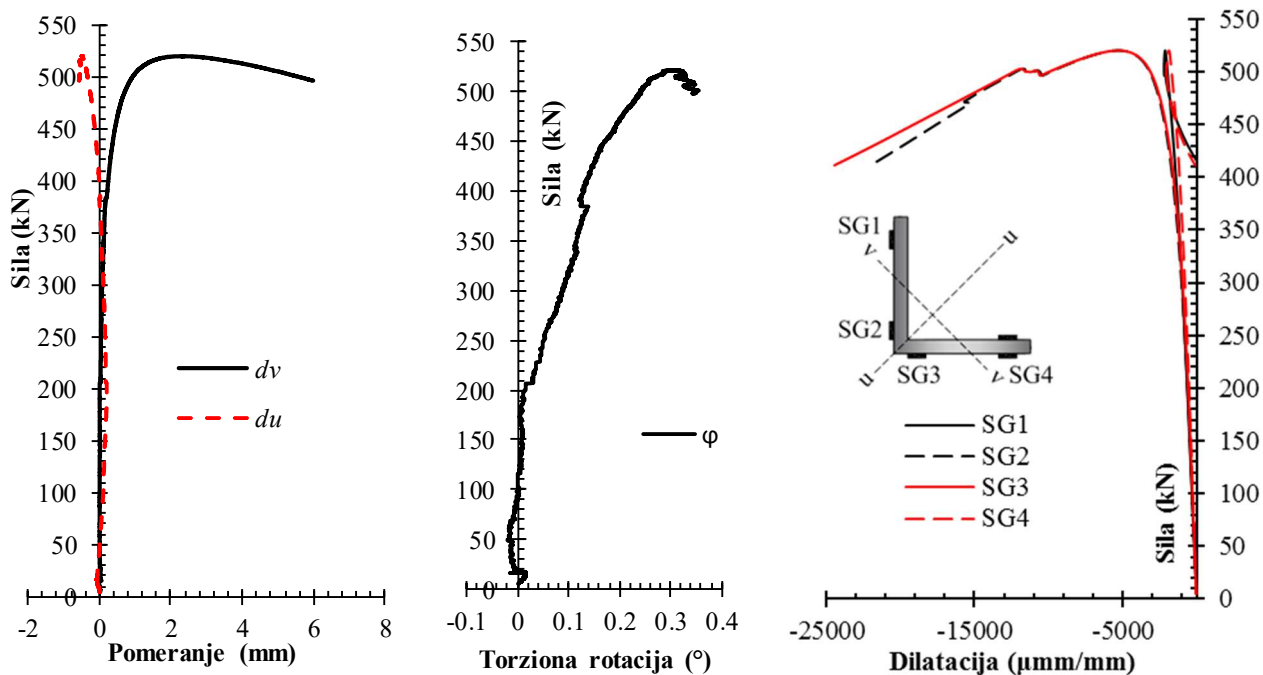


a) Sila - pomeranja u pravcu glavnih osa inercije

b) Sila - torziona rotacija

c) Sila - aksijalna dilatacija

Slika B.23 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 100 × 100 × 10 – 500 – 2

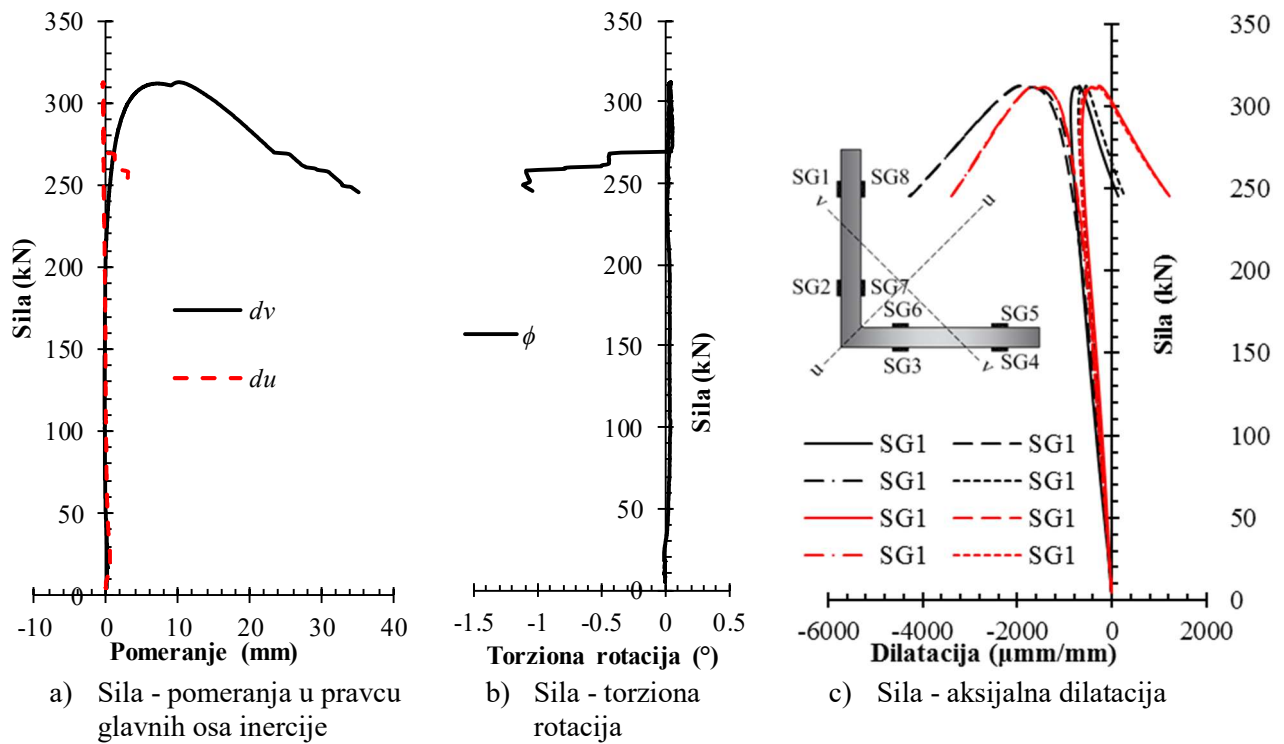


a) Sila - pomeranja u pravcu glavnih osa inercije

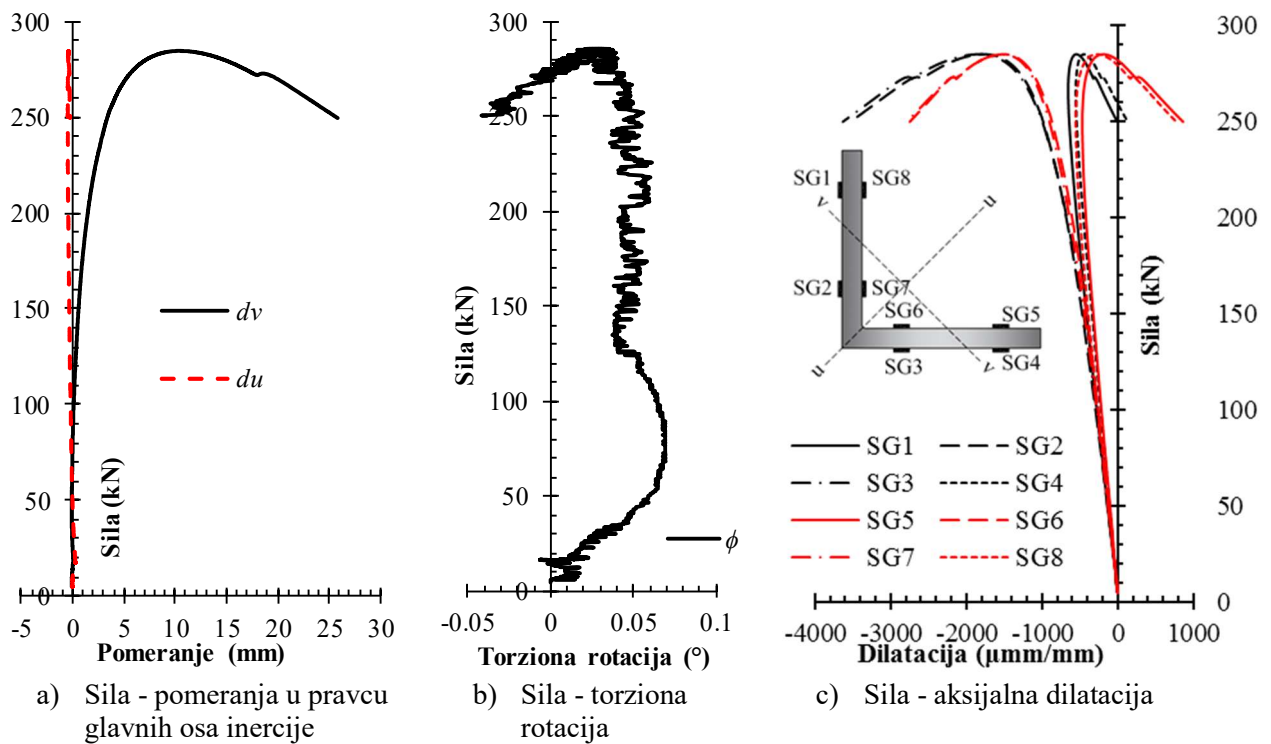
b) Sila - torziona rotacija

c) Sila - aksijalna dilatacija

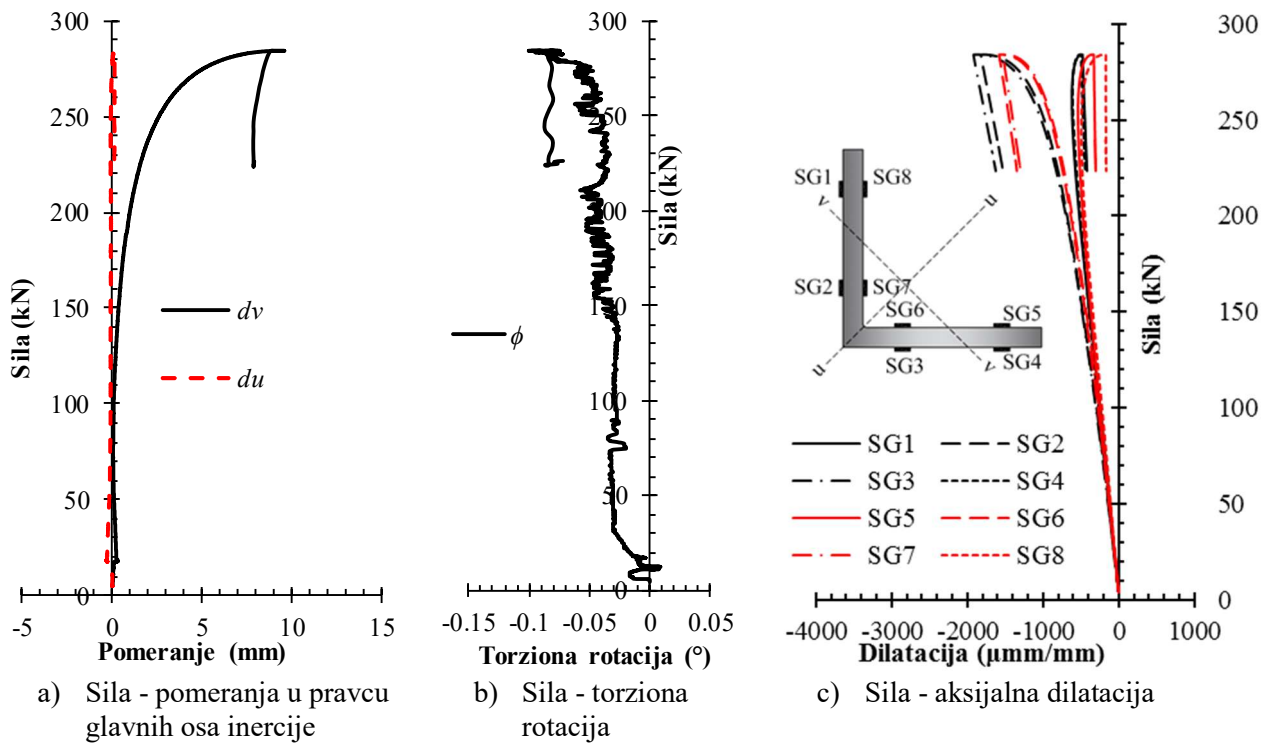
Slika B.24 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 100 × 100 × 10 – 500 – 3



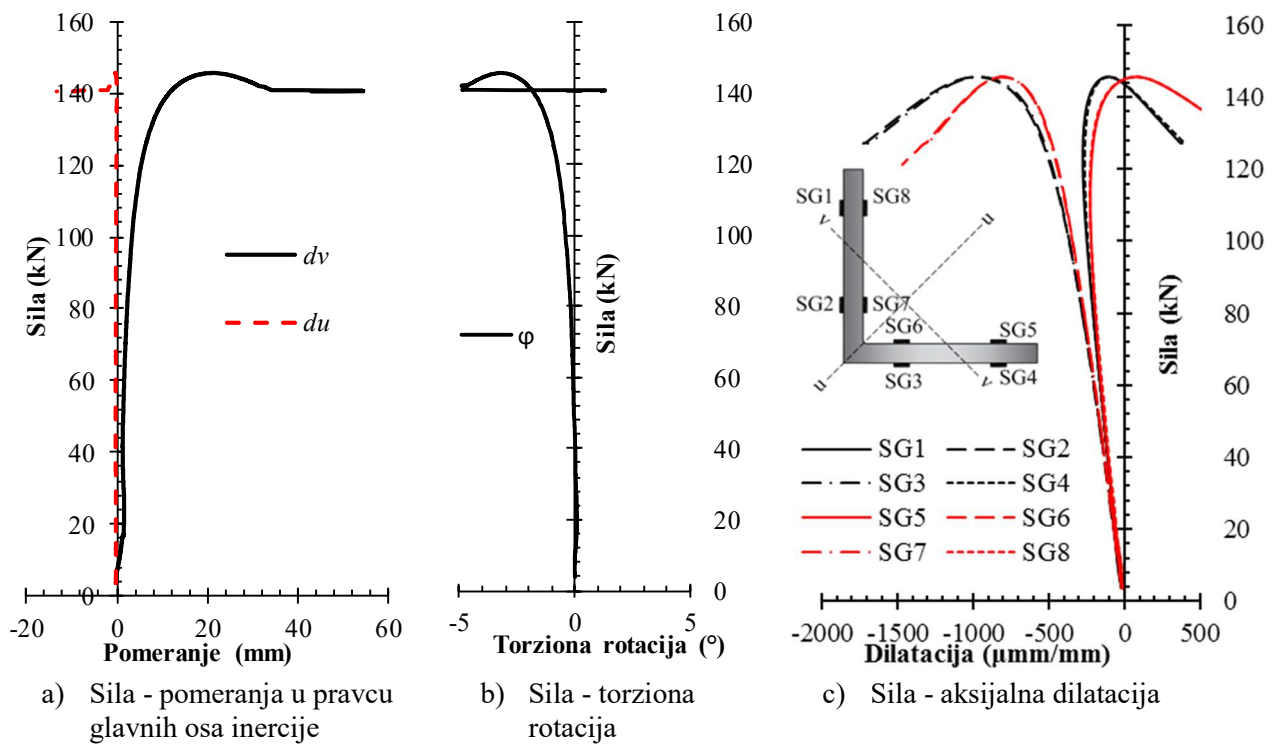
Slika B.25 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 100 × 100 × 10 – 1500 – 1



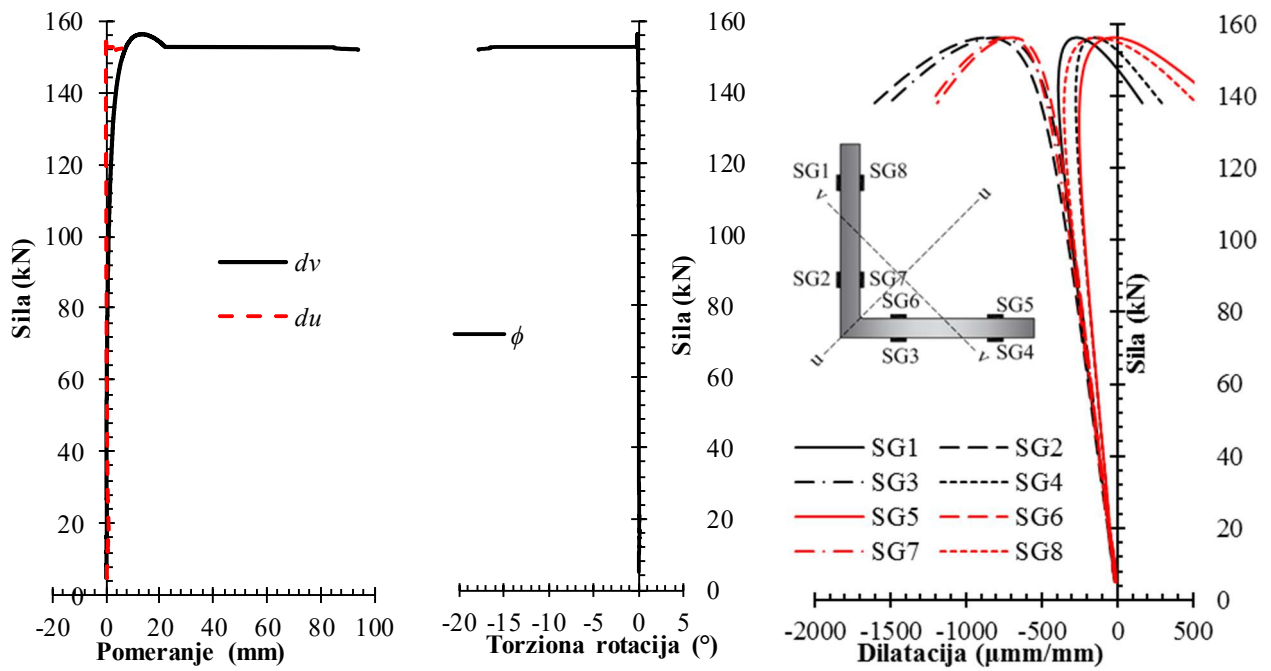
Slika B.26 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 100 × 100 × 10 – 1500 – 3



Slika B.27 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 100 × 100 × 10 – 1500 – 4



Slika B.28 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 100 × 100 × 10 – 2500 – 1

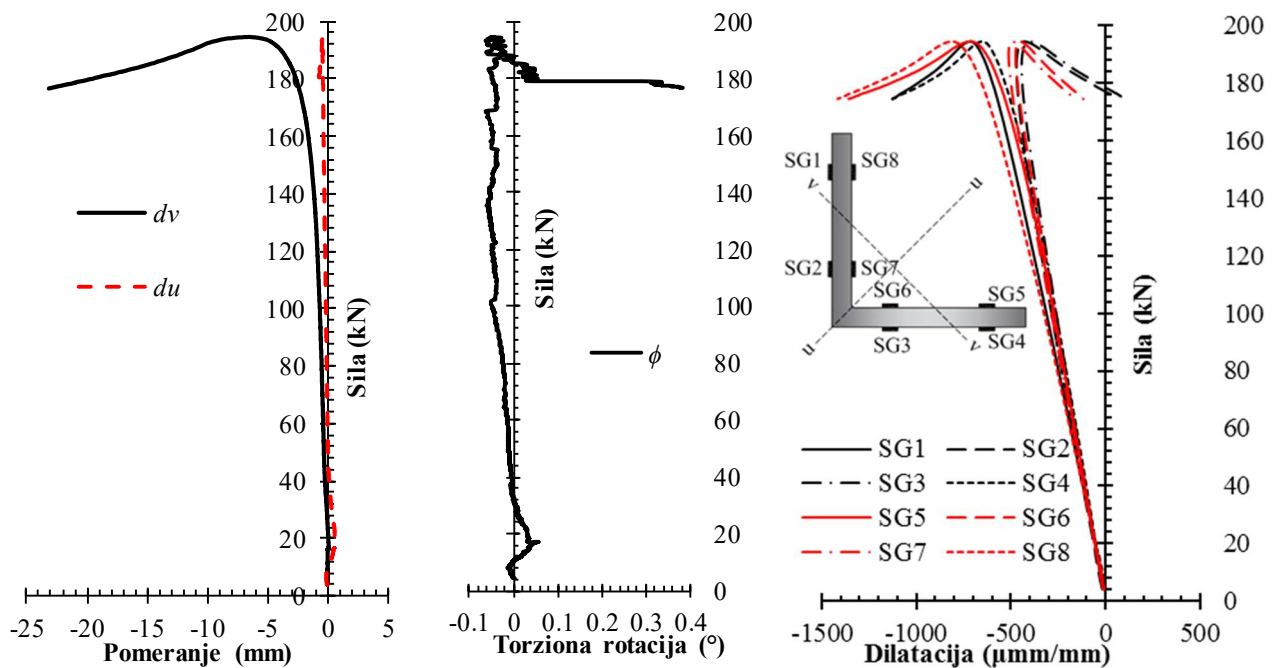


a) Sila - pomeranja u pravcu glavnih osa inercije

b) Sila - torziona rotacija

c) Sila - aksijalna dilatacija

Slika B.29 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 100 × 100 × 10 – 2500 – 2



a) Sila - pomeranja u pravcu glavnih osa inercije

b) Sila - torziona rotacija

c) Sila - aksijalna dilatacija

Slika B.30 – Dijagrami ključnih rezultata za uzorak ALW 100 × 100 × 10 – 2500 – 4

Biografija autora

Aljoša Filipović rođen je 1990. godine u Pančevu. Osnovnu školu "Olga Petrov" završio je u Banatskom Brestovcu. Prirodno-matematički smer gimnazije „Uroš Predić“ u Pančevu završio je 2008. godine.

Osnovne akademske studije na Građevinskom fakultetu u Beogradu upisao je školske 2008/2009 godine, a završio školske 2011/2012 godine na modulu konstrukcije sa prosečnom ocenom 9,42/10. Za sintezni projekat na temu „Projekat jednobrodne industrijske hale sa aneksom“, dobio je ocenu 10.

Master akademske studije, upisao je takođe na Građevinskom fakultetu u Beogradu, školske 2012/2013 godine. Na master studijama ostvario je prosečnu ocenu 9,43/10. Master rad na temu „Dejstva vetra i snega prema Evrokodu 1 sa primerom primene-projekat čelične konstrukcije industrijske hale“ odbranio je u januaru 2014. godine sa ocenom 10.

Doktorske studije na Građevinskom fakultetu u Beogradu upisao je školske 2015/2016 godine na modulu za konstrukcije i položio je sve ispite predviđene nastavnim planom i programom sa prosečnom ocenom 10,00/10.

Od 2013. do 2016. bio je zaposlen u kompaniji „Amiga“ DOO na poziciji projektant – pripravnik, gde se prevashodno bavio projektovanjem čeličnih konstrukcija. Tokom rada u ovoj kompaniji učestvovao je u aktivnostima vezanim za izradu dokumentacije, fabrikaciju i montažu čeličnih konstrukcija na raznim projektima u zemlji i inostranstvu.

U februaru 2016. godine izabran je u zvanje asistenta – studenta doktorskih studija za užu naučnu oblast Metalne konstrukcije i od tada je zaposlen na Građevinskom fakultetu Univerzitetu u Beogradu na Katedri za materijale i konstrukcije. Učestvuje na izvođenju nastave na osnovnim studijama na grupi predmeta iz oblasti Metalnih konstrukcija. Aktivno učestvuje u izradi diplomskih i master radova studenata završnih godina.

Njegov naučno-istraživački rad usmeren je na ponašanje centrično pritisnutih elemenata od nerđajućeg čelika. Autor je i koautor pet radova u časopisima indeksiranim na *SCI* listi, kao i većeg broja radova u domaćim časopisima, na međunarodnim i domaćim naučnim i stručnim skupovima. Kao istraživač učestvovao je u naučnom projektu Ministarstva nauke, prosvete i tehnološkog razvoja Republike Srbije, evidencioni broj projekta TR-36048.

Pored rada u nastavi i naučnom istraživanju aktivno učestvuje u stručnoj primeni stečenog znanja. Posедуje licencu 310 odgovornog projektanta građevinskih konstrukcija objekata visokogradnje, niskogradnje i hidrogradnje i licencu 410 odgovornog izvođača radova građevinskih konstrukcija i građevinsko - zanatskih radova na objektima visokogradnje, niskogradnje i hidrogradnje.

Aljoša Filipović govori engleski i ruski jezik. Oženjen je.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора _____ Аљоша Филиповић _____

Број индекса _____ 904/15 _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Носивост различитих типова равнокраких угаоника од нерђајућег челика при дејству
центричног притиска

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

Потпис аутора

У Београду, 07.05.2021.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Аљоша Филиповић

Број индекса 904/15

Студијски програм Грађевинарство

Наслов рада Носивост различитих типова равнокраких угаоника од нерђајућег челика при дејству центричног притиска

Ментор В. проф. др Јелена Добрић, дипл. грађ. инж.

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 07.05.2021.

Изјава о коришћењу

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

Носивост различитих типова равнокраких угаоника од нерђајућег челика при дејству
центричног притиска

која је моје ауторско дело.

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

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

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 07.05.2021.

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако

се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прерада. Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство – делити под истим условима. Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.