



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА



ПОНАШАЊЕ ЕКСЦЕНТРИЧНО ПРИТИСНУТИХ ХЛАДНО- ОБЛИКОВАНИХ ЧЕЛИЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА СА ОТВОРИМА У РЕБРУ

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ментор:
Доц. др Игор Џолев

Кандидат:
Владимир Живаљевић

Нови Сад, 2023. године

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА¹

Врста рада:	Докторска дисертација
Име и презиме аутора:	Владимир Живаљевић
Ментор (титула, име, презиме, звање, институција):	др Игор Цолев, доцент, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Наслов рада:	Понашање ексцентрично притиснутих хладно-обликованих челичних елемената са отворима у ребру
Језик публикације (писмо):	Српски (ћирилица)
Физички опис рада:	Страница: 303 Поглавља: 9 Референци: 114 Табела: 59 Слика: 302 Прилога: 5
Научна област:	Грађевинско инжењерство
Ужа научна област (научна дисциплина):	Теорија конструкција
Кључне речи / предметна одредница:	хладно-обликовани челик, локално извијање, дисторзионо извијање, глобално извијање, ексцентрични притисак, нелинеарна анализа конструкција
Резиме на језику рада:	Развој светског грађевинског сектора је осим све учесталијег унапређивања карактеристика грађевинских материјала остварен и изналажењем начина за брзом реализацијом пројеката. Иновације у погледу механизације, логистике, процеса пројектовања, те процеса производње конструктивних елемената су неки од кључних фактора који су допринели смањењу рокова изградње. Једно од поља у којима је остварено унапређење процеса производње је свакако поље челичних конструкција, тачније, танкозидних елемената формираних од хладно-обликованих профила. У самом почетку, оно је подразумевало изналажење оптималних облика попречних пресека елемената, а касније

¹ Аутор докторске дисертације потписао је и приложио следеће Обрасце:

5б – Изјава о ауторству;

5в – Изјава о истоветности штапане и електронске верзије и о личним подацима;

5г – Изјава о коришћењу.

Ове Изјаве се чувају на факултету у штапаном и електронском облику и не користе се са тезом.

	<p>и додатна унапређења како би се са највећом ефикасношћу црпили могућности које процес хладног обликовања пружа. Једно од многих побољшања урађено је када су хладно-обликовани елементи први пут почели да се производе са отворима у ребру. Овакав начин производње не само да је утицао на олакшање конструкција, већ је и пружио могућност ефикаснијег искоришћења простора у објекту тако што се сада електричне, водоводне или грејне инсталације могу поставити у раван носећих или преградних зидова и међуспратних конструкција.</p> <p>Предмет истраживања ове докторске дисертације су танкозидни хладно-обликовани елементи са отворима у ребру оптерећени истовременим дејством притиска и савијања. Спроведено је опсежно експериментално испитивање у три фазе: испитивање механичких својстава материјала, мерење почетних геометријских имперфекција и испитивање хладно-обликованих елемената на дејство ексцентричног притиска. Експериментално истраживање симулирано је у оквиру нумеричких анализа применом софтвера <i>Abaqus</i>. Нумеричке симулације експерименталног испитивања послужиле су као основа за калибрацију модела за накнадне параметарске анализе, са циљем сагледавања утицаја и осетљивости различитих фактора на понашање и носивост хладно-обликованих елемената са отворима у ребру. Параметризовани су дужина елемента, облик попречног пресека, број и величина отвора у ребру, као и интензитет дејства силе притиска и момента савијања. Примећено је да за елементе код којих се локално и дисторзионо извијање јављају као доминантни облици губитка стабилности, линеарна функција интеракционог дијаграма не даје резултате који су увек на страни сигурности. Такође, примећено је да се криве интеракционих дијаграма елемената са отворима у ребру „померају“ ка унутрашњости дијаграма, тј. ка границама успостављеним критеријумима у <i>SRPS EN 1993-1-3</i>. Стога, предложени су нови изрази за контролу интеракције нормалне силе притиска и момента савијања хладно-обликованих челичних елемената.</p>
Датум прихватања теме од стране надлежног већа:	22.12.2022.
Датум одбране:	

<p>Чланови комисије: (титула, име, презиме, звање, институција):</p>	<p>Председник: др Андрија Рашета, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду</p> <p>Члан: др Душан Ковачевић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду</p> <p>Члан: др Владимир Вукобратовић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду</p> <p>Члан: др Ђорђе Јовановић, доцент, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду</p> <p>Члан: др Марија Нефовска-Даниловић, ванредни професор, Грађевински факултет, Универзитет у Београду</p> <p>Члан, ментор: др Игор Цолев, доцент, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду</p>
<p>Напомена:</p>	

KEY WORD DOCUMENTATION²

Document type:	Doctoral dissertation
Author:	Vladimir Živaljević
Supervisor (title, first name, last name, position, institution):	dr Igor Džolev, assistant professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Thesis title:	Behaviour of eccentrically compressed cold-formed steel members with web holes
Language of text (script):	Serbian language (cyrillic script)
Physical description:	Pages: 303 Chapters: 9 References: 114 Tables: 59 Illustrations: 302 Appendices: 5
Scientific field:	Civil Engineering
Scientific subfield (scientific discipline):	Theory of Structures
Subject, Key words:	cold-formed steel, local buckling, distortional buckling, global buckling, eccentric axial load, nonlinear structural analysis
Abstract in English language:	The development of the global construction market was accomplished not only by the frequent improvement of the characteristics of structural materials, but also by discovering new ways of quickly project realisation. Innovations in terms of mechanization, logistics, design process, and the production process of structural elements are some of the key factors in contribution to the reduction of the entire construction process. One of the fields in which the improvement of the production process has been achieved is certainly the field of steel structures, or more precisely, the field of thin-walled elements formed by the process of cold-forming. At its very beginning, the orientation was set to finding the optimal cross-section shapes. Later, additional improvements were made in order to exploit more efficiently

² The author of doctoral dissertation has signed the following Statements:

5Ć – Statement on the authority,

5B – Statement that the printed and e-version of doctoral dissertation are identical and about personal data,

5r – Statement on copyright licenses.

The paper and e-versions of Statements are held at the faculty and are not included into the printed thesis.

	<p>the possibilities that the process of cold forming offers. One of the many improvements was introduction of the web holes. This production method not only influenced on the decrease of the structural weight, but also provided the possibility of more efficient use of the space in buildings. Consequently, electrical, plumbing or heating installations can be placed within the thickness of walls and floor slabs.</p> <p>The research of this doctoral dissertation is oriented on thin-walled cold-formed elements with web holes, subjected to the simultaneous load of compression and bending. An extensive experimental investigation was carried out in three phases: (i) determination of the mechanical properties of the material, (ii) measuring of the initial geometric imperfections and (iii) eccentric axial load testing of the cold-formed steel elements. The experimental research was numerically simulated with the use of the <i>Abaqus</i> software. These simulations served as a groundwork for model calibration for subsequent parametric analyses, which were carried out aiming to determine the influence and sensitivity of various factors on the behaviour and bearing capacity of cold-formed elements with web holes. Element length, cross-section shape, the number and size of the web holes, as well as the axial load and bending moment intensity were parameterized. It was observed that for elements, for which the loss of stability was governed by the local or distortional buckling shape, the linear function of the interaction diagram yields results that are not always on the safety side. Moreover, it was noticed that the interaction curves of the elements with the web holes „move“ towards the inner side of the diagram, i.e. towards the boundaries of the criteria established in <i>SRPS EN 1993-1-3</i>. Hence, a new set of equations was proposed for the purpose of controlling the axial compressive load-to-bending moment interaction of cold-formed steel elements.</p>
Accepted on Scientific Board on:	22.12.2022.
Defended:	

<p>Thesis Defend Board: (title, first name, last name, position, institution):</p>	<p>President: dr Andrija Rašeta, Associate professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad</p> <p>Member: dr Dušan Kovačević, Full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad</p> <p>Member: dr Vladimir Vukobratović, Associate professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad</p> <p>Member: dr Đorđe Jovanović, Assistant professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad</p> <p>Member: dr Marija Nefovska-Danilović, Associate professor, Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade</p> <p>Member, mentor: dr Igor Džolev, Assistant professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad</p>
<p>Note:</p>	

САДРЖАЈ

РЕЗИМЕ	iii
АБСТРАКТ	v
СПИСАК СЛИКА	vii
СПИСАК ТАБЕЛА	xxiv
ЛИСТА СИМБОЛА	xxviii
1. УВОД	1
1.1. ПРЕДМЕТ, ПОТРЕБА И ЦИЉЕВИ ИСТРАЖИВАЊА	3
1.2. КРАТАК ПРИКАЗ САДРЖАЈА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ.....	5
2. ПРЕГЛЕД СТАЊА У ОБЛАСТИ	8
2.1. ИЗВИЈАЊЕ ТАНКОЗИДНИХ ХЛАДНО-ОБЛИКОВАНИХ ЧЕЛИЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА	8
2.2. НУМЕРИЧКЕ МЕТОДЕ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ КРИТИЧНОГ ОПТЕРЕЂЕЊА	10
2.3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА И НУМЕРИЧКА ИСТРАЖИВАЊА.....	12
2.4. ПРОРАЧУН И ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ ХЛАДНО-ОБЛИКОВАНИХ ЕЛЕМЕНАТА СА РУПАМА ПРЕМА ТРЕНУТНО ВАЖЕЋИМ ПРОПИСИМА.....	21
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТИВАЊЕ	29
3.1. ОПИС УЗОРАКА	29
3.2. ПРВА ФАЗА: ИСПИТИВАЊЕ МЕХАНИЧКИХ СВОЈСТАВА МАТЕРИЈАЛА	32
3.3. ДРУГА ФАЗА: МЕРЕЊЕ ПОЧЕТНИХ ГЕОМЕТРИЈСКИХ ИМПЕРФЕКЦИЈА	41
3.4. ТРЕЋА ФАЗА: ИСПИТИВАЊЕ ХЛАДНО-ОБЛИКОВАНИХ ЕЛЕМЕНАТА	51
4. НУМЕРИЧКЕ АНАЛИЗЕ	82
4.1. МОДЕЛИРАЊЕ ПОНАШАЊА МАТЕРИЈАЛА	85
4.2. ОПИС НУМЕРИЧКИХ МОДЕЛА	92
4.3. РЕЗУЛТАТИ НУМЕРИЧКИХ АНАЛИЗА	98
5. ПАРАМЕТАРСКА АНАЛИЗА	112
5.1. ОПИС МОДЕЛА И АНАЛИЗЕ.....	112
5.2. РЕЗУЛТАТИ ПАРАМЕТАРСКЕ АНАЛИЗЕ	114

6. ПРЕПОРУКЕ ЗА ПРОРАЧУН	125
7. ЗАПАЖАЊА, ЗАКЉУЧЦИ И ПРАВЦИ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА	132
7.1. ОПШТА ЗАПАЖАЊА.....	132
7.2. ЗАКЉУЧЦИ И ПРАВЦИ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА.....	134
8. ЛИТЕРАТУРА	137
9. ПРИЛОЗИ	145
9.1. ПРИЛОГ А: РЕЗУЛТАТИ ПРВЕ ФАЗЕ ЕКСПЕРИМЕНТА: ИСПИТИВАЊЕ МЕХАНИЧКИХ СВОЈСТАВА МАТЕРИЈАЛА	145
9.2. ПРИЛОГ Б: РЕЗУЛТАТИ ДРУГЕ ФАЗЕ ЕКСПЕРИМЕНТА: МЕРЕЊЕ ПОЧЕТНИХ ГЕОМЕТРИЈСКИХ ИМПЕРФЕКЦИЈА.....	155
9.3. ПРИЛОГ В: РЕЗУЛТАТИ ТРЕЋЕ ФАЗЕ ЕКСПЕРИМЕНТА: ИСПИТИВАЊЕ ХЛАДНО-ОБЛИКОВАНИХ ЕЛЕМЕНАТА.....	167
9.4. ПРИЛОГ Г: РЕЗУЛТАТИ ПАРАМЕТАРСКИХ АНАЛИЗА	209
9.5. ПРИЛОГ Д: ОДРЕЂИВАЊЕ НОСИВОСТИ ПОПРЕЧНОГ ПРЕСЕКА ЕЛЕМЕНАТА ПРЕМА SRPS EN 1993-1-3	248
СПИСАК ПУБЛИКАЦИЈА	258
БИОГРАФИЈА.....	260

ПОНАШАЊЕ ЕКСЦЕНТРИЧНО ПРИТИСНУТИХ ХЛАДНО-ОБЛИКОВАНИХ ЧЕЛИЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА СА ОТВОРИМА У РЕБРУ

РЕЗИМЕ

Развој светског грађевинског сектора је осим све учесталијег унапређивања карактеристика грађевинских материјала остварен и изналажењем начина за брзом реализацијом пројеката. Иновације у погледу механизације, логистике, процеса пројектовања, те процеса производње конструктивних елемената су неки од кључних фактора који су допринели смањењу рокова изградње. Једно од поља у којима је остварено унапређење процеса производње је свакако поље челичних конструкција, тачније, танкозидних елемената формираних од хладно-обликованих профила. У самом почетку, оно је подразумевало изналажење оптималних облика попречних пресека елемената, а касније и додатна унапређења како би се са највећом ефикасношћу црпили могућности које процес хладног обликовања пружа. Једно од многих побољшања урађено је када су хладно-обликовани елементи први пут почели да се производе са отворима у ребру. Овакав начин производње не само да је утицао на олакшање конструкција, већ је и пружио могућност ефикаснијег искоришћења простора у објекту тако што се сада електричне, водоводне или грејне инсталације могу поставити у раван носећих или преградних зидова и међуспратних конструкција.

Предмет истраживања ове докторске дисертације су танкозидни хладно-обликовани елементи са отворима у ребру оптерећени истовременим дејством притиска и савијања. Сprovedено је опсежно експериментално испитивање у три фазе: испитивање механичких својстава материјала, мерење почетних геометријских имперфекција и испитивање хладно-обликованих елемената на дејство ексцентричног притиска. Експериментално истраживање симулирано је у оквиру нумеричких анализа применом софтвера *Abaqus*. Нумеричке симулације експерименталног испитивања послужиле су као основа за калибрацију модела за накнадне параметарске анализе, са циљем сагледавања утицаја и осетљивости различитих фактора на понашање и носивост хладно-обликованих елемената са отворима у ребру. Параметризовани су дужина елемента, облик попречног пресека, број и величина отвора у ребру, као и интензитет дејства силе притиска и момента савијања. Примећено је да за елементе код којих се локално и дисторзионо извијање јављају као доминантни облици губитка стабилности, линеарна функција интеракционог дијаграма не даје резултате који су увек на страни сигурности. Такође, примећено је да се криве интеракционих дијаграма елемената са отворима у ребру „померају“ ка унутрашњости дијаграма, тј. ка границама успостављеним

критеријумима у *SRPS EN 1993-1-3*. Стога, предложени су нови изрази за контролу интеракције нормалне силе притиска и момента савијања хладно-обликованих челичних елемената.

Кључне речи: хладно-обликовани челик, локално извијање, дисторзионо извијање, глобално извијање, ексцентрични притисак, нелинеарна анализа конструкција

BEHAVIOUR OF ECCENTRICALLY COMPRESSED COLD-FORMED STEEL MEMBERS WITH WEB HOLES**A B S T R A C T**

The development of the global construction market was accomplished not only by the frequent improvement of the characteristics of structural materials, but also by discovering new ways of quickly project realisation. Innovations in terms of mechanization, logistics, design process, and the production process of structural elements are some of the key factors in contribution to the reduction of the entire construction process. One of the fields in which the improvement of the production process has been achieved is certainly the field of steel structures, or more precisely, the field of thin-walled elements formed by the process of cold-forming. At its very beginning, the orientation was set to finding the optimal cross-section shapes. Later, additional improvements were made in order to exploit more efficiently the possibilities that the process of cold forming offers. One of the many improvements was introduction of the web holes. This production method not only influenced on the decrease of the structural weight, but also provided the possibility of more efficient use of the space in buildings. Consequently, electrical, plumbing or heating installations can be placed within the thickness of walls and floor slabs.

The research of this doctoral dissertation is oriented on thin-walled cold-formed elements with web holes, subjected to the simultaneous load of compression and bending. An extensive experimental investigation was carried out in three phases: (i) determination of the mechanical properties of the material, (ii) measuring of the initial geometric imperfections and (iii) eccentric axial load testing of the cold-formed steel elements. The experimental research was numerically simulated with the use of the *Abaqus* software. These simulations served as a groundwork for model calibration for subsequent parametric analyses, which were carried out aiming to determine the influence and sensitivity of various factors on the behaviour and bearing capacity of cold-formed elements with web holes. Element length, cross-section shape, the number and size of the web holes, as well as the axial load and bending moment intensity were parameterized. It was observed that for elements, for which the loss of stability was governed by the local or distortional buckling shape, the linear function of the interaction diagram yields results that are not always on the safety side. Moreover, it was noticed that the interaction curves of the elements with the web holes „move“ towards the inner side of the diagram, i.e. towards the boundaries of the criteria established in *SRPS EN 1993-1-3*. Hence, a new set of equations was proposed for the

purpose of controlling the axial compressive load-to-bending moment interaction of cold-formed steel elements.

Key words: cold-formed steel, local buckling, distortional buckling, global buckling, eccentric axial load, nonlinear structural analysis

СПИСАК СЛИКА

Слика 1.1. Хладно-обликовани челични елементи С, Z и Σ попречног пресека са кружним отворима у ребру.....	1
Слика 1.2. Хладно-обликовани челични елемент са ивичним укрућењима отвора	2
Слика 1.3. Примери примене хладно-обликованих елемената са отворима у ребру у конструкцијама високоградње	2
Слика 1.4. Машине за производњу хладно-обликованих челичних елемената: DAHEZB FX350 за производњу хладним ваљањем (горе) [www.dahezbforming.com/] и GASPARINI X PRESS 165 преса за савијање лимова (доле) [www.gasparini.com , www.rollerdie.com]	3
Слика 2.1. Извијање хладно-обликованих елемената: локално (лево), дисторзионо (средина) и глобално бочно-торзионо (десно)	9
Слика 2.2. Крива еластичног извијања за хладно-обликовани елемент С попречног пресека (МКТ решење) и утицај отвора у ребру у оквиру МКЕ анализе својствених вредности извијања	11
Слика 3.1. Геометријске карактеристике испитаних узорак С100.....	30
Слика 3.2. Геометријске карактеристике испитаних узорак С150.....	30
Слика 3.3. Узорак С100 са 3 отвора у ребру	31
Слика 3.4. Узорак С150 са 2 отвора у ребру	31
Слика 3.5. Сечење епрувета воденим млазом из равног дела лима (лево) и из угла попречног пресека (десно)	33
Слика 3.6. Димензије епрувета исечених из равног дела (лево) и из угла пресека(десно) за испитивање механичких својстава материјала	33
Слика 3.7. Епрувете исечене из узорак и узорци из којих су исечене	34
Слика 3.8. Припремљене епрувете исечене из елемента С100	36
Слика 3.9. Припремљене епрувете исечене из елемента С150	36
Слика 3.10. Поставка контролног теста епрувете (лево) и поређење резултата екстензометра и КДС методе (десно)	37
Слика 3.11. Поставка експерименталног испитивања.....	38

Слика 3.12. Типични облици лома за равну (лево) и угаону (десно) епрувету.....	39
Слика 3.13. Изглед корисничког интерфејса софтвера GOM Correlate	40
Слика 3.14. Дијаграми напон-деформација за испитане епрувете исечене из елемената C100 (лево) и C150 (десно).....	40
Слика 3.15. Дијаграми напон-дилатација након уклањања шума за испитане епрувете исечене из елемената C100 (лево) и C150 (десно).....	41
Слика 3.16. Компоненте оптичког 3Д скенера и мерни волумен [107].....	43
Слика 3.17. Калибрација мерног система [107]	44
Слика 3.18. Наношење титанијум диоксида на површину узорка	45
Слика 3.19. Помоћни рам и узорак припремљени за контролу геометрије	46
Слика 3.20. Контрола геометрије оптичким 3Д скенером ATOS (GOM)	47
Слика 3.21. Ротација зида ребра (лево) и релативна ротација зидова фланши у односу на зид ребра (десно)	48
Слика 3.22. Имперфекција ребра у правцу јаче осе попречног пресека за узорке C100 (лево) и узорке C150 (десно)	48
Слика 3.23. Имперфекција фланши у правцу слабије осе попречног пресека узорака C100.....	48
Слика 3.24. Имперфекција фланши у правцу слабије осе попречног пресека узорака C150.....	49
Слика 3.25. Ротација зида ребра узорака C100 (лево) и узорака C150 (десно).....	49
Слика 3.26. Релативна ротација зидова фланши у односу на зид ребра узорака C100	49
Слика 3.27. Релативна ротација зидова фланши у односу на зид ребра узорака C150	50
Слика 3.28. Припрема: фиксирање мерне траке за подлогу и повијање инсталација (лево) и мерна трака са уклоњеним вишковима дужина лицни и постављеним терминалом за лемљење (десно)	52
Слика 3.29. Терминали за лемљење HBM LS7.....	52
Слика 3.30. Лемљење лицни за терминал.....	53
Слика 3.31. Провера отпора у мерној траци након лемљења	53

Слика 3.32. Мерне траке припремљене за лепљење	54
Слика 3.33. Чишћење површине узорка пре лепљења мерне траке	54
Слика 3.34. RMS 1 спреј за уклањање нечистоће (лево) и лепак Z70 за лепљење мерних трака (десно).....	55
Слика 3.35. Наношење лепка на површину узорка (лево) и лепљење мерне траке (десно).....	55
Слика 3.36. Контрола отпора у мерној траци након лепљења	56
Слика 3.37. Заштитни премаз PU 140 (лево) и наношење премаза PU 140 преко мерне траке (десно)	57
Слика 3.38. Распоред мерних трака код узорка C100-0	57
Слика 3.39. Распоред мерних трака код узорка C100-2	58
Слика 3.40. Распоред мерних трака код узорка C100-3	58
Слика 3.41. Распоред мерних трака код узорка C150-0	59
Слика 3.42. Распоред мерних трака код узорка C150-2	60
Слика 3.43. Распоред мерних трака код узорка C150-3	61
Слика 3.44. Пример одређивања момента савијања у попречном пресеку узорка C100-0 на основу записа мерних трака	62
Слика 3.45. Хидраулични цилиндар ENERPAC RC-254 (лево) и пумпа ENERPAC P-392 (десно)	63
Слика 3.46. Давач силе HBM-C2F-S20/200kN (лево) и инклинометар SST151-30-P (десно).....	63
Слика 3.47. Индуктивни давач померања HBM-WA/50mm (лево) и два осмоканална аквизициона уређаја Quantum MX 840A (десно)	64
Слика 3.48. Кориснички интерфејс софтвера MX Assistant.....	64
Слика 3.49. Приказ поставке за испитивање узорка на дејство центричног/ексцентричног притиска	65
Слика 3.50. Центрични и ексцентрични положаји узорка (лево) и распоред угбомера за мерење хоризонталног померања (десно).....	66
Слика 3.51. Дијаграм зависности силе притиска у узорку и вертикалног померања хидрауличне пресе (померање у правцу осе узорка) за узорке C100: а) без отвора у ребру, б) са 2 отвора у ребру, в) са 3 отвора у ребру, г) оптерећене центричним притиском,	

д) оптерећене силом на ексцентрицитету од 40 mm и њ) оптерећене силом на ексцентрицитету од 80 mm	67
Слика 3.52. Дијаграм зависности силе притиска у узорку и вертикалног померања хидрауличне пресе (померање у правцу осе узорка) за узорке С150: а) без отвора у ребру, б) са 2 отвора у ребру, в) са 3 отвора у ребру, г) оптерећене центричним притиском, д) оптерећене силом на ексцентрицитету од 40 mm и њ) оптерећене силом на ексцентрицитету од 80 mm	68
Слика 3.53. Испитивање узорака С100 на дејство центричног и ексцентричног притиска: а) С100-0-е00-3, б) С100-0-е40-2, в) С100-2-е00-1 и г) С100-2-е80-1	73
Слика 3.54. Испитивање узорака С100 на дејство центричног и ексцентричног притиска: а) С100-3-е00-1, б) С100-3-е40-1, в) С100-3-е40-2 и г) С100-3-е80-1	74
Слика 3.55. Зависност максималне нормалне силе притиска и момента савијања за узорак С100	74
Слика 3.56. Испитивање узорака С150 на дејство центричног и ексцентричног притиска: а) С150-0-е00-2, б) С150-0-е40-2, в) С150-0-е80-2, г) С150-0-е80-2, д) С150-2-е00-2, њ) С150-2- е80-1, е) С150-3-е00-2 и ж) С150-3-е40-2	78
Слика 3.57. Зависност нормалне силе притиска и момента савијања за узорак С150	79
Слика 3.58. Интеракциони дијаграм за прорачунске вредности израчунате према SRPS EN 1993-1-3	81
Слика 4.1. Унутрашња и кинетичка енергија система постигнуте у нумеричкој анализи модела С100-0 за комплетну анализу (лево) и за део анализе до тренутка у којем се дешава извијање (десно)	83
Слика 4.2. Типична крива инжењерски напон-инжењерска дилатација за конструкциони челик.....	86
Слика 4.3. Промена дужине епрувете у току времена	87
Слика 4.4. Криве инжењерски напон-инжењерска дилатација и стварни напон-стварна дилатација упросечене за серије узорака ERA (лево) и EUA (десно)	88

Слика 4.5. Криве инжењерски напон-инжењерска дилатација и стварни напон-стварна дилатација упросечене за серије узорака ERB (лево) и EUB (десно)	88
Слика 4.6. Контурни услови и спољашње оптерећење хексаедра (лево) и мрежа коначних елемената (десно).....	89
Слика 4.7. Поређење зависности стварни напон-стварна дилатација теста и нумеричког модела коцке за узорке из серије ERA (лево) EUA (десно)	89
Слика 4.8. Поређење зависности стварни напон-стварна дилатација теста и нумеричког модела коцке за узорке из серије ERB (лево) EUB (десно)	89
Слика 4.9. Поређење зависности инжењерски напон-инжењерска дилатација теста и нумеричког модела за узорке из серије ERA (лево) EUA (десно)	90
Слика 4.10. Поређење зависности напон-дилатација теста затезања и нумеричког модела за узорке из серије ERB (лево) EUB (десно)	90
Слика 4.11. Поређење слике дилатација нумеричког модела и теста затезања за узорке из серије ERA (лево) EUA (десно)	91
Слика 4.12. Поређење слике дилатација нумеричког модела и теста затезања за узорке из серије ERB (лево) EUB (десно)	91
Слика 4.13. Геометрија нумеричког модела узорка C100-3-e80 са означеним позицијама референтних чворова на крајевима елемента	92
Слика 4.14. Геометрија нумеричког модела узорка C150-2-e80 са означеним позицијама референтних чворова на крајевима елемента	93
Слика 4.15. Smooth step функција коришћена приликом дефинисања померања	94
Слика 4.16. Зависност критичне силе и броја степени слободе модела елемента C100-0-e00	96
Слика 4.17. Детаљи мреже коначних елемената C100 узорака (горе) и C150 узорака (доле)	97
Слика 4.18. Облици еластичног извијања коришћени приликом дефинисања почетних геометријских имперфекција (лево) и поређење измерених имперфекција са задатим у Abaqus-у (десно) за узорке C100-0-e00	98

Слика 4.19. Поређење резултата експерименталног испитивања са резултатима нумеричких анализа за узорке: а) С100-0, б) С100-2 и в) С100-3	99
Слика 4.20. Поређење резултата експерименталног испитивања са резултатима нумеричких анализа за узорке: а) С150-0, б) С150-2 и в) С150-3	100
Слика 4.21. Поређење деформисаног облика експерименталног испитивања и нумеричких анализа за узорак С100-2-е40	101
Слика 4.22. Поређење деформисаног облика експерименталног испитивања и нумеричких анализа за узорак С100-3-е00	102
Слика 4.23. Поређење деформисаног облика експерименталног испитивања и нумеричких анализа за узорак С100-3-е40	103
Слика 4.24. Поређење деформисаног облика експерименталног испитивања и нумеричких анализа за узорак С150-2-е40	104
Слика 4.25. Поређење деформисаног облика експерименталног испитивања и нумеричких анализа за узорак С150-2-е80	105
Слика 5.1. Геометријске карактеристике елемената обухваћених параметарском анализом	114
Слика 5.2. Зависност силе притиска и момента савијања код елемената С100-750 (лево) и С150-750 (десно)	115
Слика 5.3. Зависност силе притиска и момента савијања код елемената С100-1250 (лево) и С150-1250 (десно).....	115
Слика 5.4. Зависност силе притиска и момента савијања код елемената С100-1750 (лево) и С150-1750 (десно).....	115
Слика 5.5. Интеракциони дијаграм $N/N_{max} + M/M_{max}$ за елементе С100-750 (лево) и С150-750 (десно).....	117
Слика 5.6. Интеракциони дијаграм $N/N_{max} + M/M_{max}$ за елементе С100-1250 (лево) и С150-1250 (десно).....	117
Слика 5.7. Интеракциони дијаграм $N/N_{max} + M/M_{max}$ за елементе С100-1750 (лево) и С150-1750 (десно).....	117
Слика 5.8. Зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања (лево) и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања (десно) за елементе С100-750.....	118

Слика 5.9. Зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања (лево) и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања (десно) за елементе С100-1250	118
Слика 5.10. Зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања (лево) и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања (десно) за елементе С100-1750	119
Слика 5.11. Зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања (лево) и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања (десно) за елементе С150-750	119
Слика 5.12. Зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања (лево) и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања (десно) за елементе С150-1250	119
Слика 5.13. Зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања (лево) и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања (десно) за елементе С150-1750	120
Слика 5.14. Интеракциони дијаграм $N/N_{RD} + M/M_{RD}$ за елементе С100-750 (лево) и С150-750 (десно)	121
Слика 5.15. Интеракциони дијаграм $N/N_{RD} + M/M_{RD}$ за елементе С100-1250 (лево) и С150-1250 (десно)	121
Слика 5.16. Интеракциони дијаграм $N/N_{RD} + M/M_{RD}$ за елементе С100-1750 (лево) и С150-1750 (десно)	121
Слика 5.17. Зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања (лево) и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања (десно) за елементе С100-750 (нормализација на основу носивости на одређених према [4] за елементе без отвора у ребру)	122
Слика 5.18. Зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања (лево) и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања (десно) за елементе С100-1250 (нормализација на основу носивости на одређених према [4] за елементе без отвора у ребру)	122

Слика 5.19. Зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања (лево) и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања (десно) за елементе С100-1750 (нормализација на основу носивости на одређених према [4] за елементе без отвора у ребру).....	123
Слика 5.20. Зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања (лево) и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања (десно) за елементе С150-750 (нормализација на основу носивости на одређених према [4] за елементе без отвора у ребру).....	123
Слика 5.21. Зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања (лево) и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања (десно) за елементе С150-1250 (нормализација на основу носивости на одређених према [4] за елементе без отвора у ребру).....	123
Слика 5.22. Зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања (лево) и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања (десно) за елементе С150-1750 (нормализација на основу носивости на одређених према [4] за елементе без отвора у ребру).....	124
Слика 6.1. Промена вредности експонента a у зависности од односа површина ефективних попречних пресека и растојања између отвора у ребру.....	126
Слика 6.2. Поређење интеракционих дијаграма према [4] (лево) и према предложеним препорукама (десно) за елементе С100-750.....	126
Слика 6.3. Поређење интеракционих дијаграма према [4] (лево) и према предложеним препорукама (десно) за елементе С150-750.....	127
Слика 6.4. Поређење интеракционих дијаграма према [4] (лево) и према предложеним препорукама (десно) за елементе С100-1250.....	127
Слика 6.5. Поређење интеракционих дијаграма према [4] (лево) и према предложеним препорукама (десно) за елементе С150-1250.....	127
Слика 6.6. Поређење интеракционих дијаграма према [4] (лево) и према предложеним препорукама (десно) за елементе С100-1750.....	128
Слика 6.7. Поређење интеракционих дијаграма према [4] (лево) и према предложеним препорукама (десно) за елементе С150-1750.....	128

Слика 6.8. Релативна разлика између интеракције дефинисане према [4] и према предложеним препорукама у односу на нормализовану нормалну силу за (лево) и нормализовани момент савијања (десно) за елементе С100-750	129
Слика 6.9. Релативна разлика између интеракције дефинисане према [4] и према предложеним препорукама у односу на нормализовану нормалну силу за (лево) и нормализовани момент савијања (десно) за елементе С100-1250	129
Слика 6.10. Релативна разлика између интеракције дефинисане према [4] и према предложеним препорукама у односу на нормализовану нормалну силу за (лево) и нормализовани момент савијања (десно) за елементе С100-1750.....	129
Слика 6.11. Релативна разлика између интеракције дефинисане према [4] и према предложеним препорукама у односу на нормализовану нормалну силу за (лево) и нормализовани момент савијања (десно) за елементе С150-750	130
Слика 6.12. Релативна разлика између интеракције дефинисане према [4] и према предложеним препорукама у односу на нормализовану нормалну силу за (лево) и нормализовани момент савијања (десно) за елементе С150-1250.....	130
Слика 6.13. Релативна разлика између интеракције дефинисане према [4] и према предложеним препорукама у односу на нормализовану нормалну силу за (лево) и нормализовани момент савијања (десно) за елементе С150-1750.....	130
Слика 9.1. Дијаграм напон-дилатација за епрувету ERA-1 и епрувета пре и после лома	145
Слика 9.2. Дилатација епрувете ERA-1 за укупно размицање чељусти кидалице од 11.242 mm (лево) и 24.876 mm (десно).....	145
Слика 9.3. Дијаграм напон-дилатација за епрувету ERA-2 и епрувета пре и после лома	146
Слика 9.4. Дилатација епрувете ERA-2 за укупно размицање чељусти кидалице од 11.591 mm (лево) и 23.483 mm (десно).....	146
Слика 9.5. Дијаграм напон-дилатација за епрувету ERA-3 и епрувета пре и после лома	147
Слика 9.6. Дилатација епрувете ERA-3 за укупно размицање чељусти кидалице од 8.003 mm (лево) и 20.228 mm (десно).....	147

Слика 9.7. Дијаграм напон-дилатација за епрувету EUA-1 и епрувета пре и после лома	148
Слика 9.8. Дилатација епрувете EUA-1 за укупно размицање чељусти кидалице од 7.024 mm (лево) и 10.607 mm (десно).....	148
Слика 9.9. Дијаграм напон-дилатација за епрувету EUA-2 и епрувета пре и после лома	149
Слика 9.10. Дилатација епрувете EUA-2 за укупно размицање чељусти кидалице од 3.833 mm (лево) и mm 6.983 (десно).....	149
Слика 9.11. Дијаграм напон-дилатација за епрувету ERB-1 и епрувета пре и после лома.....	150
Слика 9.12. Дилатација епрувете ERB-1 за укупно размицање чељусти кидалице од mm (лево) и 16.139 mm (десно).....	150
Слика 9.13. Дијаграм напон-дилатација за епрувету ERB-2 и епрувета пре и после лома.....	151
Слика 9.14. Дилатација епрувете ERB-2 за укупно размицање чељусти кидалице од 6.673 mm (лево) и 17.394 mm (десно).....	151
Слика 9.15. Дијаграм напон-дилатација за епрувету ERB-3 и епрувета пре и после лома.....	152
Слика 9.16. Дилатација епрувете ERB-3 за укупно размицање чељусти кидалице од 7.495 mm (лево) и 24.510 mm (десно).....	152
Слика 9.17. Дијаграм напон-дилатација за епрувету EUB-1 и епрувета пре и после лома.....	153
Слика 9.18. Дилатација епрувете EUB-1 за укупно размицање чељусти кидалице од 2.621 mm (лево) и 6.156 mm (десно).....	153
Слика 9.19. Дијаграм напон-дилатација за епрувету EUB-2 и епрувета пре и после лома.....	154
Слика 9.20. Дилатација епрувете EUB-2 за укупно размицање чељусти кидалице од 2.342 mm (лево) и 6.078 mm (десно).....	154
Слика 9.21. Имперфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека (лево) и ротација зида ребра (десно) узорка С100-0-е00-1.....	155
Слика 9.22. Имперфекција фланши у правцу јаче осе попречног пресека узорка С100-0-е00-1.....	155
Слика 9.23. Релативне ротације фланши у односу на ребро узорка С100-0-е00-1	155

Слика 9.24. Имперфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека (лево) и ротација зида ребра (десно) узорка С100-0-е00-2.....	156
Слика 9.25. Имперфекција фланши у правцу јаче осе попречног пресека узорка С100-0-е00-2.....	156
Слика 9.26. Релативне ротације фланши у односу на ребро узорка С100-0-е00-2	156
Слика 9.27. Имперфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека (лево) и ротација зида ребра (десно) узорка С100-2-е00-1.....	157
Слика 9.28. Имперфекција фланши у правцу јаче осе попречног пресека узорка С100-2-е00-1.....	157
Слика 9.29. Релативне ротације фланши у односу на ребро узорка С100-2-е00-1	157
Слика 9.30. Имперфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека (лево) и ротација зида ребра (десно) узорка С100-2-е00-2.....	158
Слика 9.31. Имперфекција фланши у правцу јаче осе попречног пресека узорка С100-2-е00-2.....	158
Слика 9.32. Релативне ротације фланши у односу на ребро узорка С100-2-е00-2	158
Слика 9.33. Имперфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека (лево) и ротација зида ребра (десно) узорка С100-3-е00-1.....	159
Слика 9.34. Имперфекција фланши у правцу јаче осе попречног пресека узорка С100-3-е00-1.....	159
Слика 9.35. Релативне ротације фланши у односу на ребро узорка С100-3-е00-1	159
Слика 9.36. Имперфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека (лево) и ротација зида ребра (десно) узорка С100-3-е00-2.....	160
Слика 9.37. Имперфекција фланши у правцу јаче осе попречног пресека узорка С100-3-е00-2.....	160
Слика 9.38. Релативне ротације фланши у односу на ребро узорка С100-3-е00-2	160
Слика 9.39. Имперфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека (лево) и ротација зида ребра (десно) узорка С150-0-е00-1.....	161
Слика 9.40. Имперфекција фланши у правцу јаче осе попречног пресека узорка С150-0-е00-1.....	161

Слика 9.41. Релативне ротације фланши у односу на ребро узорка C150-0-е00-1	161
Слика 9.42. Имперфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека (лево) и ротација зида ребра (десно) узорка C150-0-е00-2.....	162
Слика 9.43. Имперфекција фланши у правцу јаче осе попречног пресека узорка C150-0-е00-2.....	162
Слика 9.44. Релативне ротације фланши у односу на ребро узорка C150-0-е00-2	162
Слика 9.45. Имперфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека (лево) и ротација зида ребра (десно) узорка C150-2-е00-1.....	163
Слика 9.46. Имперфекција фланши у правцу јаче осе попречног пресека узорка C150-2-е00-1.....	163
Слика 9.47. Релативне ротације фланши у односу на ребро узорка C150-2-е00-1	163
Слика 9.48. Имперфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека (лево) и ротација зида ребра (десно) узорка C150-2-е00-2.....	164
Слика 9.49. Имперфекција фланши у правцу јаче осе попречног пресека узорка C150-2-е00-2.....	164
Слика 9.50. Релативне ротације фланши у односу на ребро узорка C150-2-е00-2	164
Слика 9.51. Имперфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека (лево) и ротација зида ребра (десно) узорка C150-3-е00-1.....	165
Слика 9.52. Имперфекција фланши у правцу јаче осе попречног пресека узорка C150-3-е00-1.....	165
Слика 9.53. Релативне ротације фланши у односу на ребро узорка C150-3-е00-1	165
Слика 9.54. Имперфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека (лево) и ротација зида ребра (десно) узорка C150-3-е00-2.....	166
Слика 9.55. Имперфекција фланши у правцу јаче осе попречног пресека узорка C150-3-е00-2.....	166
Слика 9.56. Релативне ротације фланши у односу на ребро узорка C150-3-е00-2	166
Слика 9.57. Резултати испитивања узорка C100-0-е00-1.....	167
Слика 9.58. Испитивање узорка C100-0-е00-1	167

Слика 9.59. Резултати испитивања узорка С100-0-е00-2.....	168
Слика 9.60. Испитивање узорка С100-0-е00-2	168
Слика 9.61. Резултати испитивања узорка С100-0-е00-3.....	169
Слика 9.62. Испитивање узорка С100-0-е00-3	169
Слика 9.63. Резултати испитивања узорка С100-0-е40-1.....	170
Слика 9.64. Испитивање узорка С100-0-е40-1	170
Слика 9.65. Резултати испитивања узорка С100-0-е40-2.....	171
Слика 9.66. Испитивање узорка С100-0-е40-2	171
Слика 9.67. Резултати испитивања узорка С100-0-е40-3.....	172
Слика 9.68. Испитивање узорка С100-0-е40-3	172
Слика 9.69. Резултати испитивања узорка С100-0-е80-1.....	173
Слика 9.70. Испитивање узорка С100-0-е80-1	173
Слика 9.71. Резултати испитивања узорка С100-0-е80-2.....	174
Слика 9.72. Испитивање узорка С100-0-е80-2	174
Слика 9.73. Резултати испитивања узорка С100-0-е80-3.....	175
Слика 9.74. Испитивање узорка С100-0-е80-3	175
Слика 9.75. Резултати испитивања узорка С100-2-е00-1.....	176
Слика 9.76. Испитивање узорка С100-2-е00-1	176
Слика 9.77. Резултати испитивања узорка С100-2-е00-2.....	177
Слика 9.78. Испитивање узорка С100-2-е00-2	177
Слика 9.79. Резултати испитивања узорка С100-2-е40-1.....	178
Слика 9.80. Испитивање узорка С100-2-е40-1	178
Слика 9.81. Резултати испитивања узорка С100-2-е40-2.....	179
Слика 9.82. Испитивање узорка С100-2-е40-2	179
Слика 9.83. Резултати испитивања узорка С100-2-е80-1.....	180
Слика 9.84. Испитивање узорка С100-2-е80-1	180
Слика 9.85. Резултати испитивања узорка С100-2-е80-2.....	181
Слика 9.86. Испитивање узорка С100-2-е80-2	181
Слика 9.87. Резултати испитивања узорка С100-3-е00-1.....	182
Слика 9.88. Испитивање узорка С100-3-е00-1	182

Слика 9.89. Резултати испитивања узорка С100-3-е00-2.....	183
Слика 9.90. Испитивање узорка С100-3-е00-2	183
Слика 9.91. Резултати испитивања узорка С100-3-е40-1.....	184
Слика 9.92. Испитивање узорка С100-3-е40-1	184
Слика 9.93. Резултати испитивања узорка С100-3-е40-2.....	185
Слика 9.94. Испитивање узорка С100-3-е40-2	185
Слика 9.95. Резултати испитивања узорка С100-3-е80-1.....	186
Слика 9.96. Испитивање узорка С100-3-е80-1	186
Слика 9.97. Резултати испитивања узорка С100-3-е80-2.....	187
Слика 9.98. Испитивање узорка С100-3-е80-2	187
Слика 9.99. Резултати испитивања узорка С150-0-е00-1.....	188
Слика 9.100. Испитивање узорка С150-0-е00-1.....	188
Слика 9.101. Резултати испитивања узорка С150-0-е00-2	189
Слика 9.102. Испитивање узорка С150-0-е00-2.....	189
Слика 9.103. Резултати испитивања узорка С150-0-е00-3	190
Слика 9.104. Испитивање узорка С150-0-е00-3.....	190
Слика 9.105. Резултати испитивања узорка С150-0-е40-1	191
Слика 9.106. Испитивање узорка С150-0-е40-1.....	191
Слика 9.107. Резултати испитивања узорка С150-0-е40-2	192
Слика 9.108. Испитивање узорка С150-0-е40-2.....	192
Слика 9.109. Резултати испитивања узорка С150-0-е40-3	193
Слика 9.110. Испитивање узорка С150-0-е40-3.....	193
Слика 9.111. Резултати испитивања узорка С150-0-е80-1	194
Слика 9.112. Испитивање узорка С150-0-е80-1.....	194
Слика 9.113. Резултати испитивања узорка С150-0-е80-2	195
Слика 9.114. Испитивање узорка С150-0-е80-2.....	195
Слика 9.115. Резултати испитивања узорка С150-0-е80-3	196
Слика 9.116. Испитивање узорка С150-0-е80-3.....	196
Слика 9.117. Резултати испитивања узорка С150-2-е00-1	197
Слика 9.118. Испитивање узорка С150-2-е00-1.....	197

Слика 9.119. Резултати испитивања узорка С150-2-е00-2	198
Слика 9.120. Испитивање узорка С150-2-е00-2.....	198
Слика 9.121. Резултати испитивања узорка С150-2-е40-1	199
Слика 9.122. Испитивање узорка С150-2-е40-1.....	199
Слика 9.123. Резултати испитивања узорка С150-2-е40-2	200
Слика 9.124. Испитивање узорка С150-2-е40-2.....	200
Слика 9.125. Резултати испитивања узорка С150-2-е80-1	201
Слика 9.126. Испитивање узорка С150-2-е80-1.....	201
Слика 9.127. Резултати испитивања узорка С150-2-е80-2	202
Слика 9.128. Испитивање узорка С150-2-е80-2.....	202
Слика 9.129. Резултати испитивања узорка С150-3-е00-1	203
Слика 9.130. Испитивање узорка С150-3-е00-1.....	203
Слика 9.131. Резултати испитивања узорка С150-3-е00-2	204
Слика 9.132. Испитивање узорка С150-3-е00-2.....	204
Слика 9.133. Резултати испитивања узорка С150-3-е40-1	205
Слика 9.134. Испитивање узорка С150-3-е40-1.....	205
Слика 9.135. Резултати испитивања узорка С150-3-е40-2	206
Слика 9.136. Испитивање узорка С150-3-е40-2.....	206
Слика 9.137. Резултати испитивања узорка С150-3-е80-1	207
Слика 9.138. Испитивање узорка С150-3-е80-1.....	207
Слика 9.139. Резултати испитивања узорка С150-3-е80-2	208
Слика 9.140. Испитивање узорка С150-3-е80-2.....	208
Слика 9.141. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе С100-750-0	210
Слика 9.142. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе С100-750-1/40.....	211
Слика 9.143. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе С100-750-1/60.....	212
Слика 9.144. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе С100-1250-0	213

Слика 9.145. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе С100-1250-2/40.....	214
Слика 9.146. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе С100-1250-3/40.....	215
Слика 9.147. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе С100-1250-4/40.....	216
Слика 9.148. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе С100-1250-2/60.....	217
Слика 9.149. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе С100-1250-3/60.....	218
Слика 9.150. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе С100-1250-4/60.....	219
Слика 9.151. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе С100-1750-0	220
Слика 9.152. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе С100-1750-2/40.....	221
Слика 9.153. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе С100-1750-3/40.....	222
Слика 9.154. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе С100-1750-4/40.....	223
Слика 9.155. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе С100-1750-5/40.....	224
Слика 9.156. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе С100-1750-2/60.....	225
Слика 9.157. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе С100-1750-3/60.....	226
Слика 9.158. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе С100-1750-4/60.....	227
Слика 9.159. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе С100-1750-5/60.....	228
Слика 9.160. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе С150-750-0	229
Слика 9.161. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе С150-750-1/60.....	230

Слика 9.162. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-750-1/90.....	231
Слика 9.163. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1250-0	232
Слика 9.164. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1250-2/60.....	233
Слика 9.165. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1250-3/60.....	234
Слика 9.166. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1250-4/60.....	235
Слика 9.167. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1250-2/90.....	236
Слика 9.168. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1250-3/90.....	237
Слика 9.169. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1250-4/90.....	238
Слика 9.170. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1750-0	239
Слика 9.171. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1750-2/60.....	240
Слика 9.172. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1750-3/60.....	241
Слика 9.173. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1750-4/60.....	242
Слика 9.174. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1750-5/60.....	243
Слика 9.175. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1750-2/90.....	244
Слика 9.176. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1750-3/90.....	245
Слика 9.177. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1750-4/90.....	246
Слика 9.178. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1750-5/90.....	247

СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 3.1. Систем означавања узорака експерименталног испитивања	29
Табела 3.2. Преглед испитаних узорака	32
Табела 3.3. Систем означавања епрувета	34
Табела 3.4. Преглед и димензије испитаних епрувета	35
Табела 3.5. Преглед мерних трака узорака С100	59
Табела 3.6. Преглед мерних трака узорака С150	61
Табела 3.7. Резултати експерименталног испитивања понашања узорака С100-0 услед центрчног и ексцентричног притиска	70
Табела 3.8. Резултати експерименталног испитивања понашања узорака С100-2 услед центрчног и ексцентричног притиска	71
Табела 3.9. Резултати експерименталног испитивања понашања узорака С100-3 услед центрчног и ексцентричног притиска	72
Табела 3.10. Резултати експерименталног испитивања понашања узорака С150-0 услед центрчног и ексцентричног притиска	75
Табела 3.11. Резултати експерименталног испитивања понашања узорака С150-2 услед центрчног и ексцентричног притиска	76
Табела 3.12. Резултати експерименталног испитивања понашања узорака С150-3 услед центрчног и ексцентричног притиска	77
Табела 3.13. Поређење резултата експерименталног испитивања са прорачунским вредностима за узорке С100	80
Табела 3.14. Поређење резултата експерименталног испитивања са прорачунским вредностима за узорке С150	80
Табела 4.1. Модели и резултати компаративне анализе за одређивање „оптималне“ мреже КЕ	95
Табела 4.2. Поређење максималних вредности нормалних сила и момената савијања експерименталног испитивања и нумеричких анализа за узорке С100	107
Табела 4.3. Поређење максималних вредности нормалних сила и момената савијања експерименталног испитивања и нумеричких анализа за узорке С150	108

Табела 4.4. Поређење вредности на граници пропорционалности нормалних сила и момената савијања експерименталног истраживања и нумеричких анализа за узорке С100	109
Табела 4.5. Поређење вредности на граници пропорционалности нормалних сила и момената савијања експерименталног истраживања и нумеричких анализа за узорке С150	110
Табела 5.1. Параметри варирани у параметарској анализи.....	112
Табела 5.2. Систем означавања узорака параметарске анализе	113
Табела 9.1. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С100-750-0	210
Табела 9.2. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С100-750-1/40	211
Табела 9.3. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С100-750-1/60	212
Табела 9.4. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С100-1250-0	213
Табела 9.5. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С100-1250-2/40.....	214
Табела 9.6. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С100-1250-3/40.....	215
Табела 9.7. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С100-1250-4/40.....	216
Табела 9.8. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С100-1250-2/60.....	217
Табела 9.9. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С100-1250-3/60.....	218
Табела 9.10. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С100-1250-4/60.....	219
Табела 9.11. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С100-1750-0	220
Табела 9.12. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С100-1750-2/40.....	221
Табела 9.13. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С100-1750-3/40.....	222

Табела 9.14. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С100-1750-4/40.....	223
Табела 9.15. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С100-1750-5/40.....	224
Табела 9.16. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С100-1750-2/60.....	225
Табела 9.17. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С100-1750-3/60.....	226
Табела 9.18. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С100-1750-4/60.....	227
Табела 9.19. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С100-1750-5/60.....	228
Табела 9.20. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С150-750-0	229
Табела 9.21. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С150-750-1/60.....	230
Табела 9.22. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С150-750-1/90.....	231
Табела 9.23. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С150-1250-0	232
Табела 9.24. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С150-1250-2/60.....	233
Табела 9.25. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С150-1250-3/60.....	234
Табела 9.26. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С150-1250-4/60.....	235
Табела 9.27. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С150-1250-2/90.....	236
Табела 9.28. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С150-1250-3/90.....	237
Табела 9.29. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С150-1250-4/90.....	238
Табела 9.30. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С150-1750-0	239

Табела 9.31. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С150-1750-2/60	240
Табела 9.32. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С150-1750-3/60	241
Табела 9.33. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С150-1750-4/60	242
Табела 9.34. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С150-1750-5/60	243
Табела 9.35. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С150-1750-2/90	244
Табела 9.36. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С150-1750-3/90	245
Табела 9.37. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С150-1750-4/90	246
Табела 9.38. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе С150-1750-5/90	247

ЛИСТА СИМБОЛА

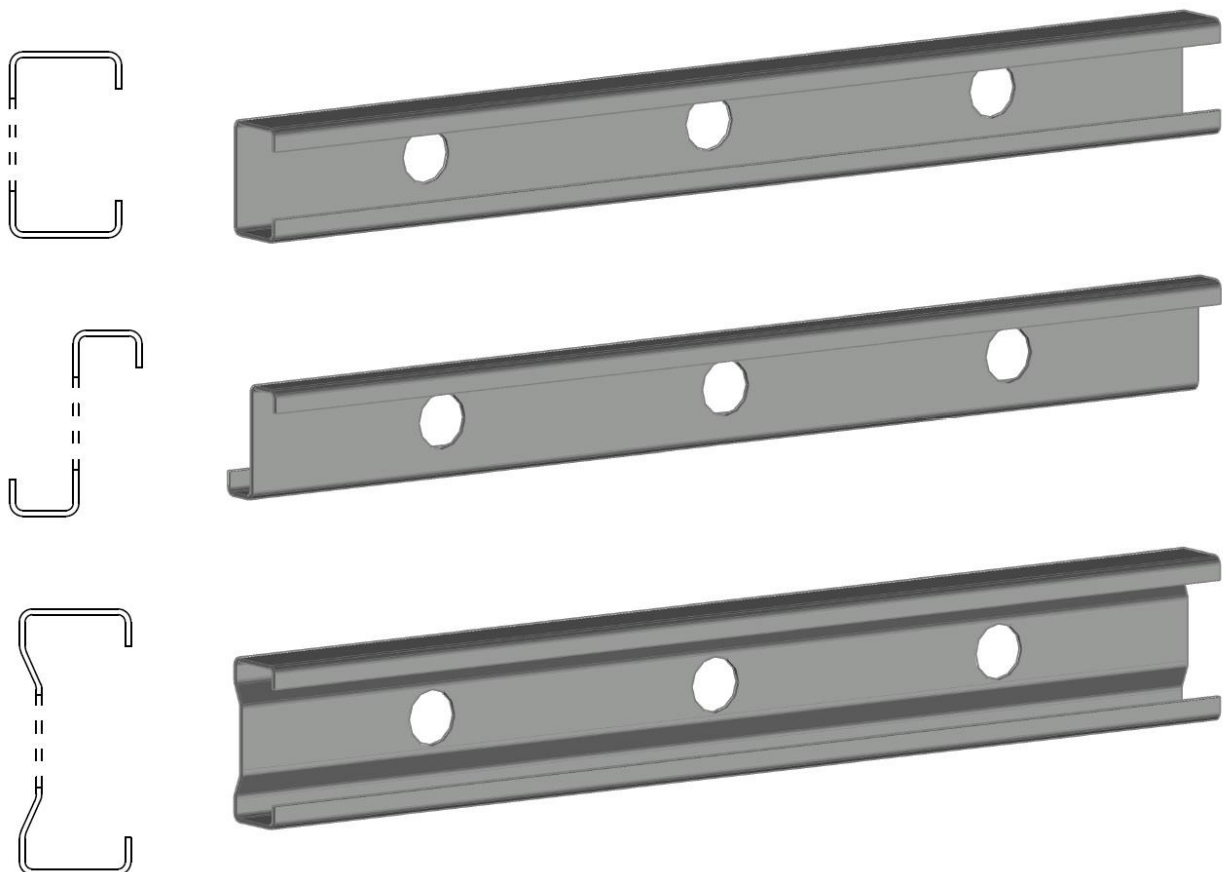
A	Тренутна површина попречног пресека епрувете
A_0	Почетна вредност површине попречног пресека епрувете
A_{eff}	Ефективна површина попречног пресека елемента без отвора
$A_{eff,o}$	Ефективна површина попречног пресека елемента са отвором
A_g	Бруто површина попречног пресека
C	Матрица пригушења система
c_d	Тренутна брзина распростирања таласа дилатације у материјалу
E	<i>Young</i> -ов модул еластичности
e_{Ny}	Размак између тежишта ефективне површине и бруто површине попречног пресека
f_{ya}	Просечна вредност напона на граници течења
f_{yb}	Основна вредност напона на граници течења
K	Матрица крутости система
L	Тренутна дужина епрувете
L_0	Почетна вредност дужине мерне базе епрувете
ΔL	Издужење епрувете
L_e	Дужина хладно-обликованог елемента
N_{Ed}	Прорачунска вредности аксијалне силе притиска
$N_{c,Rd}$	Отпорност попречног пресека на притисак
$N_{b,Rd}$	Отпорност елемента на притисак услед глобалног извијања
N_{cr}	Еластична критична сила релевантног облика извијања
M	Матрица маса система
$M_{y,Ed}$	Прорачунска вредности момента савијања
$\Delta M_{y,Ed}$	Додатни прорачунски момент савијања услед промене положаја тежишта ефективне површине у односу на тежиште бруто површине попречног пресека
$M_{c,Rd,com}$	Отпорност попречног пресека на савијање
$M_{b,Rd}$	Отпорност елемента на савијање услед глобалног извијања
R	Вектор спољашег оптерећења

Δt	Временски инкремент
U	Вектор померања у тренутном временском инкременту анализе
${}^{t+\Delta t}U$	Вектор померања наредном временском инкременту анализе
${}^{t-\Delta t}U$	Вектор померања у претходном временском инкременту анализе
W_y	Отпорни момент попречног пресека на граници течења
W_{eff}	Ефективни отпорни момент попречног пресека елемента без отвора
$W_{eff,o}$	Ефективни отпорни момент попречног пресека елемента са отвором
W_{el}	Еластични отпорни момент попречног пресека
W_{pl}	Пластични отпорни момент попречног пресека
X	растојање између отвора у ребру
a	Коефицијент имперфекције
β	Однос релативне виткости фланше и релативне виткости ребра одређених према <i>SRPS EN 1993-1-5</i>
γ_{MO}	Парцијални коефицијент за носивост попречног пресека било које класе
ε_e	Инжењерска дилатација
ε_t	Стварна дилатација
$\bar{\lambda}$	Релативна виткост за флексионо извијање
$\bar{\lambda}_{LT}$	Релативна виткост за бочно-торзионо извијање
$\bar{\lambda}_e$	Релативна виткост дела пресека
$\bar{\lambda}_{e,o}$	За равне делове пресека = 0.673; За укрућене делове пресека = 0.65
$\bar{\lambda}_{p,f}$	Релативна виткост фланше одређена према <i>SRPS EN 1993-1-5</i>
$\bar{\lambda}_{p,w}$	Релативна виткост ребра одређена према <i>SRPS EN 1993-1-5</i>
ν	<i>Poisson</i> -ов коефицијент
ξ_{max}	Коефицијент релативног пригушења
ρ	Запреминска маса
σ_e	Инжењерски напон
σ_t	Стварни напон
X	Коефицијент редукције услед флексионог извијања

χ_{LT}	Коефицијент редукације услед бочно-торзионог извијања
ω_{max}	Својствена кружна фреквенција највишег тона осциловања система

1. УВОД

Током претходних неколико деценија употреба танкозидних хладно-обликованих челичних елемената доживела је знатан пораст у области грађевинског, машинског и аеронаутичног инжењерства. Неки од разлога ове експанзије су њихова релативно мала маса у односу на дужину (распон), трајност, бенефити у погледу односа цене и ефикасности током процеса производње, одрживост, итд. Они су често саставни делови конструкција како носећих, тако и преградних и фасадних зидова и међуспратних конструкција. У савременој инжењерској пракси је на располагању широк спектар отворених, затворених и сложених попречних пресека са кружним, правоугаоним или елипсастим отворима у ребру, од којих се најчешће користе C и Z облици попречног пресека [1,2]. Као такви, ови елементи се често производе са отворима у ребру ради постављања електричних, водоводних или грејних инсталација, па се последично очекује смањење њихове носивости. На слици 1.1 су приказани хладно-обликовани елементи C , Z и Σ попречног пресека са отворима у ребру.

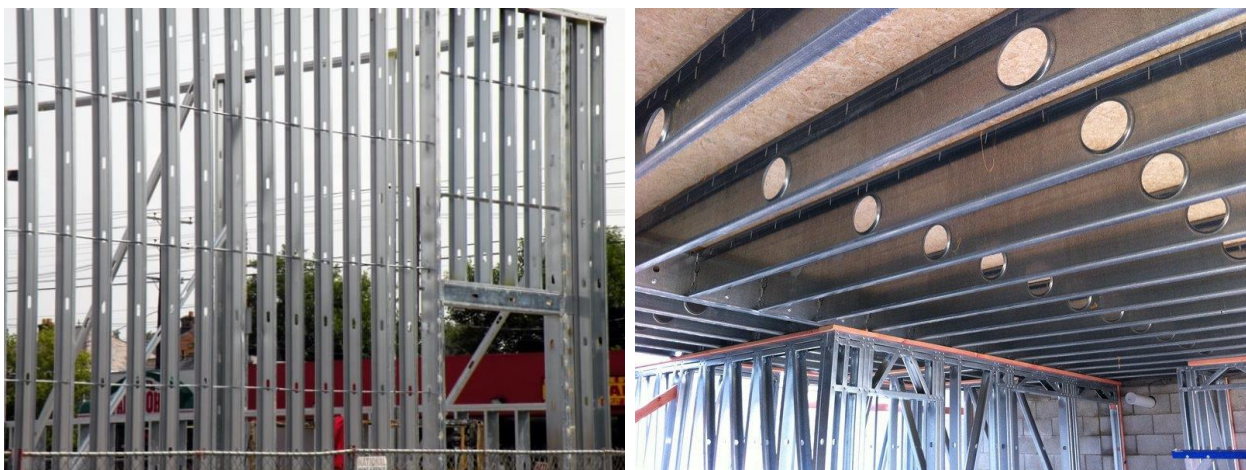


Слика 1.1. Хладно-обликовани челични елементи C , Z и Σ попречног пресека са кружним отворима у ребру

Проблем пада носивости елемента услед постојања отвора у ребру се покушао превазићи постављањем укрућења дуж ребра или фланши, као и дуж ивице отвора. На слици 1.2 приказан је хладно-обликовани челични елемент С пресека са ивичним укрућењем отвора. С обзиром на то да је понашање хладно-обликованих елемената диктирано ефектима губитка стабилности пре него достизањем напона течења материјала, величина и позиција отвора дуж елемента се може испоставити веома битним фактором.



Слика 1.2. Хладно-обликовани челични елемент са ивичним укрућењима отвора



Слика 1.3. Примери примене хладно-обликованих елемената са отворима у ребру у конструкцијама високоградње

Хладно-обликовани челични елементи се производе на један од два начина: хладним ваљањем (енг. *cold roll forming*), превијањем лимова помоћу пресе (енг. *press braking*). Хладно ваљање подразумева формирање челичних елемената пропуштањем табли лимова кроз низ ваљкастих преса на амбијенталној температури, како би се постигао жељени попречни пресек елемената. Обликовање челичних елемената савијањем лимова помоћу пресе подразумева утискивање пресе различитих облика крајева у таблу лима, чиме се лим савија и формира се жељени облик елемента [3]. Будући да се најчешће производе од поцинкованог лима, третирање елемената антикорозивном заштитом изостаје током процеса производње, чиме се постиже уштеда у времену током самог

процеса. На слици 1.4 приказани су неки типови машина које се користе за производњу челичних хладно-обликованих елемената.

Отвори у ребру хладно-обликованих елемената могу се креирати пробијањем или сечењем. Пробивање ребра се врши утискивањем игле за пробијање. Промена облика и величине отвора захтевају заустављање процеса производње, одабир одговарајуће величине игле за пробијање, те њену замену на производној машини. Сечење се најчешће изводи помоћу рачунарске нумерички управљане (енг. *computerized numerical control (CNC) - PNU*) машине или сечењем воденим млазом (енг. *water jet*). Предност сечењем помоћу PNU машине или воденим млазом је у томе што димензије и облик отвора могу бити произвољни, чак и међусобно различити у оквиру једног елемента. Међутим, једино поступком пробијања рупа могуће је креирати ивична укрућења отвора.



Слика 1.4. Машине за производњу хладно-обликованих челичних елемената:
DAHEZB FX350 за производњу хладним ваљањем (горе)
[www.dahezbforming.com/] и *GASPARINI X PRESS 165* преса за савијање лимова
(доле) [www.gasparini.com, www.rollerdie.com]

1.1. ПРЕДМЕТ, ПОТРЕБА И ЦИЉЕВИ ИСТРАЖИВАЊА

Увек актуелни трендови у конструкторству за што ефикаснијом оптимизацијом конструкције у виду искоришћења што мање количине материјала и остварења већих распона, стварају потребу за пројектовањем конструкција које ће

истовремено задовољити оба критеријума. Следећи ове трендове при пројектовању челичних конструкција, често се захтева олакшање конструкцијских елемената креирањем отвора у ребрима ради постављања електричних, водоводних или грејних инсталација. Стога, на тржишту су све присутније фирме које производе хладно-обликоване елементе са већ претходно формираним отворима у ребру, не допуштајући пројектантима могућност избора локације истих.

Будући да су танкозидни хладно-обликовани елементи у већини случајева отвореног попречног пресека због начина њихове производње, њихово понашање и носивост су диктирани стабилитетним ефектима пре него достизањем напона течења материјала, па креирање отвора на елементима свакако неповољно утиче на њихова гранична стања и мења њихово понашање. Неопходна носивост елемената, који су готово по правилу оптерећени истовременим дејством момента савијања и аксијалне силе притиска, обезбеђује се процесом димензионисања. С обзиром на то да прерасподела утицаја (одређених на глобалном моделу конструкције) у елементима зависи од распореда крутости истих, трагање за оптималним попречним пресеком чини процес димензионисања итеративним. Код конструкција од хладно-обликованих елемената, везе између елемената, поготово оних у оквиру међуспратних конструкција, су најчешће зглобне. У тим случајевима, елементи су статичког система просте греде, па је одређивање попречног пресека диктирано меродавним критеријумом стабилности, независно од распореда крутости елемената.

Прорачун носивости хладно-обликованих елемената без отвора према *SRPS EN 1993-1-3* [4] на истовремено дејство притиска и савијања захтева провере на нивоу попречног пресека и на нивоу елемента. Провера на нивоу попречног пресека се своди на контролу критеријума да је збир нормализоване силе притиска и момента савијања мањи од јединичне вредности, односно, налаже усвајање линеарне функције интеракционог дијаграма *N-M*. При томе, попречни пресеци хладно-обликованих елемената су по правилу класе 4, стога, потребно је одредити њихову ефективну површину, и то за сваки сет утицаја из сваке комбинације оптерећења, што је могуће урадити искључиво помоћу софтвера. Провера елемента се своди на контролу глобалног извијања и проверу истог критеријума као у случају контроле попречног пресека, с тим да су сада и нормализована сила притиска и момент савијања степеновани фактором 0.8. Међутим, и даље њихов збир не сме прелазити јединичну вредност. Посебне напомене за отворе у ребру нису дате, већ отвор улази у разматрање кроз прорачун карактеристика ефективног попречног пресека. Дакле, број и распоред отвора дуж елемента није обухваћен овим нормама.

Слично европским нормама, и према северно-америчком стандарду за пројектовање конструкција од хладно-обликованих елемената *AISI S100-2016* [5]

контрола носивости елемента на истовремено дејство притиска и савијања спроводи се контролом критеријума да је збир нормализоване силе притиска и момента савијања мањи од јединичне вредности. Међутим, за разлику од европских норми, у северно-америчким дате су посебне напомене за узимање у обзир отвора у ребру, мада само приликом одређивања прорачунске носивости елемента посебно за стање притиска, посебно за стање савијања. Стога, у оквиру овог стандарда број и распоред отвора дуж елемента обухваћен је једино приликом одређивања вредности еластичног критичног оптерећења у оквиру поступка димензионисања.

Иако су извршена бројна истраживања на пољу танкозидних хладно-обликованих елемената, њихов број који се односи на елементе са отворима није велик. Штавише, број истраживања веома честог случаја у инжењерској пракси - елемента оптерећеног истовремено на притисак и савијање је још скромнији. Један од разлога се може тражити у потешкоћама одржавања константног интензитета попречног оптерећења приликом експерименталног испитивања. Потреба за експерименталним испитивањем оваквог типа премда постоји, како у пројектантској, тако и у истраживачкој заједници.

Ово истраживање, оријентисано ка испитивању танкозидних хладно-обликованих елемената са отворима у ребру оптерећених истовременим дејством савијања и притиска, утврдиће да ли је претпоставка о усвојеној линеарној функцији интеракционог дијаграма $N-M$ оправдана за ове елементе. Уколико није, допринос унапређењу стандарда за пројектовање хладно-обликованих елемената са отворима у ребру ће бити изнет у виду новог облика интеракционог дијаграма. Још један од циљева израде ове дисертације јесте да се утврди у коликој мери су различит број и положај отвора у ребру значајни фактори који утичу на понашање ових елемената. Такође, ово истраживање настоји да обогати садржај експерименталних испитивања танкозидних хладно-обликованих елемената са отворима у ребру оптерећених ексцентричним притиском, који је до тренутка осмишљавања овог истраживања скромног обима.

1.2. КРАТАК ПРИКАЗ САДРЖАЈА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ова докторска дисертација састоји се од девет поглавља. У првом поглављу су представљени предмет и циљеви истраживања.

Тренутно стање у области истраживања је приказано у другом поглављу. Детаљнији опис проблема понашања танкозидних хладно-обликованих елемената услед извијања, као и доступне нумеричке методе за њихово решавање су дате у првом делу овог поглавља. Потом, приказана су досадашња експериментална и нумеричка истраживања из области танкозидних хладно-обликованих елемената

са отворима у ребру. С обзиром на то да досадашња истраживања понашања ових елемената на симултано дејство аксијалне силе притиска и момента савијања нису обимна, представљена су истраживања која се односе на елементе оптерећене изолованим дејствима притиска и савијања. На крају, дат је приказ прорачуна носивости ових елемената према тренутно важећим прописима за пројектовање. Представљене су метода ефективне ширине (*EWM*), инкорпорирана у европским нормама, као и метода директне чврстоће (*DSM*), инкорпорирана у северно-америчким нормама.

У трећем поглављу, уз детаљан опис узорака, изнети су план и опис фаза, као и резултати експерименталног истраживања. Будући да је свака фаза експеримента захтевала његову пажљиву припрему, као и посебну припрему узорака, ови процеси описани су темељно. Уз то, дат је приказ и опис опреме коришћене приликом испитивања. Резултати експеримента представљени су за сваку фазу у виду графичких и табеларних прилога. Графички прилози дати су у форми фотографија и дијаграма посматраних величина.

Понашање елемената у оквиру експерименталног истраживања симулирано је нумеричким анализама методом коначних елемената (МКЕ), и приказано је у четвртом поглављу ове дисертације. Нумеричке анализе модела креираних од површинских коначних елемената (КЕ) урађене су у софтверу *Abaqus*, и послужиле су као основа за калибрацију модела за касније параметарске анализе. За сваки тип узорка су урађене линеарна анализа својствених облика извијања, као и геометријски и материјално нелинеарна анализа.

Након верификације нумеричког рачунског модела и валидације на основу резултата експерименталног истраживања, у петом поглављу спроведена је параметарска анализа са циљем сагледавања утицаја различитих фактора на понашање и носивост хладно-обликованих елемената са отворима у ребру. Параметри који су варирани у оквиру овог дела истраживања су дужина елемента, облик попречног пресека, број и величина отвора у ребру, као и интензитет дејства силе притиска и момента савијања. За сваки тип елемента је урађено 11 анализа са различитим ексцентрицитетима силе притиска. Разматрана су 2 различита попречна пресека, 5 различитих конфигурација отвора и по 2 различите димензије отвора. Такође, за центрично оптерећене елементе је у обзир узет и утицај почетних геометријских имперфекција.

Последња фаза истраживања у оквиру докторске дисертације садржана је у шестом поглављу, у којем су изнете препоруке за дефинисање критеријума носивости елемената оптерећених истовремено на дејство притиска и савијања.

Закључци изведени из целокупног истраживања изнети су у седмом поглављу, уз пожељне правце даљег истраживања запажене током израде ове дисертације.

У осмом поглављу је дат комплетан списак коришћене литературе, који обухвата 111 референци. Међу њима се налазе радови из научних часописа и зборника радова са научних конференција, књиге, стандарди и докторске дисертације.

Последње поглавље представља скуп прилога, који дају опширнији приказ резултата све три фазе експерименталног испитивања, параметарске анализе, као и поступак одређивања носивости узорака према важећим стандардима.

2. ПРЕГЛЕД СТАЊА У ОБЛАСТИ

2.1. ИЗВИЈАЊЕ ТАНКОЗИДНИХ ХЛАДНО-ОБЛИКОВАНИХ ЧЕЛИЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА

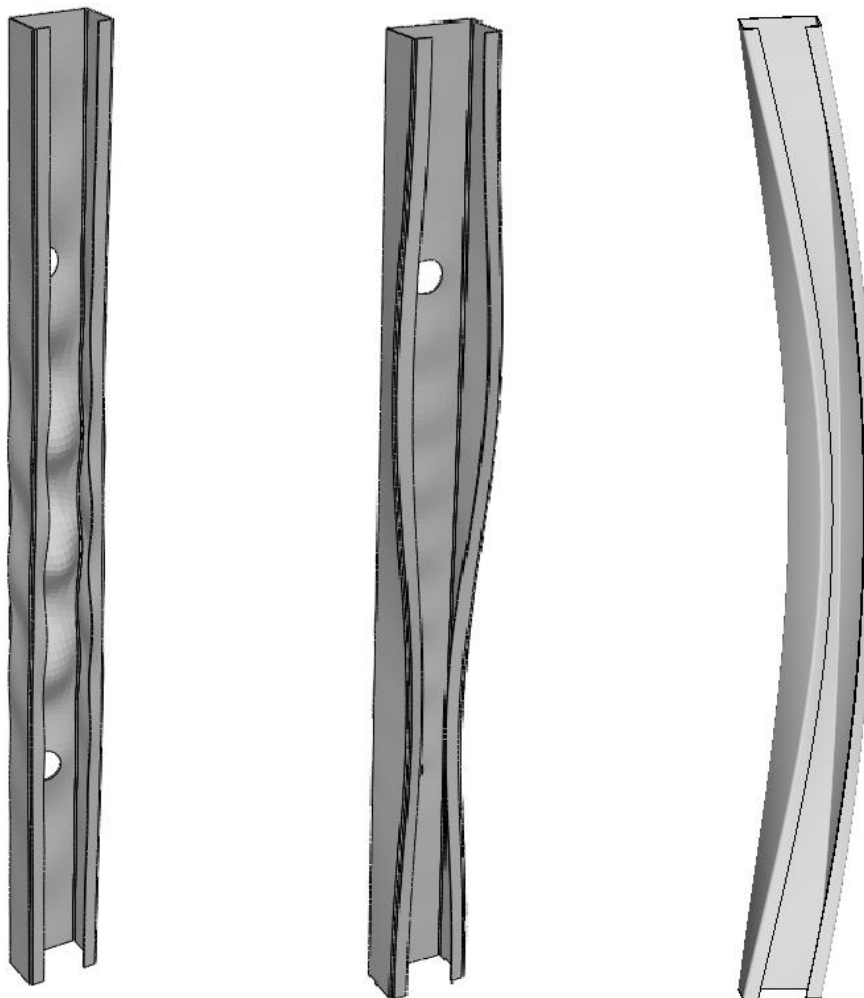
Код хладно-обликованих елемената у чијим се попречним пресецима јављају напони притиска, услед аксијалних сила притиска, савијања или комбинације ова два утицаја, честа је појава феномена губитка стабилности. Губитак стабилности, као један од критеријума контролисаних приликом димензионисања, праћен је извијањем, тј. појавом тренутног и без најаве наглог повећања деформација елемента управно на његову осу услед релативно ниског прираштаја интензитета оптерећења. Будући да је у питању изразито геометријски нелинеаран процес, процена понашања система се не може утврдити екстраполацијом стања које претходи губитку стабилности. С обзиром на високе механичке карактеристике челика, одувек се тежило пројектовању конструкција што мањих дебљина зидова попречног пресека. Стога, феномен губитка стабилности је проблем који се у великом броју јавља код ових конструкција [6].

Проблем извијања је први формулисао *Euler* [7] још 1744. године, разматрајући центрично притиснут идеални штап. Његова теорија еластичног извијања је заснована на низу претпоставки: материјал је хомоген, изотропан и еластичан, торзија елемента је спречена, попречни пресек елемента је константан и једноличан, непостојање геометријских имперфекција. Оптерећење при којем долази до извијања се назива критично оптерећење, а његов интензитет зависи од контурних услова елемента, његове дужине, материјала, као и од облика и димензија попречног пресека. Због ограничења *Euler-ove* теорије у области нелинеарног понашања материјала, допринос у овом пољу касније дали су *Bauschinger* [8], *Engesser* [9], *Tetmajer* [10], *Karman* [11] и *Shanley* [12] и многи други.

Међутим, понашање и губитак стабилности танкозидних хладно-обликованих елемената није увек праћено извијањем у глобалној форми (флексионој, торзионој или бочно-торзионој). Развојем експерименталних метода истраживања, а посебно нумеричких технологија, примећено је да танкозидни елементи могу имати и неке друге форме извијања. У општем случају, облици извијања танкозидних елемената се могу груписати у три фамилије:

- локално извијање пресека (избочавање);
- дисторзионо извијање (кривљење пресека) у комбинацији са локалним савијањем лимова;
- глобално извијање (флексионо, торзионо или бочно-торзионо извијање).

Карактеристични облици извијања танкозидних хладно-обликованих челичних елемената приказани су на слици 2.1.



Слика 2.1. Извијање хладно-обликованих елемената: локално (лево), дисторзионо (средина) и глобално бочно-торзионо (десно)

Локално извијање подразумева деформацију у виду савијања зидова попречног пресека, односно ротацију (не и транслагацију) превојних чворова зидова попречног пресека (тј. углова попречног пресека), при чему углови између појединачних лимова у пресеку остају непромењени. Дужина полуталаса локалног извијања би требало да буде мања или једнака највећој димензији елемента попречног пресека изложеног напону притиска.

Дисторзионо извијање представља комбинацију савијања и торзије зидова попречног пресека, односно и ротацију и транслагацију једног или више превојних чворова зидова попречног пресека. Услед савијања једног или више зидова попречног пресека, те ротације његових углова, остали делови попречног пресека прате деформацију у виду крутих тела. Дужина полуталаса зависи од интензитета

оптерећења и геометрије елемента, и по величини налази се између полуталаса локалног и глобалног извијања [5].

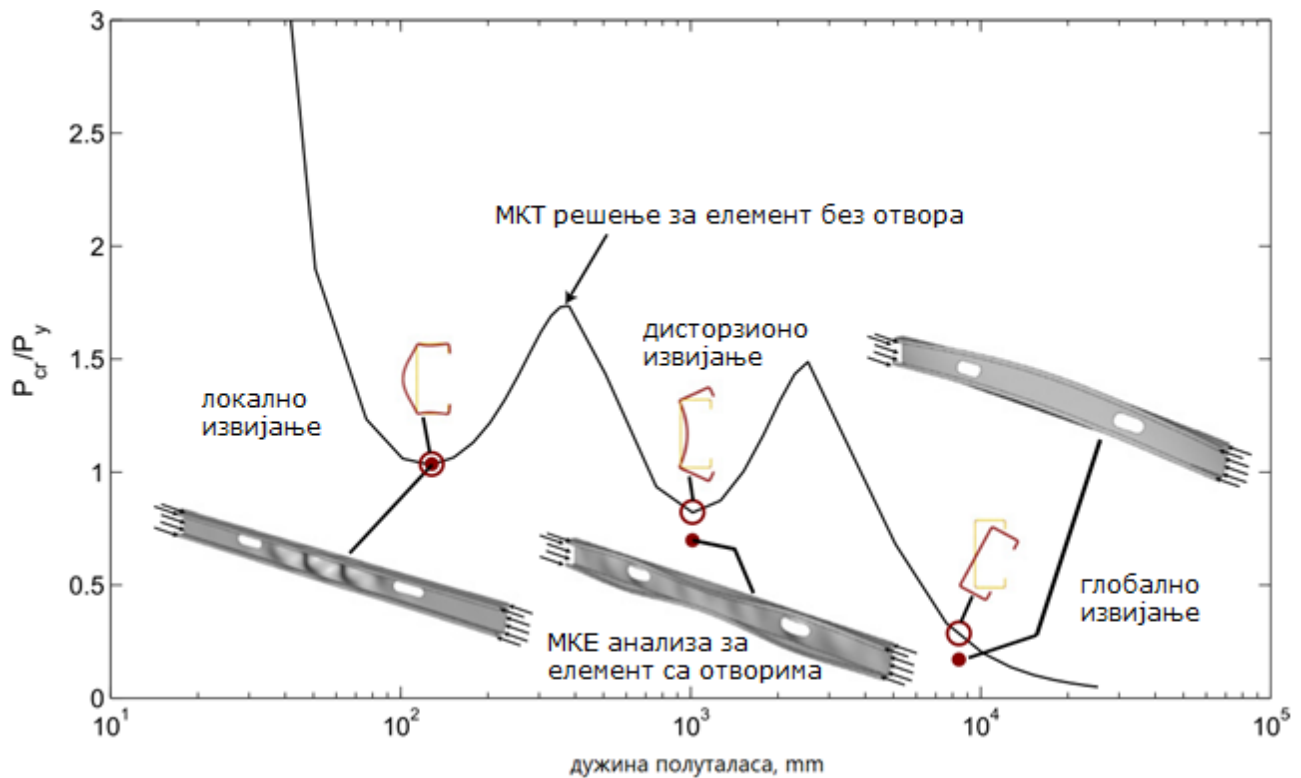
Код глобалног извијања изостају савијање зидова попречног пресека и ротација његових превојних чворова, већ је карактеристична појава транслације (флексионо извијање) и/или ротације (бочно-торзионо извијање) комплетног попречног пресека. Дужина полуталаса извијања овог облика једнака је неукрућеној дужини елемента (дужини између ослонаца, бочно придржаних тачака, итд.).

2.2. НУМЕРИЧКЕ МЕТОДЕ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ КРИТИЧНОГ ОПТЕРЕЋЕЊА

Неколико метода нумеричких анализа за одређивање локалних, дисторзионих и глобалних облика извијања је данас доступно: метода коначних елемената (енг. *finite element method (FEM)* - МКЕ), метода коначних трака (енг. *finite strip method (FSM)* - МКТ) и генерализована теорија греда (енг. *generalised beam theory (GBT)* - ГТГ). Међутим, само је применом МКТ и ГТГ могуће за решења овог задатка добити одабране и изоловане („чисте“) или произвољно комбиноване („спрегнуте“) облике извијања [13].

Док конвенционална МКТ анализа за граничне услове простог ослањања даје прорачунску вредност прве критичне силе извијања за низ различитих дужина елемента, решење ограничене методе коначних трака (енг. *constrained finite strip method (cFSM)* - оМКТ) је оријентисано ка одређивању виших облика извијања елемента тачно одређене дужине за опште граничне услове. На тај начин, оМКТ решење за опште граничне услове веома подсећа на МКЕ решења [14]. оМКТ је садржана у софтверу *CUF5M5 (Ver. 5.04)* [13,15], развијеном од стране проф. *Schafer*-а и његовог тима на *Johns Hopkins* Универзитету у Балтимору, САД. Узимање у обзир присуства отвора у ребру елемента у *CUF5M5* је тренутно у развоју. Међутим, у [16] *Schafer* и *Moep* предлажу креирање модела са нултом дебљином елемента траке на месту отвора у циљу обухватања ефекта присуства истог. На слици 2.2 је приказано МКТ решење еластичног извијања и утицај отвора у МКЕ анализи својствених вредности еластичног извијања.

Слично оМКТ, анализа еластичног извијања танкозидних елемената применом ГТГ је такође модалног карактера. У ГТГ су у обзир узете деформације попречног пресека у његовој равни и ван ње увођењем додатног степена слободе. Најскорији напредак у пољу ГТГ је остварила истраживачка група на Техничком универзитету у Лисабону, под вођством проф. *Kamotim*-а и проф. *Silvestre*-а [17–20]. Они су развили софтвер *GBTUL2 (Ver. 2)* [21], у којем је још увек могуће анализирати само елементе без отвора у ребру.



Слика 2.2. Крива еластичног извијања за хладно-обликовани елемент С попречног пресека (МКТ решење) и утицај отвора у ребру у оквиру МКЕ анализе својствених вредности извијања

Прорачун еластичног извијања танкозидних елемената применом МКЕ у обзир може узети локално и дисторзионо извијање уколико су модели креирани од коначних елемената (КЕ) љуске (енг. *shell*) или тродимензионалних (енг. *solid*) КЕ. Модели сачињени од једнодимензионалних (енг. *beam*) КЕ ове феномене не могу да обухвате, те су ограничени једино глобалним облицима извијања. За разлику од претходно описаних метода, МКЕ дозвољава анализу елемената произвољне геометрије. Овде се пре свега мисли на отворе у ребру, на разне варијације и промене облика које се могу појавити дуж једног елемента, као и на произвољне контурне услове. Са друге стране, категоризација облика извијања захтева субјективну оцену инжењера, при чему је често неопходно визуелно прегледати неколико десетина, па и стотина облика ради проналажења неког од основних облика. Разлог је што се облици извијања јављају најчешће у виду разних комбинација локалних, дисторзионих и глобалних облика.

Узимајући у обзир тренутне могућности у погледу нумеричког моделирања и анализе извијања хладно-обликованих елемената са отворима у ребру, може се закључити да МКЕ и даље остаје оптимална метода за одређивање критичног оптерећења и облика еластичног извијања ових елемената, али због поменутих комплексности у интерпретацији резултата, ретко и коришћена у практичном пројектовању. Стога се за практичне примене далеко више користе МКТ у САД, где

је стандард у сагласности са резултатима ове анализе, или "ручно" димензионисање у Европи, где ГТГ није у сагласности са Еврокодом. У оба случаја, димензионисање елемената са рупама у ребру представља својеврстан проблем, јер није обухваћено поменутиим софтверима и правилницима.

2.3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА И НУМЕРИЧКА ИСТРАЖИВАЊА

С обзиром на тенденцију хладно-обликованих елемената ка извијању у локалном или дисторзионом облику, претходна истраживања у овој области су углавном у фокус стављала кратке елементе и елементе средњих дужина. У таквим ситуацијама, позиција отвора у ребру може да се поклопи са позицијом максималне амплитуде полуталаса извијања [1]. Елементи већих виткости имају тенденцију ка глобалном (флексионом, бочно-торзионом) извијању, те се сматра да код таквих елемената позиција и број отвора у ребру не играју значајну улогу у одређивању облика извијања и интензитета критичног оптерећења. Иако је највећи број истраживања током претходних неколико деценија био оријентисан ка испитивању понашања елемената услед дејства централног притиска или савијања, веома чест случај у инжењерској пракси истовременог дејства притиска и савијања до сада није привукао велику пажњу, бар када су елементи са отворима у ребру у питању. Ексцентрично оптерећене елементе I попречног пресека састављене од по два међусобно спрегнута хладно-обликована елемента C пресека са сложеним типом ивичних укрућења су у свом истраживању испитали *Wang et al.* [22]. Осим њих, нумеричко испитивање овог типа су спровели и *He et al.* [23], и дошли су до закључака да веза између максималних вредности аксијалне силе притиска и момента савијања остаје линеарна, али и да нагиб криве интеракционог дијаграма зависи од типа и облика отказа елемента (локални или дисторзиони). Нешто већи број истраживања овог типа је урађен на елементима без отвора [24,25,34,26–33] и на елементима са малим и густо распоређеним отворима, карактеристичним за стубове металних полица у оквиру складишних система [35–37].

2.3.1. ЕЛЕМЕНТИ ОПТЕРЕЂЕНИ ПРИТИСКОМ

Прва експериментална испитивања хладно-обликованих елемената са отворима у ребру су још 1971. и 1972. године спровели *Yu* и *Davis* [38,39]. Након њих су *Loon* [40] и *Sivakumaran* [41], [42] наставили овај тренд. Ова испитивања су била изведена на кратким стубовима, што је за последицу имало да губитак стабилности по правилу буде локалног облика. Потврђене су претпоставке да присуство отвора утиче на редукацију критичног оптерећења, али и да облик отвора није имао утицај на пост-стабилитетну носивост. Такође, откривено је да такви стубови не могу бити адекватно пројектовани користећи поступке тада важећих канадских и северноамеричких прописа за пројектовање (*CSA S136-1974* [43] и *Specification for*

the design of cold-formed steel structural members design [44], редом), стога је ревизија ових прописа била неопходна.

Нешто касније, обимно експериментално испитивање, на чак 63 узорка, урадили су *Pu et al.* [45] ради утврђивања утицаја положаја отвора у оквиру попречног пресека. Три различита распореда отвора су разматрана: (а) отвори лоцирани на једној и три четвртине висине ребра, (б) отвори на средини висине ребра и (в) отвори у угловима попречног пресека. Испоставило се да величина и позиција отвора битно утичу на смањење носивости, при чему је редукација носивости била најизраженија у случају у коме су отвори били лоцирани у оквиру ефективне површине попречног пресека, тј. у угловима попречног пресека.

Са унапређењем рачунарских способности и софтвера, пажњу истраживача су све више заокупљивала нумеричка истраживања. Међу првима, нумеричке симулације кратких стубова са отворима у ребру оптерећених на притисак 1998. године спровели су *Abdel-Rahman* и *Sivakumaran* [46]. Аутори су дали предлог за *EWM* једначине за одређивање носивости, чију су прецизност потврдили поређењем са резултатима неколико експерименталних истраживања у постојећој литератури. Њихов МКЕ модел се састојао од једне четвртине кратког стуба, будући да су геометрија и оптерећење разматраних проблема двоосно симетрични. За моделирање зидова попречног пресека коришћени су коначни елементи (КЕ) љуске. Равномерно расподељено аксијално померање врха стуба је аплицирано преко круте плоче (*rigid plate*), док је веза круте плоче са КЕ стуба остварена преко простих штапова. Такође, у обзир су биле узете и почетне геометријске имперфекције у виду локалне деформације зидова пресека. У осам симетрије су усвојени услови симетричног ослањања, будући да су експериментална посматрања у докторској дисертацији *Abdel-Rahmana* [47] указала да несиметрични облици извијања немају утицаја на проблем стабилности.

Shanmugam и *Dhanalakshmi* [48] су спровели нумеричку параметарску студију, чији је резултат била поједностављена формулација за прорачун носивости кратких хладно-обликованих стубова *C* попречног пресека. Варирани параметри у овој студији су виткост ребра, величина отвора и однос чврстоће при течењу и граничне чврстоће. МКЕ моделирањем су узети у обзир заостали напони, линеарно променљиви по дебљини зидова пресека, као и почетне геометријске имперфекције у форми комбинације неколико облика извијања. Као и у претходно наведеном истраживању, и овде су поузданост МКЕ модела и предложених једначина носивости потврђени на основу поређења са резултатима постојећих експерименталних и нумеричких испитивања у литератури.

До самог почетка 21. века, одређивање носивости хладно-обликованих елемената је захтевало само познавање параметара попречног пресека, занемарујући чињеницу да се извијање хладно-обликованих елемената не мора нужно дешавати

у глобалном (флексионом) облику. Тек су испитивањем елемената средње виткости отворена врата ка новом истраживачком правцу – елементима чији су доминантни облици извијања дисторзиони облици. *Moen* и *Schafer* су направили велики напредак у овој области. Правила за пројектовање хладно-обликованих елемената са отворима у ребру у [5] су заснована на свеобухватном истраживању представљеном у докторској дисертацији *Моела* [49], чији је преглед истраживања за стубове објављен у [2] и [1]. Испитивање је урађено на кратким стубовима и на стубовима средње дужине, разматрајући два типа *C* попречног пресека са различитим висинама ребра. Циљ ове студије је било утврђивање корелације између локалног и дисторзионог извијања и одговора стубова са отворима у ребру. Локација отвора дуж ребра је одређена тако да се поклопи са позицијом максималне амплитуде полуталаса дисторзионог извијања (по један отвор на кратким и две на стубовима средње дужине). Уочено је да, иако је утицај отвора на пад носивости мали, њихов утицај на понашање након достизања максималне силе и дуктилност елемента је значајнији. На крају, развијен је нови сет израза за одређивање носивости елемената како би се на одговарајући начин узели у обзир ефекти отвора.

Иако је доказано да су *KE* љуске погодни за свакодневну употребу, креирање модела може да буде веома захтевно. На тачност и ефикасност нумеричког модела битно утиче одговарајући избор типа *KE* и густине мреже, а често комплексан задатак представља и дефинисање граничних услова. Осим тога, током процеса пројектовања хладно-обликованих елемената према *DSM* поступку неопходна је и субјективна визуелна идентификација облика извијања. У циљу унапређења процеса пројектовања, *Moen* и *Schafer* [50] су представили поједностављену методу апроксимације глобалних, дисторзионих и локалних критичних оптерећења еластичног извијања хладно-обликованих стубова са отворима. Узимајући у обзир чињеницу да отвори имају различит утицај на различите облике извијања, предложили су употребу одвојених *MKT* модела са модификованим дебљинама елемента за сваки од случајева еластичног извијања.

Предмет истраживања које су спровели *Yao* и *Rasmussen* [51] су били начин преноса оптерећења, расподеле напона и облика лома просто ослоњених плоча и стубова *C* попречног пресека са различитим величинама и распоредом отвора. Они су користили изопараметарску *spline* *MKT* (*ISFSM*, [52,53]), коју су и сами развили. Нагласак њиховог истраживања је стављен на дистрибуцију *von Mises*-овић мембранских напона при различитим нивоима оптерећења и различитим радним дијаграмима материјала. Примећено је да је на понашање и отпорност елемената највећи утицај има висина отвора, док су његова дужина и размаци између њих од мање важности. Понашање хладно-обликованих стубова разних облика попречних пресека (*C*, укрућени *C*, *Z*, регални и шеширасти попречни пресеци) је испитано у

њиховом даљем нумеричком истраживању [54], а резултати су објављени у дводелном раду [55,56]. У овој параметарској студији је у обзир узет широк спектар димензија и размака отвора, материјалних карактеристика и облика почетне геометријске имперфекције. Добијени резултати су упоређени са прорачунском носивошћу одређеном према аустралијском стандарду за пројектовање конструкција од хладно-обликованих елемената (*Cold-formed steel structures AS/NZS 4600:2018*) [57]. Примећена су значајна одступања између нумеричких резултата и прорачунске носивости, чији разлог се може тражити у присуству отвора, интеракције облика извијања, те ограничењу саме методе прорачуна (*DSM*). Стога, предложена су два сета једначина за одређивање носивости танкозидних стубова са отворима у ребру. Предложене методе су упоређене са *DSM* једначинама датим у *AS/NZS 4600:2018* и са Опцијом 4 представљеном у [2]. Закључено је да су највеће варијације у предвиђеним резултатима пре резултат интеракције облика извијања него присуства отвора. Са друге стране, како облик лома, тако и тип и димензије попречног пресека, диктирају колики ће утицај имати присуство отвора на понашање и носивост елемента.

Утицаје позиције и облика отвора у ребру на отпорност стубова *C* попречног пресека су такође испитали *Kulatunga* и *Macdonald* [58] и *Kulatunga et al.* [59]. Испитивања су показала да се највећи пад носивости елемента јавио у случајевима у којима су отвори били у близини крајева елемента. У случају елемената са једним отвором, облик отвора се није испоставио толико важним фактором у погледу носивости стуба. Међутим, у случајевима са два отвора, смањење носивости је било веће код елемената са кружним у односу на оне са овалним отворима исте површине. Примећено је да се при достизању нивоа оптерећења од око 50% носивости јавља локално извијање, док се даљим повећањем оптерећења до вредности од око 70% носивости елемента јављају дисторзиони облици извијања. Прикупљени резултати су такође упоређени са прорачунском носивошћу одређеном према америчком стандарду за пројектовање хладно-обликованих елемената *AISI* из 2012. године [60], британском стандарду *BS 5950-5* [61] и европским стандардима [62] где се испоставило да су вредности добијене стандардима конзервативне.

Током претходних неколико година, ограничења примене конвенционалних хладно-обликованих елемената *C* попречног пресека у погледу величине и размака отвора су довеле до развитка нове групе ових елемената: *C* попречни пресеци са ивичним укрућењима рупа. Правила за пројектовање оваквих елемената још увек нису обухваћена стандардима за пројектовање хладно-обликованих елемената.

Међу првима су утицај ивичних укрућења рупа на понашање хладно-обликованих стубова *C* попречног пресека испитали *Chen et al.* [63], [64]. Можда неочекивано, носивост елемената са ивичним укрућењима рупа је била чак и до 21% већа од

носивости елемената без рупа, док је са друге стране код елемената са неукрућеним рупама примећен пад носивости од 20%. Осим тога, примећено је да се локална деформација, која је претходно била присутна у близини рупе, сада преместила у зону између два отвора. Резултати носивости добијени параметарском нумеричком студијом су упоређени са вредностима прорачунатим према тренутно важећим стандардима за пројектовање хладно-обликованих елемената са неукрућеним отворима, који су се испоставили непоузданим за елементе са ивичним укрућењима рупа. Стога, препоручене су нове једначине за различите виткости стуба, чија суштина лежи у факторисању аксијалне отпорности елемента одређене једначинама предложеним од стране *Moena* и *Schafera* [1,2,50,65].

Проблемом предвиђања стабилитетног понашања хладно-обликованих стубова и греда са ивичним укрућењима рупа су се бавили *Grey* и *Moel* [66]. За одређивање глобалног критичног оптерећења, пондерисана/тежинска просечна (*weighted average*) својства попречног пресека су убачена у изразе за одређивање критичних вредности услед глобалног флексионог и торзионог извијања. С обзиром на то да је уочено да уклањање дела пресека у зони рупе умањује савојну крутост попречног пресека, а да је ивична укрућења рупа повећавају, нови израз за одређивање ефективне дебљине ребра је предложен за случајеве дисторзионог извијања.

У циљу повећања крутости попречног пресека, *C* попречни пресеци се могу произвести са двоструким ивичним укрућењима (сложена ивична укрућења или *G* попречни пресек). Понашање и носивост таквих стубова (кратки и стубови средње дужине) са рупама дуж ребра је експериментално и нумерички истражено од стране *Wang et al.* [67], [68]. Осим елемената *G* попречног пресека, разматрани су и елементи Σ попречног пресека (пресеци са укрућењима ребра). Запажено је да елементи Σ попречног пресека са отворима у ребру имају 30% до 50% већу носивост у односу на елементе *G* попречног пресека. Међутим, пад носивости *C* попречних пресека услед присуства рупа је износио око 6%, док је у случајевима Σ попречних пресека тај пад био око 25%. Истовремено, ни облик рупа ни размак између њих нису имали пресудан утицај на пад носивости. Док је код кратких стубова *C* попречног пресека водећи облик отказа био облик локалног извијања, код Σ попречних пресека је то била комбинација локалног и дисторзионог облика. У случајевима стуба средње дужине, комбинација локалног и флексионог облика извијања је била доминантан облик отказа код елемената *C* попречног пресека, а комбинација дисторзионог и флексионог код Σ попречних пресека. Упркос чињеници да тренутне *DSM* једначине доводе до нешто другачијих вредности чврстоће у односу на оне добијене МКЕ анализама, закључено је да је *DSM* и даље примењив у случајевима стубова са отворима у ребру и са једноставним и сложеним

ивичним укрућењима. До сличних закључака су дошли и *Xiang et al.* [69] испитујући стубове G попречног пресека са рупама.

Експериментално испитивање кратких, средње дугих и дугих стубова вишеделног I попречног пресека са рупама дуж ребра и сложеним укрућењима су спровели *Wang et al.* [22]. У случајевима кратких и средње дугих стубова, водећи облик отказа је био дисторзиони, будући да су укрућења ребра спречила појаву локалног извијања. Осим тога, ефекат укрућења ребра је примећен и у виду смањења деформације у близини рупе. Са друге стране, водећи облик отказа дугих стубова је био глобални (савојни), што је указало да у случајевима дугих стубова укрућења ребра не утичу на носивост. Параметарском студијом утврђено је да су оптималне вредности односа величине рупе и димензије укрућеног дела ребра између 0.7 и 0.8. С обзиром на то да *DSM* једначине за вишеделне I попречне пресеке тренутно не постоје, запажено је да једначине предложене од стране *Moena* и *Schafera* [2] и *Yaoa* и *Rasmussena* [56] дају довољно прецизну вредност носивости елемената.

Понашање и носивост хладно-обликованих стубова L попречног пресека са отворима у ребру су експериментално и нумерички, а касније и параметарски испитали *Dhanalakshmi* и *Shanmugam* [70]. Као што је и било очекивано, присуство рупа је утицало на смањење носивости елемента. У раду су предложене једначине за прорачун носивости, које са задовољавајућом прецизношћу у односу на експерименталне резултате предвиђају носивост елемента.

2.3.2. ЕЛЕМЕНТИ ОПТЕРЕЂЕНИ САВИЈАЊЕМ

Средином деведесетих година прошлог века група истраживача предвођена *Shanom*, а под менторством проф. *W. W. Yua*, са Универзитета *Missouri* из Роле, САД, је започела програм експерименталног испитивања хладно-обликованих елемената са отворима у ребру услед дејства савијања и смицања [71]. Фаза у којој је испитано савијање ових елемената је приказана у [72]. Испитивање је било рађено на узорцима који су се састојали од два просто ослоњена повезана елемента C попречног пресека, окренутим лице у лице, оптерећеним попречним оптерећењем у виду двеју концентрисаних сила (савијање у 4 тачке). Лом услед локалног извијања се јављао код већег броја узорака, у односу на дисторзионо извијање, при чему је носивост на савијање углавном зависила од односа величине отвора и висине ребра. Испитане су три различите методе за одређивање носивости. Најтачнијом се показала метода нето попречног пресека, док је модификација методе из *AISI* стандарда за пројектовање хладно-обликованих елемената из 1986. године [73] преценила носивост елемента на савијање. Нешто другачија поставка теста је коришћена у [74], где је изучавано понашање услед интеракције савијања и смицања. У овим случајевима је водећи узрок лома било локално извијање у зонама око рупе и зонама концентрисаног оптерећења. Носивост елемента је

одређена применом интеракционих једначина датим у [73], и закључено је да утицај рупа може бити узет у обзир са задовољавајућом тачношћу уколико се појединачне носивости на смицање и савијање модификују.

За разлику од претходних истраживања, у експерименталном испитивању греда *C* попречног пресека са правоугаоним рупама *Moena et al.* [75] примећена је појава дисторзионог извијања са максималном амплитудом на месту рупе, праћено локалним извијањем притиснутог дела ребра у зони отвора. У сваком од тестова, лом се прво појавио на једној од две греде. Са повећањем висине рупе, локално извијање ребра је било замењено локалним извијањем дела притиснуте фланше изнад рупе. Моментни капацитет испитаних узорака је упоређен са *DSM* једначинама *AISI* стандарда за пројектовање хладно-обликованих елемената из 2007. године [76]. Постигнута је довољна тачност, иако је у неким случајевима носивост елемента била потцењена.

Wang и *Young* [77] су на основу експерименталног испитивања дошли до закључка да носивост опада брже када је однос пречника рупе и висине ребра већи од 0.5. Прорачун еластичног критичног локалног и дисторзионог момента вишеделних пресека је разматран кроз више различитих приступа, будући да је прорачун у стандардима намењен примени у случајевима појединачних греда. Закључено је да је поступак прорачуна у *AISI S100-2012* довољно прецизан и у случајевима вишеделних попречних пресека. У наредном делу њихове студије [78], *Wang* и *Young* су урадили параметарско истраживање, испитујући различите виткости попречног пресека и величине отвора. Носивости на савијање добијене експерименталним и нумеричким анализама су упоређене са прорачунским вредностима добијеним према *AISI S100-2016*. Испоставило се да је поступак овим стандардом довољно прецизан и у случајевима отворених вишеделних попречних пресека са рупама, док је у случајевима затворених вишеделних попречних пресека прилично конзервативан. Из тог разлога су предложене модификације *DSM* једначина за елементе затвореног вишеделног попречног пресека са рупама.

На основу нумеричких и аналитичких анализа, *Yuan et al.* [79] су потврдили да је повећање величине рупе утицало на смањење вредности критичног момента дисторзионог извијања и повећање дужине одговарајућег полу-таласа извијања. Нумеричке анализе су спроведене употребом МКЕ софтвера, док је аналитички модел успостављен према препорукама датим у *SRPS EN 1993-1-3*. Смањење ротационе крутости ребра у односу на притиснуту фланшу, изазвано увођењем рупа, може се узети у обзир употребом предложених фактора редукције.

Исти тим истраживача је у свом наредном истраживању [80] дошао до закључка да модел који се састоји од фланше и превоја (који је први представио *Hancock* [81] за елементе без рупа) може бити употребљен и за предикцију напона при дисторзионом извијању греде *C* попречног пресека са рупама дуж ребра, под

условом да је крутост ротационе опруге правилно редукована. Штавише, препоручени аналитички модел предвиђа критични напон дисторзионог извијања прецизније у односу на модификовану методу представљену у [79].

У циљу процене поузданости прорачунске методе дате у *AISI S100-2016*, *Zhao et al.* [82] су спровели експеримент у којем су узорке хладно-обликованих греда *C* попречног пресека са правоугаоним рупама подвргнули *4-point-bending* тесту. Узорци су извијање испољавали у комбинацији локалног и дисторзионог облика. Међутим, преовлађујући облик код елемената са краћим ивичним укрућењима фланши је био дисторзиони облик извијања, док је локални облик био доминантан код елемената са дужим ивичним укрућењима. Слично као у [77], смањење отпорности на савијање је било евидентније када је однос пречника рупе и висине ребра био већи од 0.4. Осим тога, примећено је да су за греде, код којих је локални облик извијања био доминантан, неопходне модификације тренутних једначина датих у *AISI S100-2016*.

Нумеричко истраживање *Moena* и *Schafera* [50], поменуто у претходном одељку, такође се бави проблемом еластичног извијања греда са отворима у ребру услед савијања. Као и у случају стубова, неопходни су различити модели за сваки од типова еластичног извијања, будући да рупе утичу на различите начине при различитим облицима извијања. Концепт пондерисаних просечних (*weighted average*) својстава попречног пресека за апроксимацију торзионо-флексионог извијања, као и принцип редуковане дебљине за предикцију дисторзионог извијања могу бити примењени и на греде са отворима у ребру. Са друге стране, за одређивање критичног оптерећења услед локалног извијања треба разматрати само оне облике, чији су полу-таласи краћи од дужине рупе у моделу са нето пресеком.

Ling et al. су у својој нумеричкој студији [83] испитали утицај различитих облика, величина, броја и размака отвора, као и одстојања отвора у односу на ивице попречног пресека. Иако су ниже вредности критичног момента и биле очекиване услед увођења отвора, требало би напоменути да је најмањи пад забележен у случајевима шестоугаоних отвора.

Идеја да се смањење носивости елемента сведе на минимум увођењем ивичних укрућења отвора је присутна и код хладно-обликованих елемената оптерећених на савијање. Претходно коментарисано истраживање *Greya* и *Moena* [66] бави се и испитивањем утицаја ивичних укрућења рупа услед еластичног извијања греда. Концепт одређивања глобалног, дисторзионог и локалног критичног оптерећења прати идентичне идеје наведене у [50] за елементе са рупама без ивичних укрућења.

Yu [84] је у свом истраживању дошао до закључка да увођење укрућења отвора не води повећању критичног момента бочно-торзионог извијања, већ је забележен његов мали пад. Међутим, у случајевима локалног и дисторзионог извијања, забележено је повећање критичног момента. Мањи размаци између отвора су утицали на повећање критичног момента, будући да се код већих размака дозвољава формирање оригиналног, нижег, облика извијања (полу-таласа мање дужине) између отвора, што значи да ће се греда понашати исто као и она без отвора. На крају, за греде *C* попречног пресека са ивичним укрућењима отвора препоручена је нова прорачунска процедура заснована на *DSM*.

С обзиром на то да се носивост елемената драстично смањује увођењем отвора дуж ребра, осим увођења ивичних укрућења отвора, једна од могућности да се то смањење редукује јесте локално ојачање ребра у околини рупе. *Sivakumaran et al.* [85] су на гредама *C* попречног пресека експериментално тестирали неколико различитих шема ојачања у циљу одређивања најадекватније шеме. У обзир су узета три различита облика отвора: кружни, квадратни и правоугаони. Узорци без рупа су доживели лом услед локалног извијања притиснуте фланше и притиснуте зоне ребра. Исти карактер извијања је могао бити уочен и на узорцима са рупом, при чему се локално извијање десило на месту рупе. Осим тога, моментни капацитет се смањио за око 10% у односу на елементе без рупа. Анализиране су две шеме локалног ојачања ребра. Уочено је да је ојачање било од користи у зони блиској притиснутим ивицама отвора, будући да је тако постављено утицало на смањење локалног извијања, док је утицај ојачања у зонама блиским затегнутим ивицама отвора био безначајан. Осим тога, препоручено је да шrafoви за везу ојачања са елементом буду постављени што је ближе могуће један другом. Смањење моментне носивости елемената са локалним ојачањима ребра је било занемарљиво у односу на елементе без отвора.

Са уобичајеним циљем повећања носивости елемената, у Аустралији је развијена нова фамилија *C* попречних пресека који се састоје од ребра и двеју правоугаоних шупљих фланши. Ови елементи су названи *LiteSteel Beams (LSB)*. Због својих торзионо крутих фланши, мале масе и ниске цене производње, примена *LSB* је остварила запажен напредак у последњих неколико година. Експерименталне тестове *LSB* греда са отворима дуж ребра су међу првима урадили *Pokharel* и *Mahendran* [86] и закључили да је преовлађујући облик извијања био бочно-дисторзиони. У свом наредном истраживању понашања *LSB* греда са рупама, *Seo* и *Mahendran* [87] су увидели да је осетљивост *LSB* греде на присуство рупа мала, будући да није забележен пад моментне носивости већи од 13%. Такође, испоставило се и да размак између рупа има минималан утицај на моментну носивост елемента. На крају, предложене су једначине за еквивалентну дебљину ребра и за одређивање моментног капацитета елемената са рупама.

Испитивање понашања услед константног момента савијања дуж *LSB* греде са рупама и методе за предикцију критичног момента услед еластичног бочно-дисторзионог извијања су у нумеричком истраживању приказали Seo et al. [88]. Четири различите једначине су предложене за одређивање еквивалентне редуковане дебљине ребра, чија је тачност верификована МКЕ анализама.

2.4. ПРОРАЧУН И ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ ХЛАДНО-ОБЛИКОВАНИХ ЕЛЕМЕНАТА СА РУПАМА ПРЕМА ТРЕНУТНО ВАЖЕЋИМ ПРОПИСИМА

Први стандард за пројектовање хладно-обликованих елемената је објављен 1946. године од стране Америчког института за гвожђе и челик (енг. *American iron and steel institute - AISI*) под називом *Specification for the design of light gage steel structural members* [89]. Од тада, велики напор је уложен у истраживању ради побољшања стандарда за пројектовање хладно-обликованих елемената. Током година, стандарди за пројектовање су се побољшавали у погледу поузданости и приступачности пројектантима, увек укључујући најновија сазнања о понашању ових елемената.

Тренутно четири водећа стандарда за пројектовање конструкција од хладно-обликованих елемената у свету су:

1. *North American specification for the design of cold-formed steel structural members S100-2016 (AISI)* [5];
2. *Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting EN 1993-1-3:2013 (European Committee for Standardization - CEN)* [62];
3. *Cold-formed steel structures AS/NZS 4600:2018 (Technical committee BD-082, Joint Standards Australia/Standards New Zealand)* [57];
4. *Technical code of cold-formed thin-wall steel structures GB 50018-2002 (Chinese Technical code)* [90].

У овим стандардима су представљена два потпуно различита приступа пројектовању конструкција од танкозидних хладно-обликованих профила:

1. метода директне чврстоће (енг. *Direct strength method - DSM*);
2. метода ефективне ширине (енг. *Effective width method - EWM*).

У северноамеричким [5] и аустралијским/новозеландским [57] стандардима за пројектовање су инкорпориране обе методе прорачуна, и њима је обухваћено пројектовање хладно-обликованих елемената са рупама дуж ребра. Са друге стране, европски [62] и кинески [90] стандарди користе само *EWM*, а упутства за елементе са рупама нису дата. Штавише, ни број ни распоред рупа дуж елемента не утичу на прорачун отпорности елемената ни у једном од горе поменутих

стандарда за пројектовање. Смернице за пројектовање хладно-обликованих елемената са малим и густо постављеним перфорацијама дуж елемента су дате у *EN 15512* [91]. Према овом документу, елементе оптерећене на притисак треба пројектовати тестирањем, док је употреба поступка датог у стандардима дозвољена за затегнуте елементе.

Прорачун носивости према *DSM* је заснован на решењима еластичног извијања елемента, при чему је пост-еластична резерва чврстоће узета у обзир. Утицај рупа је обухваћен преко пондерисаних просечних (енг. *weighted average*) својстава попречног пресека. Према [5], за елементе подвргнуте чистом затезању, чврстоћа елемента се одређује на основу напона на граници течења и карактеристика нето попречног пресека. У случајевима чистог притиска или савијања, чврстоћа елемента се одређује за три гранична стања:

1. течење материјала и глобално извијање;
2. локално извијање у интеракцији са течењем материјала и глобалним извијањем;
3. дисторзионо извијање.

Прорачун чврстоће на смицање и улубљење ребра (*web crippling*) елемената са рупама дуж ребра је према [5] дефинисан само за елементе *C* попречног пресека. Одредбе дефинисане у овом случају важе само под одређеним ограничењима, при којима се номинална чврстоћа на смицање и улубљење ребра *C* попречног пресека без рупа множе одговарајућим фактором редукције.

Одређивање носивости елемената услед комбинованог дејства притиска и савијања се своди на проверу критеријума да је збир нормализоване силе притиска и момента савијања мањи од јединичне вредности, па је одговарајући интеракциони дијаграм линеарна функција. Теоријске основе *DSM* приступа за челичне хладно-обликоване греде са рупама и примери прорачуна су дати у [16].

EWM се користи за прорачун носивости уобичајених типова хладно-обликованих пресека и захтева сложено итеративну процедуру [92], што аутоматизацију поступка пројектовања чини неопходном. Прорачун отпорности у [62] је дат за аксијално затезање и притисак, савијање, смицање, торзију и њихове интеракције, док се, за разлику од *DSM*, пост-еластичне резерве не разматрају. Будући да се присуство рупа уводи преко нето својства попречног пресека, најнеповољнији распоред рупа се мора узети у обзир.

2.4.1. ПРОРАЧУН ПРЕМА SRPS EN 1993-1-3:2013

Према важећим нормама за прорачун и пројектовање челичних конструкција, носивост елемената оптерећених аксијалном силом притиска и/или моментом савијања зависи од мере у којој су делови њихових попречних пресека подложни

избочавању. Ова њихова особина је квантификована кроз тзв. класе попречног пресека. Припадност попречног пресека одређеној класи диктира и методе како глобалне, тако и анализе попречног пресека. На глобалном нивоу конструкције, попречни пресеци класе 1 захтевају примену пластичне анализе, док попречни пресеци класа 2, 3 и 4 захтевају примену еластичне анализе. На нивоу попречног пресека елемента, пластична анализа се примењује на елементе чији су попречни пресеци класе 1 и 2, а еластична анализа у случајевима класа 3 и 4. Додатно, приликом прорачуна попречног пресека класе 4, треба узети у обзир карактеристике ефективног попречног пресека (ефективну површину попречног пресека - A_{eff} и ефективни отпорни момент - W_{eff}), тј. у анализи занемарити све притиснуте делове пресека за које се сматра да ће се у њима јавити избочина [93]. Носивост попречног пресека на комбиновано дејство аксијалне силе притиска и момента савијања око јаче осе је дефинисана критеријумом:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{M_{cy,Rd,com}} \leq 1.0 \quad (2.1)$$

где су N_{Ed} и $M_{y,Ed}$ прорачунске вредности аксијалне силе притиска и момента савијања, а $\Delta M_{y,Ed}$ додатни прорачунски момент савијања услед померања тежишта ефективног попречног пресека у односу на тежиште бруто попречног пресека за величину e_{Ny} и узима се као:

$$\Delta M_{y,Ed} = N_{Ed} e_{Ny} \quad (2.2)$$

Отпорност попречног пресека на притисак $N_{c,Rd}$ се одређује у зависности од тога да ли је ефективна површина једнака или је мања од бруто површине попречног пресека:

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} f_{yb}}{Y_{M0}} \quad \text{за } A_{eff} < A_g$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A_g \left(f_{yb} + (f_{ya} - f_{yb}) \cdot 4 \cdot \left(1 - \frac{\bar{\lambda}_e}{\bar{\lambda}_{e0}} \right) \right)}{Y_{M0}} \leq \frac{A_g f_{ya}}{Y_{M0}} \quad \text{за } A_{eff} = A_g \quad (2.3)$$

где је $\bar{\lambda}_e$ релативна виткост дела пресека и одговара вредностима $\bar{\lambda}_p$ за равне делове пресека и $\bar{\lambda}_d$ за укрућене делове пресека. Отпорност попречног пресека на савијање $M_{c,Rd,com}$ се одређује у зависности од тога да ли је ефективни отпорни момент једнак или је мањи од отпорног момента бруто попречног пресека, при чему је отпорни момент одређен за притиснуту ивицу попречног пресека:

$$M_{c,Rd,com} = \frac{W_{eff} f_{yb}}{Y_{M0}} \quad \text{за } W_{eff} < W_{el}$$

$$M_{c,Rd,com} = \frac{f_{yb} \left(W_{el} + (W_{pl} - W_{el}) \cdot 4 \cdot \left(1 - \frac{\bar{\lambda}_{e,max}}{\bar{\lambda}_{e0}} \right) \right)}{Y_{M0}} \leq \frac{W_{pl} f_{ya}}{Y_{M0}} \quad \text{за } W_{eff} = W_{el} \quad (2.4)$$

Ефективне карактеристике попречног пресека се одређују узимајући у обзир утицаје локалног и дисторзионог избочавања. За случај локалног избочавања, ефективне карактеристике се одређују сагласно поступку датом у *SRPS EN 1993-1-5* [94]. Према овом поступку, ефективне ширине су одређене за сваки од делова пресека понаособ. Ефекти дисторзионог извијања могу бити обухваћени или употребом линеарне или нелинеарне анализе извијања нумеричким методама или према упрошћеном поступку датом у *SRPS EN 1993-1-3*.

Осим прорачуна попречног пресека, потребно је одредити и носивост елемента услед извијања. У овом случају, термин „извијање“ односи се само на извијање у неком од глобалних облика: савојни, торзиони, бочно-торзиони. Дисторзионе и локалне облике извијања Еврокод не препознаје у овом облику, већ само приликом прорачуна на нивоу попречног пресека. Према *SRPS EN 1993-1-3* носивост елемента услед извијања на комбиновано дејство аксијалне силе притиска и момента савијања око јаче осе је дефинисана критеријумом:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \right)^{0.8} + \left(\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \right)^{0.8} \leq 1.0 \quad (2.5)$$

где су $N_{b,Rd}$ и $M_{b,Rd}$ редом отпорност елемента на притисак услед извијања (флексионог, торзионог или торзионо-флексионог) и отпорност елемента на савијање. Отпорност елемента на притисак услед извијања одређује се према поступку датом у *SRPS EN 1993-1-1* [95]:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{Y_{M1}}$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1.0 \quad (2.6)$$

$$\Phi = 0.5 \left[1 + a(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2 \right]$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}}$$

где су a фактор имперфекције, чија вредност зависи од криве извијања, а N_{cr} еластична критична сила релевантног облика извијања. За C попречне пресеке препоручује се употреба криве извијања b , па коефицијент a има вредност 0.34. Отпорност на притисак услед торзионог извијања треба узети у обзир само у

случајевима централне симетрије попречног пресека, тј. пресека који су симетрични у односу на једну тачку (Z попречни пресеци и сл.). За једноосно симетричне попречне пресеке, какав је свакако C пресек, отпорност на притисак услед торзионо-флексионог извијања може бити меродавна.

Отпорност елемента на савијање услед бочно-торзионог извијања одређује се такође према поступку датом у *SRPS EN 1993-1-1*:

$$M_{b,Rd} = \frac{X_{LT} W_{eff,y} f_y}{Y_{M1}}$$

$$X_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1.0$$

$$\Phi_{LT} = 0.5 \left[1 + a_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}$$
(2.7)

2.4.2. ПРОРАЧУН ПРЕМА AISI S100-2016 (DSM МЕТОДА)

Као и у случају европских норми, и у северно-америчким се провера носивости хладно-обликованих елемената услед истовременог дејства притиска и једноосног савијања своди на проверу критеријума:

$$\frac{\bar{P}}{P_a} + \frac{\bar{M}_x}{M_{ax}} \leq 1.0$$
(2.8)

где су \bar{P} и \bar{M}_x прорачунска аксијална сила притиска и прорачунски момент савијања, а P_a и M_{ax} отпорности елемента на притисак и савијање, одређени према упутствима датим за елементе оптерећене појединачним дејством притиска или савијања. Отпорности елемента на притисак и савијање се према *DSM* методи одређују за 3 различита случаја:

1. течење материјала и глобално извијање;
2. локално извијање у интеракцији са течењем материјала и глобалним извијањем;
3. дисторзионо извијање.

Отпорност на притисак за случај течења материјала и глобалног извијања се одређује према следећем поступку:

$$\begin{aligned}
P_{ne} &= A_g F_n \\
F_n &= (0.658^{\lambda_c^2}) F_y \text{ за } \lambda_c \leq 1.5 \\
F_n &= \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) F_y \text{ за } \lambda_c > 1.5 \\
\lambda_c &= \sqrt{\frac{F_y}{F_{cre}}}
\end{aligned} \tag{2.9}$$

где су A_g бруто површина попречног пресека, F_n напон притиска, F_y напон на граници течења, F_{cre} најмања вредност критичног напона услед флексионог, торзионог или торзионо-флексионог извијања.

Отпорност на притисак за случај локалног извијања се за елементе са отворима у ребру одређује према следећем поступку:

$$\begin{aligned}
P_{nl} &= P_{ne} \leq P_{ynet} = A_{net} F_y \quad \text{за } \lambda_l \leq 0.776 \\
P_{nl} &= \left[1 - 0.15 \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0.4} \right] \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0.4} P_{ne} \leq P_{ynet} = A_{net} F_y \quad \text{за } \lambda_l > 0.776 \\
\lambda_l &= \sqrt{\frac{P_{ne}}{P_{crl}}}
\end{aligned} \tag{2.10}$$

где је P_{ne} отпорност на притисак при течењу и глобалном извијању одређена према једначини (2.9), P_{crl} критично оптерећење за случај локалног извијања и A_{net} нето површина попречног пресека на месту отвора.

Отпорност на притисак за случај дисторзионог извијања се за елементе са отворима у ребру одређује према следећем поступку:

$$\begin{aligned}
P_{nd} &= P_{ynet}, \quad P_{ynet} = A_{net} F_y \quad \text{за } \lambda_d \leq \lambda_{d1} \\
P_{nd} &= P_{ynet} - \left(\frac{P_{ynet} - P_{d2}}{\lambda_{d2} - \lambda_{d1}} \right) (\lambda_d - \lambda_{d1}) \quad \text{за } \lambda_{d1} < \lambda_d \leq \lambda_{d2} \\
P_{nd} &= \left[1 - 0.25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} \right] \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} P_y \quad \text{за } \lambda_d > \lambda_{d2} \\
\lambda_d &= \sqrt{\frac{P_y}{P_{crd}}}, \quad P_y = A_g F_y \\
\lambda_{d1} &= 0.561 \left(\frac{P_{ynet}}{P_y} \right) \\
\lambda_{d2} &= 0.561 \left[14 \left(\frac{P_y}{P_{ynet}} \right)^{0.4} - 13 \right] \\
P_{d2} &= \left[1 - 0.25 \left(\frac{1}{\lambda_{d2}} \right)^{1.2} \right] \left(\frac{1}{\lambda_{d2}} \right)^{1.2} P_y
\end{aligned} \tag{2.11}$$

где је P_{crd} вредност критичне силе услед дисторзионог извијања.

Отпорност на савијање за случај течења материјала и глобалног извијања се одређује према следећем поступку:

$$\begin{aligned}
 M_{ne} &= W_f F_n \leq M_y = W_{fy} F_y \\
 F_n &= F_y && \text{за } F_{cre} \geq 2.78 F_y \\
 F_n &= \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10 F_y}{36 F_{cre}} \right) && \text{за } 2.78 F_y > F_{cre} > 0.56 F_y \\
 F_n &= F_{cre} && \text{за } F_{cre} \leq 0.56 F_y
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

где су W_f еластични отпорни момент бруто попречног пресека у односу на највише притиснуто влакно пресека, F_{cre} најмања вредност критичног напона услед бочно-торзионог извијања.

Отпорност на савијање за случај локалног извијања се за елементе са отворима у ребру одређује према следећем поступку:

$$\begin{aligned}
 M_{nl} &= M_{ne} \leq M_{ynet} = W_{fnet} F_y && \text{за } \lambda_l \leq 0.776 \\
 M_{nl} &= \left[1 - 0.15 \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0.4} \right] \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0.4} M_{ne} \leq M_{ynet} = W_{fnet} F_y && \text{за } \lambda_c > 0.776 \\
 \lambda_l &= \sqrt{\frac{M_{ne}}{M_{crl}}}
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

где је M_{ne} отпорност на савијање за случај течења материјала и глобалног извијања одређена према једначини (2.12), M_{crl} критично оптерећење за случај локалног извијања и W_{fnet} отпорни момент нето попречног пресека на месту отвора.

Отпорност на притисак за случај дисторзионог извијања се за елементе са отворима у ребру одређује према следећем поступку:

$$\begin{aligned}
M_{nd} &= M_{ynet} , \quad M_{ynet} = S_{fnet} F_y && \text{за } \lambda_d \leq \lambda_{d1} \\
M_{nd} &= M_{ynet} - \left(\frac{M_{ynet} - M_{d2}}{\lambda_{d2} - \lambda_{d1}} \right) (\lambda_d - \lambda_{d1}) \leq \\
&\leq \left[1 - 0.22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} \right] \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} M_y && \text{за } \lambda_{d1} < \lambda_d \leq \lambda_{d2} \\
M_{nd} &= \left[1 - 0.22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} \right] \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} M_y && \text{за } \lambda_d > \lambda_{d2} \\
\lambda_d &= \sqrt{\frac{M_y}{M_{crd}}} , \quad M_y = S_f F_y \\
\lambda_{d1} &= 0.673 \left(\frac{M_{ynet}}{M_y} \right)^3 \\
\lambda_{d2} &= 0.673 \left[1.7 \left(\frac{M_y}{M_{ynet}} \right)^{2.7} - 0.7 \right] \\
M_{d2} &= \left[1 - 0.22 \left(\frac{1}{\lambda_{d2}} \right) \right] \left(\frac{1}{\lambda_{d2}} \right) M_y && (2.14)
\end{aligned}$$

У стандарду су дате препоруке за аналитички прорачун за одређивање вредности критичног оптерећења (аксијалне силе или момента савијања) за поједина стања (услед глобалног, локалног и дисторзионог извијања). Поступци у појединим случајевима умеју да буду приметни и са инжењерске стране гледишта непрактични за свакодневну употребу. Због тога, за потребе одређивања ових вредности стандардом је дозвољена употреба нумеричких метода, где се у први план стављају МКТ и МКЕ. Међутим, потребно је нагласити да се овим стандардом не фаворизују ни аналитичке, ни нумеричке методе.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТИВАЊЕ

Експериментално испитивање је спроведено у 3 фазе:

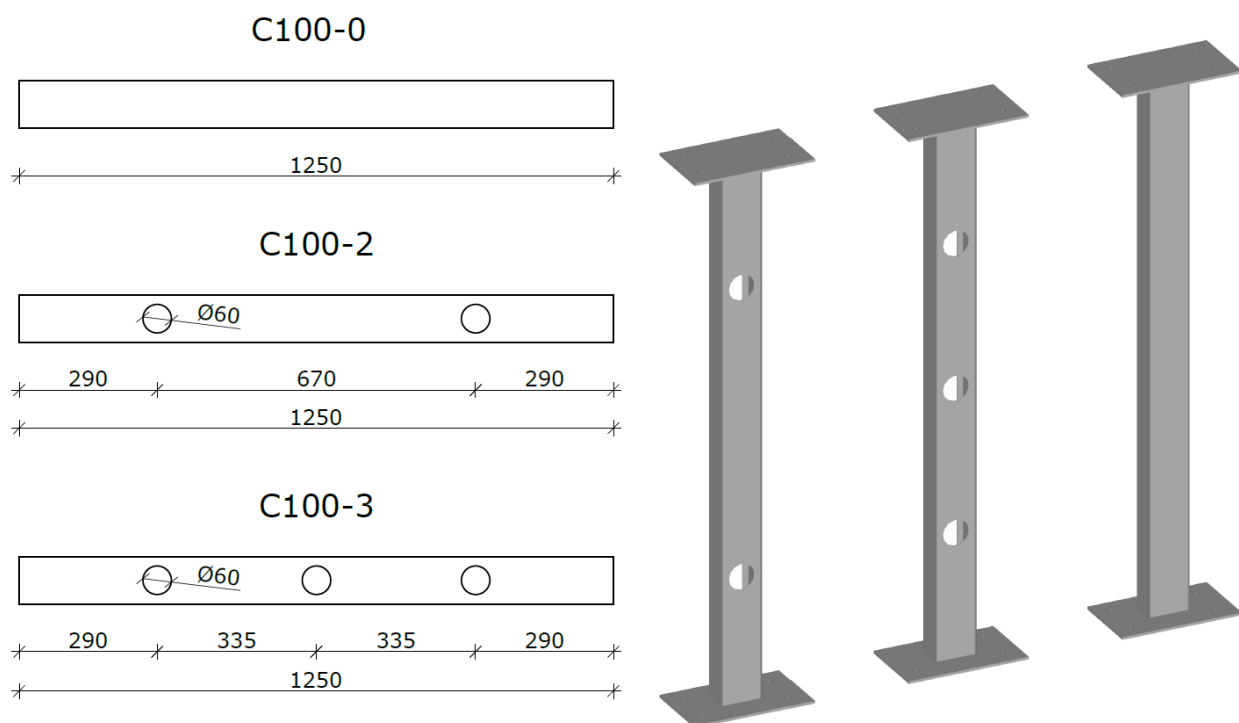
1. Испитивање механичких својстава материјала;
2. Мерење почетних геометријских имперфекција хладно-обликованих елемената;
3. Испитивање хладно-обликованих елемената на дејство центричног и ексцентричног притиска.

3.1. ОПИС УЗОРАКА

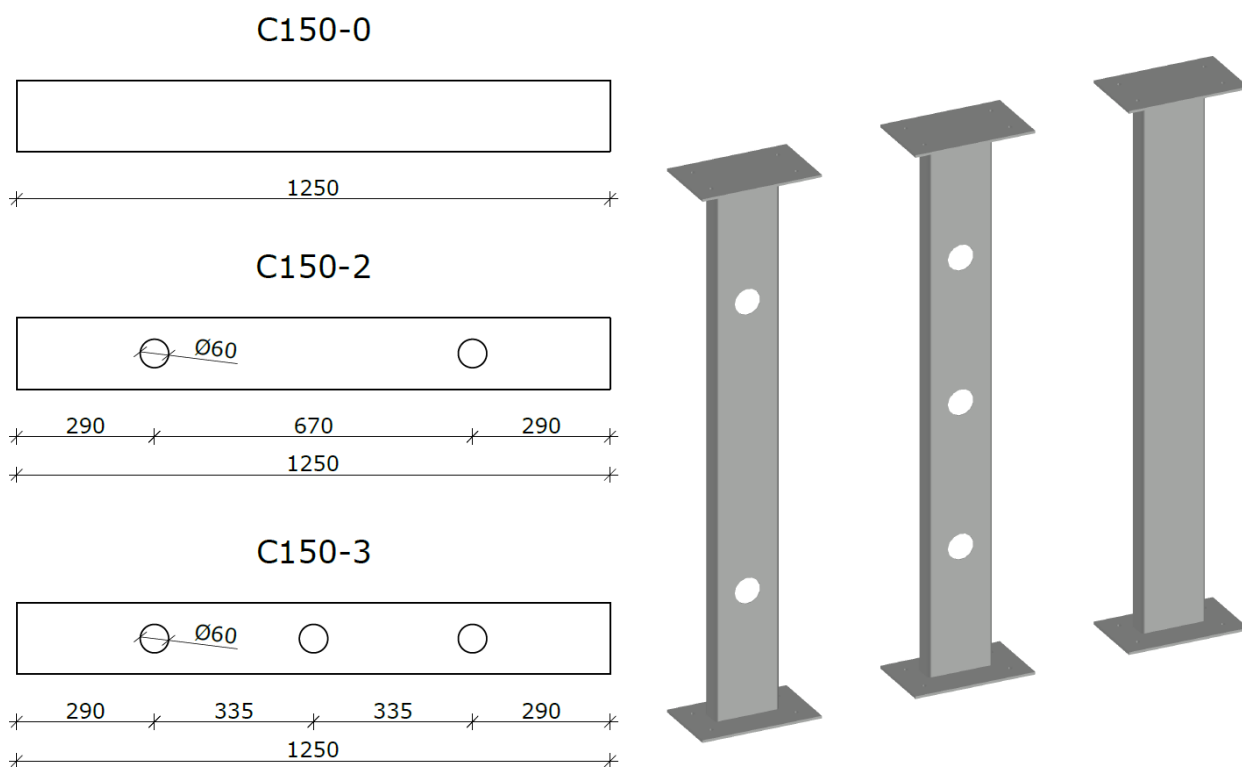
Узорци од хладно-обликованог челика испитани у овој дисертацији су произведени у погону компаније *VOS System d.o.o.* из Жабља. Испитани су елементи два различита попречна пресека: *C100* и *C150*, дебљине зидова попречног пресека 2.0 mm. Узорци у оквиру сваке групе се међусобно разликују према броју отвора присутних у ребру. Номинална дужина свих узорака је 1250 mm, а на својим крајевима имају заварене чеоне плоче дебљине 4 mm, које омогућавају остваривање везе са конструкцијом лабораторијског рама за испитивање. Плоче су за узорке заварене угаоним шавовима, по спољашњој контури попречног пресека. Испитано је укупно 42 узорка, по 21 из обе групе попречних пресека, од којих је по 9 узорака без отвора, по 6 узорака садржи 2, а 6 узорака 3 отвора. Начин означавања узорака је приказан у табели 3.1, а њихов преглед у табели 3.2. На сликама 3.1 и 3.2 су приказане геометријске карактеристике и тродимензионални изгледи CAD модела узорака *C100* и *C150*, а на сликама 3.3 и 3.4 узорци из групе *C100* са 3 и *C150* са 2 отвора, редом.

Табела 3.1. Систем означавања узорака експерименталног испитивања

Р. бр. ознаке у називу	Ознака	Значење
1.	C100 / C150	Облик и висина попречног пресека
2.	0 / 1 / 2 / 3	Број отвора у ребру дуж елемента
3.	e00 / e40 / e80	Ексцентрицитет у [mm] на којем се уноси сила притиска у односу на тежиште попречног пресека, у правцу паралелном са ребром пресека
4.	1 / 2 / 3	Редни број узорка



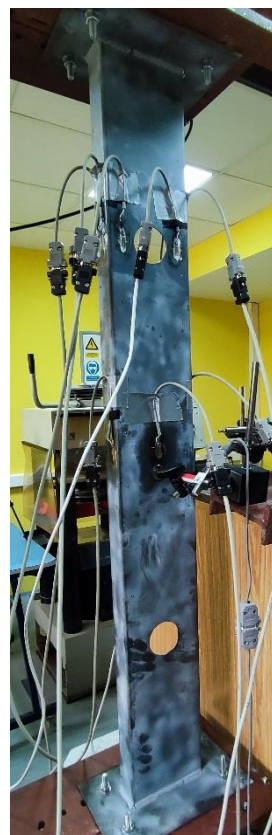
Слика 3.1. Геометријске карактеристике испитаних узорака C100



Слика 3.2. Геометријске карактеристике испитаних узорака C150



Слика 3.3. Узорак C100 са 3 отвора у ребру



Слика 3.4. Узорак C150 са 2 отвора у ребру

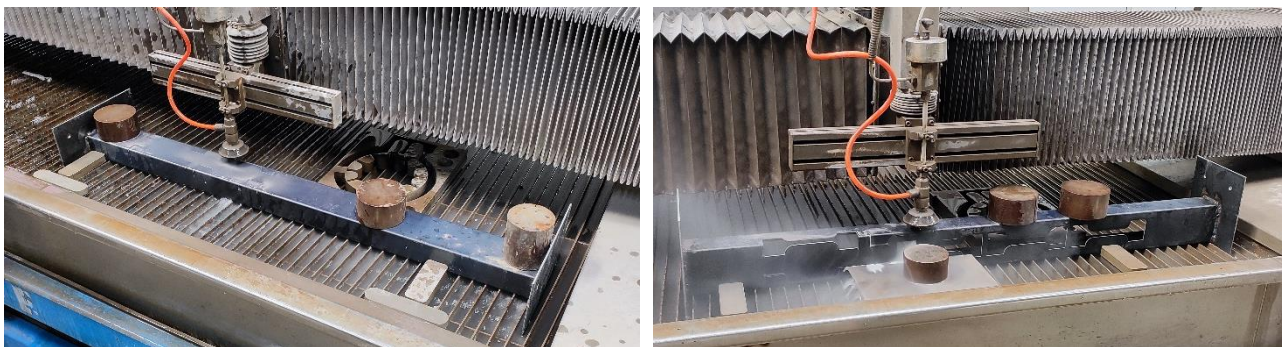
Табела 3.2. Преглед испитаних узорака

Редни број	Ознака узорка	Број комада	Попречни пресек	Број рупа	Ексцентрицитет [mm]
1.	C100-0-e00	3	Тип 1 (C100)	0	0.0
2.	C100-0-e40	3		0	40.0
3.	C100-0-e80	3		0	80.0
4.	C100-2-e00	2		2	0.0
5.	C100-2-e40	2		2	40.0
6.	C100-2-e80	2		2	80.0
7.	C100-3-e00	2		3	0.0
8.	C100-3-e40	2		3	40.0
9.	C100-3-e80	2		3	80.0
10.	C150-0-e00	3	Тип 2 (C150)	0	0.0
11.	C150-0-e40	3		0	40.0
12.	C150-0-e80	3		0	80.0
13.	C150-2-e00	2		2	0.0
14.	C150-2-e40	2		2	40.0
15.	C150-2-e80	2		2	80.0
16.	C150-3-e00	2		3	0.0
17.	C150-3-e40	2		3	40.0
18.	C150-3-e80	2		3	80.0
$\Sigma = 42$					

3.2. ПРВА ФАЗА: ИСПИТИВАЊЕ МЕХАНИЧКИХ СВОЈСТАВА МАТЕРИЈАЛА

Прва фаза експерименталног испитивања је подразумевала механичко испитивање својстава материјала, које је урађено на епруветама исеченим из оба типа узорака (C100 и C150). С обзиром на то да се својства материјала мењају у зонама углава попречног пресека приликом процеса хладног обликовања, ово испитивање је, осим на епруветама из равног дела попречног пресека, урађено и на епруветама исеченим из углава попречног пресека. Из оба типа хладно-обликованих узорака узето је по 7 епрувета: 3 из равног дела и 4 из углава пресека. Ради избегавања промена у структури материјала у зони сечења услед повишених температура у

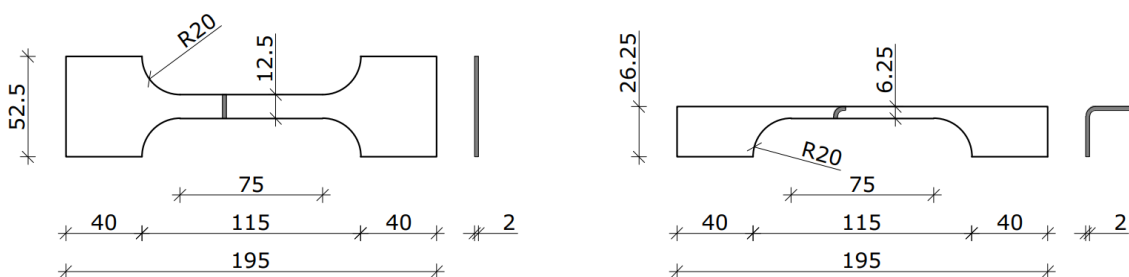
случајевима сечења гасом, плазмом или ласером [96], епрувете су из профила исечене воденим млазом. Сечење епрувета урађено је у погону фирме Лимар д.о.о. из Земуна. На слици 3.5 је приказан поступак сечења епрувета.



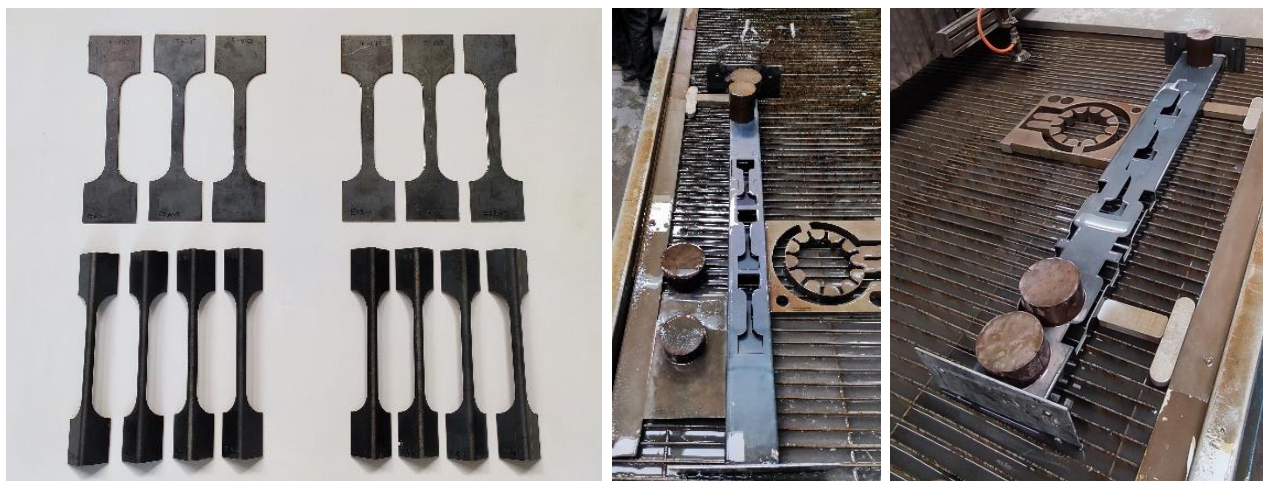
Слика 3.5. Сечење епрувета воденим млазом из равног дела лима (лево) и из угла попречног пресека (десно)

3.2.1. ОПИС ЕПРУВЕТА

Димензије епрувета дефинисане су према упутствима и препорукама датим у стандарду *EN 10002-1* [97]. За номиналну ширину свих епрувета (b_0) усвојена је вредност од 12.5 ± 5 mm. С обзиром на то да је прелазни радијус 20 mm, ширине крајева епрувете су 52.5 mm, те је тиме испуњен услов да оне морају бити веће или једнаке од $1.2 \cdot b_0$. Дужина на којој се мери дилатација (L_0) је 50 mm, те паралелна дужина не сме бити мања од $L_0 + b_0/2$. Усвојена паралелна дужина је 75 mm. Номинална дебљина епрувета је 2.0 mm. На слици 3.6 приказани су изглед, номиналне димензије епрувета из равног дела пресека и из угла и испитни попречни пресеци (S_0), а на слици 3.7 изглед епрувета и узорци из којих су оне исечене.



Слика 3.6. Димензије епрувета исечених из равног дела (лево) и из угла пресека (десно) за испитивање механичких својстава материјала



Слика 3.7. Епрувете исечене из узорака и узорци из којих су исечене

Начин означавања епрувета приказан је у табели 3.3. Стварне димензије епрувета су измерене дигиталним помичним мерилом са прецизношћу од 0.01 mm, и дате су у табели 3.4.

Табела 3.3. Систем означавања епрувета

Р. бр. ознаке у називу	Ознака	Значење
1.	Е	Узорак епрувете
2.	Р / U	Облик епрувете (R – из равног дела попречног пресека; U – из угла попречног пресека)
3.	А / В	Тип узорка из којег је исечена епрувета (А – из узорка С100; В – из узорка С150)
4.	1 / 2 / 3 / 4	Редни број епрувете

Табела 3.4. Преглед и димензије испитаних епрувета

Редни број	Ознака епрувете	Дебљина [mm]	Ширина врата [mm]	Површина попречног пресека на паралелној дужини [mm ²]
1.	ERA-1	1.99	12.53	24.94
2.	ERA-2	2.01	12.60	25.37
3.	ERA-3	2.01	12.58	25.25
4.	EUA-1	2.00	10.67	21.33
5.	EUA-2	2.03	11.50	23.35
6.	EUA-3	2.02	10.17	20.54
7.	EUA-4	2.02	11.00	22.18
8.	ERB-1	2.00	12.76	25.48
9.	ERB-2	1.97	12.77	25.15
10.	ERB-3	1.99	12.77	25.45
11.	EUB-1	1.97	11.90	23.48
12.	EUB-2	1.94	11.00	21.34
13.	EUB-3	1.94	11.85	23.03
14.	EUB-4	1.98	12.35	24.41

3.2.2. МЕРЕЊЕ ДИЛАТАЦИЈА МЕТОДОМ КОРЕЛАЦИЈЕ ДИГИТАЛНИХ СЛИКА

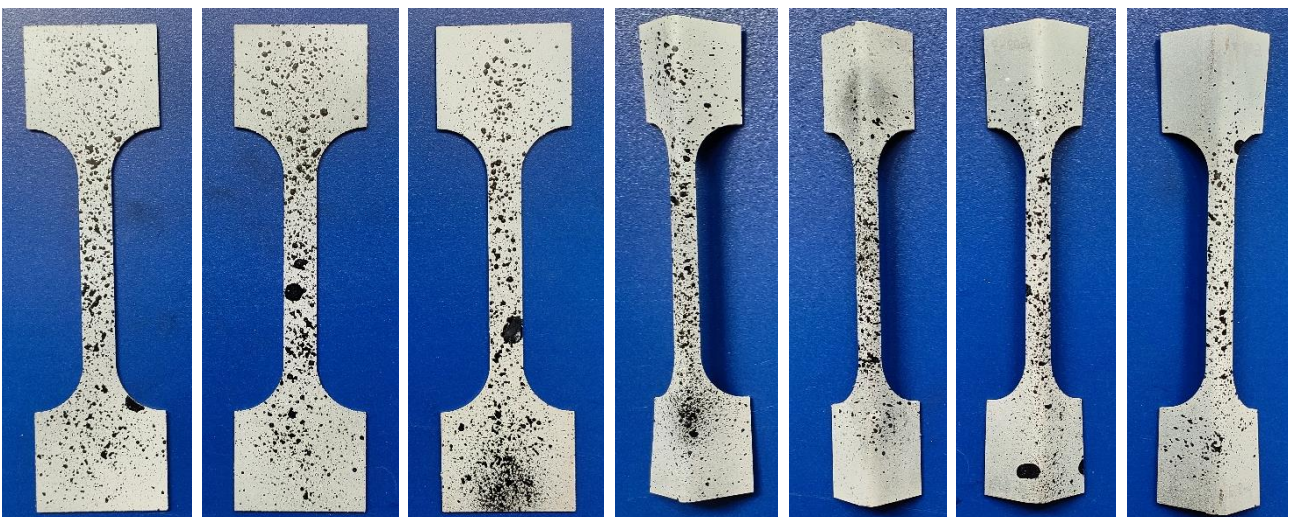
С обзиром на то да кидалица током испитивања бележи само промену дужине између чељусти, измерена дилатација би се у том случају односила на укупну дужину епрувете између чељусти. Да би се из разматрања искључила деформација крајева епрувете и зоне прелазног радијуса, и узела у обзир само деформација која се јавља на паралелној дужини епрувете, неопходно је користити уређаје за мерење промене дужине (екстензометре), чије су уобичајене дужине мерних база 25, 50 и 100 mm. При томе, одређује се упросечена дилатација на дужини базе, на основу регистрованих промена растојања између базних тачака. Додатни проблем који се може јавити приликом употребе екстензометара може настати ако до појаве пластификације дође у зонама ван мерне базе, те би у тим случајевима пластична деформација могла остати непозната. Применом методе корелације дигиталних слика (енг. *digital image correlation (DIC)* – КДС) за мерење дилатација, ови евентуални недостаци превазилазе се одређивањем поља деформација комплетне епрувете.

Основа КДС методе лежи у мерењу деформација путем преклапања слика, снимљених током процеса деформисања узорка. Стање деформације током наношења оптерећења прати се посматрањем одговарајућих пиксела на узастопним сликама. С обзиром на то да овај проблем није могуће једнозначно решити, неопходно је посматрати блиску околину пиксела (енг. *facet*). Да би праћење пиксела било могуће, неопходно је припремити узорак наношењем насумично распоређеног шаблона црних тачкица на белој позадини.

На сликама 3.8 и 3.9 приказане су епрувете припремљене за испитивање затезањем. На епрувете је прво нанет танак слој беле боје на акрилној бази. Одмах затим нанет је насумичан шаблон тачкица (мрља) различитих величина црне боје, такође на бази акрила.



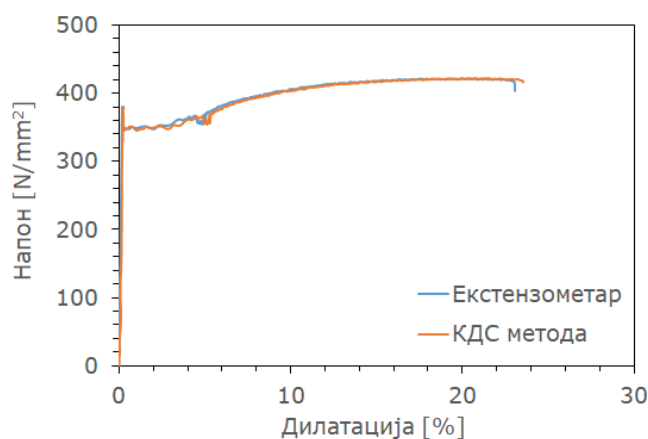
Слика 3.8. Припремљене епрувете исечене из елемента *C100*



Слика 3.9. Припремљене епрувете исечене из елемента *C150*

3.2.3. КОНТРОЛНО ИСПИТИВАЊЕ

Пре експерименталног испитивања механичких својстава материјала на серији исечених епрувета, извршено је контролно испитивање на једној епрувети са циљем да се испита поузданост дефинисане експерименталне поставке, и евентуално коригује уколико се покаже да је неопходно. Током контролног теста, дилатација епрувете регистрована је како КДС методом, тако и екстензометром. Екстензометар са дужином мерне базе од 50 mm је био постављен централно у односу на паралелну дужину епрувете. Дилатација на тој истој дужини је касније израчуната коришћењем КДС методе применом софтвера *GOM Correlate* [98], произвођача *GOM* из Немачке. Низ фотографија је добијен из видео записа високе резолуције са фреквенцијом снимања од 30 слика у секунди. Накнадном обрадом видео записа изолован је сваки тридесети кадар, па је анализа спроведена над низом фотографија са интервалом од 1 s. Експериментална поставка контролног теста и поређење резултата екстензометра и КДС методе су приказани на слици 3.10.



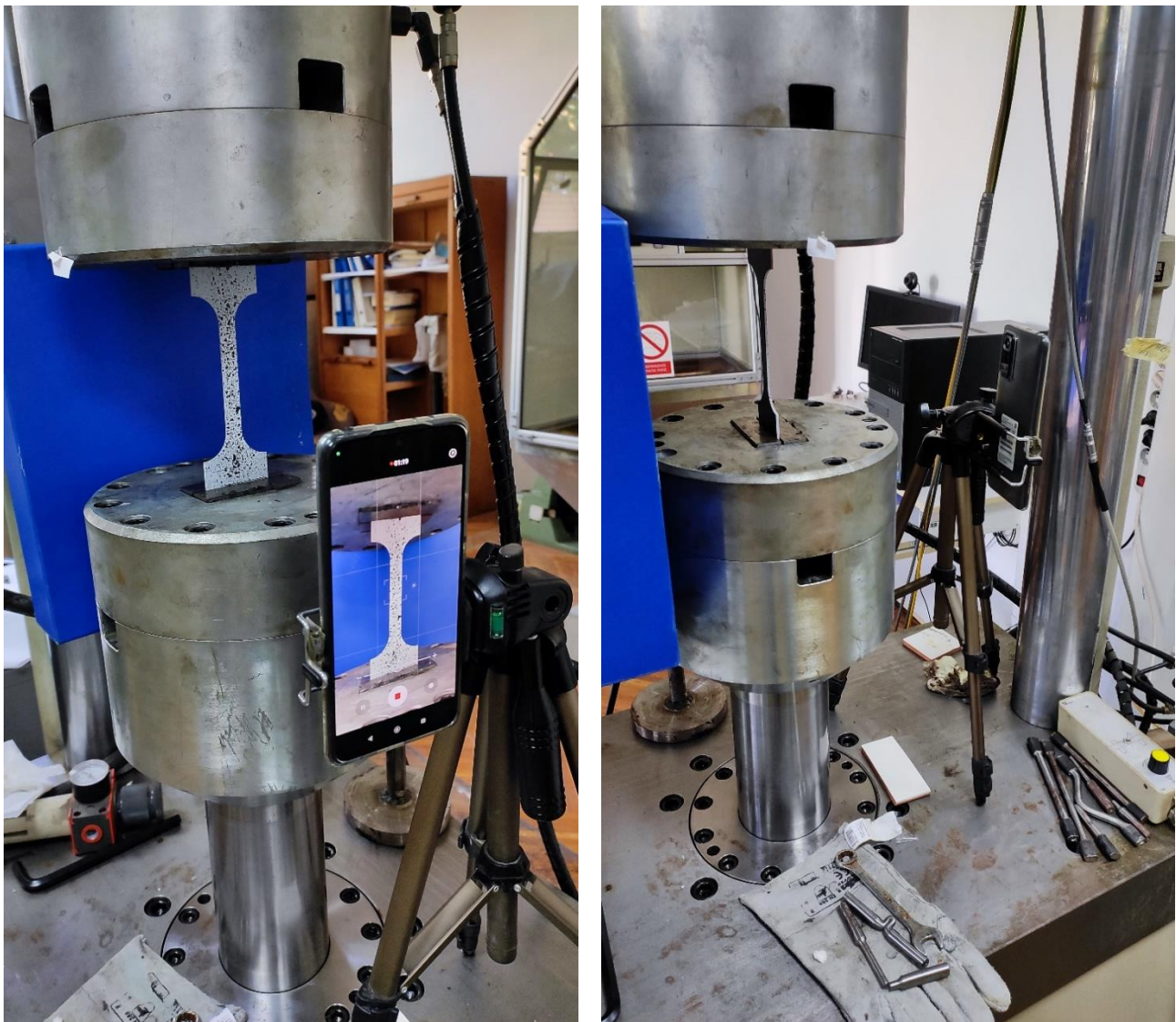
Слика 3.10. Поставка контролног теста епрувете (лево) и поређење резултата екстензометра и КДС методе (десно)

Криве на дијаграму напон-дилатација на слици 3.10 указују на високу поузданост резултата мерења КДС методом, будући да је њихово поклапање постигнуто у највећем делу. Иако су варијације присутне у зони течења материјала, оне се могу сматрати занемарљивим будући да се вредности напона крећу у веома сличним границама. Такође, регистрована дуктилност је веома блиска. Имајући у виду наведено, закључено је да КДС метода са оваквом поставком теста може бити коришћена за потребе регистровања дилатација приликом испитивања механичких својстава материјала.

3.2.4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТИВАЊЕ

Испитивање механичких својстава материјала је урађено у лабораторији Департамента за производно машинство Факултета техничких наука у Новом Саду,

на кидалици *Schenck Hydropuls PSB 250*, чији је максимални капацитет 250 kN. За снимање је коришћена камера са 108 мегапиксела и величином сензора од 16.71 mm (1/1.52 инча). Камера је била постављена на удаљености од око 30 cm од епрувете, што је било довољно далеко да се у једном кадру ухвати комплетно издужење, а довољно близу да се обезбеди квалитет снимка потребан за анализу. За накнадну обраду снимка је коришћен софтвер *GOM Correlate*. Поставка експеримента приказана је на слици 3.11.



Слика 3.11. Поставка експерименталног испитивања

Прво су испитане епрувете исечене из равног дела лима, а потом и угаоне епрувете. Хватање угаоних епрувета чељустима кидалице и њихово стежање било је могуће тек пошто се проширени део епрувете претходно исправи (спљошти). Исправљање проширених делова угаоних епрувета урађено је стежањем на кидалици, хватањем крајева у дужини од око 20 mm. На тај начин врат угаоне епрувете задржава закривљење због постојања прелазног радијуса.

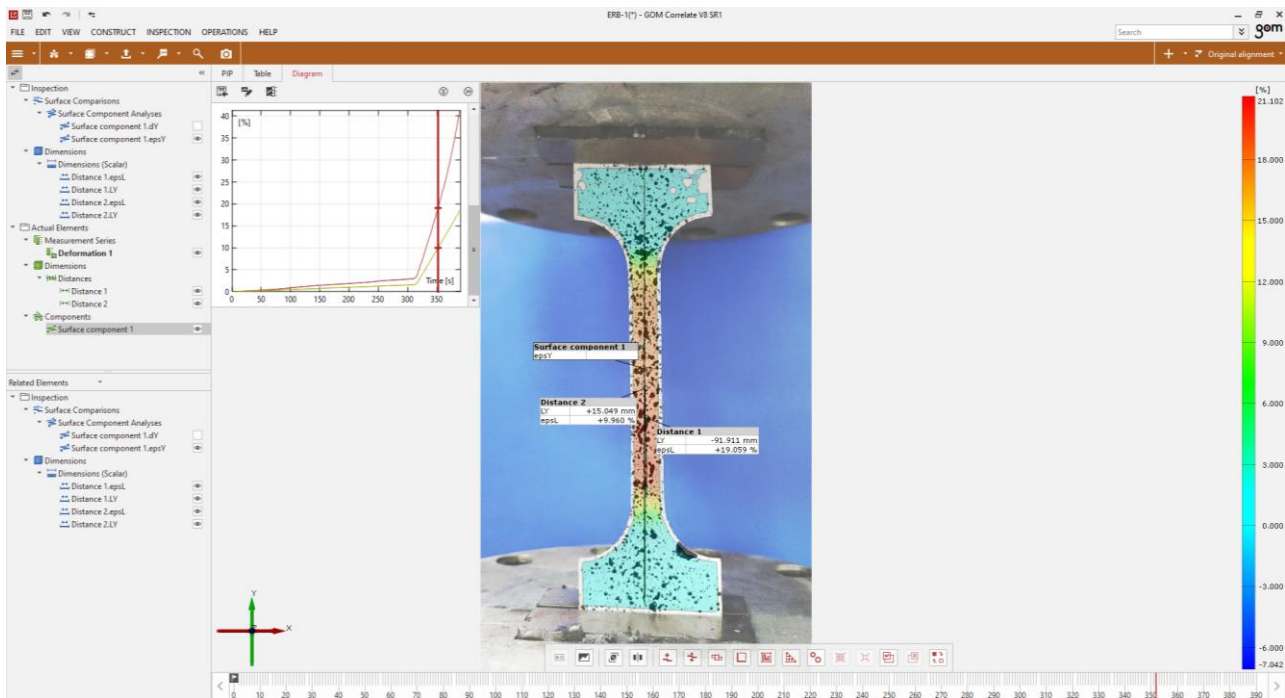
Испитивање епрувета спроведено је сагласно стандарду *EN 10002-1*. Према овом документу, брзина nanoшења оптерећења је различита за еластичну и пластичну фазу. За материјале модула еластичности већег од 150 GPa брзина у еластичној фази дефинисана је у односу на величину напона и треба да буде у границама од 6 до 60 MPa/s или не брже од 0.0025 m/m·s. У пластичној фази рада, прираст дилатације не сме бити већи од 0.008 m/m·s. Типични облици лома за једну равну и једну угаону епрувету приказани су на слици 3.12.



Слика 3.12. Типични облици лома за равну (лево) и угаону (десно) епрувету

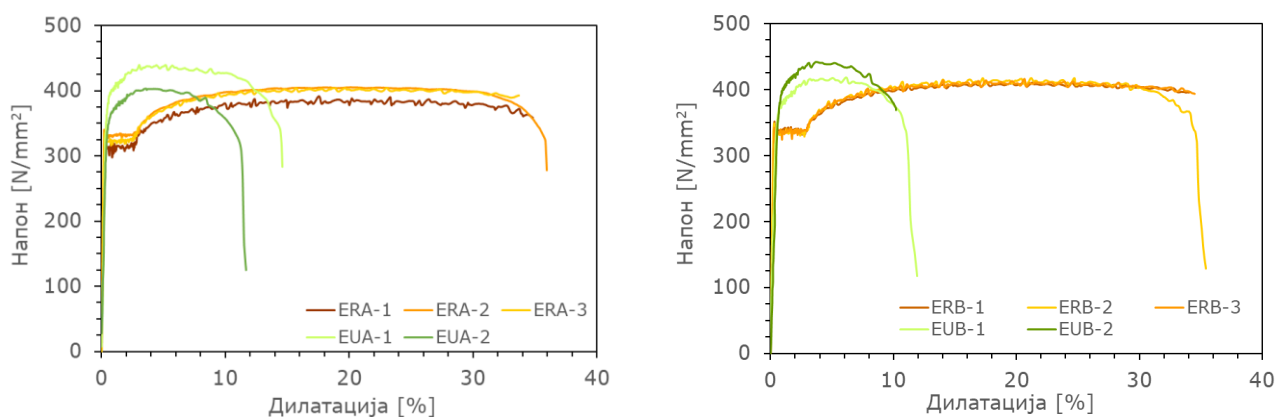
Након испитивања свих епрувета, спроведена је обрада видео записа у софтверу *GOM Correlate*, чији је изглед корисничког интерфејса приказан на слици 3.13. Обработом снимака уочене су неправилности у понашању епрувета *EUA-3*, *EUA-4*, *EUB-3* и *EUB-4*. С обзиром на то да су снимком регистроване дилатације у виду скраћења епрувете у почетном делу дијаграма, што није могуће, пажљивом анализом снимка закључео је да је разлог ове појаве неадекватно постављена опрема за снимање. Стога, резултати испитивања ових узорака нису узети у

разматрање приликом одређивања својстава материјала нити су приказани у оквиру овог поглавља. Без обзира на то, преостали број узорак је био довољан за статистичку обраду и извођење закључка о понашању и својствима материјала.



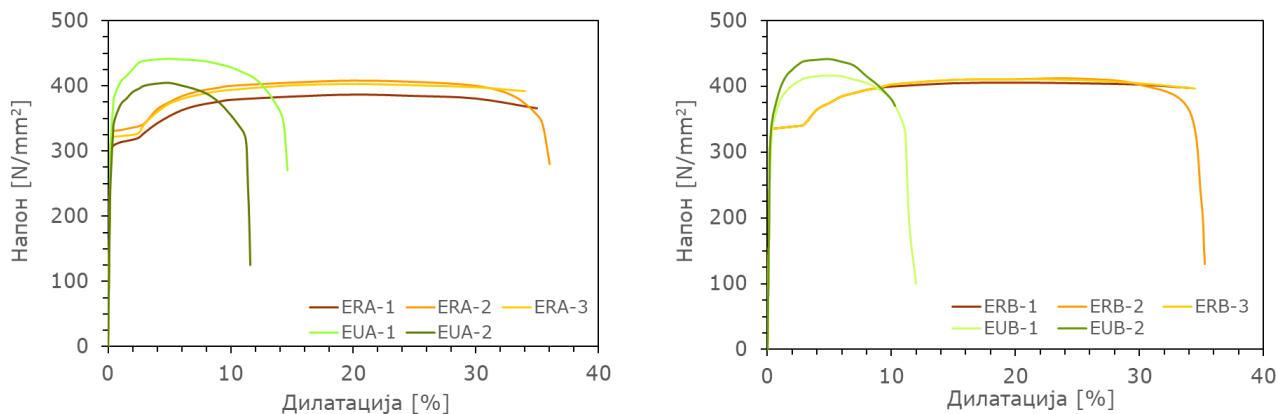
Слика 3.13. Изглед корисничког интерфејса софтвера *GOM Correlate*

На слици 3.14 су приказани дијаграми зависности напона и деформације у „сировом“ облику. Разлика у понашању материјала у зонама углова и у равним зонама попречног пресека јасно је уочљива. Због пластичних деформација реализованих у току процеса хладног обликовања, за зоне углова попречног пресека карактеристична је појава већих вредности чврстоћа и мање дуктилности. Такође, зона течења материјала је код равних епрувета јасно изражена, за разлику од угаоних.



Слика 3.14. Дијаграми напон-деформација за испитане епрувете исечене из елемената *C100* (лево) и *C150* (десно)

Након обраде дијаграма и уклањања шума добијене су криве приказане на слици 3.15. Детаљнији приказ резултата испитивања свих епрувета дат је у Прилогу А.



Слика 3.15. Дијаграми напон-дилатација након уклањања шума за испитане епрувете исечене из елемената C100 (лево) и C150 (десно)

3.3. ДРУГА ФАЗА: МЕРЕЊЕ ПОЧЕТНИХ ГЕОМЕТРИЈСКИХ ИМПЕРФЕКЦИЈА

Током процеса производње и постављања у пројектовани положај, неминовна је појава почетних геометријских имперфекција. Оне се манифестују у форми савијања осе елемента, локалног савијања лимова попречног пресека, као и дисторзије попречног пресека у комбинацији са савијањем лимова [99].

Стандардом *SRPS EN 1090-2* [100] неправилности у геометрији хладно-обликованих елемената идентификоване су у виду девијације у погледу ширине ребра и фланши, као и девијације у погледу правости (енг. *straightness*) осе елемента. Када су у питању грешке у ширини ребра и фланши, дозвољена је само негативна вредност девијације у износу од $h/50$ за ребро и $b/80$ за фланшу, где су h и b редом ширина ребра и ширина фланше. Дозвољена глобална почетна геометријска имперфекција у виду савијања осе елемента у облику једног полуталаса дуж елемента износи $L/750$, при чему је ова вредност независна у односу на правац у коме се девијација испољава. Приметно је да савијање зидова попречног пресека није препознато овим стандардом, иако су честе појаве оваквог облика почетних геометријских имперфекција. С обзиром на то да је понашање танкозидних хладно-обликованих елемената при достизању граничног стања стабилности крајње осетљиво на постојање геометријских имперфекција, као и то да су локални и дисторзиони облици извијања доминантни облици код кратких и средње дугих елемената, познавање почетне геометрије се испоставља изузетно битним фактором у погледу прецизног и сигурног одређивања критичног оптерећења.

Контрола геометрије је скуп радњи који се обавља са циљем прикупљања димензионалних података о објекту мерења и поређења измерених величина са идеализованом геометријом и захтеваном толеранцијом. Успешност контроле геометрије зависи од неколико фактора, попут стања објекта мерења, стања површине на којој се налази објекат приликом мерења, типа мерне опреме, тачности мерне опреме, израбљености исте (у случајевима контактних мерних система), температуре средине, итд.

За потребе контроле геометрије, на располагању је неколико типова мерних система, који се могу поделити у две групе: контактни и неконтактни мерни системи. Контактни системи, чести у употреби, су уређаји за мерење координата (енг. *coordinate measuring machines* - *CMM*), кљунаста помична мерила (шублери), микрометри, и друга једнодимензионална мерила. Једини 3Д мерни уређај међу њима је *CMM*, док остали служе углавном за мерење једне димензије [101]. С обзиром на то да *CMM* прикупља податке само у дискретном броју тачака, стандардна процедура подразумева превлачење куглице преко површине објекта над којим се врши мерење. Последишно, дефекти који се могу јавити унутар области над којом се превлачи куглица могу бити изостављени уколико се куглицом не пређе преко њих.

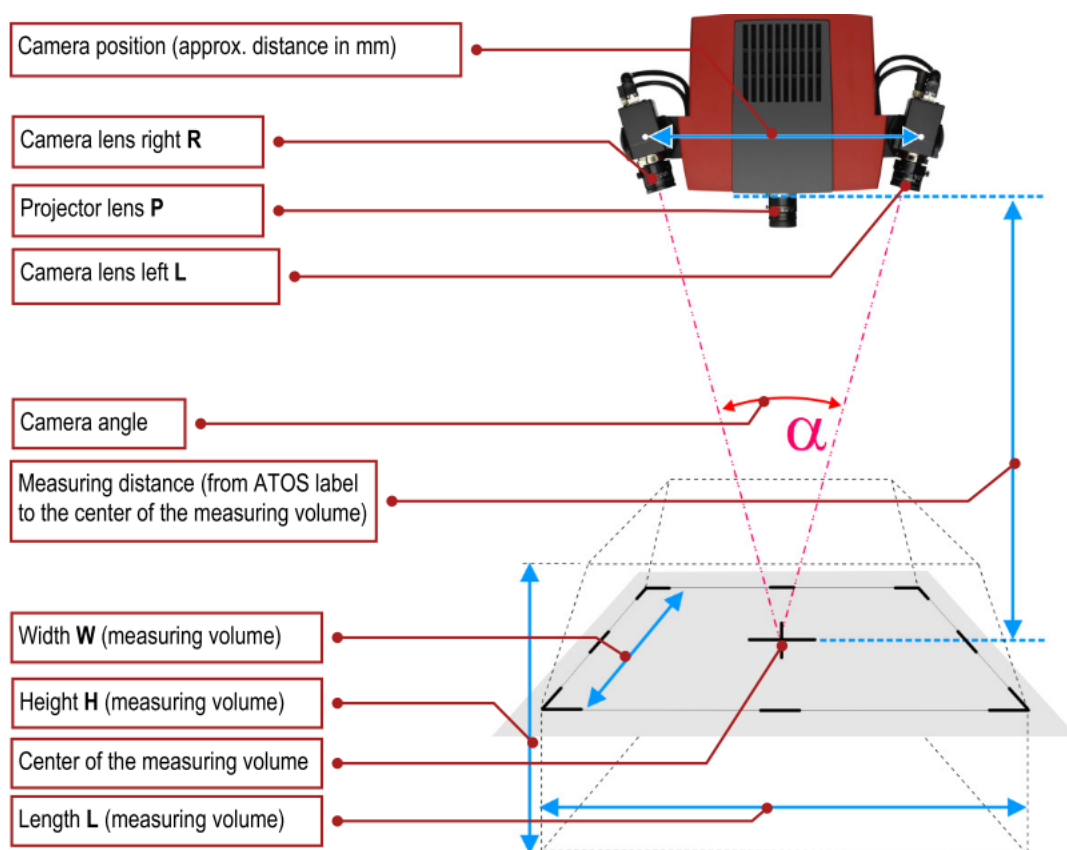
У типичне бесконтактне мерне системе спадају: оптички компаратор, ЦТ скенери (енг. *computerized tomography* - *CT*), фотограметријски системи, и разни други ласерски системи. За разлику од контактних мерних система, подаци су дати за релативно велик број тачака, тзв. облак тачака (енг. *point cloud*). Иако је тачност бесконтактних мерних система мања у односу на *CMM*, њима је могуће обухватити геометрију далеко комплекснију од оне коју је могуће измерити неким од контактних система. Употреба оптичких 3Д скенера углавном се повезује са проблемима машинске индустрије и производње делова у области аутоиндустрије, аеронаутике, медицине, итд. [102–105]. Компоненте такве опреме обично су сложене геометрије и ригорозне толеранције, што све заједно указује на значај обезбеђења квалитета оваквих елемената [106].

Контрола геометрије у оквиру ове дисертације рађена је у сарадњи са предузећем Унимет из Каћа, у контролисаним условима у просторијама лабораторије предузећа у Каћу.

3.3.1. МЕРНА ОПРЕМА

Геометријска инспекција узорака урађена је помоћу оптичког 3Д скенера *ATOS*, произвођача *GOM* из Немачке. Компоненте овог мерног система су *ATOS* мерни уређај са стерео камерама, пројектор, контролер и напајање, сталак и рачунарски систем са посебном мрежном интерфејс картицом и апликативним софтвером [107]. Коришћена је конфигурација сензора са растојањем између камера од 300 mm и

међусобним углом од 25° . Једна од карактеристика конфигурације сензора која би требало да буде дефинисана пре почетка мерења је мерни волумен, који представља део 3Д простора испред мерних сензора у оквиру којег је неопходно поставити објект мерења [108]. Приликом овог испитивања, одабран је мерни волумен од $300 \times 230 \times 230$ mm са растојањем између мерних тачака од 0.124 mm, као функција објекта мерења, захтеване тачности и густине облака тачака. Као резултат постигнута је тачност мерења од 0.02 mm. Да би непомерљивост скенера у току процеса скенирања била обезбеђена, скенер се поставља на стабилан сталак и фиксира у позицију помоћу завртња. На врху сталка на којем је постављен скенер налази се сферни зглоб, који омогућава произвољан положај и оријентацију сензора у простору. На слици 3.16 су приказане компоненте оптичког 3Д скенера и мерни волумен.

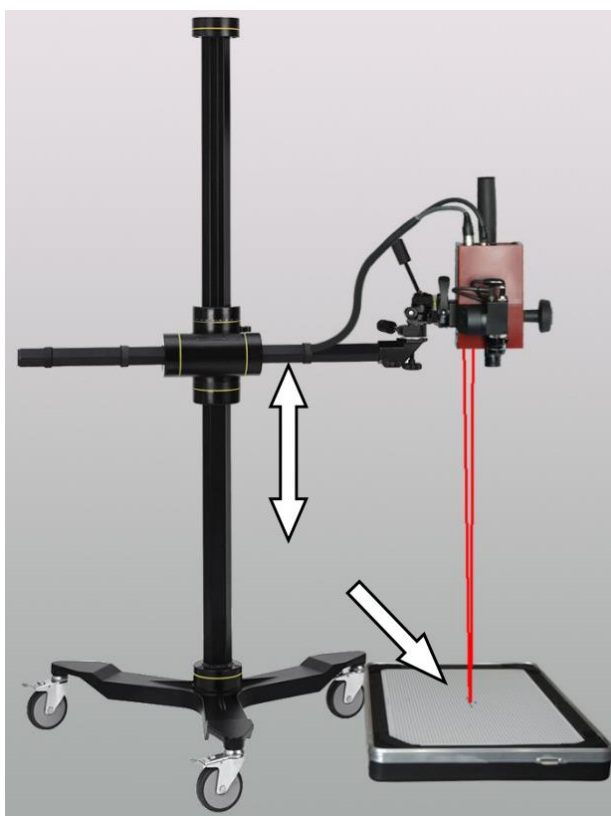


Слика 3.16. Компоненте оптичког 3Д скенера и мерни волумен [107]

3.3.2. КАЛИБРАЦИЈА МЕРНОГ СИСТЕМА

Снимљена фотографија објекта не садржи податке о његовој величини, будући да су фотограметријска мерења бездимензиона. Да би димензије објекта могле бити одређене, неопходно је познавање најмање једне дужине у оквиру мерног волумена. То је могуће уколико су познате стварне координате одређених (референтних) тачака у оквиру мерног волумена или уколико се у оквиру истог поставе референтне тачке константног међусобног растојања [105].

Пре спровођења контроле геометрије, неопходно је урадити калибрацију мерног система. Током овог поступка, димензионална конзистентност мерног система се обезбеђује његовим подешавањем помоћу калибрационих објеката. На основу снимљених фотографија, софтвер одређује геометријске параметре (попут позиције и оријентације сваке камере), као и 3Д координате тачака калибрационог објекта [107]. Калибрациони објекти се састоје од низа црних тачака на белој позадини, а бирају се у зависности од коришћеног мерног волумена. У оквиру овог истраживања, коришћен је калибрациони панел *CP40/MV320* за мерни волумен 320. Пре почетка калибрације, неопходно је укључити камере и пројектор, те на тај начин дозволити сензору да постигне радну температуру, за шта је потребно око 30 минута. Комплетан процес калибрације је помогнут софтвером, те је на кориснику само да прати упутства корак-по-корак. Дефинисањем траженог мерног волумена и позиције камера, софтвером се одређују жижна даљина сочива камера и пројектора. Неопходан податак за извршење калибрације је и температура околине, која не би требало да буде променљива током целокупног процеса контроле геометрије. Калибрациони панел се поставља на под, а сензори ортогонално изнад њега. Након довођења сензора у одговарајући положај и на одговарајућу даљину у односу на калибрациони панел, корисника кроз даље кораке калибрације води софтвер. Даљи кораци калибрације подразумевају промену положаја сензора у односу на калибрациони панел. На слици 3.17 приказан је процес калибрације.



Слика 3.17. Калибрација мерног система [107]

3.3.3. ПРИПРЕМА УЗОРАКА ЗА ГЕОМЕТРИЈСКУ КОНТРОЛУ

Након извршене калибрације мерног система, неопходно је припремити узорке за контролу. С обзиром на то да на узорке није нанета фарба, њихово директно излагање светлости води појави сјајних површи на фотографијама. Стога, неопходно је нанети титанијум диоксид (прах беле боје) на површину сваког узорка, како би се степен рефлексије смањио [108] и како би на фотографијама било лакше уочити разлику између мерног објекта и околине. На слици 3.18 приказан је процес наношења титанијум диоксида помоћу компресора.



Слика 3.18. Наношење титанијум диоксида на површину узорка

Уколико је узорак већих димензија од мерног волумена, током контроле геометрије неопходно је мењати релативну позицију мерног објекта у односу на камере како би се обухватила његова комплетна геометрија. Да би фотографије могле бити обједињене у јединствен 3Д модел, на површину узорка се адхезивном везом постављају референтне тачке (маркери), чија растојања остају непромењена током контроле. Пречник маркера коришћених у овом истраживању је био 3 mm и функција је мерног волумена. Будући да на свакој фотографији морају да буду видљива бар 3 маркера, од којих су бар 2 позната из ранијих снимања, јасно је да маркери морају бити постављени у густој расподели. Са циљем утрошка што мањег броја маркера током снимања, формиран је помоћни челични рам. Овај рам је постављен око објекта мерења, а будући да су делови рама видљиви на свакој снимљеној фотографији, било је неопходно покрити овај рам густом мрежом маркера. На овај начин могуће је поставити само 4 маркера на сваки узорак, узимајући у обзир неопходну ротацију (окретање) узорка током скенирања, те је избегнута потрошња великог броја маркера. На слици 3.19 је приказан помоћни рам заједно са узорком припремљеним за контролу геометрије.



Слика 3.19. Помоћни рам и узорак припремљени за контролу геометрије

Са циљем постизања непомерљивости објеката мерења, као и елиминисања утицаја њихове сопствене тежине на деформацију, узорци су ослањани целом својом дужином на челичну плочу испод.

3.3.4. ПРОЦЕС КОНТРОЛЕ ГЕОМЕТРИЈЕ

Процес контроле геометрије подразумева креирање низа фотографија, сваки пут постављајући камере у различиту позицију у односу на мерени објекат, при томе водећи рачуна да се поједини делови снимљених фотографија преклапају. Пошто једна фотографија представља пројекцију 3Д сцене на 2Д раван, том приликом се трећа димензија (дубина) губи, тј. свака тачка на 2Д фотографији је заправо линија у 3Д простору. Уколико су доступне бар две фотографије на којима се из различитих позиција виде бар две исте тачке у простору (референтне тачке), процесом триангулације се може доћи до 3Д координата свих осталих тачака на фотографијама. Стога, да би свака следећа фотографија могла да пружи податке о мереном објекту, морају да буду видљиве бар три референтне тачке, од којих су бар две познате из претходно снимљених фотографија.

Контрола геометрије је урађена на 12 узорака, по 2 комада од сваког од следећих типова узорака: *C100-0*, *C100-2*, *C100-3*, *C150-0*, *C150-2* и *C150-3*. Приликом

снимања, у просеку је креирано око 80 фотографија по узорку. На слици 3.20 приказан је процес контроле геометрије.



Слика 3.20. Контрола геометрије оптичким 3Д скенером ATOS (GOM)

3.3.5. РЕЗУЛТАТИ СНИМАЊА

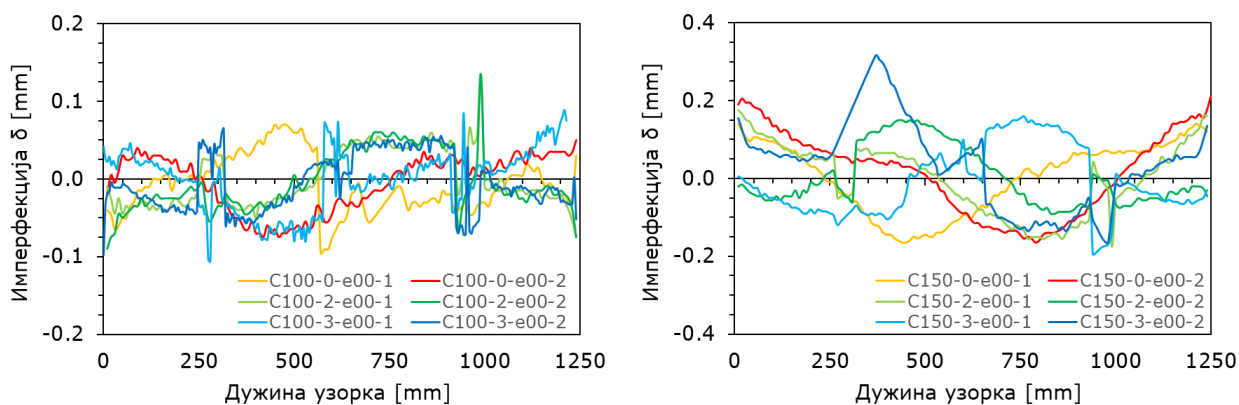
По завршетку процеса скенирања, дигитализована геометрија је упоређена са идеализованом геометријом CAD модела. Да би ово било могуће урадити, обе геометрије би требало да буду постављене у исти координатни систем. Трансформација дигитализоване геометрије у координатни систем идеализоване спроводи се методом најбољег преклапања (енг. *best fit method*) [103]. Почетне геометријске имперфекције су приказане као:

1. Имперфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека;
2. Имперфекције фланши у правцу јаче осе попречног пресека;
3. Ротација зида ребра попречног пресека;
4. Релативна ротација зидова фланши у односу на зид ребра.

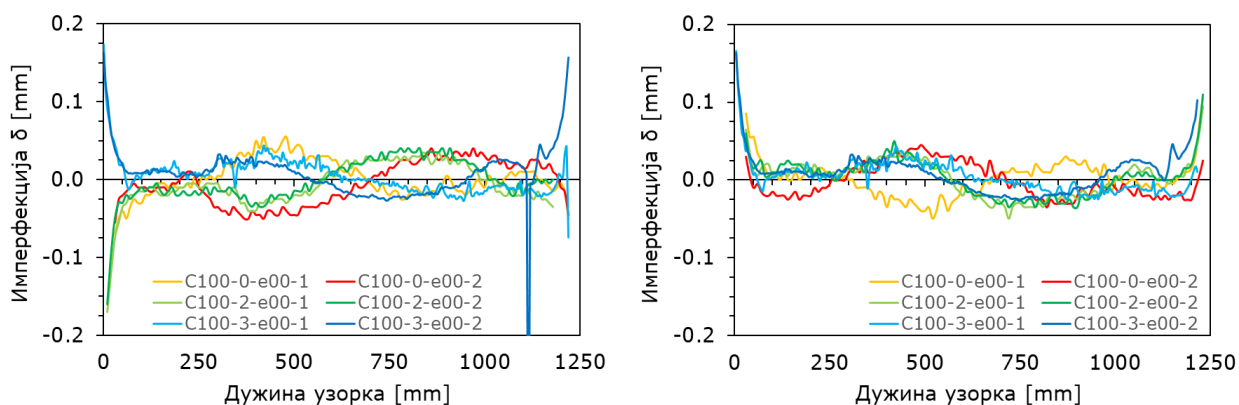
На слици 3.21 су приказане разматране ротације зидова попречних пресека узорака, док су на сликама 3.22 до 3.27 приказани резултати мерења почетних геометријских имперфекција. Детаљнији приказ резултата за сваки елемент понаособ је дат у Прилогу Б.



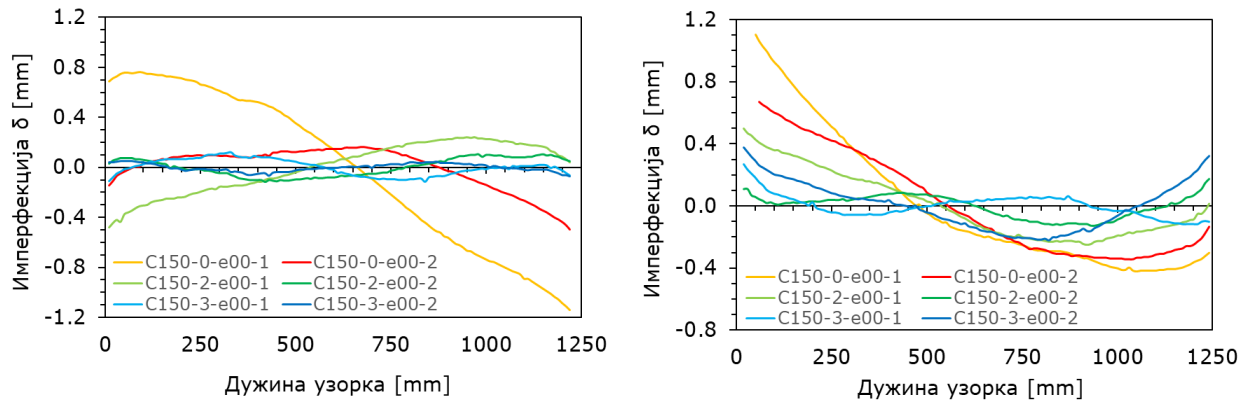
Слика 3.21. Ротација зида ребра (лево) и релативна ротација зидова фланши у односу на зид ребра (десно)



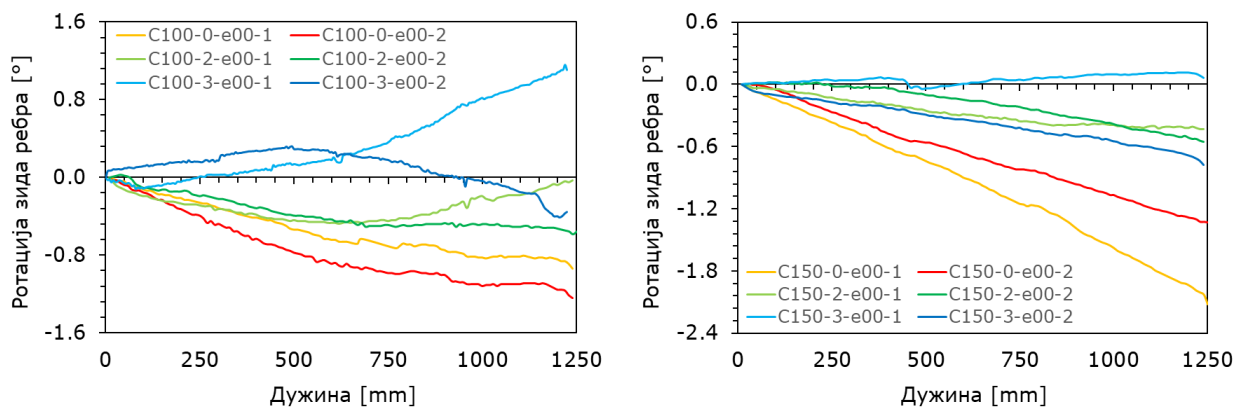
Слика 3.22. Имперфекција ребра у правцу јаче осе попречног пресека за узорке C100 (лево) и узорке C150 (десно)



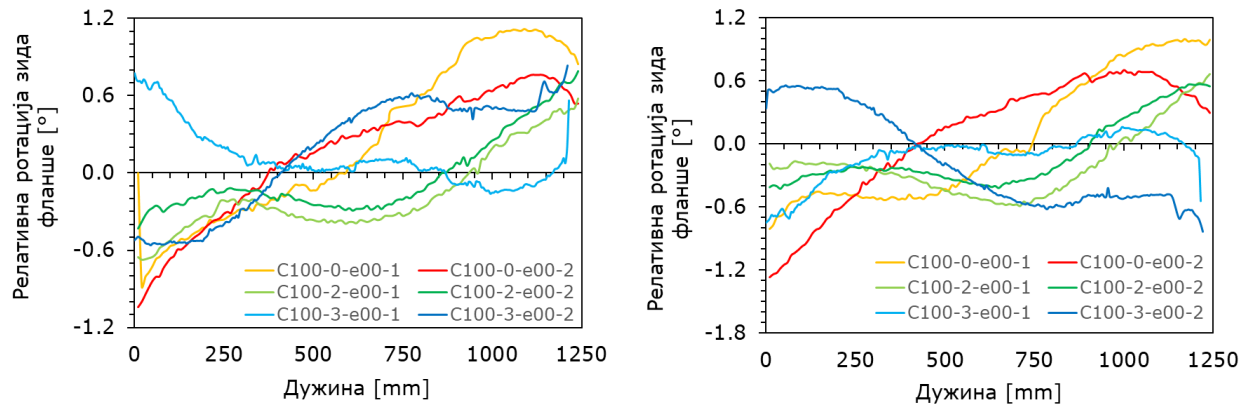
Слика 3.23. Имперфекција фланши у правцу слабије осе попречног пресека узорка C100



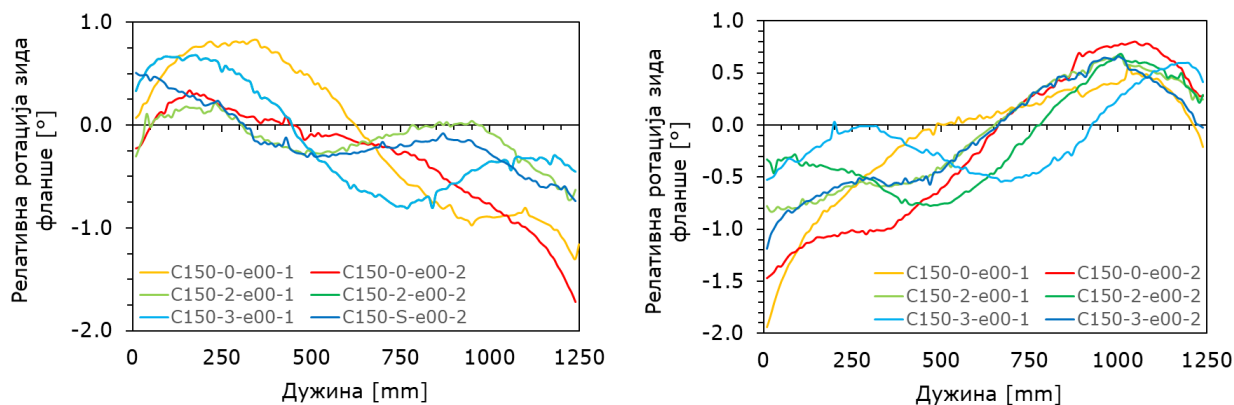
Слика 3.24. Имперфекција фланши у правцу слабије осе попречног пресека узорака C150



Слика 3.25. Ротација зида ребра узорака C100 (лево) и узорака C150 (десно)



Слика 3.26. Релативна ротација зидова фланши у односу на зид ребра узорака C100



Слика 3.27. Релативна ротација зидова фланши у односу на зид ребра узорака C150

На основу резултата мерења почетних геометријских имперфекција може се закључити да су имперфекције у виду девијације ребра у највећем броју случајева биле ограничене на вредности између -0.1 mm и $+0.1\text{ mm}$, иако су највеће забележене вредности биле -0.195 mm и $+0.315\text{ mm}$. Посматрано у односу на укупну дужину узорака, то значи да је највећа забележена вредност била $\approx L/3970$, што је вредност далеко испод критеријума $L/750$ дефинисаног стандардом *SRPS EN 1090-2* за хладно-обликоване елементе. Девијације фланши узорака C100 биле су још нижих вредности него у случају зидова ребара. Међутим, код узорака C150 су забележене нешто веће вредности, које су се кретале око вредности 0.4 mm , уз појаву максималних вредности од око 1.2 mm , што у односу на укупну дужину узорка представља $\approx L/1040$. Иако већих вредности, и имперфекције у правцу јаче осе елемента су остале испод горе поменутог критеријума. Ротације зидова ребра указују на постојање имперфекција у виду торзије попречног пресека целом дужином код свих узорака. Највећи угао отклона попречних пресека на крајевима елемената забележен је код узорка C150-0-e00-1, и износи 2.12° . Са друге стране, најуниформнијим у овом погледу показао се узорак C150-3-e00-1. Анализирањем релативних ротација зидова фланши у односу на зид ребра, уочава се формирање 2 до 3 полуталаса дуж узорака, што јасно указује да је дисторзиони облик имперфекције присутан код свих узорака. Ово додатно поткрепљује и слика имперфекција у виду девијација ребра и фланши, које су такође присутне у 2 до 3 полуталаса дуж елемената.

3.4. ТРЕЋА ФАЗА: ИСПИТИВАЊЕ ХЛАДНО-ОБЛИКОВАНИХ ЕЛЕМЕНАТА

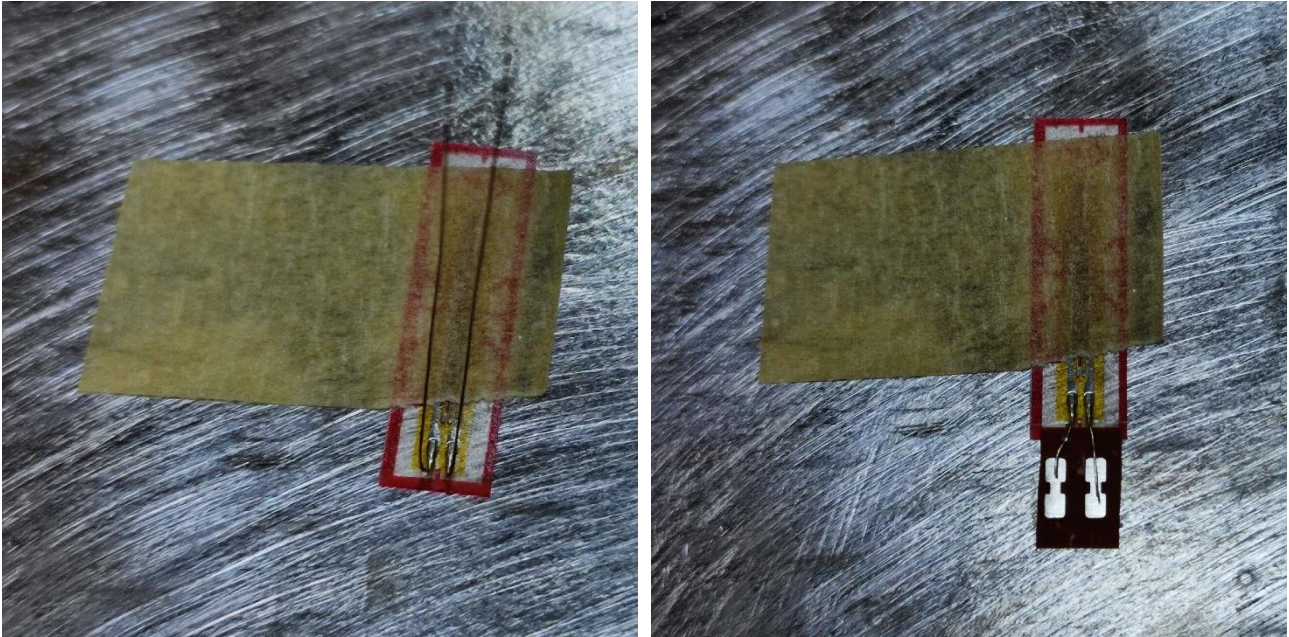
3.4.1. ПРИПРЕМА УЗОРАКА

Први корак у припреми узорака био је заваривање чеоних плоча на крајеве узорака који ће бити испитани на центрични и ексцентрични притисак. Ове плоче су дебљине 4 mm и служе за фиксирање узорака за зглобне ослонце на раму за испитивање. Заваривање плоча на крајеве узорака урађено је у погону компаније *VOS System*, која је произвела и донирала ове узорке. Заваривање је урађено угаоним шавовима са спољашње стране попречних пресека, целом дужином ребра и фланши.

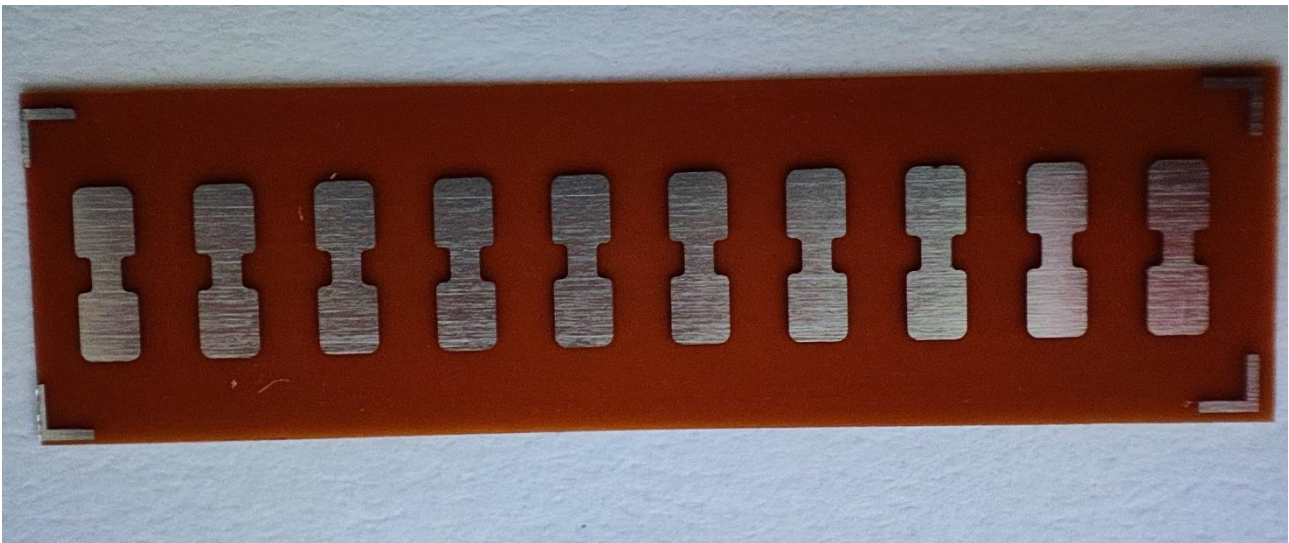
Наредни корак представља припрема површина узорака за лепљење мерних трака за праћење напонско-деформацијског стања. Припрема површина започиње обележавањем позиција благим урезивањем праваца мерних трака. С обзиром на то да је површина узорака глатка и масна, било је потребно прво шмирглом благо охрапавити предвиђена мерна места. Након шмирглања, површине су очишћене органским растварачем масти (бензином), а потом и посебним средством *RMS 1* произвођача *HBM* из Швајцарске на бази ацетона и изопропанола предвиђеним за ту намену.

Пре лепљења мерних трака на површине узорака, потребно је за сваку мерну траку појединачно урадити припрему на неупрљаној независној подлози. Прво, мерна трака се фиксира за подлогу самолепљивом траком и инсталације (лицне) се повијају нагоре, тако да се оне одвоје од краја (ивице) мерне траке. Мерне траке употребљене приликом овог испитивања су типа *PFL-10-11* произвођача *TML* из Јапана, са дужином мерне базе од 10 mm. Мерна трака се састоји од носача проводника направљеног од полиестерске смоле димензија 17.5 x 5.0 mm и решетке проводника димензија 10.0 x 0.9 mm. Проводник представља бакар-никл жица пречника 0.12 mm, приближне дужине 60 mm и отпора $120 \pm 0.3 \Omega$.

Потом се поставља терминал за лемљење тако да један његов крај налегне на ивицу мерне траке са горње стране, а испод повијених лицни. Коришћени су терминали за лемљење *LS7* произвођача *HBM*. Један пар *LS7* терминала за лемљење чине по две никлом обложене бакарне плочице на полиамиду. Пошто се ови терминали испоручују у тракама од по 5 пари, неопходно их је одсећи маказама или скалпелом. Након постављања терминала, лицне се повијају преко терминала и одсецањем се уклања вишак дужине лицне.

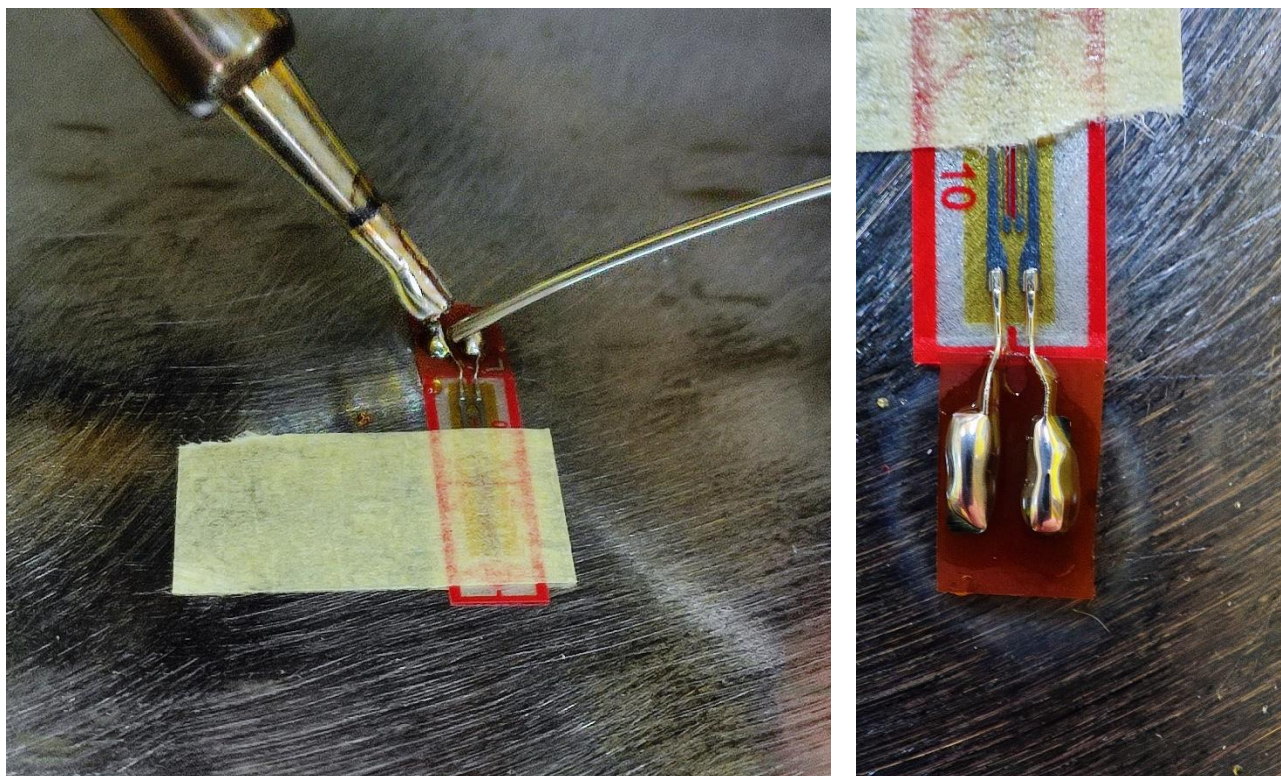


Слика 3.28. Припрема: фиксирање мерне траке за подлогу и повијање инсталација (лево) и мерна трака са уклоњеним вишковима дужина лицни и постављеним терминалом за лемљење (десно)



Слика 3.29. Терминали за лемљење HBM LS7

Следећи корак у припреми мерне траке представља лемљење лицни за терминал. Лемљење је урађено штапном лемилицом. Након лемљења, неопходно је проверити отпор у мерним тракама, чиме се врши контрола успешности лемљења за терминал. Отпор треба да буде у границама декларисаним према произвођачу мерних трака. Пошто се установи да је лемљење успешно урађено, преко преосталог дела мерне траке, лицни и терминала поставља се самолепљива трака.



Слика 3.30. Лемљење лицни за терминал

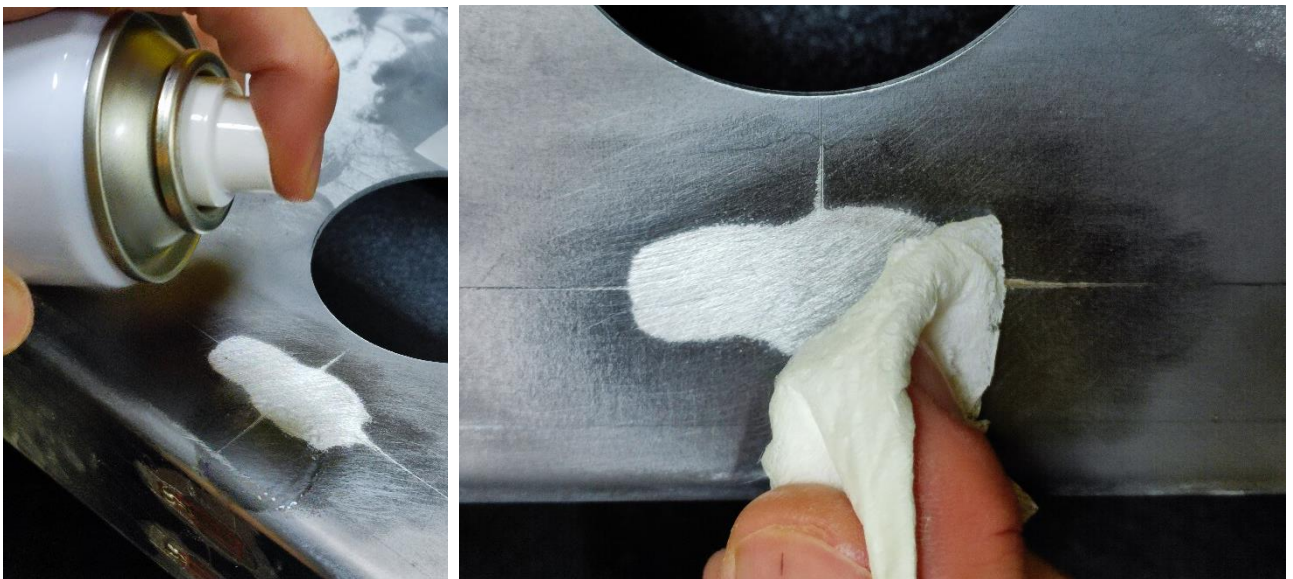


Слика 3.31. Провера отпора у мерној траци након лемљења

Пре постављања сваке мерне траке површина узорка још једном је очишћена средством *RMS 1* како би се уклонила прашина.



Слика 3.32. Мерне траке припремљене за лепљење

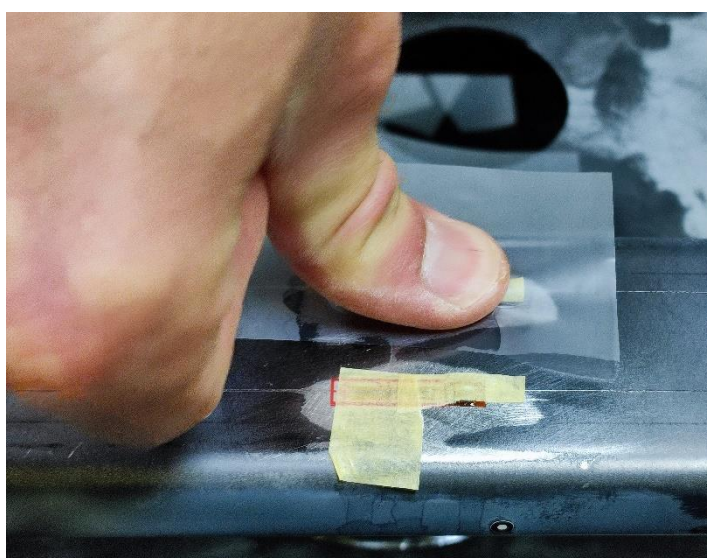


Слика 3.33. Чишћење површине узорка пре лепљења мерне траке

Након чишћења површине узорка, припремљена мерна трака се поставља у предвиђени положај и за површину узорка фиксира самолепљивом траком. На површину узорка испод мерне траке наноси се лепак и пажљиво размазује дуж зоне обухваћене мерном траком и терминалом. За лепљење мерних трака је коришћен лепак *Z70* произвођача *HBM*. Једна кап овог лепка била је довољна за лепљење једне мерне траке. Чврст притисак прстом преко целе површине мерне траке у трајању од око 60 секунди потребан је за сигурно лепљење.



Слика 3.34. RMS 1 спреј за уклањање нечистоће (лево) и лепак Z70 за лепљење мерних трака (десно)



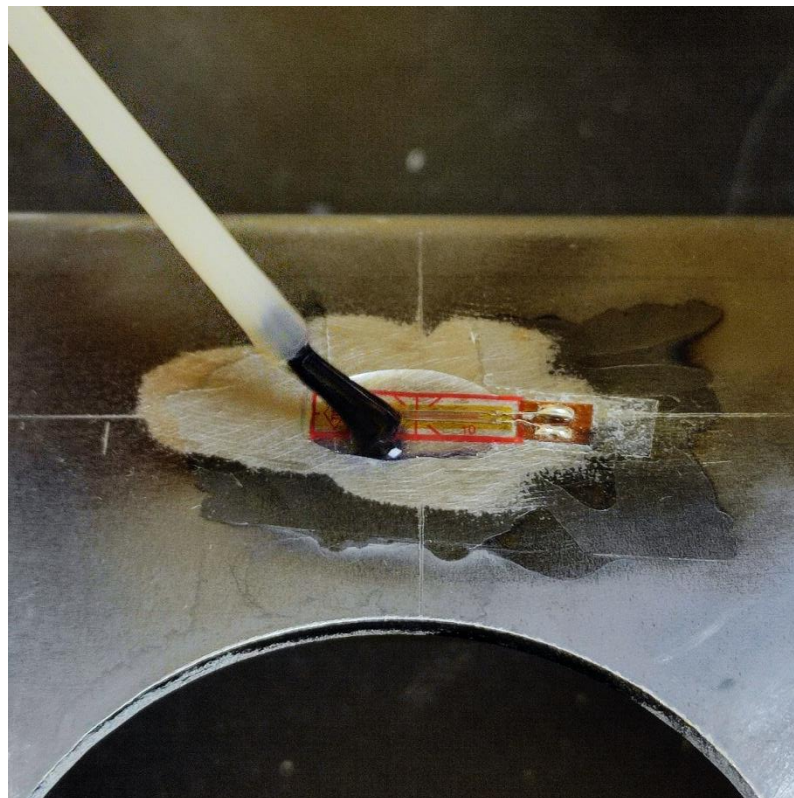
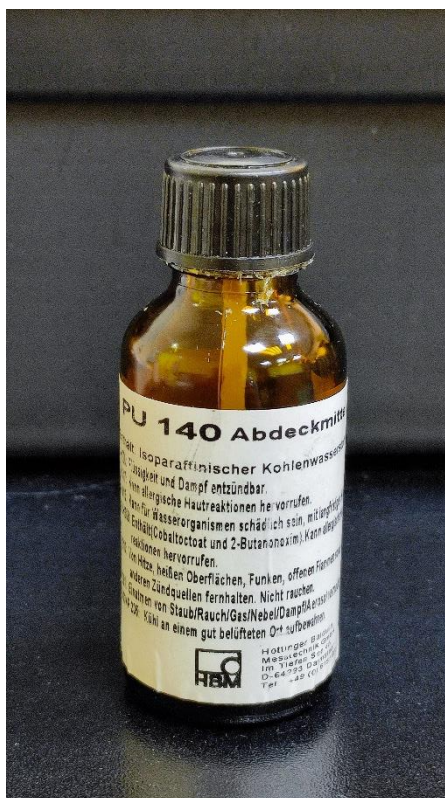
Слика 3.35. Наношење лепка на површину узорка (лево) и лепљење мерне траке (десно)

Залепљену мерну траку потребно је оставити неколико минута ради сушења лепка. Након скидања самолепљиве траке и поновљене контроле отпора у мерној траци, преко мерне траке се наноси полиуретански премаз *PU 140*, који представља заштиту за мерну траку од хемијских и механичких утицаја. Површину узорка, на коју је нанет премаз, потребно је оставити у хоризонталном положају у трајању од око сат времена ради очвршћавања, пошто је премаз полу-течне конзистенције.



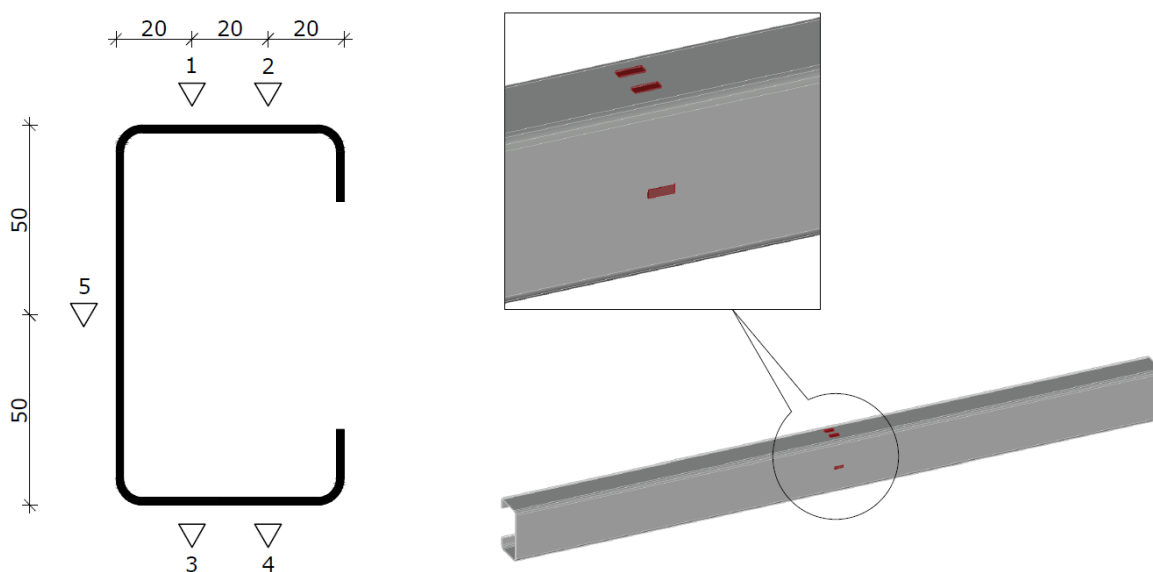
Слика 3.36. Контрола отпора у мерној траци након лепљења

Приликом овог испитивања на узорке је залепљено укупно 246 мерних трака у различитим конфигурацијама, у зависности од типа узорка. Најмањи број мерних трака по узорку је присутан код појединих узорака са 3 отвора у ребру. С обзиром на то да је нормалну силу у узорку могуће пратити, осим помоћу мерних трака, и преко давача силе, од интереса је одредити и максималан момент савијања који се јавља у близини средине распона елемента, па су 4 мерне траке биле довољне за ту сврху (по 2 на сваку фланшу). Са друге стране, највећи број мерних трака по узорку се јавља код узорака са 2 отвора у ребру. У овом случају је било од интереса пратити промену унутрашњих сила у попречном пресеку на месту рупе (која се налази у близини краја елемента) и у попречном пресеку на средини распона елемента, будући да се очекује да на том месту ефекти другог реда буду најизраженији. Укупно 9 мерних трака је искоришћено у овој конфигурацији (6 у попречном пресеку на месту рупе и 3 у попречном пресеку на средини распона).

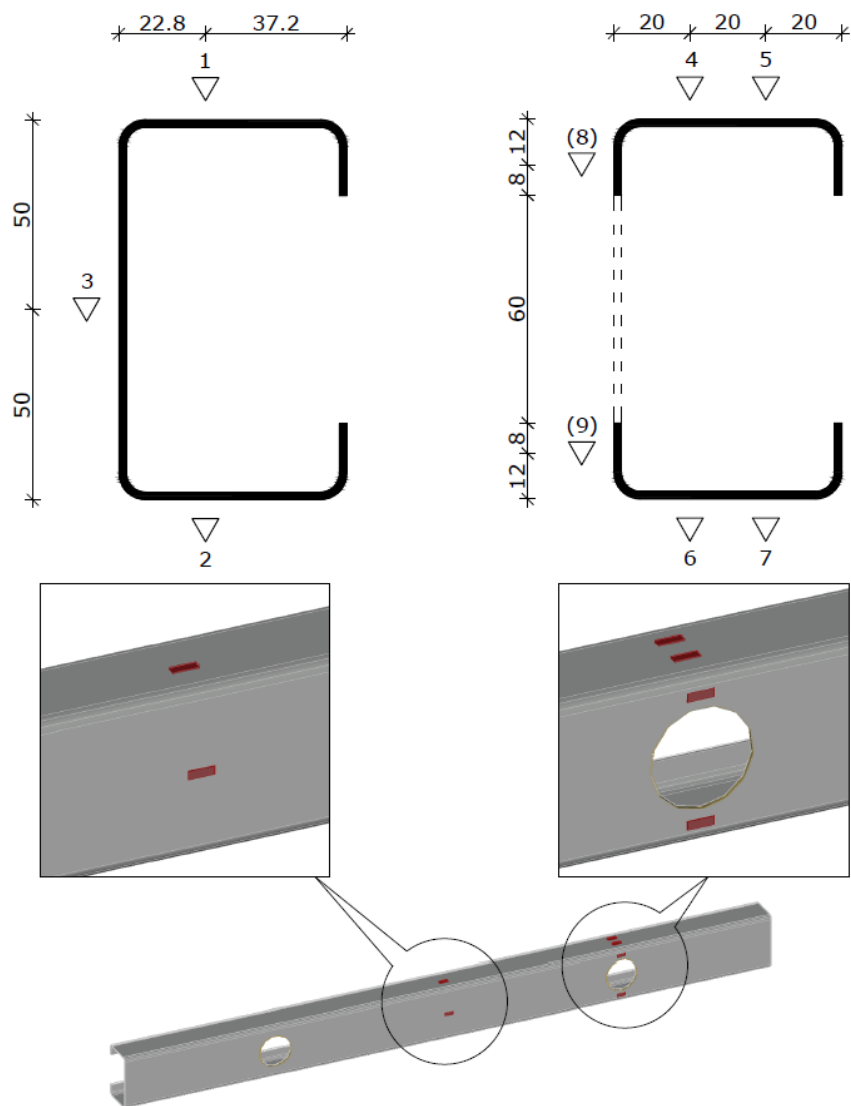


Слика 3.37. Заштитни премаз *PU 140* (лево) и
наношење премаза *PU 140* преко мерне траке (десно)

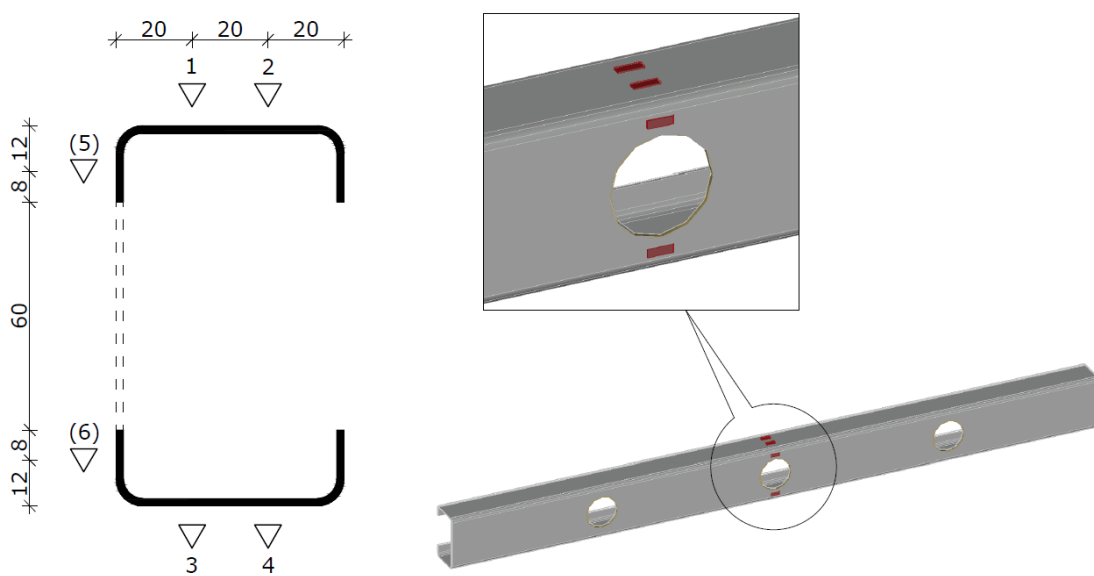
На сликама 3.38 до 3.40 приказани су распореди мерних трака за узорке *C100*, а у табели 3.5 је дат њихов преглед. На цртежима узорака са два и три отвора у ребру јављају се мерне траке чији се редни број налази у загради – (5), (6), (8) и (9). Овако означене мерне траке су присутне код половине од укупног броја комада узорака исте серије.



Слика 3.38. Распоред мерних трака код узорака *C100-0*



Слика 3.39. Распоред мерних трака код узорка C100-2

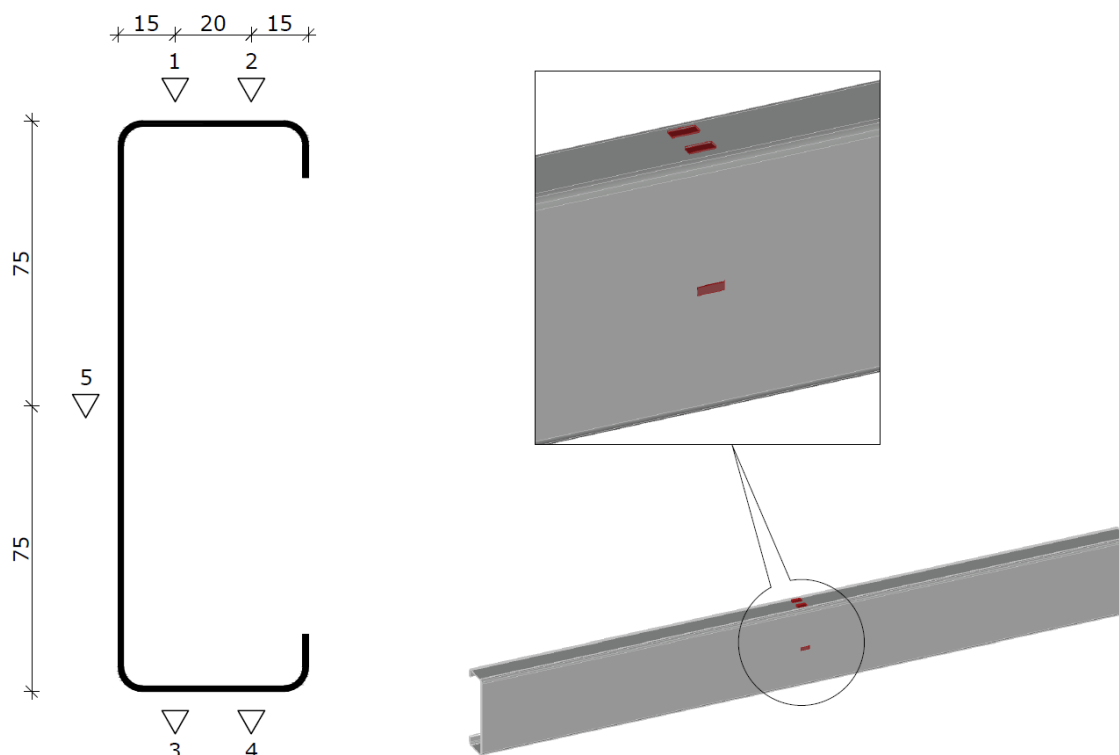


Слика 3.40. Распоред мерних трака код узорка C100-3

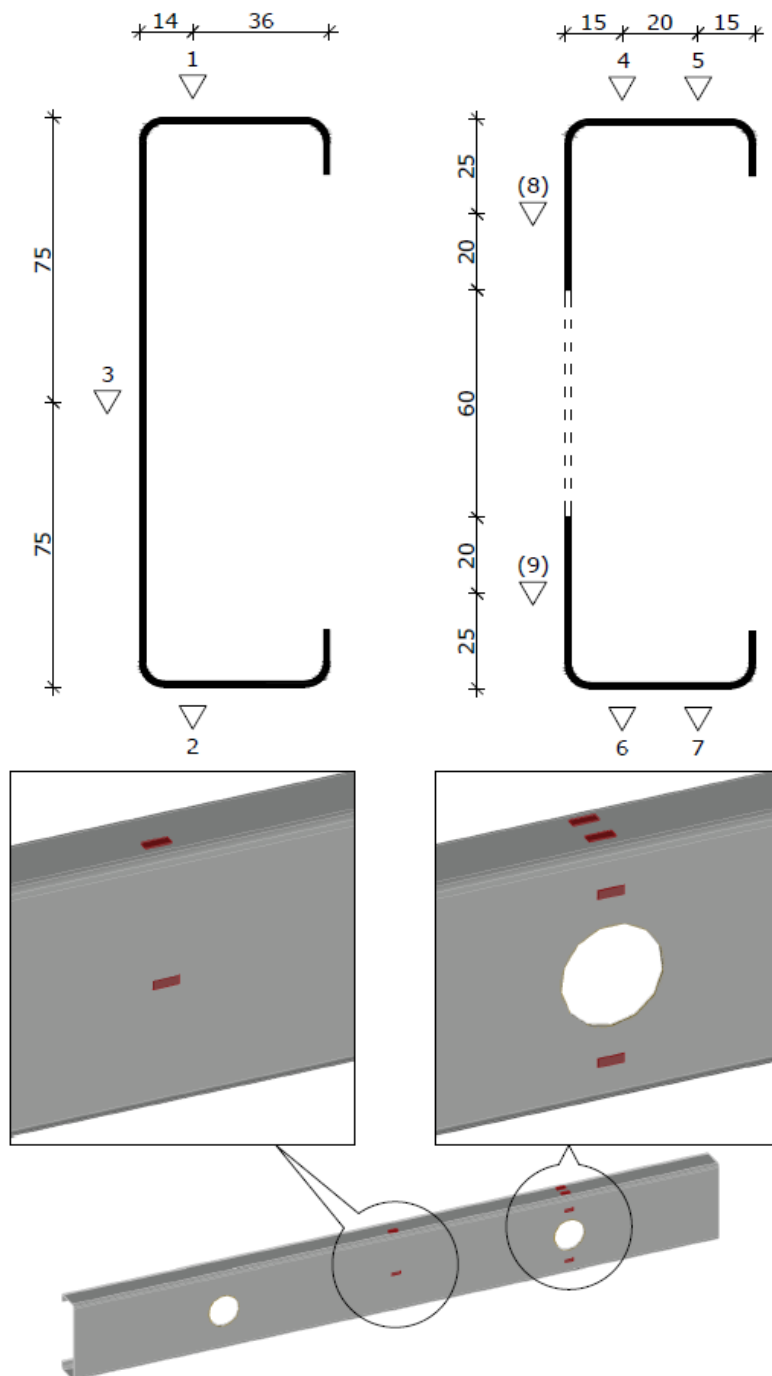
Табела 3.5. Преглед мерних трака узорака C100

Ознака узорка	Број мерних трака	Ознака мерних трака
C100-0	5	1, 2, 3, 4, 5
C100-2-e00-1	9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
C100-2-e40-1		
C100-2-e80-1		
C100-2-e00-2	7	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
C100-2-e40-2		
C100-2-e80-2		
C100-3-e00-1	6	1, 2, 3, 4, 5, 6
C100-3-e40-1		
C100-3-e80-1		
C100-3-e00-2	4	1, 2, 3, 4
C100-3-e40-2		
C100-3-e80-2		

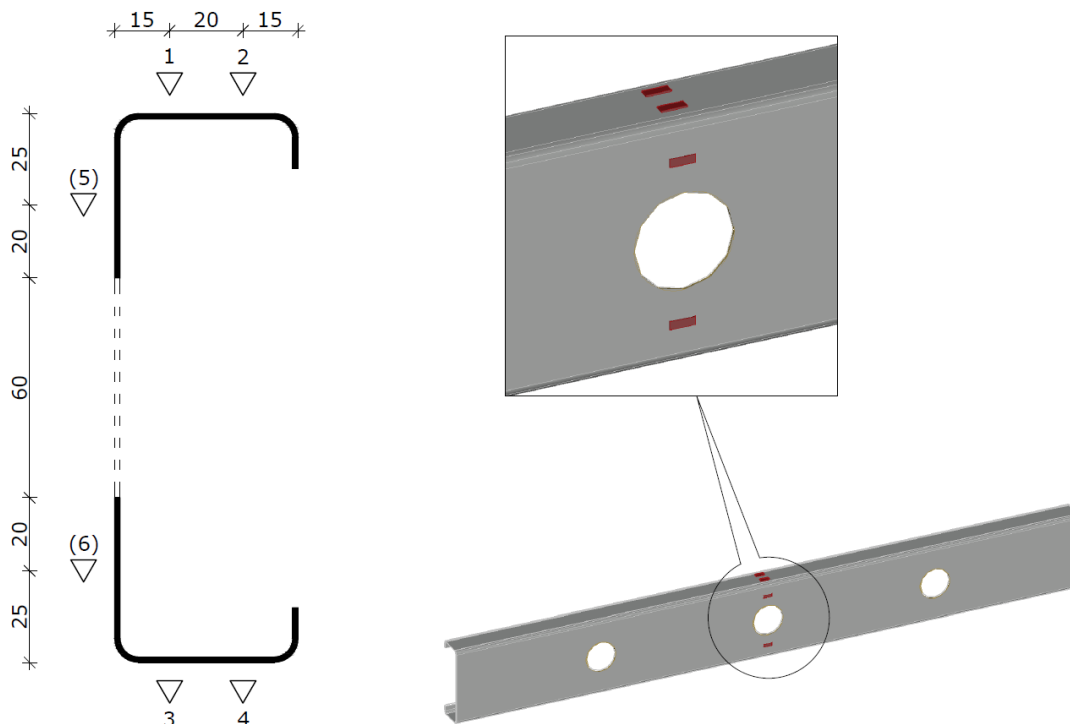
На сликама 3.41 до 3.43 приказани су распореди мерних трака за узорке C150, а у табели 3.6 је дат њихов преглед. Коментар у вези са ознакама мерних трака означених са (5), (6), (8) и (9) код узорка C100, важи и у случају узорка C150.



Слика 3.41. Распоред мерних трака код узорка C150-0



Слика 3.42. Распоред мерних трака код узорка C150-2



Слика 3.43. Распоред мерних трака код узорка C150-3

Табела 3.6. Преглед мерних трака узорка C150

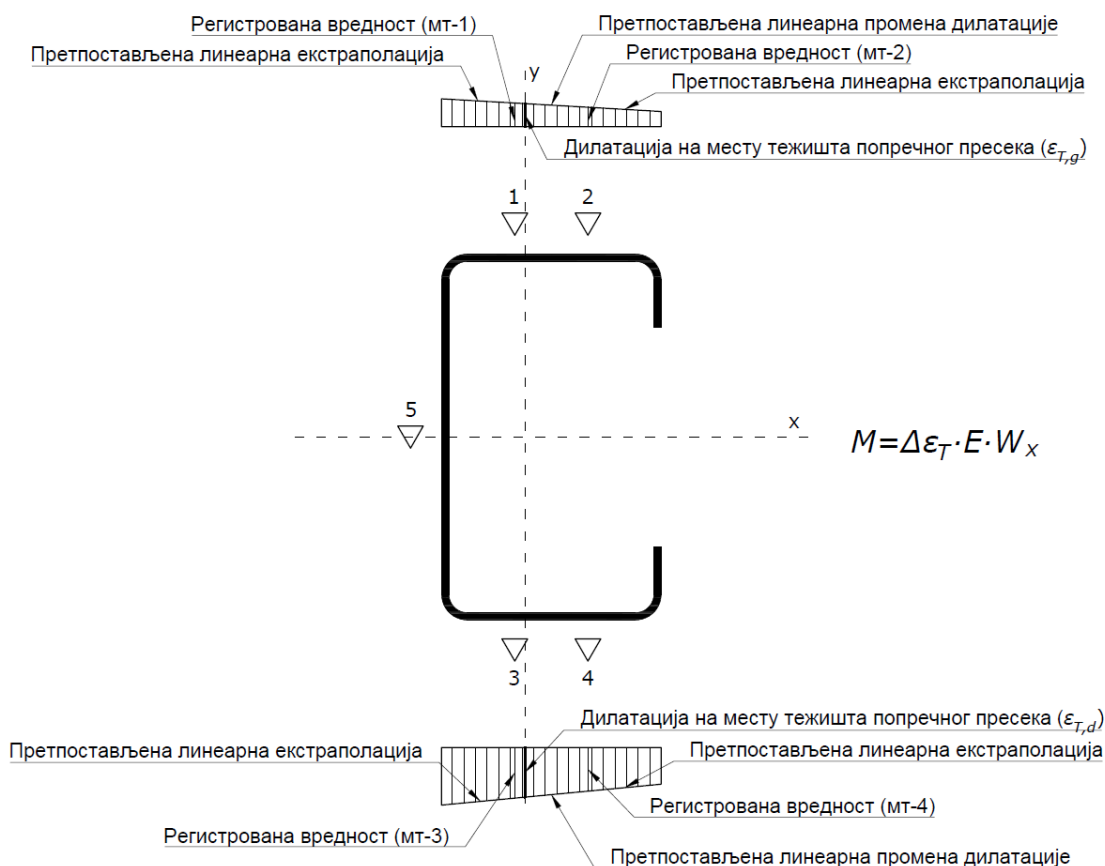
Ознака узорка	Број мерних трака	Ознака мерних трака
C150-0	5	1, 2, 3, 4, 5
C150-2-e00-1	9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
C150-2-e40-1		
C150-2-e80-1		
C150-2-e00-2	7	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
C150-2-e40-2		
C100-2-e80-2		
C150-3-e00-1	6	1, 2, 3, 4, 5, 6
C150-3-e40-1		
C150-3-e80-1		
C150-3-e00-2	4	1, 2, 3, 4
C150-3-e40-2		
C150-3-e80-2		

3.4.2. ОПИС ПОСТУПКА ИСПИТИВАЊА

Трећа фаза експерименталног испитивања - испитивање хладно-обликованих елемената са отворима у ребру на дејства центричног и ексцентричног притиска - спроведена је у лабораторији за испитивање конструкција Департмана за

грађевинарство и геодезију Факултета техничких наука у Новом Саду. Лабораторијски рам за испитивање конструкција сачињен од греда профила *HEA 280* и стубова профила *UPN 260* коришћен том приликом произведен је у погону фирме Челик д.о.о. Конструкција рама је затвореног типа, у оквиру које силе аплициране током теста оптерећења остају задржане у раму, тј. не преносе се на под лабораторије.

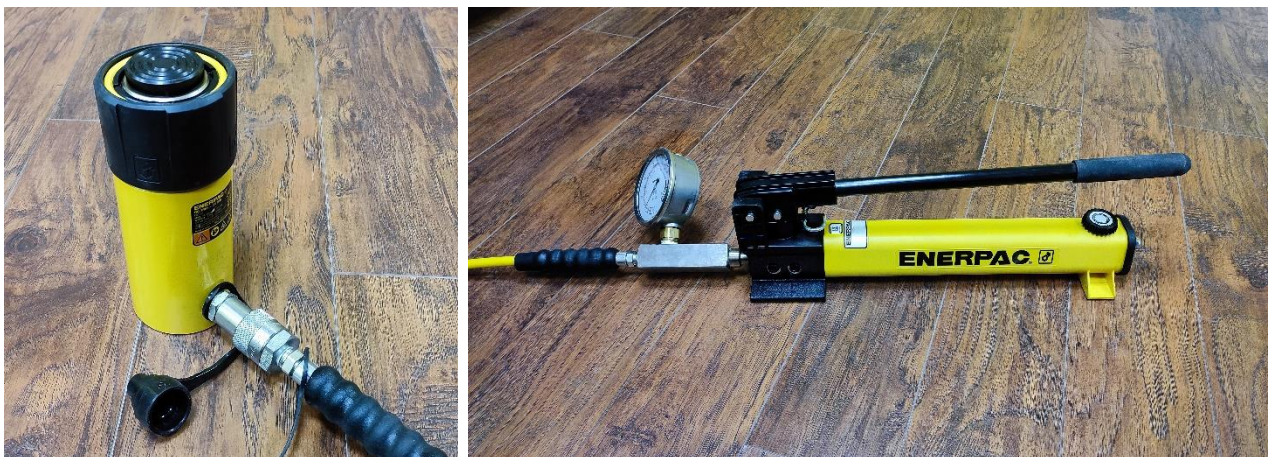
За доношење оптерећења коришћен је хидраулични цилиндар *ENERPAC RC-254* капацитета 25 t са пумпом *ENERPAC P-392* максималног радног притиска од 700 bar. Мерење притисне силе током теста вршено је помоћу давача силе *HBM-C2F-S20* укупног капацитета 200 kN. Померања су током испитивања мерена помоћу четири индуктивна давача померања *HBM-WA*, од којих су три имала могућност хода 50 mm, а један 100 mm. Нагиби ослоначких плоча на оба краја су мерени инклинометрима *SST151-30-P* произвођача *Vigor Technology*, чији је опсег мерења нагиба $\pm 30^\circ$. Записи мерних трака коришћених за мерење напонско-деформацијског стања послужили су за одређивање момента савијања у попречним пресецима у којима су мерне траке позициониране. На слици 3.44 је приказан пример одређивања момента савијања у попречном пресеку узорка *C100-0* на основу записа мерних трака.



Слика 3.44. Пример одређивања момента савијања у попречном пресеку узорка *C100-0* на основу записа мерних трака

Мерне траке су код свих узорака биле постављене у попречном пресеку на средини висине/распона узорка, тј. на месту где се очекује највећи утицај ефеката другог реда.

С обзиром на то да је коришћено укупно 7 индуктивних сензора, те да је највише 9 мерних трака на једном узорку било присутно током испитивања, за прикупљање података коришћена су два осмоканална аквизициона уређаја *Quantum MX 840A* произвођача *HBM*. Иако овај уређај има капацитет од 40000 записа у секунди по каналу, услед квази-статичке природе овог испитивања 10 записа у секунди по каналу било је довољно за регистровање свих мерених величина. За праћење и контролу рада уређаја коришћен је софтвер *MX Assistant*. На наредним сликама су приказани хидраулични цилиндар са пумпом, сензори и аквизициони уређаји коришћени приликом испитивања, као и кориснички интерфејс софтвера *MX Assistant*.



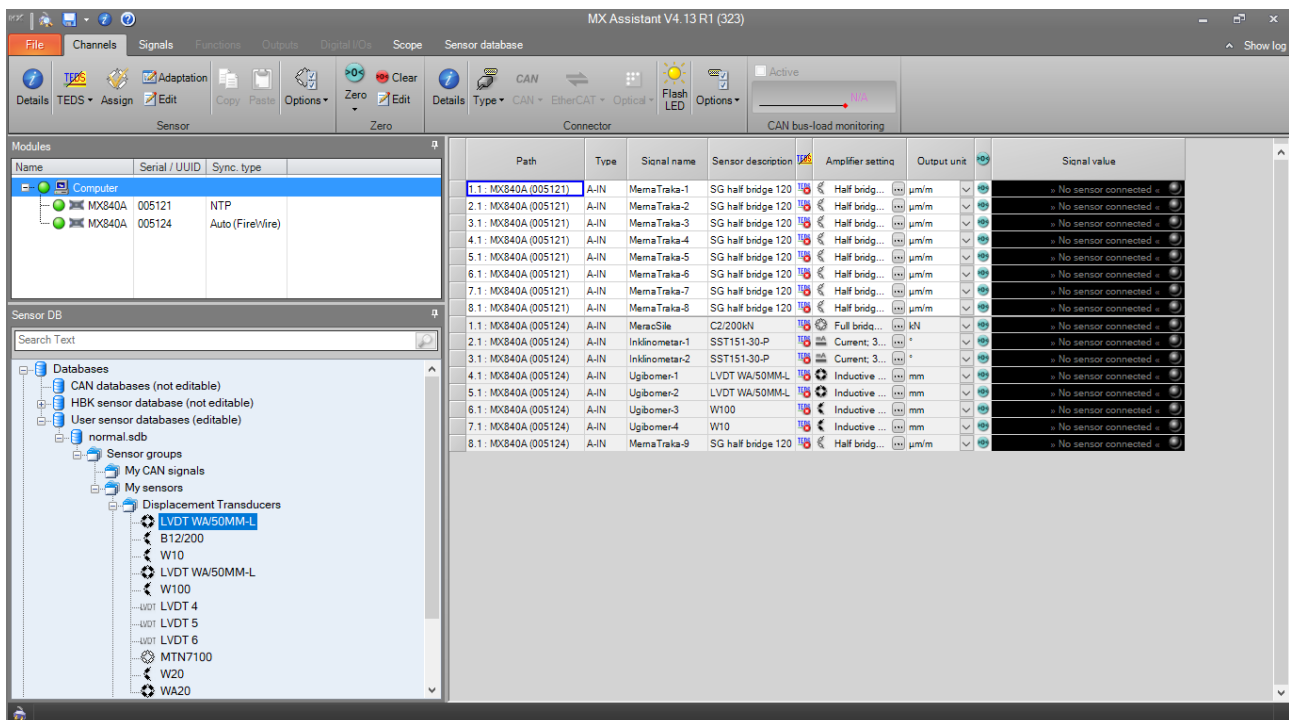
Слика 3.45. Хидраулични цилиндар *ENERPAC RC-254* (лево)
и пумпа *ENERPAC P-392* (десно)



Слика 3.46. Давач силе *HBM-C2F-S20/200kN* (лево)
и инклинометар *SST151-30-P* (десно)



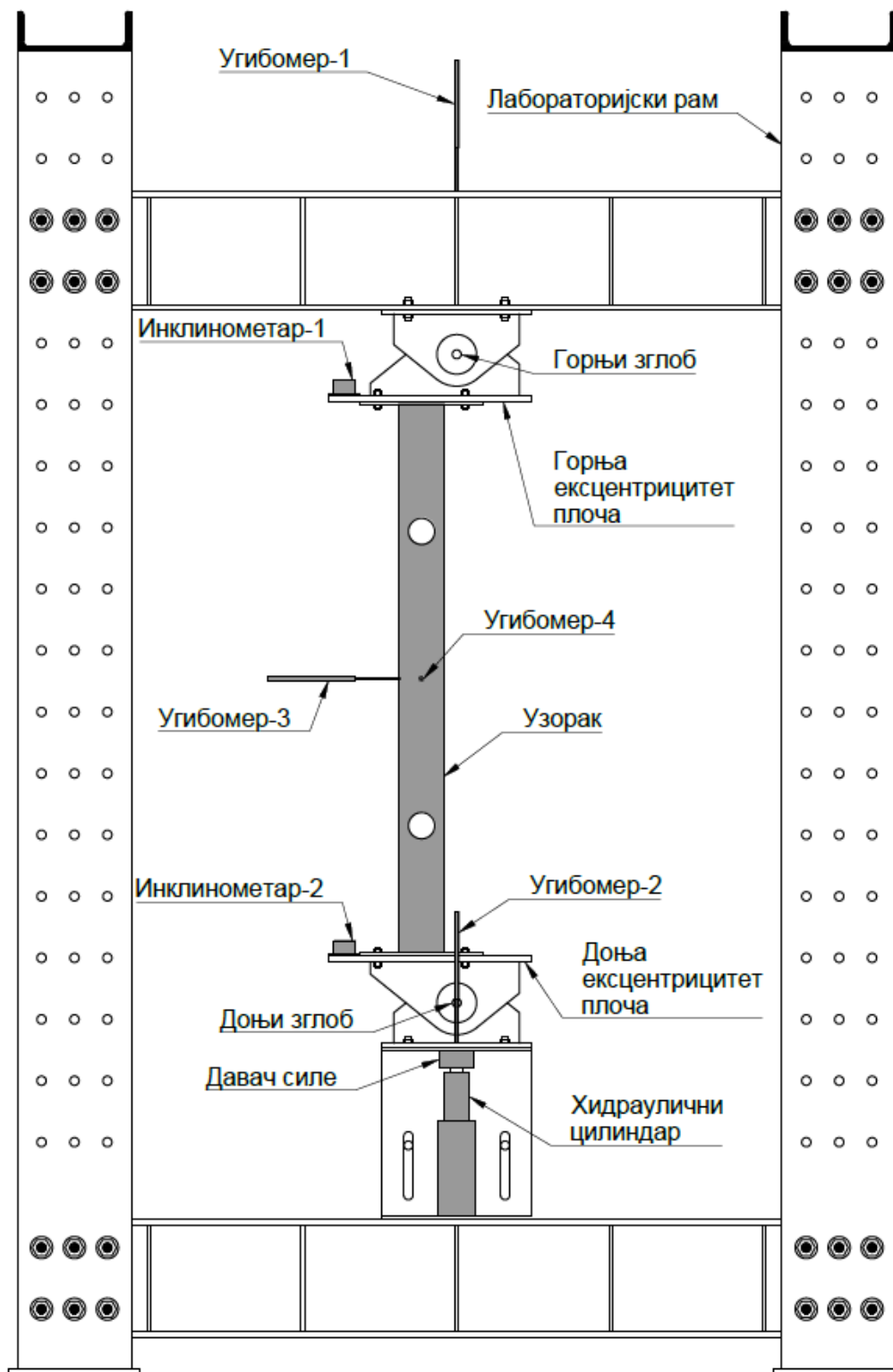
Слика 3.47. Индуктивни давач померања *HBM-WA/50mm* (лево) и два осмоканална аквизициона уређаја *Quantum MX 840A* (десно)



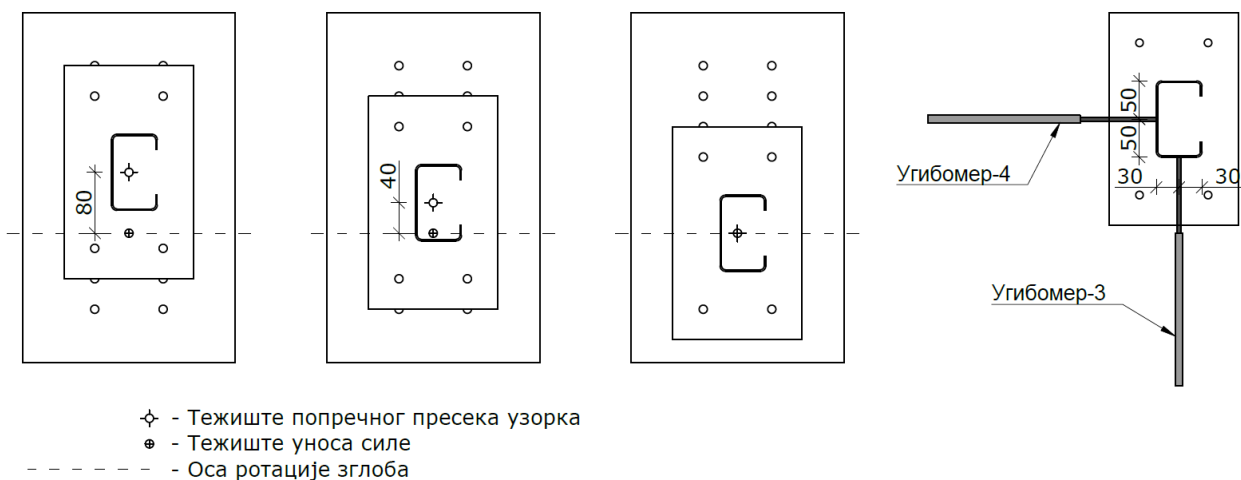
Слика 3.48. Кориснички интерфејс софтвера *MX Assistant*

Узорци испитани на центрични и ексцентрични притисак били су постављени у вертикални положај, и за конструкцију рама су били повезани преко зглобних лежишта, посебно пројектованих за потребе овог истраживања. Свако од ових лежишта састоји се од два склопа челичних плоча, кроз које се провлачи трн који обезбеђује ротацију. Склоп који служи за повезивање узорка садржи плочу са низом рупа за завртње, чије су позиције пројектоване тако да унос силе, може бити центричан, али и остварен са ексцентрицитетом од 40, 80 и 120 mm. Растојање од крајева узорка до осе ротације лежишта износи 113.5 mm, те је ефективна дужина испитаних узорка увећана за $2 \cdot 113.5$ mm у односу на номиналу дужину узорка, и износи 1477.0 mm. На слици 3.49 дат је приказ поставке за испитивање узорка на дејство центричног и ексцентричног притиска, а на слици 3.50 позиције узорка

у центричним и ексцентричним положајима и распоред угибомера за мерење хоризонталног померања у пресеку на средини распона узорка. Подаци добијени сензором Угибомер-3 послужили су за контролу величине момента савијања око јаче осе попречног пресека, одређених на основу записа мерних трака.



Слика 3.49. Приказ поставке за испитивање узорка на дејство центричног/ексцентричног притиска

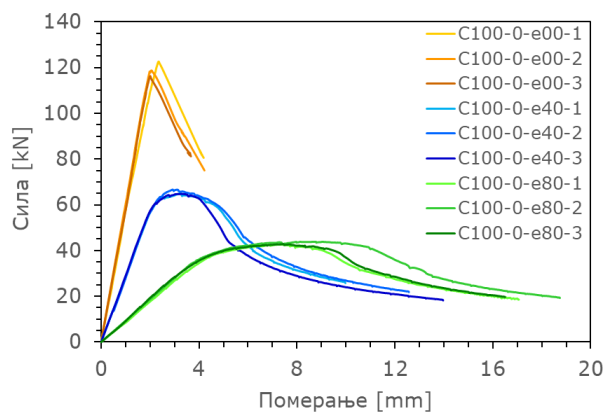


Слика 3.50. Центрични и ексцентрични положаји узорака (лево) и распоред угибомера за мерење хоризонталног померања (десно)

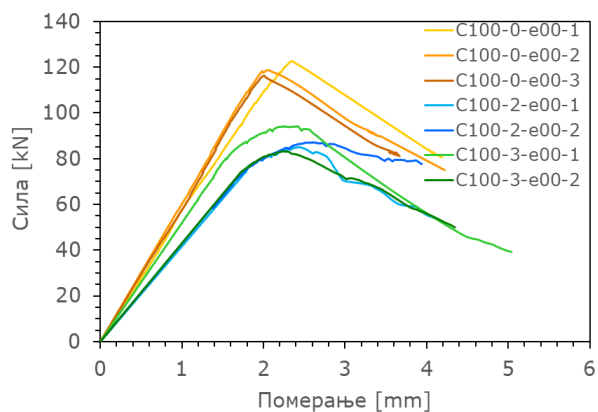
На дејство центричног притиска испитано је укупно 14 узорака, по 7 узорака *C100* и 7 узорака *C150*. У свакој од те две групе узорака, по 3 узорка нису имала отвор у ребру, 2 узорка су имала 2 отвора, док су на преостала 2 узорка била присутна 3 отвора дуж ребра. На дејство ексцентричног притиска испитано је укупно 28 узорака, по 14 са силом унетом на ексцентрицитету од 40 mm и 14 на ексцентрицитету од 80 mm, према идентичној бројној расподели као и у случају центричног притиска.

3.4.3. РЕЗУЛТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ ИСПИТИВАЊА

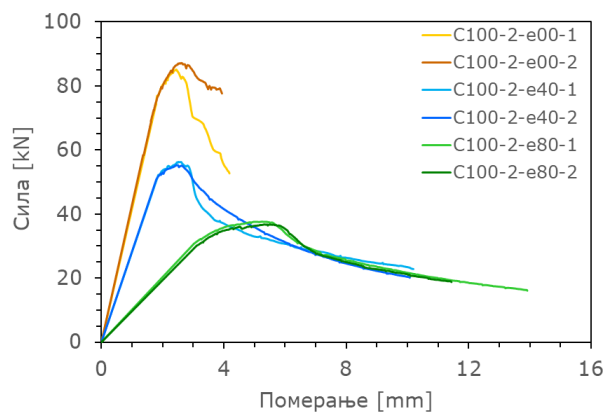
У овом поглављу су приказани најбитнији резултати испитивања понашања хладно-обликованих елемената услед центричног и ексцентричног притиска. На сликама 3.51 и 3.52 су приказани дијаграми зависности силе притиска у узорку и вертикалног померања хидрауличне пресе (померање у правцу осе узорка) за узорке *C100* и *C150*, редом. На дијаграмима а), б) и в) на обе слике приказани су резултати за елементе без отвора у ребру, са 2 и са 3 отвора у ребру, редом. На дијаграмима г), д) и ђ) резултати су груписани према величини ексцентрицитета са којим је нането оптерећење (0.0, 40.0 и 80.0 mm, редом).



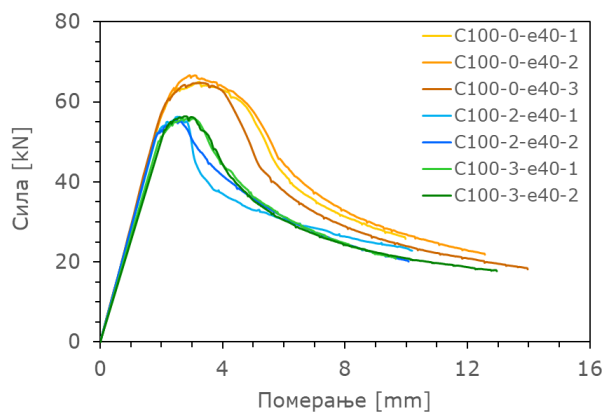
а)



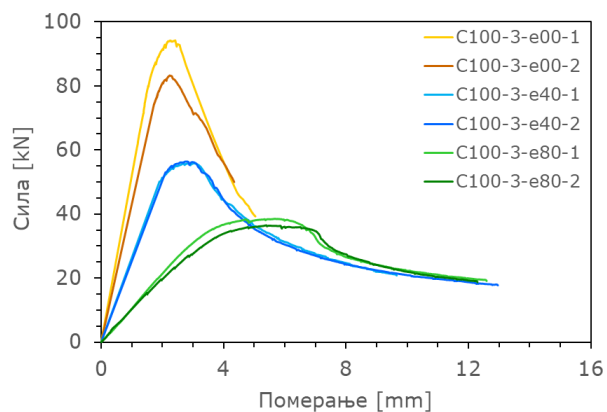
г)



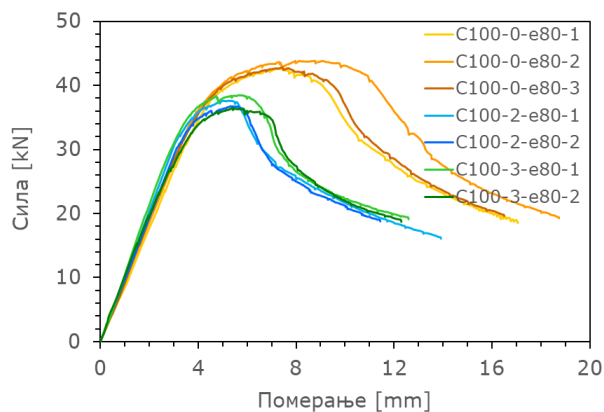
б)



д)

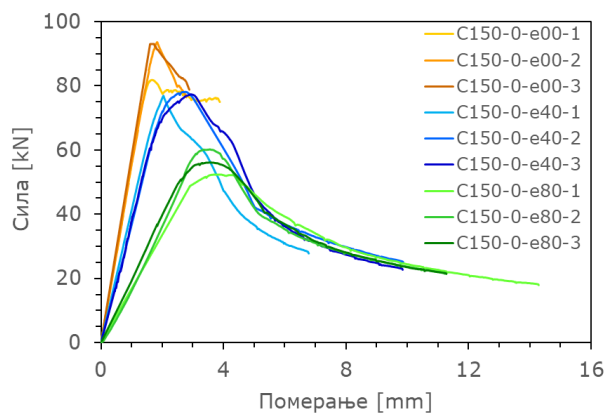


в)

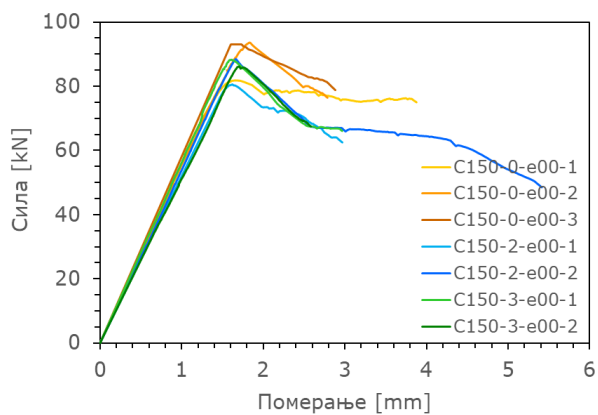


ђ)

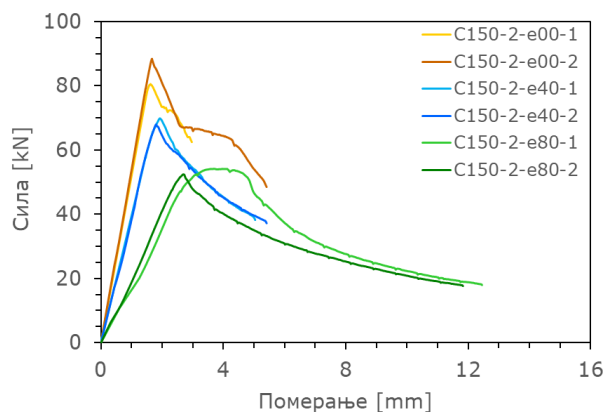
Слика 3.51. Дијаграм зависности силе притиска у узорку и вертикалног померања хидрауличне пресе (померање у правцу осе узорка) за узорке C100: а) без отвора у ребру, б) са 2 отвора у ребру, в) са 3 отвора у ребру, г) оптерећене центричним притиском, д) оптерећене силом на ексцентрицитету од 40 mm и ђ) оптерећене силом на ексцентрицитету од 80 mm



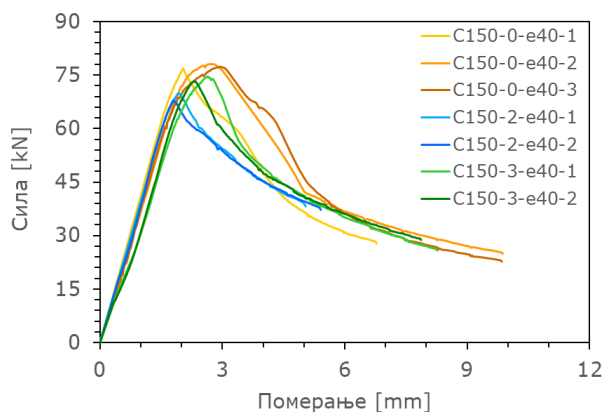
а)



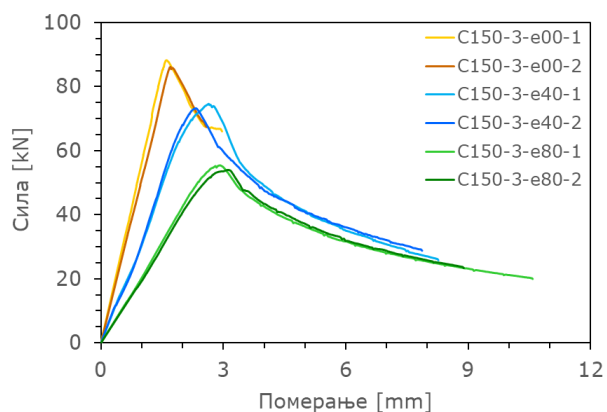
г)



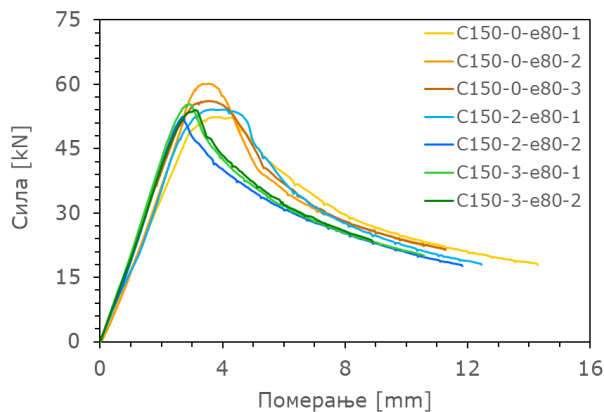
б)



д)



в)



ђ)

Слика 3.52. Дијаграм зависности силе притиска у узорку и вертикалног померања хидрауличне пресе (померање у правцу осе узорка) за узорке C150: а) без отвора у ребру, б) са 2 отвора у ребру, в) са 3 отвора у ребру, г) оптерећене центричним притиском, д) оптерећене силом на ексцентрицитету од 40 mm и ђ) оптерећене силом на ексцентрицитету од 80 mm

С обзиром на то да је услед центричног притиска вредност нормалног напона приближно константна у целом попречном пресеку, сваки прираштај спољашње

силе која уноси центричан притисак значи и прираштај напона притиска у сваком влакну (спољашњем и унутрашњем) попречног пресека. Стога, вредности нормалног напона у сваком влакну у приближно исто време достижу критичне вредности. Због тога, појава извијања је код центрично оптерећених узорака била нагла и праћена брзим падом носивости елемента. Са друге стране, у случају ексцентричног притиска, вредности нормалног напона у попречном пресеку нису константне, већ променљиве. Штавише, могућ је случај да се на супротним странама попречног пресека јаве вредности различитог предзнака. У тим случајевима, прираштај нормалног напона у попречном пресеку изазваног прираштајем спољашње силе ће прво изазвати достизање критичног напона у једном делу пресека, пре него у осталим. Из тог разлога је прелазак у нестабилно стање код ексцентрично притиснутих елемената био блажи, при чему се он одвијао све спорије са порастом ексцентрицитета. Очекивано, са повећањем ексцентрицитета, елементи су приказивали особине веће дуктилности. Пад носивости је у тим случајевима био блажи у односу на центрично притиснуте узорке. Међутим, поредећи понашање ексцентрично притиснутих узорака *C100* и *C150*, примећује се да је код узорака *C150* појава губитка стабилности ипак била наглија и праћена стрмијим падом носивости.

Будући да су на претходним сликама приказани дијаграми зависности аксијалне силе и скраћења узорка у правцу осе елемента (правцу пре наношења оптерећења), почетна грана свих кривих указује на величину аксијалне крутости узорака. Очекивано, крутост је била највећа приликом центричног оптерећења, а потом је опадала са порастом ексцентрицитета.

Поредећи носивост узорака *C100* у оквиру једне групе ексцентрицитета оптерећења, примећује се да је носивост елемената без отвора изразито већа у односу на елементе са отворима, али и да број отвора није играо велику улогу, како у погледу постигнуте носивости, тако и у погледу остварене дуктилности. Са друге стране, разлика вредности носивости у оквирима једне групе ексцентрицитета код узорака *C150* је много мања у односу на претходни случај. Разлог се може тражити у чињеници да је величина отвора у оба случаја била иста ($\emptyset = 60 \text{ mm}$), те да посматрано релативно у односу на површину ребра, захвата мањи удео код узорака *C150*. Осим тога, отвор својим димензијама захвата релативно већи део ефективне површине ребра код узорака *C100*, што није случај код узорака *C150*.

У табелама 3.7 до 3.12 истакнути су кључни резултати експерименталног истраживања, редом за групе узорака *C100-0*, *C100-2*, *C100-3*, *C150-0*, *C150-2* и *C150-3*. За сваки испитани узорак наведен је доминантан облик извијања (Л – локални, Д – дисторзиони, Г – глобални), максимална сила притиска и максималан момент савијања око јаче осе постигнути током теста, као и сила притиска и момент

савијања око јаче осе у тренутку до којег се сматра да се узорак налази у еластичној области, непосредно пре губитка стабилности.

Табела 3.7. Резултати експерименталног испитивања понашања узорака C100-0 услед центрчног и ексцентричног притиска

Узорак	Облик извијања	$N_{u,t}$ [kN]	$N_{p,t}$ [kN]	$M_{u,t}$ [kNm]	$M_{p,t}$ [kNm]
C100-0-e00-1	Л	122.64	120.0	0.163	0.160
C100-0-e00-2	Л	118.71	116.0	0.121	0.118
C100-0-e00-3	Л	116.31	114.0	0.124	0.120
Средња вредност		119.22	116.67	0.136	0.133
Стандардна девијација		2.61 (2.19%)	2.49 (2.14%)	0.019 (14.01%)	0.019 (14.58%)
C100-0-e40-1	Л + Д	64.97	57.0	3.212	2.552
C100-0-e40-2	Л + Д	66.63	59.0	3.289	2.650
C100-0-e40-3	Л + Д	64.79	58.0	3.156	2.601
Средња вредност		65.46	58.00	3.219	2.601
Стандардна девијација		0.83 (1.27%)	0.82 (1.41%)	0.05 (1.69%)	0.04 (1.57%)
C100-0-e80-1	Л + Д	42.59	35.5	3.980	3.150
C100-0-e80-2	Л + Д	43.86	34.5	4.267	3.004
C100-0-e80-3	Л + Д	42.83	34.0	4.061	2.948
Средња вредност		43.09	34.67	4.103	3.034
Стандардна девијација		0.55 (1.27%)	0.62 (1.80%)	0.12 (2.95%)	0.08 (2.80)

Табела 3.8. Резултати експерименталног испитивања понашања узорака C100-2 услед центричног и ексцентричног притиска

Узорак	Облик извијања	$N_{u,t}$ [kN]	$N_{p,t}$ [kN]	$M_{u,t}$ [kNm]	$M_{p,t}$ [kNm]
C100-2-e00-1	Л	85.14	76.0	0.683	0.110
C100-2-e00-2	Л	87.18	73.0	0.226	0.085
Средња вредност		86.16	74.50	0.454	0.098
Стандардна девијација		1.02 (1.18%)	1.50 (2.01%)	0.229 (50.30%)	0.013 (12.82%)
C100-2-e40-1	Л + Д	56.30	52.0	2.708	2.303
C100-2-e40-2	Л + Д	55.26	50.5	2.595	2.261
Средња вредност		55.78	51.52	2.651	2.282
Стандардна девијација		0.52 (0.93%)	0.75 (1.46%)	0.06 (2.11%)	0.02 (0.88%)
C100-2-e80-1	Л + Д	37.61	31.0	3.472	2.698
C100-2-e80-2	Л + Д	36.75	30.0	3.429	2.653
Средња вредност		37.18	30.50	3.450	2.676
Стандардна девијација		0.43 (1.16%)	0.50 (1.64%)	0.02 (0.63%)	0.03 (0.93%)

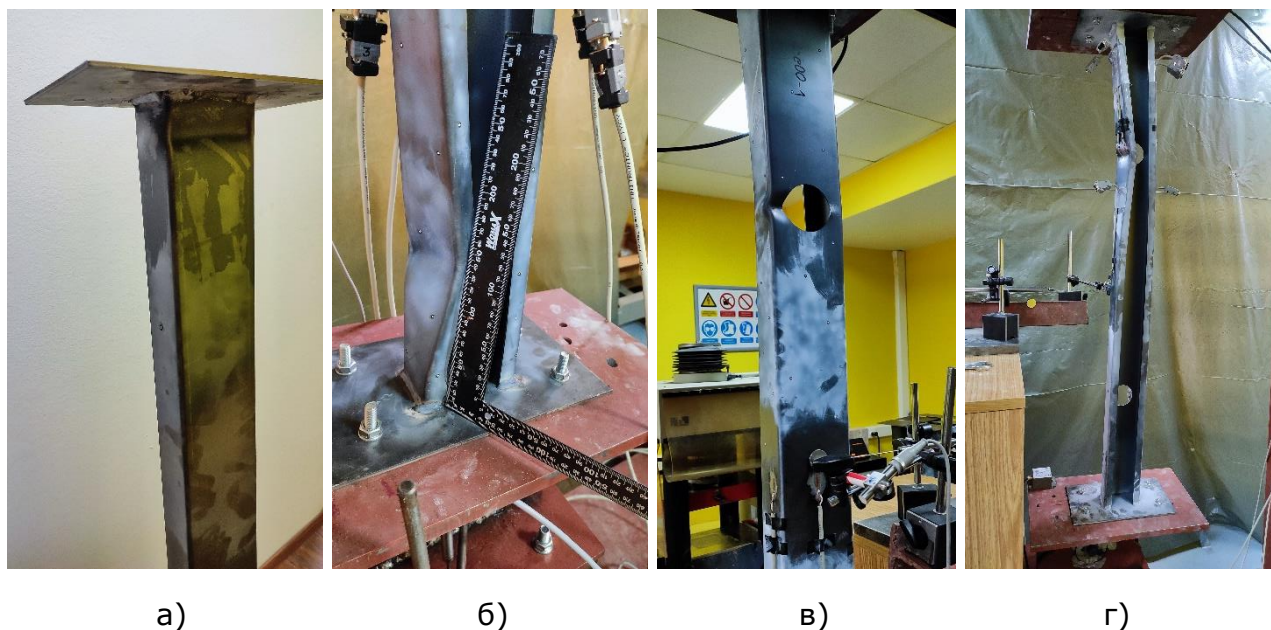
Табела 3.9. Резултати експерименталног испитивања понашања узорака *C100-3* услед центричног и ексцентричног притиска

Узорак	Облик извијања	$N_{u,t}$ [kN]	$N_{p,t}$ [kN]	$M_{u,t}$ [kNm]	$M_{p,t}$ [kNm]
C100-3-e00-1	Г + Л	94.21	80.0	1.250	0.120
C100-3-e00-2	Л	83.27	75.0	0.712	0.120
Средња вредност		88.74	77.50	0.981	0.120
Стандардна девијација		5.47 (6.17%)	2.50 (3.23%)	0.269 (27.45%)	0.000 (0.00%)
C100-3-e40-1	Л + Д	55.92	50.5	2.657	2.203
C100-3-e40-2	Г + Д	56.40	52.5	2.810	2.301
Средња вредност		56.16	51.50	2.73	2.252
Стандардна девијација		0.24 (0.42%)	1.00 (1.94%)	0.08 (2.80%)	0.05 (2.22%)
C100-3-e80-1	Г + Л	38.48	33.0	3.667	2.848
C100-3-e80-2	Г + Л	36.48	31.0	3.467	2.652
Средња вредност		37.48	32.00	3.567	2.750
Стандардна девијација		1.00 (2.67%)	1.00 (3.13%)	0.10 (2.80%)	0.10 (3.64%)

У свакој од група *C100* узорака највеће варијације вредности максималне силе притиска присутне су код узорака оптерећених центричним оптерећењем. Највећа вредност стандардне девијације забележена је код узорака са 3, а најмања код узорака са 2 отвора у ребру. Са друге стране, најмање варијације се јављају код елемената оптерећених ексцентричним оптерећењем на 40 mm. Вредности момента савијања су се пак кретале у ширим границама у односу на аксијалну силу. Поготово је то случај код центрично оптерећених узорака, где овај момент потиче од ефеката другог реда, што овакав тренд и оправдава. У тим случајевима, деформације осе елемента су непредвидиве и случајне, и зависе највише од почетних геометријских имперфекција. Због тога и не чуде вредности стандардне девијације од чак 50 %. Међутим, чак и са великим вредностима стандардне девијације, апсолутне вредности момента савијања центрично оптерећених узорака су ниске, практично занемарљиве.

Код свих центрично оптерећених узорака *C100* запажено је локално извијање, изузев код узорка *C100-3-e00-1*, код којег се глобално извијање показало доминантним у односу на локално. Код ексцентрично притиснутих узорака без и са

2 отвора дуж ребра преовладала је комбинација локалног и дисторзионог облика извијања. На слици 3.53 су приказани неки карактеристични облици деформација узорка без и са 2 отвора у ребру приликом достизања критичног оптерећења.



Слика 3.53. Испитивање узорка *C100* на дејство центричног и ексцентричног притиска: а) *C100-0-e00-3*, б) *C100-0-e40-2*, в) *C100-2-e00-1* и г) *C100-2-e80-1*

Достизање критичног оптерећења код ексцентрично оптерећених узорка са 3 отвора било је праћено комбинацијом глобалне и локалне форме извијања, изузев у случају узорка *C100-3-e40-1*, код којег је локално извијање наступило у комбинацији са дисторзионим. Овакав тренд се може приписати позицији отвора на месту највећих утицаја ефеката другог реда. Умањујући површину попречног пресека на критичном месту, отвор у ребру утиче на повећану деформабилност у зони око средине дужине узорка, те на тај начин иницира развијање највећих померања баш на том месту. Извијени облици неких узорка *C100* са 3 отвора у ребру су приказани на слици 3.54.

На слици 3.55 приказана је зависност нормалне силе притиска и момента савијања око јаче осе попречног пресека за узорке *C100* без и са отворима у ребру, у тренутку до којег се сматра да се узорак налази у еластичној области, непосредно пре губитка стабилности. На слици се јасно могу уочити зоне различитог нивоа ексцентрицитета. Највећа разлика у резултатима у оквиру једне групе ексцентрицитета присутна је код центрично оптерећених узорка, где су резултати узорка без отвора у ребру постигли носивост за око 30 % већу у односу на узорке са отворима. Поред тога, и овде је потврђена чињеница да већу улогу у носивости има постојање отвора у ребру, у односу на број отвора.



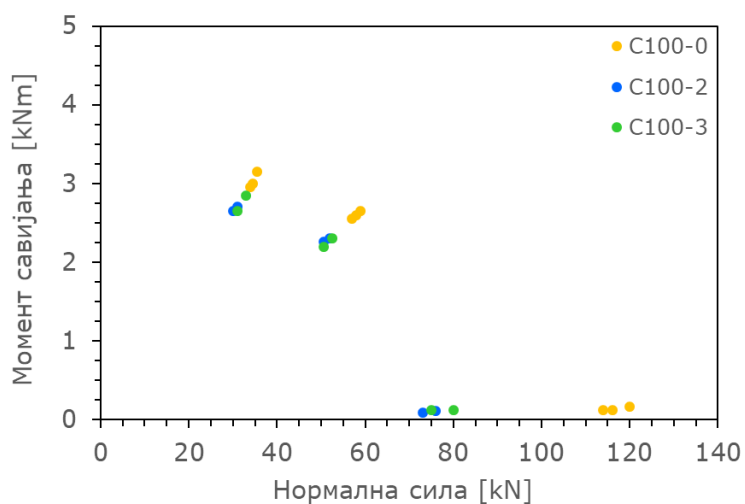
а)

б)

в)

г)

Слика 3.54. Испитивање узорка *C100* на дејство централног и ексцентричног притиска: а) *C100-3-e00-1*, б) *C100-3-e40-1*, в) *C100-3-e40-2* и г) *C100-3-e80-1*



Слика 3.55. Зависност максималне нормалне силе притиска и момента савијања за узорке *C100*

Табела 3.10. Резултати експерименталног испитивања понашања узорак C150-0 услед центрчног и ексцентричног притиска

Узорак	Облик извијања	$N_{u,t}$ [kN]	$N_{p,t}$ [kN]	$M_{u,t}$ [kNm]	$M_{p,t}$ [kNm]
C150-0-e00-1	Л	81.82	79.0	0.040	0.038
C150-0-e00-2	Л	93.59	85.0	0.069	0.062
C150-0-e00-3	Л	93.04	89.0	0.057	0.055
Средња вредност		89.48	84.33	0.055	0.052
Стандардна девијација		5.42 (6.06%)	4.11 (4.87%)	0.012 (21.64%)	0.010 (19.50%)
C150-0-e40-1	Л + Д	76.89	71.0	3.290	2.951
C150-0-e40-2	Л + Д	78.10	72.5	3.396	3.050
C150-0-e40-3	Л + Д	77.34	65.0	3.156	2.801
Средња вредност		77.44	69.50	3.281	2.934
Стандардна девијација		0.50 (0.65%)	3.24 (4.66%)	0.10 (2.99%)	0.10 (3.50%)
C150-0-e80-1	Л + Д	52.36	47.5	4.456	3.952
C150-0-e80-2	Л + Д	60.19	57.0	5.187	4.647
C150-0-e80-3	Л + Д	56.13	53.0	4.779	4.402
Средња вредност		56.23	52.50	4.807	4.333
Стандардна девијација		3.20 (5.69%)	3.89 (7.42%)	0.30 (6.22%)	0.29 (6.68%)

Табела 3.11. Резултати експерименталног испитивања понашања узорак C150-2 услед центричног и ексцентричног притиска

Узорак	Облик извијања	$N_{u,t}$ [kN]	$N_{p,t}$ [kN]	$M_{u,t}$ [kNm]	$M_{p,t}$ [kNm]
C150-2-e00-1	Л	80.57	76.0	0.063	0.060
C150-2-e00-2	Л	88.43	85.0	0.380	0.082
Средња вредност		84.50	80.50	0.222	0.071
Стандардна девијација		3.93 (4.65%)	4.50 (5.59%)	0.158 (71.45%)	0.011 (15.49%)
C150-2-e40-1	Л	69.88	66.0	2.946	2.722
C150-2-e40-2	Л	68.00	65.0	2.865	2.709
Средња вредност		68.94	65.50	2.906	2.716
Стандардна девијација		0.94 (1.37%)	0.50 (0.76%)	0.04 (1.40%)	0.01 (0.18%)
C150-2-e80-1	Л + Д	54.16	51.0	4.594	4.214
C150-2-e80-2	Л + Д	52.44	50.0	4.420	4.103
Средња вредност		53.30	50.50	4.507	4.159
Стандардна девијација		0.86 (1.62%)	0.50 (0.99%)	0.09 (1.93%)	0.06 (1.32%)

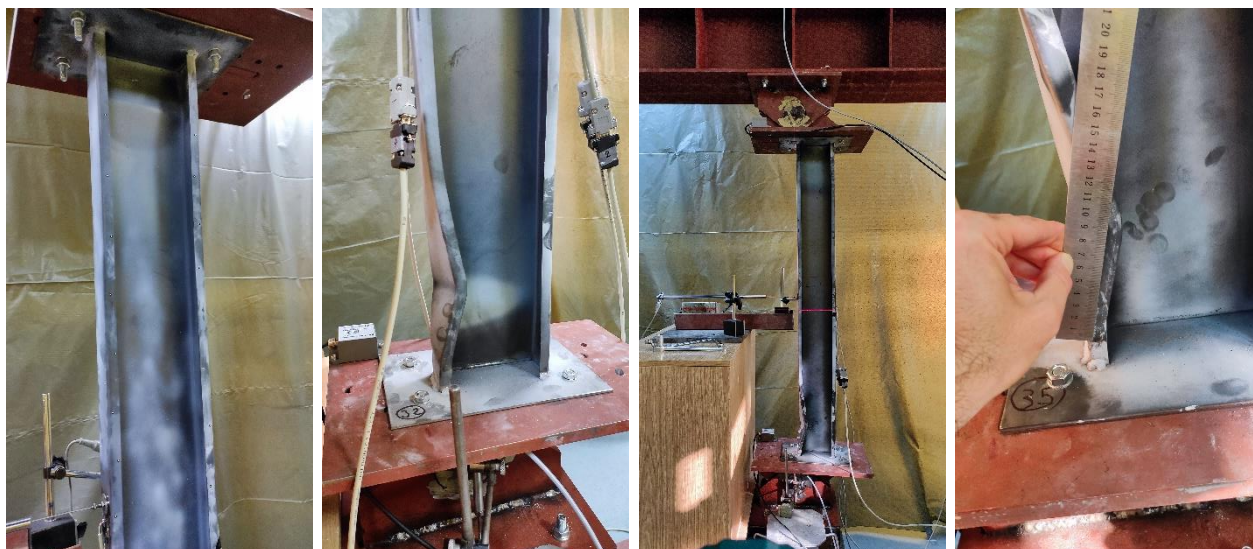
Табела 3.12. Резултати експерименталног испитивања понашања узорак C150-3 услед центричног и ексцентричног притиска

Узорак	Облик извијања	$N_{u,t}$ [kN]	$N_{p,t}$ [kN]	$M_{u,t}$ [kNm]	$M_{p,t}$ [kNm]
C150-3-e00-1	л	88.26	87.0	0.081	0.076
C150-3-e00-2	л	86.18	83.0	0.150	0.060
Средња вредност		87.22	85.00	0.116	0.068
Стандардна девијација		1.04 (1.19%)	2.00 (2.35%)	0.034 (29.78%)	0.008 (11.76%)
C150-3-e40-1	л	74.65	65.0	3.207	2.701
C150-3-e40-2	л	73.27	68.0	3.118	2.803
Средња вредност		73.96	66.50	3.162	2.752
Стандардна девијација		0.69 (0.93%)	1.50 (2.26%)	0.04 (1.40%)	0.05 (1.82%)
C150-3-e80-1	л	55.41	53.0	4.698	4.353
C150-3-e80-2	л	54.02	52.0	4.572	4.298
Средња вредност		54.71	52.50	4.635	4.326
Стандардна девијација		0.70 (1.27%)	0.50 (0.95%)	0.06 (1.36%)	0.02 (0.58%)

Као код узорак C100, и код узорак из групе C150 највеће варијације вредности максималне силе притиска присутне су код узорак оптерећених центричним оптерећењем. Вредност стандардне девијације од чак преко 6 % забележена је код узорак без отвора у ребру. Такође, и овде су најмање варијације присутне код елемената оптерећених ексцентричним оптерећењем на 40 mm. У погледу момената савијања, закључци изведени за групу узорак C100 важе и у овом случају.

Локални облик је без изузетка био доминантан облик извијања и код свих центрично оптерећених узорак C150. Осим код центрично оптерећених, и код свих осталих ексцентрично оптерећених елемената са 3 отвора и елемената са 2 отвора оптерећених са ексцентрицитетом од 40 mm, овај облик извијене форме је био доминантан. Комбинација локалног и дисторзионог облика извијања забележена је код ексцентрично оптерећених узорак без отвора, као и код елемената са 2 отвора оптерећених са ексцентрицитетом од 80 mm. Изостанак форме извијања у виду савијања осе елемента у случајевима узорак C150 може се објаснити нешто већом флексионом крутошћу у односу на елементе C100, као и чињеницом да су

ексцентрицитети од 40 и 80 mm ближи језгру пресека код елемената *C150*, те је однос нормалних напона у фланшама елемента нижи у односу на елементе *C100*. На слици су приказани неки карактеристични облици деформација узорака без и са 2 отвора у ребру приликом достизања критичног оптерећења.



а)

б)

в)

г)



д)

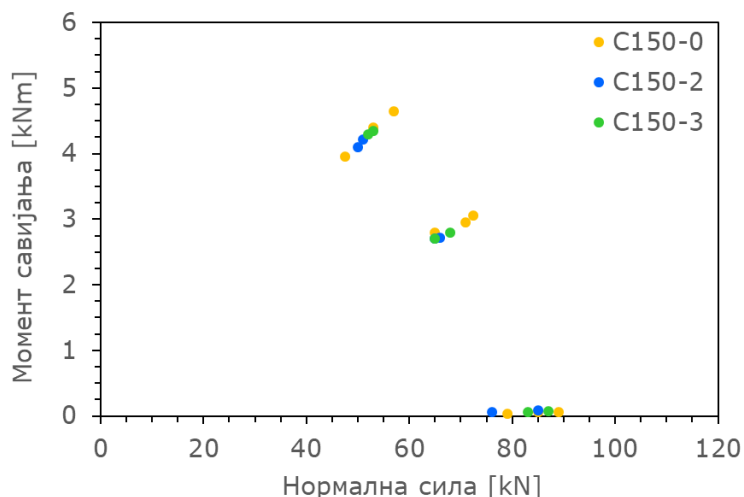
ђ)

е)

ж)

Слика 3.56. Испитивање узорака *C150* на дејство центричног и ексцентричног притиска: а) *C150-0-e00-2*, б) *C150-0-e40-2*, в) *C150-0-e80-2*, г) *C150-0-e80-2*, д) *C150-2-e00-2*, ђ) *C150-2-e80-1*, е) *C150-3-e00-2* и ж) *C150-3-e40-2*

На слици 3.57 дат је приказ зависности нормалне силе притиска и момента савијања за узорке *C150* без и са отворима у ребру, за границу пропорционалности, тј. непосредно пре губитка стабилности. За разлику од узорака *C100*, у овом случају се уочава мања разлика носивости између елемената са и без отвора, у оквиру једне групе ексцентрицитета.



Слика 3.57. Зависност нормалне силе притиска и момента савијања за узорак *C150*

Детаљнији приказ резултата за сваки испитани елемент посебно дат је у Прилогу В. Приказани су дијаграми зависности силе притиска у узорку и вертикалног померања хидрауличне пресе (померање у правцу осе узорка), момента савијања у узорку и вертикалног померања хидрауличне пресе, записи свих мерних трака на узорку и ротације крајева узорка у зависности од вертикалног померања хидрауличне пресе. На кривама дијаграма сила-померање и момент-померање означена је тачка до које се сматра да важи линеарна зависност ових величина, тј. тренутак непосредно пре губитка стабилности узорка. Код свих узорка је губитак стабилности у виду извијања осе елемента или избочавања делова попречног пресека био праћен пластичним деформацијама.

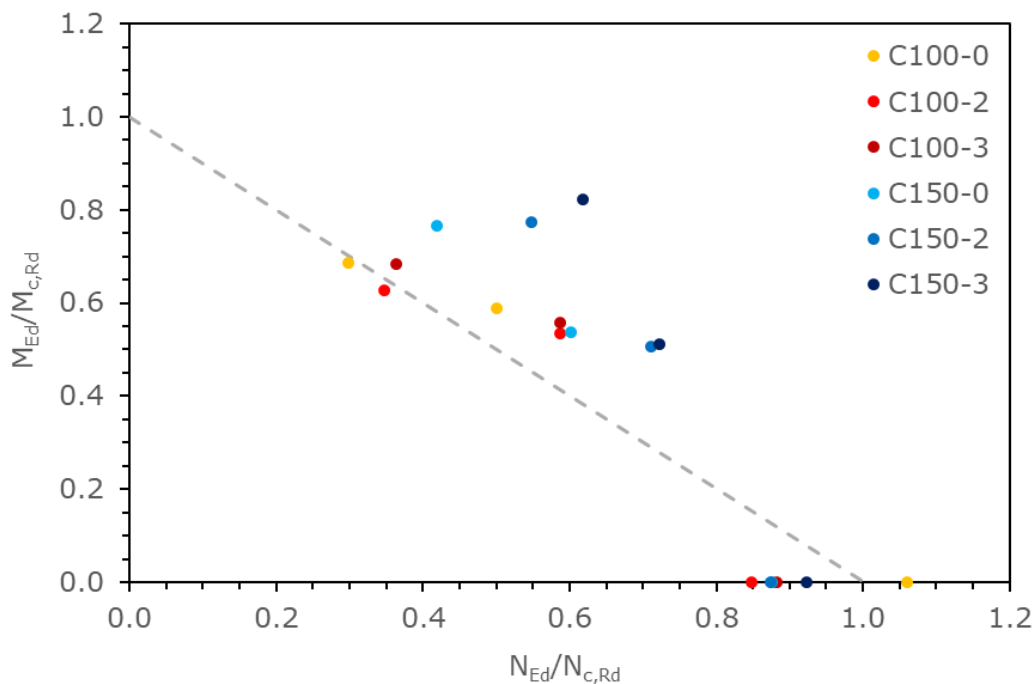
У табелама 3.13 и 3.14 је приказано поређење резултата експерименталног испитивања са прорачунским вредностима одређеним према *SRPS EN 1993-1-3*, а на слици 3.58 одговарајући интеракциони дијаграм. С обзиром на то да *SRPS EN 1993-1-3* не наводи посебне напомене за елементе са отворима у ребру, ефективне карактеристике попречног пресека елемента су одређене узимајући у обзир отвор.

Табела 3.13. Поређење резултата експерименталног испитивања са прорачунским вредностима за узорке C100

Узорак	SRPS EN 1993-1-3		
	$N_{p,t} / N_{p,pr}$ [kN]	$M_{p,t} / M_{p,pr}$ [kNm]	$n + m$
C100-0-e00	1.06	-	-
C100-0-e40	0.50	0.59	1.09
C100-0-e80	0.30	0.69	0.99
C100-2-e00	0.85	-	-
C100-2-e40	0.59	0.53	1.12
C100-2-e80	0.35	0.63	0.98
C100-3-e00	0.88	-	-
C100-3-e40	0.59	0.56	1.15
C100-3-e80	0.36	0.68	1.05

Табела 3.14. Поређење резултата експерименталног испитивања са прорачунским вредностима за узорке C150

Узорак	SRPS EN 1993-1-3		
	$N_{p,t} / N_{p,pr}$ [kN]	$M_{p,t} / M_{p,pr}$ [kNm]	$n + m$
C150-0-e00	0.88	-	-
C150-0-e40	0.60	0.54	1.14
C150-0-e80	0.42	0.77	1.18
C150-2-e00	0.87	-	-
C150-2-e40	0.71	0.51	1.22
C150-2-e80	0.55	0.77	1.32
C150-3-e00	0.92	-	-
C150-3-e40	0.72	0.51	1.23
C150-3-e80	0.62	0.82	1.44



Слика 3.58. Интеракциони дијаграм за прорачунске вредности израчунате према *SRPS EN 1993-1-3*

Носивост центрично притиснутих узорака одређена према *SRPS EN 1993-1-3* је прецењена у свим случајевима, осим у случају узорака *C100-0*. У случајевима ексцентрично оптерећених узорака, препоруке дате у *SRPS EN 1993-1-3* воде прорачунским вредностима носивости које су на страни сигурности, при чему су носивости узорака из серије *C100-0* најближе прорачунским вредностима. У поређењу са њима, конзервативније носивости добијене су за ексцентрично оптерећене узорке *C150*, код којих се вредности збира нормализоване силе притиска и момента савијања крећу између вредности 1.14 и 1.44. У погледу елемената *C100*, збир нормализоване силе притиска и момента савијања узорака оптерећених силом на ексцентрицитету од 40 mm био је већи у односу на исти збир код узорака оптерећених силом на ексцентрицитету од 80 mm. За разлику од њих, код узорака *C150* забележена је супротна појава.

Иако се експерименталним испитивањем настоје дефинисати закључци о понашању предметних елемената, у научно-истраживачкој заједници је са унапређењем рачунарских могућности увођење нумеричког дела истраживања постала уобичајена пракса, чиме је могуће обухватити што већи број зависних параметара, те детаљније сагледати проучавани феномен. Устаљена процедура, која је примењена и у оквиру овог истраживања, подразумева прво нумеричку симулацију самог експерименталног испитивања ради валидације нумеричког модела који ће бити коришћен у даљој параметарској студији. Стога, наредно поглавље ове дисертације бави се управо израдом нумеричких модела и симулацијама понашања узорака током експерименталног испитивања.

4. НУМЕРИЧКЕ АНАЛИЗЕ

Нумеричке анализе у оквиру ове дисертације спроведене су у софтверу *Abaqus* [109], заснованом на МКЕ. Симулације експерименталног испитивања су послужиле као основа за калибрацију модела за накнадне параметарске анализе. За сваки тип узорка су урађене линеарна бифуркациона анализа (анализа својствених облика извијања), као и геометријски и материјално нелинеарна анализа. Бифуркацијом анализом одређени су облици извијања, на основу којих су касније дефинисане почетне геометријске имперфекције модела у нелинеарним анализама. За решавање нелинеарног проблема, у овој дисертацији коришћена је динамичка експлицитна шема, у оквиру које се проблеми решавају на основу једначине:

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2}M + \frac{1}{2\Delta t}C\right)^{t+\Delta t}U = R - \left(K - \frac{2}{\Delta t^2}M\right)U - \left(\frac{1}{\Delta t^2}M - \frac{1}{2\Delta t}C\right)^{t-\Delta t}U \quad (4.1)$$

где су Δt временски инкремент анализе, M , C и K матрице маса, пригушења и крутости система, U , ${}^{t+\Delta t}U$ и ${}^{t-\Delta t}U$ вектори померања у тренутном, претходном и наредном инкременту и R вектор спољашњег оптерећења. Трајање временског инкремента анализе одређује се за сваки КЕ система посебно, и одређује се на основу најмање димензије КЕ у систему (L_{min}) и тренутне брзине распрострањања таласа дилатације у материјалу (c_d):

$$\Delta t \approx \frac{L_{min}}{c_d} \quad (4.2)$$

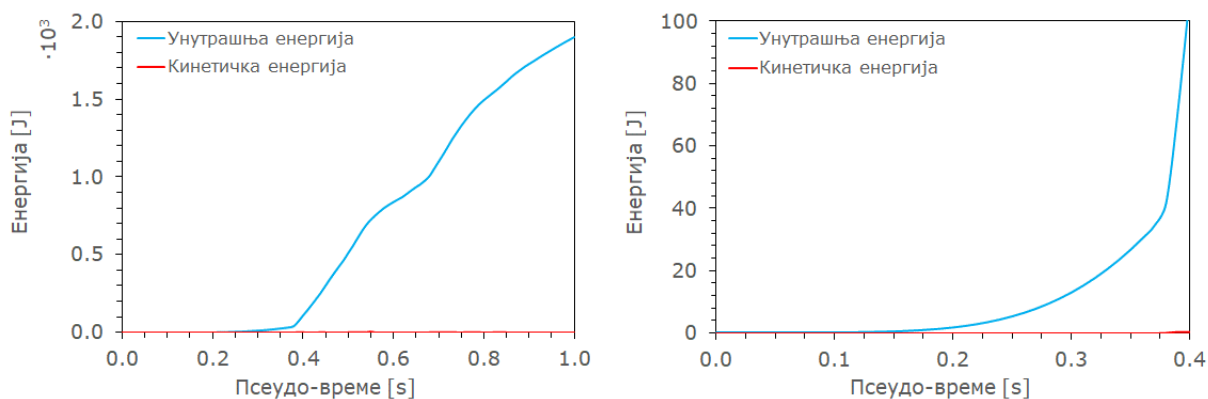
где c_d зависи од запреминске масе (ρ), модула еластичности (E) и *Poisson*-овог коефицијента (ν), и одређује се једначинама:

$$\begin{aligned} c_d &= \sqrt{\frac{\hat{\lambda} + 2\hat{\mu}}{\rho}} \\ \hat{\lambda} &= \lambda_0 = \frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)} \\ \hat{\mu} &= \mu_0 = \frac{E}{2(1+\nu)} \end{aligned} \quad (4.3)$$

При томе, максимална величина временског инкремента, која зависи од вредности фреквенције највишег тона осциловања система (ω_{max}), за пригушене системе не сме прекорачити вредност:

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{max}} \left(\sqrt{1 + \xi_{max}^2} - \xi_{max} \right) \quad (4.4)$$

Динамичка експлицитна шема развијена је пре свега за потребе решавања комплексних контактних анализа са израженим динамичким ефектима, тј. анализа у којима је утицај инерцијалних сила значајан [109]. Поред тога, ова шема се показала веома ефикасном и приликом решавања нелинеарних квази-статичких проблема, какви и јесу проблеми понашања танкозидних челичних елемената оптерећених критичним и посткритичним оптерећењем. Међутим, да би експлицитна динамичка шема у оквирима квази-статичких проблема дала поуздане резултате, у обзир је потребно узети и на одређен начин третирати динамичке ефекте. Симулирање квази-статичког теста оптерећења у његовој реалној временској скали би са рачунарске тачке гледишта било непрактично, будући да би захтевало превелик број изузетно малих временских инкремената. Да би се решавање проблема свело на временски прихватљиву меру, наношење оптерећења се мора на неки начин убрзати. Услед повећања брзине наношења оптерећења, очекује се све доминантнији утицај инерцијалних сила. Тада, понашање система више не би могло бити описано једначинама статичке равнотеже, већ динамичке. У циљу повећања брзине наношења оптерећења, а самим тим и прорачуна, као и умањења значаја инерцијалних сила на понашање система, коришћена је техника скалирања масе KE , тј. комплетног модела. Фактор вештачког увећања масе је у нумеричким анализама одређен аутоматски, на основу задате минималне вредности стабилног инкремента времена, на почетку и у току сваког инкремента. Минимална вредност стабилног инкремента одређена је итеративним поступком, контролишући однос кинетичке и унутрашње енергије система. С обзиром да се ради о квази-статичком тесту оптерећења, укупна кинетичка енергија система не би требало да буде већа од 5 до 10 % унутрашње енергије [109]. На слици 4.1 су приказане унутрашња и кинетичка енергија система нумеричког модела $C100-0-e00$ у односу на псеудо-време анализе. Јасно је да је критеријум горе поменут испуњен, те да оваква дефиниција експлицитне динамичке анализе може бити употребљена за симулирање квази-статичког теста оптерећења.



Слика 4.1. Унутрашња и кинетичка енергија система постигнуте у нумеричкој анализи модела $C100-0$ за комплетну анализу (лево) и за део анализе до тренутка у којем се дешава извијање (десно)

Један од корака у алгоритму креирања нумеричког модела је свакако избор типа и облика мреже КЕ. Осим на тачност решења, избор типа и облика КЕ мреже има велики утицај и на време неопходно за извршење прорачуна. Употреба *beam* КЕ би омогућила најкраће време за извршење прорачуна, међутим, облици деформације би били ограничени само на глобалне, тј. флексионе облике извијања, услед недостатка довољног броја степени слободе за описивање деформација на нивоу попречног пресека. Стога, феномени локалног и дисторзионог извијања не би били обухваћени. За описивање понашања танкозидних елемената, код којих су ефекти локалног и дисторзионог избочавања веома изражени, погодно је користити *solid* или *shell* КЕ. Будући да је понашање *solid* КЕ дефинисано помоћу 3 транслаторна степена слободе, ови елементи су у стању да опишу деформације у виду затезања, притиска и смицања. Праве ивице *solid* КЕ пре деформације остају праве и након деформације, те није могуће обухватити ефекте савијања користећи само један *solid* КЕ по дебљини конструкцијског елемента. Последица овако дефинисане мреже КЕ је нереално већа крутост елемента услед *shear locking* ефекта, тј. појаве увећаних напона смицања који у реалним елементима не постоје. Да би савијање било узето у обзир на одговарајући начин, неопходно је по дебљини пресека употребити или бар три *solid* КЕ са линеарном, или један *solid* КЕ са квадратном функцијом промене поља. Како је у оквиру динамичке експлицитне шеме у *Abaqus*-у доступно користити само *solid* КЕ са линеарном функцијом промене поља, неопходно је извршити поделу мреже КЕ и на нивоу дебљине елемента попречног пресека [109]. Са друге стране, понашање *shell* КЕ је описано помоћу 6 степени слободе (3 транслаторна и 3 ротациона), те је ефекте савијања могуће обухватити коришћењем једног КЕ по дебљини елемента конструкције. Варијација напона по дебљини КЕ је обухваћена употребом броја интеграционих тачака по дебљини већим од 1. Уколико је дебљина конструкцијског елемента мања од 1/10 „глобалне димензије елемента“, тада се елемент може сматрати танкозидним, и његово понашање се може довољно прецизно описати коришћењем *shell* КЕ. Под термином „глобалне димензије елемента“ се сматрају растојања између ослонаца, дужине делова попречног пресека између укрућења, као и дужине полуталаса највишег својственог облика извијања елемента [109]. Како су у оквиру овог истраживања испитани елементи чије су ширине фланши 40 mm и 60 mm, а ребра 100 mm и 150 mm, дебљина зидова попречног пресека од 2 mm свакако задовољава претходно поменут критеријум.

У својој докторској дисертацији, *Moен* [49] је урадио поређење *shell* елемената *S4*, *S4R* и *S9R5* на примеру танке плоче оптерећене константним напоном притиска, при чему је дошао до сличног закључка као и у [109]. Број КЕ по дужини полуталаса извијања већи или једнак од 10 води практично једнаким резултатима када су у питању сва три типа КЕ. Уколико је тај број мањи од 5, *S4* елементи показују особине нешто веће крутости, док за број елемената по дужини

полуталаса мањи од 3, *S4R* елементи постају конзервативнији од елемената *S9R5*. Међутим, чињеница која не иде у прилог *S9R5* елементима јесте та, да је за прорачун модела креираног овим КЕ потребно више рачунарских ресурса услед већег броја степени слободе модела у односу на моделе од *S4R* КЕ. Међутим, пошто су *S9R5* КЕ са квадратним пољем промене, оправдано је у случају њихове употребе користи ређу мрежу у односу на ону формирану од *S4* и *S4R* КЕ. *Gunalan* је у оквиру истраживачког рада на својој докторској дисертацији [110] урадио компаративне нумеричке анализе модела танкозидних хладно-обликованих елемената користећи *S4* и *S4R* елементе и показао да се понашање таквих елемената поуздано може описати коришћењем оба типа КЕ. Осим њих, низ је научних публикација [1,32,55,64,79,88] у којима су нумеричке симулације спроведене користећи *shell* КЕ, чиме је оправдана одлука да се и у склопу ове докторске дисертације користе исти.

4.1. МОДЕЛИРАЊЕ ПОНАШАЊА МАТЕРИЈАЛА

Типична крива напон-дилатација за дуктилне материјале као што је конструкциони челик употребљен у овом експерименталном испитивању приказана је на слици 4.2. Оваква крива је заправо само апроксимација, и не описује стварну везу између напона и дилатација у епрувети током теста затезања. На типичној кривој напон-дилатација, напон и дилатација дефинисани су следећим изразима:

$$\begin{aligned}\sigma_e &= \frac{F}{A_0} \\ \varepsilon_e &= \frac{\Delta L}{L_0}\end{aligned}\tag{4.5}$$

где су A_0 и L_0 почетне вредности површине попречног пресека и дужине мерне базе епрувете, F аплицирана сила и ΔL издужење епрувете. Овако дефинисани, називају се инжењерски напон и инжењерска дилатација.

За одређивање стварних вредности напона и дилатација требало би у обзир узети и чињеницу да се током теста затезања, осим дужине епрувете, мења и величина њеног попречног пресека. Смањење попречног пресека, односно појава врата на узорку (*necking*), постаје уочљиво и прогресивно расте по достизању максималне вредности напона на инжењерској кривој напон-дилатација.



Слика 4.2. Типична крива инжењерски напон-инжењерска дилатација за конструкциони челик

Узимајући у обзир претпоставку да запремина узорка током теста затезања остаје константна, може се доћи до једначине за одређивање стварног напона (σ_t) на следећи начин:

$$\begin{aligned}
 AL &= A_0L_0 \Rightarrow A = \frac{A_0L_0}{L} \\
 \varepsilon_e &= \frac{\Delta L}{L} = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{L}{L_0} - 1 \\
 \sigma_t &= \frac{F}{A} = \frac{FL}{A_0L_0} = \frac{F}{A_0}(1 + \varepsilon_e) = \sigma_e(1 + \varepsilon_e)
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

где су A и L тренутна површина попречног пресека и тренутна дужина епрувете. Приликом одређивања стварне дилатације требало би у обзир узети чињеницу да се почетна дужина епрувете мења континуирано, у сваком тренутку током трајања теста затезања. Ради једноставности, овде ће тај процес бити приказан за коначан број инкремената времена (слика 4.3).

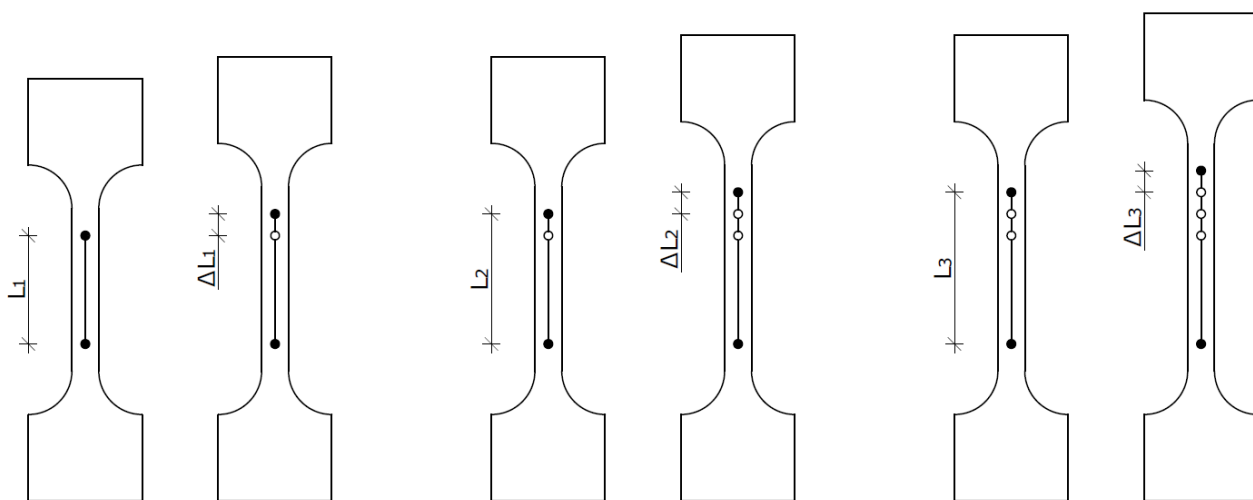
Укупна дилатација се одређује као сума дилатација у свим инкрементима:

$$\varepsilon_t = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta L_i}{L_i} \tag{4.7}$$

Уколико се узме у обзир да је овај проблем континуалан, те да је величина инкремената бесконачно мала, до тренутка почетка формирања грла на епрувети једначина за одређивање стварне дилатације може се записати на следећи начин:

$$\varepsilon_t = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} = \ln(1 + \varepsilon_e) \tag{4.8}$$

Након формирања грла, стање деформације у околној зони из једнооксијалног прелази у триаксијално, па се јављају одступања регистрованих дилатација у односу на дилатације одређене изразом 4.8. У истраживању представљеном од стране *Dong et al.* [111], предложени су изрази који са мањом грешком обухватају апроксимацију везе напон-дилатација након формирања грла. У овом истраживању, приликом испитивања елемената на дејство центричног и ексцентричног притиска, дилатација при губитку стабилности је била испод вредности при којој напон достиже максималну вредност на радном дијаграму материјала. Стога, оправдано је коришћење представљених израза за одређивање зависности стварни напон-стварна дилатација.

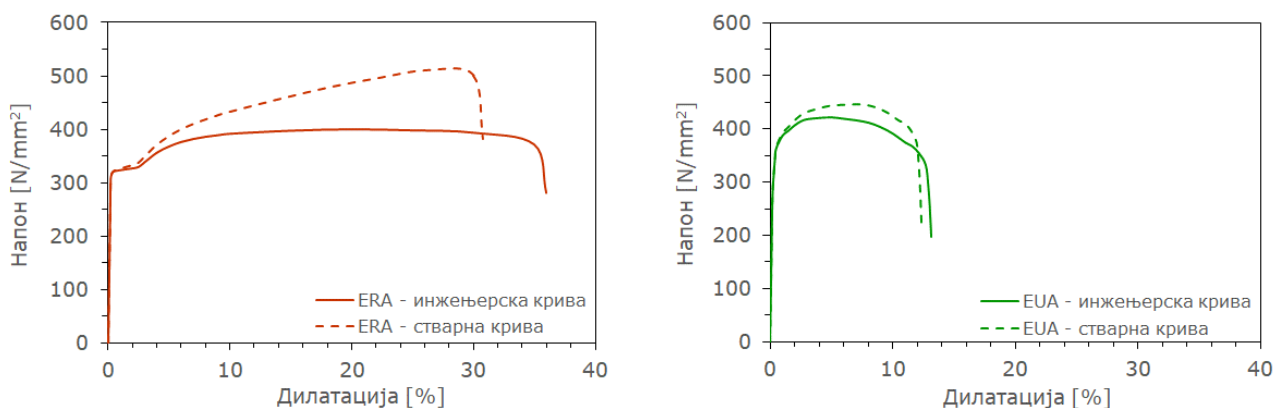


Слика 4.3. Промена дужине епрувете у току времена

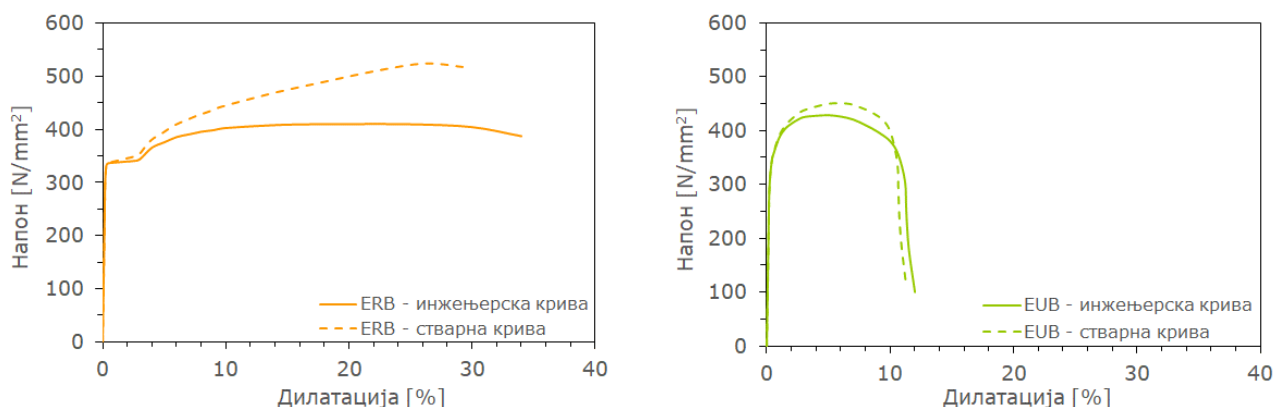
Механичка својства материјала нумеричких модела у овом истраживању дефинисана су на основу резултата испитивања механичких својстава материјала описаних у одељку 3.2. За сваку серију епрувета (А и В) и сваки тип (равне и угаоне), појединачни дијаграми епрувета су упросечени. На сликама 4.4 и 4.5 приказани су упросечени дијаграми инжењерски напон-инжењерска дилатација добијени испитивањем епрувета на затезање, као и одговарајућа крива стварни напон-стварна дилатација.

У овом раду је у оквиру нумеричких анализа коришћен еласто-пластични модел понашања материјала. Еластична грана понашања материјала дефинисана је вредношћу *Young*-овог модула еластичности. Нелинеарни део дијаграма је представљен мулти-линеарном функцијом, дефинисаном са 40 до 70 тачака скупа стварних вредности напон-дилатација. Будући да су предмет испитивања у овом истраживању танкозидни елементи, и да се очекује да њихов отказ буде праћен губитком стабилности (на локалном или глобалном нивоу), а не отказом материјала, овај број тачака довољан је да би проблем ојачања материјала био прецизно описан. Осим стварне везе напон-дилатација, дефинисани су и *Poisson*-

ов коефицијент и запреминска маса, чије су усвојене вредности редом 0.3 и 7850 kg/m^3 . Криве стварни напон-стварна дилатација приказане на слици 4.4 коришћене су у нумеричким анализама модела *C100*, док су криве стварни напон-стварна дилатација приказане на слици 4.5 коришћене у симулацијама модела *C150*.



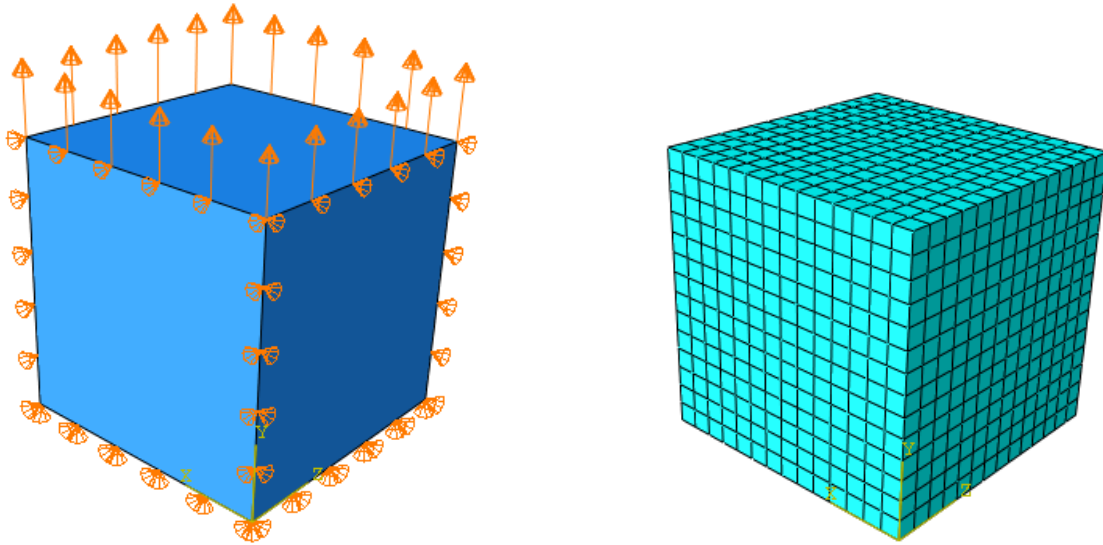
Слика 4.4. Криве инжењерски напон-инжењерска дилатација и стварни напон-стварна дилатација упросечене за серије узорака ERA (лево) и EUA (десно)



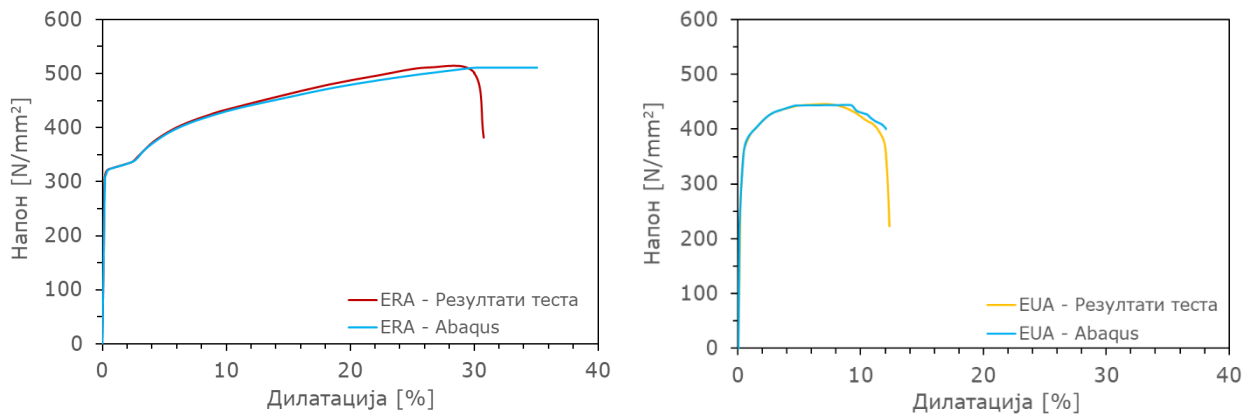
Слика 4.5. Криве инжењерски напон-инжењерска дилатација и стварни напон-стварна дилатација упросечене за серије узорака ERB (лево) и EUB (десно)

Пре спровођења нумеричких симулација треће фазе експерименталног испитивања, урађене су нумеричке симулације теста затезања на моделу правилног хексаедра странице 100 mm, ради контроле усвојеног материјалног модела. За сваки тип материјалног модела, тј. тип епрувете, дефинисан је посебан модел хексаедра. Начин дефинисања контурних услова одговара условима симетрије у односу на 3 равни посматраног тела. Коришћени су КЕ облика хексаедра, типа *C3D8R* (тродимензионални КЕ са линеарном променом поља унутар елемента и редукованом интеграцијом) и просечне димензије 8 mm. На слици 4.6 је приказан модел са контурним условима и спољашњим оптерећењем, као и геометрија усвојене мреже КЕ. На сликама 4.7 и 4.8 су приказани резултати

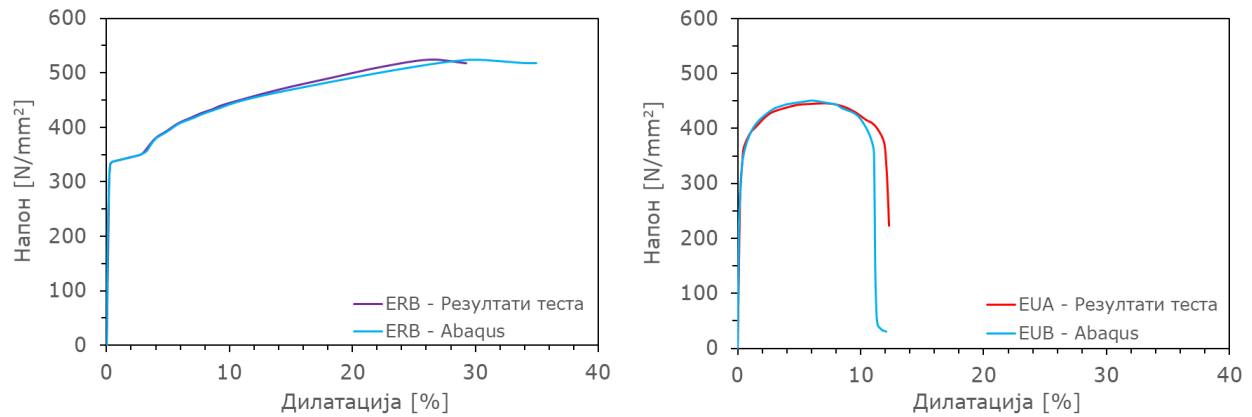
нумеричких симулација теста затезања хексаедра у виду поређења зависности стварног напона и стварне дилатације теста и нумеричког модела хексаедра.



Слика 4.6. Контурни услови и спољашње оптерећење хексаедра (лево) и мрежа коначних елемената (десно)

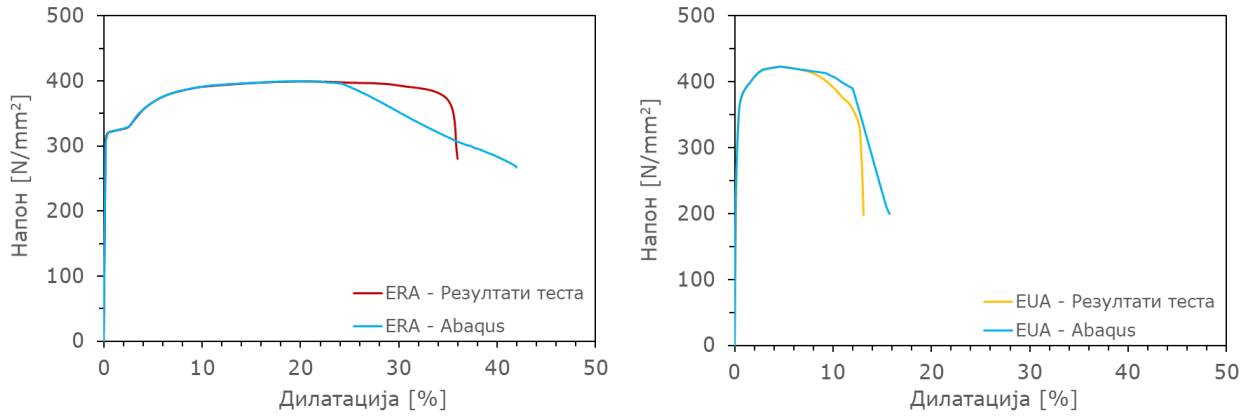


Слика 4.7. Поређење зависности стварни напон-стварна дилатација теста и нумеричког модела коцке за узорке из серије ERA (лево) EUA (десно)

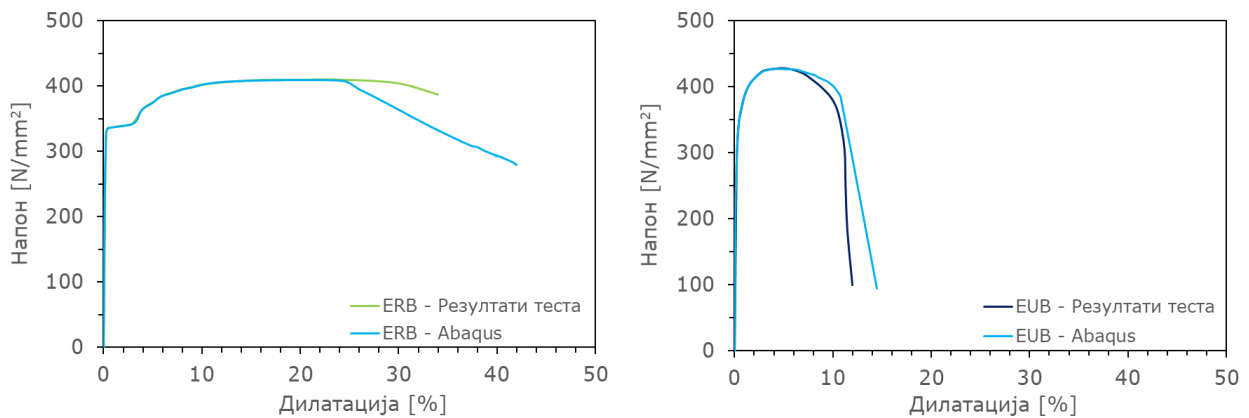


Слика 4.8. Поређење зависности стварни напон-стварна дилатација теста и нумеричког модела коцке за узорке из серије ERB (лево) EUB (десно)

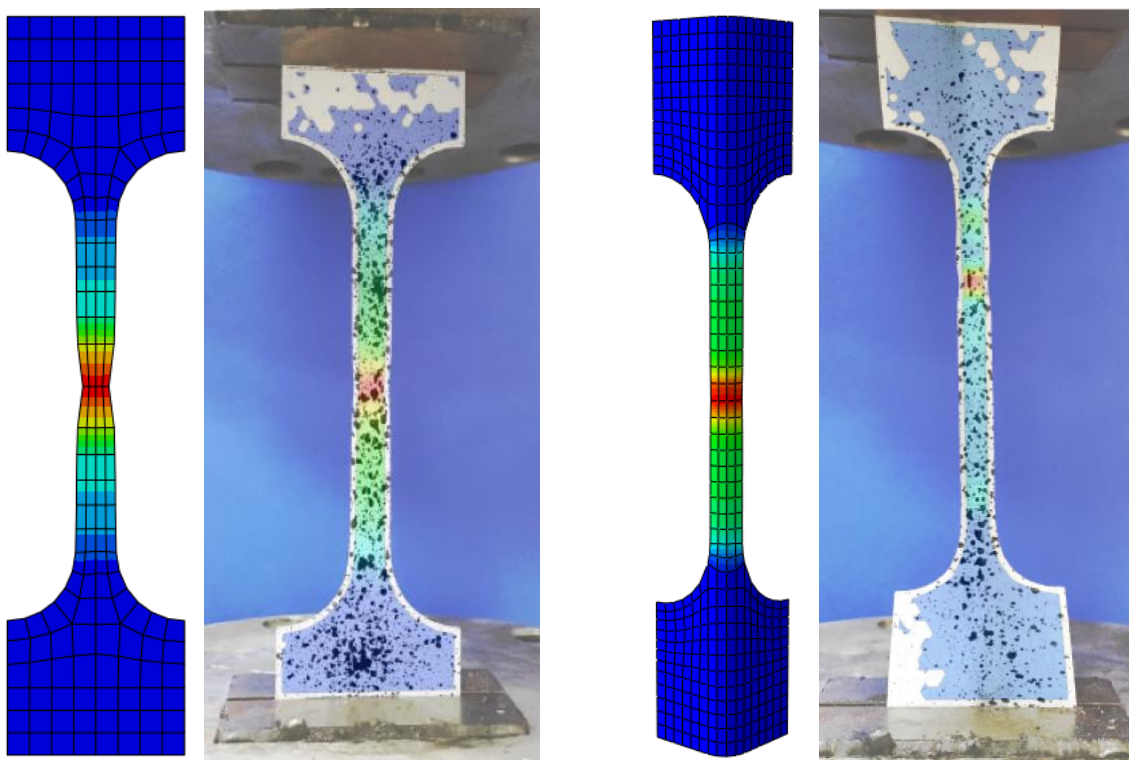
Осим нумеричких симулација хексаедра, спроведене су и нумеричке анализе за сваки тип епрувете, са истим циљем - контроле усвојеног материјалног модела, али коришћењем *shell* КЕ. На наредним сликама су приказана поређења теста затезања и нумеричких симулација за све типове епрувета.



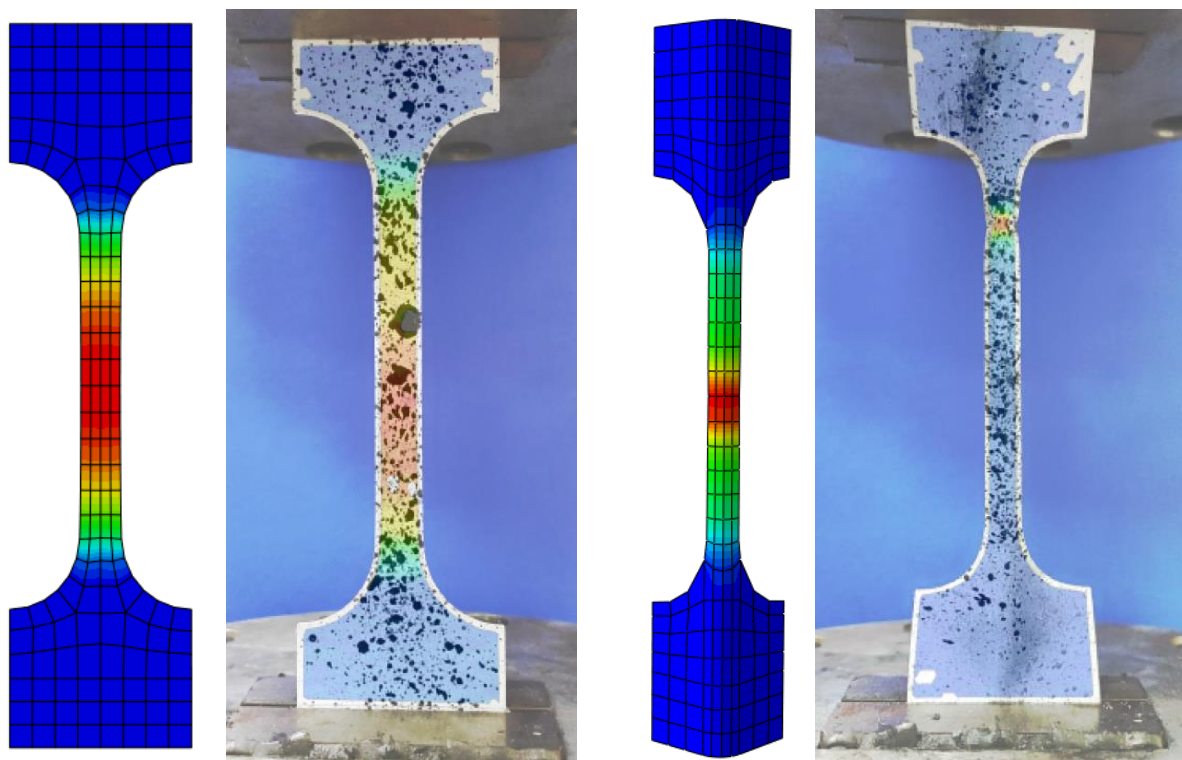
Слика 4.9. Поређење зависности инжењерски напон-инжењерска дилатација теста и нумеричког модела за узорке из серије ERA (лево) EUA (десно)



Слика 4.10. Поређење зависности напон-дилатација теста затезања и нумеричког модела за узорке из серије ERB (лево) EUB (десно)



Слика 4.11. Поређење слике дилатација нумеричког модела и теста затезања за узорке из серије ERA (лево) EUA (десно)

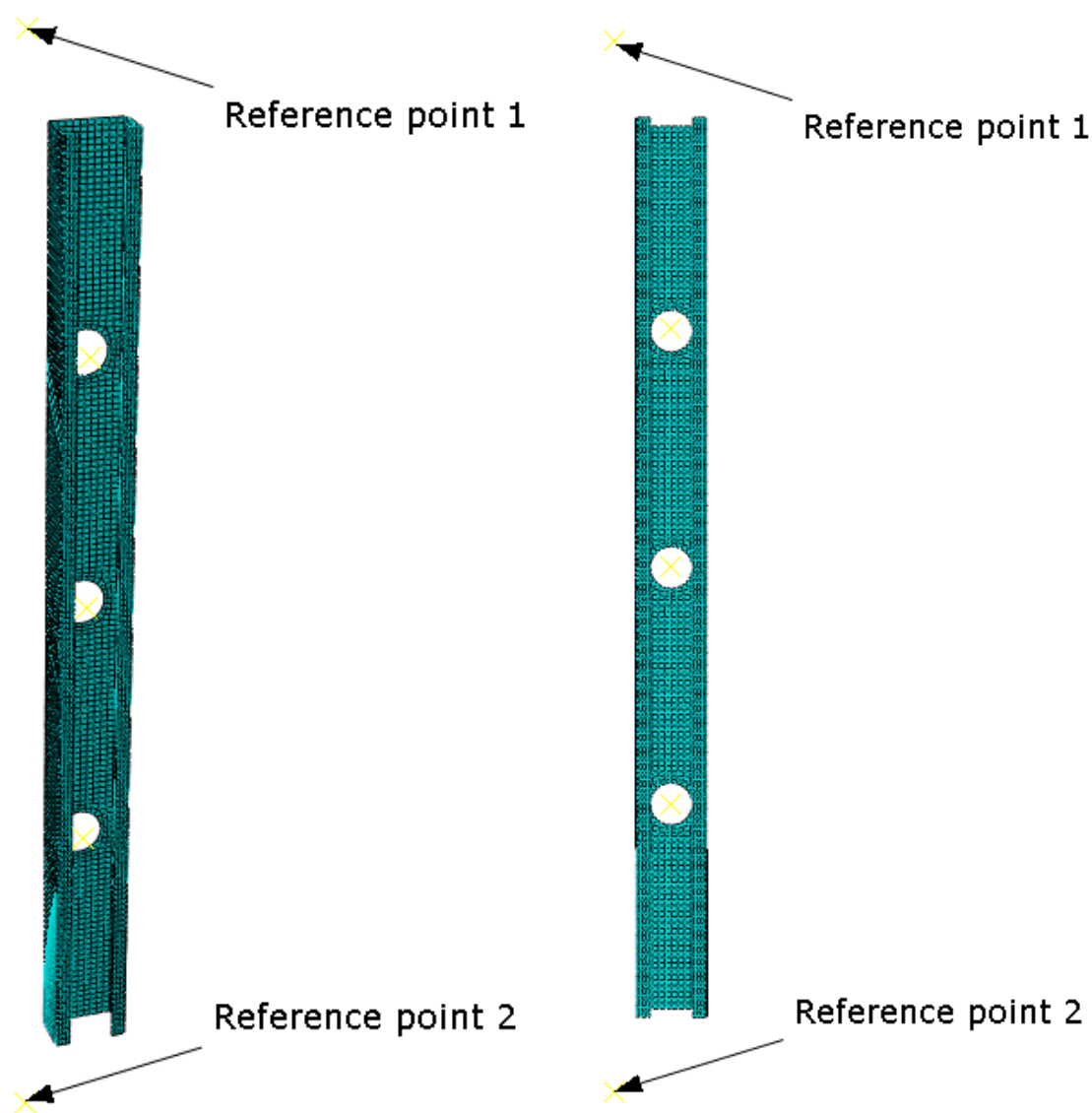


Слика 4.12. Поређење слике дилатација нумеричког модела и теста затезања за узорке из серије ERB (лево) EUB (десно)

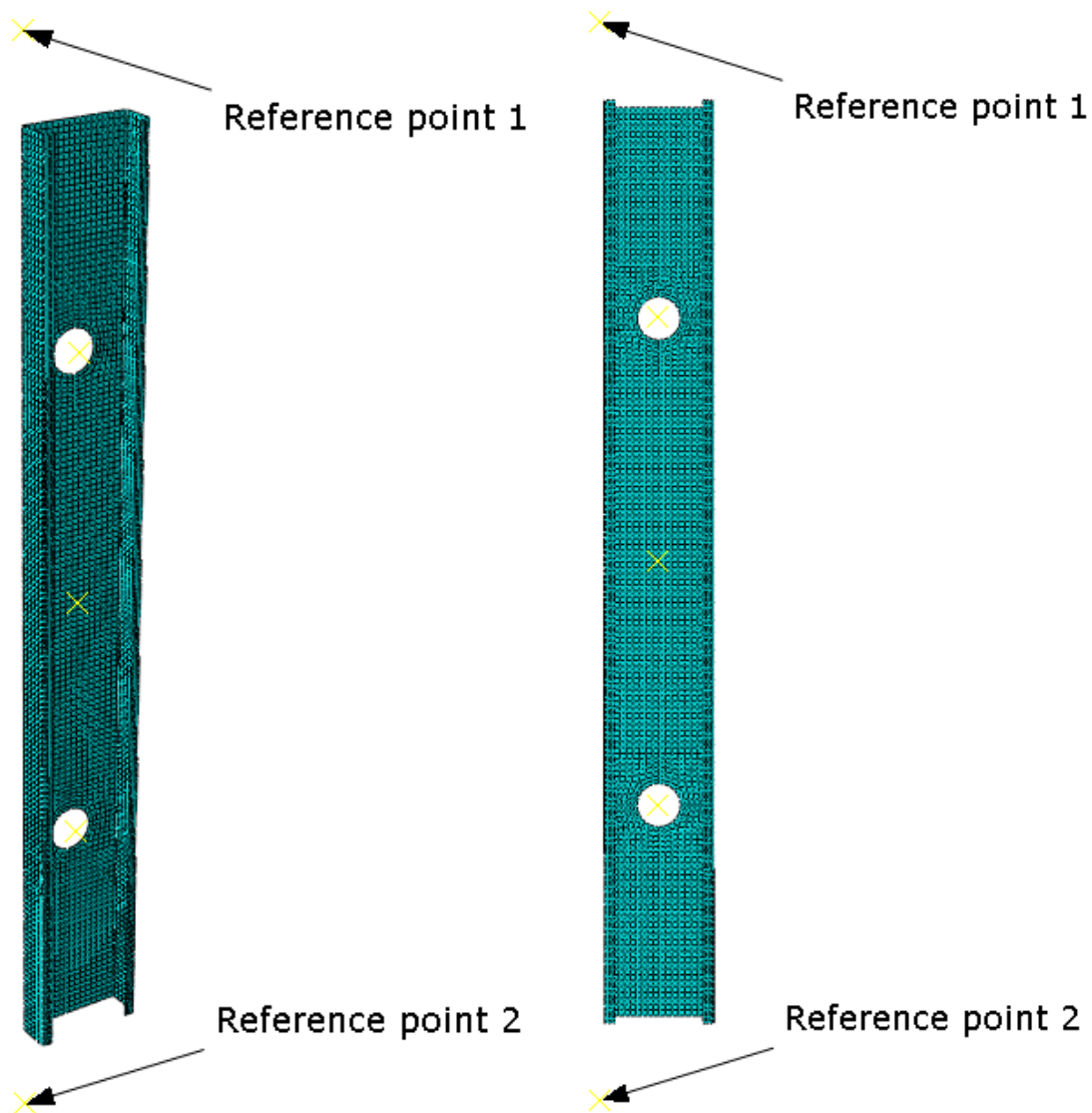
4.2. ОПИС НУМЕРИЧКИХ МОДЕЛА

Геометрија узорака креирана је у софтверу *AutoCAD* као тродимензионална површина, са у обзир узетим заобљењима углова попречног пресека елемената. Да би увоз такве геометрије у *Abaqus* био могућ, неопходно је геометрију модела извести у виду *SAT (standard ACIS text)* фајла, који тродимензионалну геометрију модела складишти у виду текста и на тај начин је чини компатибилним са бројним *CAD* софтверима. За описивање понашања материјала коришћен је еласто-пластични модел материјала описан у одељку 4.1.

Веза узорка са зглобним ослоњцима моделирана је употребом крутих спојних (*tie*) елемената (*rigid body constraint*) по целом обиму крајњих попречних пресека елемента. Позиција референтног чвора везе одговара пројекцији тежишта попречног пресека на осу ротације зглоба (слике 4.13 и 4.14).



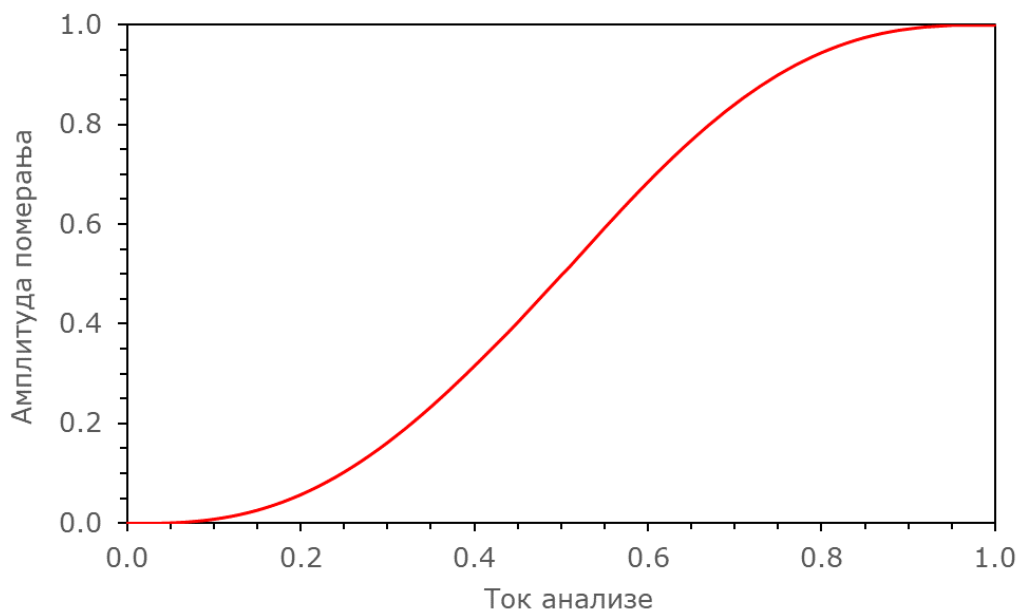
Слика 4.13. Геометрија нумеричког модела узорка C100-3-e80 са означеним позицијама референтних чворова на крајевима елемента



Слика 4.14. Геометрија нумеричког модела узорка С150-2-е80 са означеним позицијама референтних чворова на крајевима елемента

Оптерећење је у моделу задавано у виду вертикалног померања, симулирајући на тај начин ход хидрауличног цилиндра. Померање је при томе дефинисано функцијом *smooth step* (слика 4.15). Утицај инерцијалних сила на почетку корака оптерећења (померања) је на овај начин сведен на врло малу меру, у поређењу са линеарном функцијом промене [112].

Последњи корак у алгоритму креирања нумеричког модела је избор типа и облика мреже КЕ. Иако *Abaqus* поседује богату библиотеку *shell* КЕ, за експлицитне шеме формулације модела на располагању су троугаони и четвороугаони КЕ са линеарним интерполационим функцијама и тачном или редукованом интеграцијом.



Слика 4.15. *Smooth step* функција коришћена приликом дефинисања померања

КЕ са тачном интеграцијом су елементи који имају по две тачке интеграције дуж сваке странице, чиме је обезбеђена линеарна промена поља унутар елемента, између чворова. С обзиром на то да странице линеарних КЕ не могу да трпе закривљење, у случају чисто савијаних КЕ у равни, јавиће се напони смицања као последица промене угла између суседних страница елемента, што не одговара реалној ситуацији. Ова појава назива се *shear locking*, и за последицу има појаву веће крутости елемента у односу на реалну [109].

Са друге стране, КЕ са редукованом интеграцијом су елементи код којих се интеграција врши у смањеном броју тачака. Тај број тачака зависи од броја тачака елемента са пуном интеграцијом (једна интеграциона тачка мање по страници КЕ). За троугаоне и четвороугаоне линеарне елементе то значи да они садрже укупно једну интеграциону тачку, која се налази у тежишту КЕ, чиме је обезбеђено униформно стање деформације. Међутим, приликом овакве дефиниције модела, могу се јавити лажни облици деформације, тзв. *hourglassing* феномен. У овим случајевима, енергија која се троши на деформисање елемента је нула, иако деформација постоји. Ова појава израженија је код система са релативно ретком мрежом КЕ, а може се избећи на више начина (прогушћењем мреже, увођењем додатне крутости, релативне у односу на облик деформисања, вискозним пригушењем). Будући да су у нумеричким анализама у овој дисертацији коришћени *shell* КЕ, била је неопходна релативно густа мрежа КЕ да би се обезбедило довољно тачно решење. Иако се ефекти локалног и дисторзионог избочавања могу обухватити употребом довољно густе мреже, превише густа мрежа КЕ се може показати неефикасном у погледу утрошка времена потребног за прорачун и рендеровање модела.

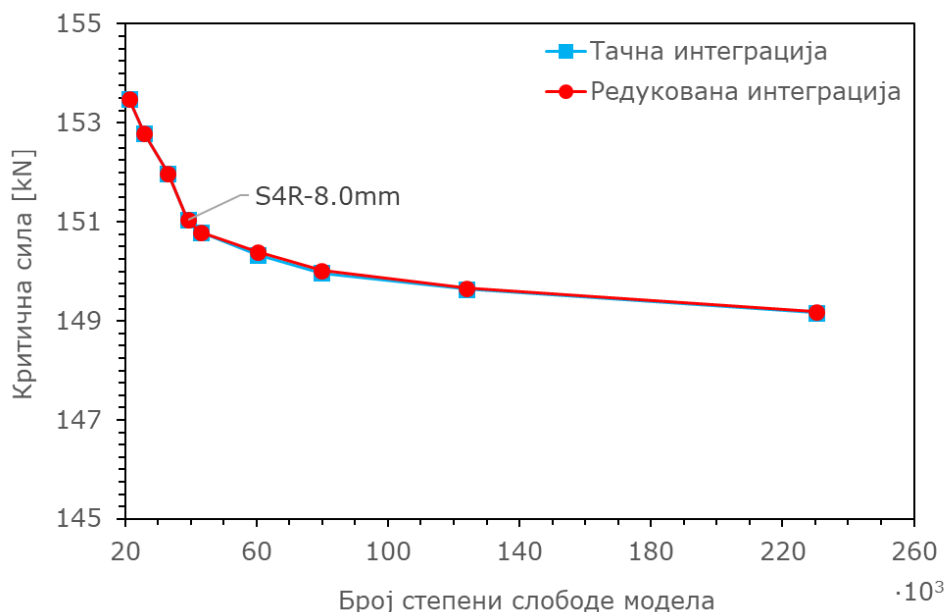
Коначном дефинисању геометрије мреже КЕ претходила је анализа осетљивости, тј. поступак одређивања „оптималне“ густине мреже КЕ. Разматран је случај елемента *S100-0-e00* код којег је мрежа дефинисана на више различитих начина, како у погледу типа, тако и у погледу просечне величине КЕ. Урађена је компаративна анализа еластичног извијања (енг. *eigenbuckling*), а основи подаци о моделима, као и резултати ове анализе приказани су у табели 4.1. С обзиром на релативне разлике између вредности критичних сила, критична сила модела са КЕ просечне величине 3.0 mm послужила је као упоредна („тачна“) вредност, у односу на коју су одређене релативне грешке осталих анализираних случајева.

Табела 4.1. Модели и резултати компаративне анализе за одређивање „оптималне“ мреже КЕ

Тип КЕ	Просечна величина КЕ [mm]	Број степени слободе	Трајање анализе [min:sec]	Критична сила [kN]	Релативна грешка [%]
S4	10.0	21186	00:18	153.488	2.81
	9.0	25872	00:18	152.783	2.37
	8.5	28626	00:19	151.985	1.85
	8.0	32988	00:19	151.041	1.24
	7.0	42978	00:21	150.788	1.07
	6.0	60210	00:29	150.331	0.77
	5.0	79836	00:33	149.971	0.53
	4.0	123966	00:44	149.637	0.31
	3.0	230202	01:12	149.169	0.0
S4R	10.0	21186	00:18	153.488	2.81
	9.0	25872	00:18	152.783	2.36
	8.5	28626	00:20	151.985	1.84
	8.0	32988	00:20	151.041	1.23
	7.0	42978	00:23	150.788	1.07
	6.0	60210	00:25	150.396	0.81
	5.0	79836	00:30	150.019	0.56
	4.0	123966	00:54	149.660	0.32
	3.0	230202	01:19	149.181	0.0

На слици 4.16 приказана је зависност критичне силе и броја степени слободе модела, тј. густине мреже. Са повећањем броја степени слободе модела, уочава се

пад критичне силе, али и пораст дужине трајања анализе. Мрежа KE S4R просечне величине 8 mm показала је „оптималне“ карактеристике, имајући у виду како тачност решења, тако и број степени слободе.



Слика 4.16. Зависност критичне силе и броја степени слободе модела елемента C100-0-e00

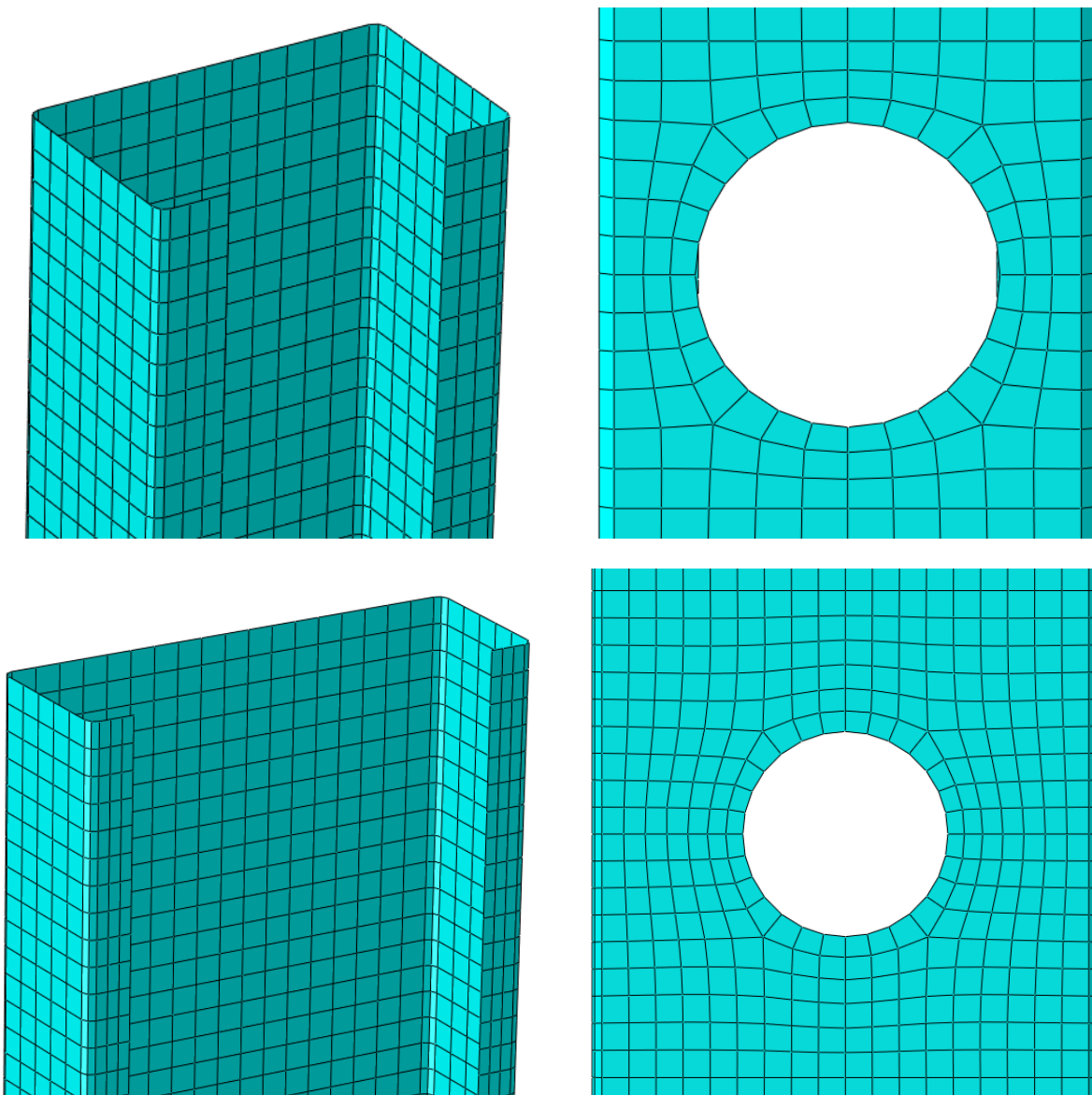
На основу резултата претходне компаративне анализе, у свим моделима у оквиру овог истраживања, усвојен је тип KE S4R, просечне величине 8 mm, што је обезбедило довољан број елемената дуж делова пресека C100 и C150 елемената, као и довољно тачну апроксимацију кружне контуре отвора у ребру (слика 4.17).

Као што је напоменуто у уводном делу овог поглавља, почетне геометријске имперфекције су у прорачун уведене у форми облика еластичног извијања. Процес дефинисања почетних имперфекција подразумева следеће кораке:

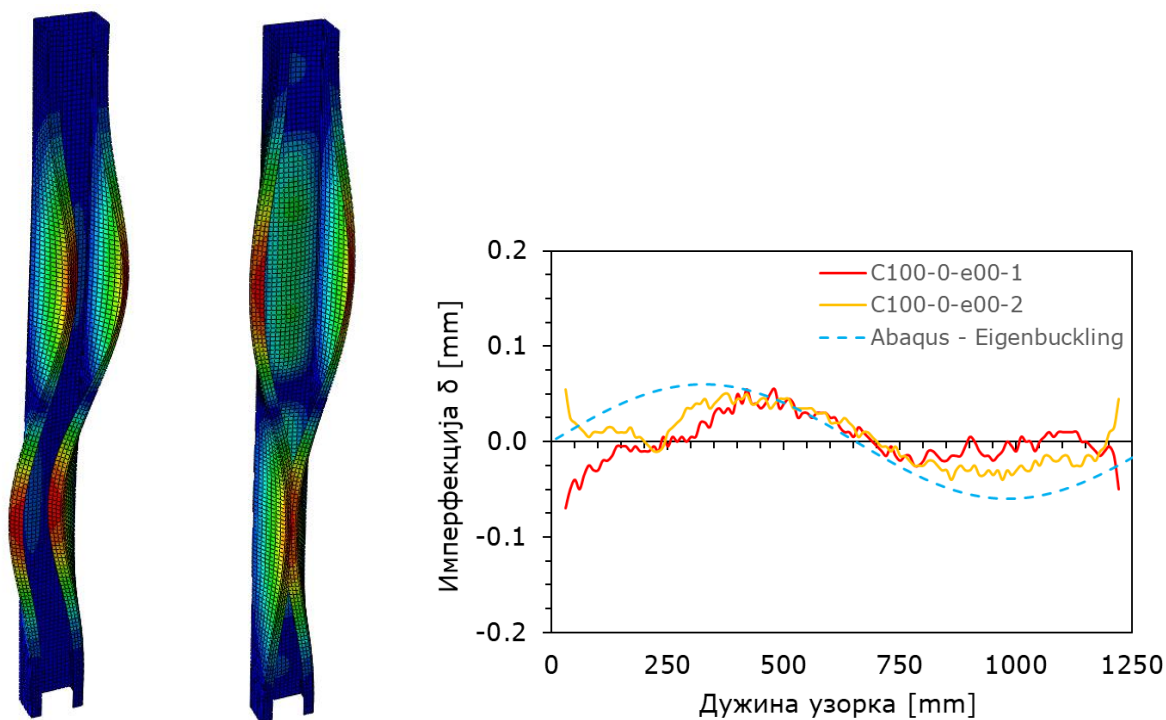
1. Визуелни преглед првих n облика еластичног извијања;
2. Селекцију једног или више облика који највише одговарају измереним имперфекцијама;
3. Имплементацију у модел за нелинеарну анализу путем линеарне суперпозиције одабраних облика извијања.

Визуелни преглед и одабир облика еластичног извијања захтевали су субјективну процену, јер се облици извијања јављају углавном у виду комбинација локалних, дисторзионих и глобалних облика. Имплементација деформисане геометрије модела је у Abaqus-у урађења путем опције измене „кључних речи“ модела (енг. *edit keywords*). Осим навођења жељених облика имперфекције, потребно је дефинисати и амплитуде истих. На слици 4.18 су приказани облици еластичног

извијања узети у обзир при дефинисању почетних геометријских имперфекција узорака *C100-0-e00*, као и поређење измерених са задатим имперфекцијама.



Слика 4.17. Детаљи мреже коначних елемената *C100* узорака (горе)
и *C150* узорака (доле)



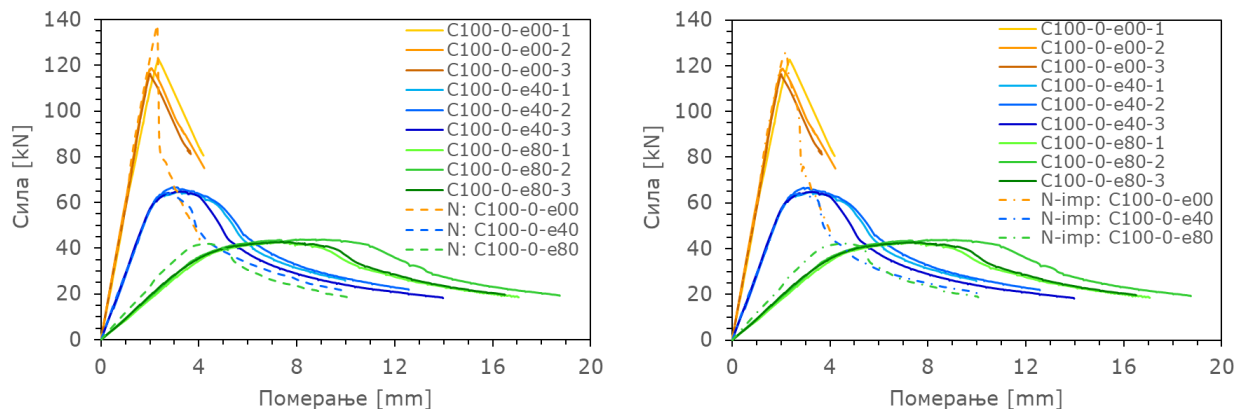
Слика 4.18. Облици еластичног извијања коришћени приликом дефинисања почетних геометријских имперфекција (лево) и поређење измерених имперфекција са задатим у Абакус-у (десно) за узорке *C100-0-e00*

Осим почетних геометријских имперфекција, у домен структурних имперфекција спадају и заостали напони, који се код хладно-обликованих елемената јављају услед деформација приликом производње, тј. обликовања истих. Они се могу поделити у две групе: савојни и мембрански. Анализом заосталих напона код вруће ваљаних и хладно-обликованих елемената *Schafer* и *Peköz* [113] су дошли до закључака да код хладно-обликованих елемената доминантну улогу играју савојни заостали напони, док су мембрански више карактеристични за вруће ваљане елементе. С обзиром на то да су савојни заостали напони карактеристични за зоне углова попречног пресека који су претрпели трајну деформацију током процеса производње, приликом теста затезања угаоних епрувета утицај ове врсте заосталих напона већ је узет у обзир кроз дефинисање радног дијаграма такве епрувете. Због тога, *Gardner* и *Nethercot* [114] истичу да посебно дефинисање заосталих напона у нумеричким моделима није неопходно, те у нумеричким анализама у оквиру ове дисертације није узето у обзир.

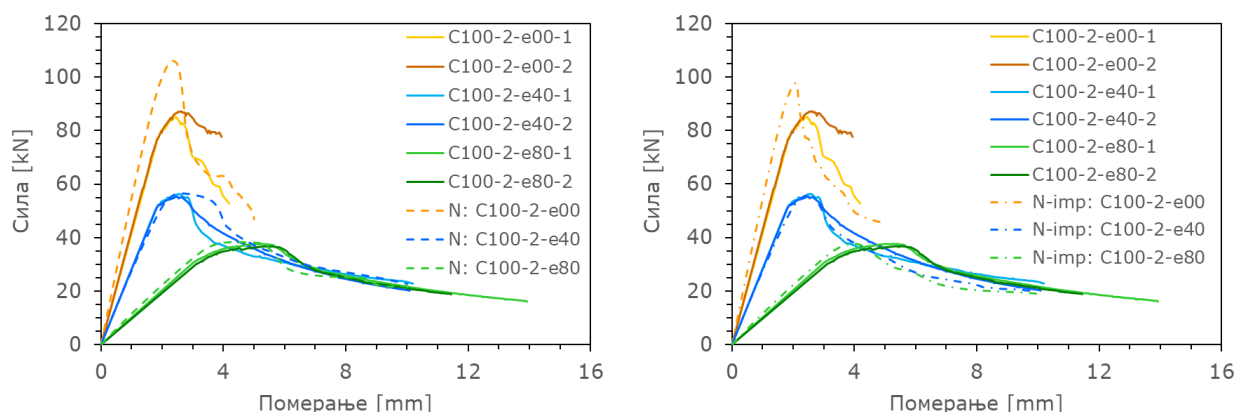
4.3. РЕЗУЛТАТИ НУМЕРИЧКИХ АНАЛИЗА

На сликама 4.19 и 4.20 приказано је поређење резултата експерименталних и нумеричких анализа у виду дијаграма зависности силе притиска и аксијалног скраћења за узорке *C100* и *C150*, редом. Криве пуних линија приказују резултате експеримента, док су испрекидане криве добијене нумерички. Испрекидане криве

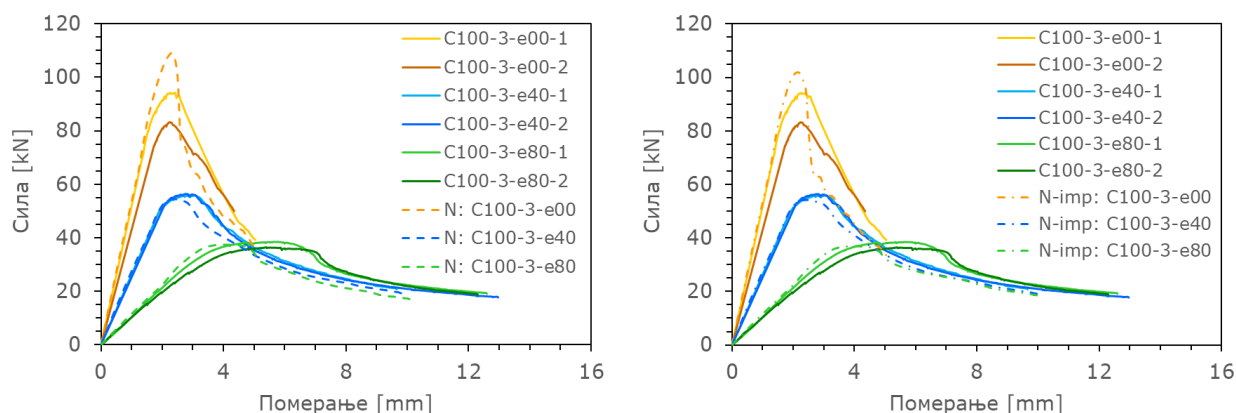
црта-црта приказују резултате нумеричких анализа у којима утицај почетних геометријских имперфекција није узет у обзир, док криве црта-тачка-црта дају приказ резултата у којима је утицај почетних геометријских имперфекција разматран. Поређења деформисаних облика експерименталног испитивања и нумеричких анализа неких узорака приказана су на сликама 4.21 до 4.25.



а)

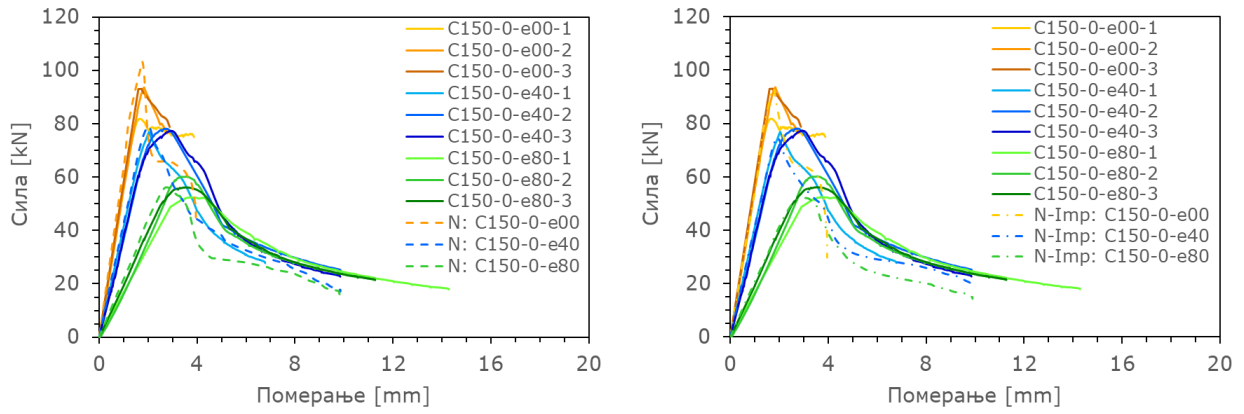


б)

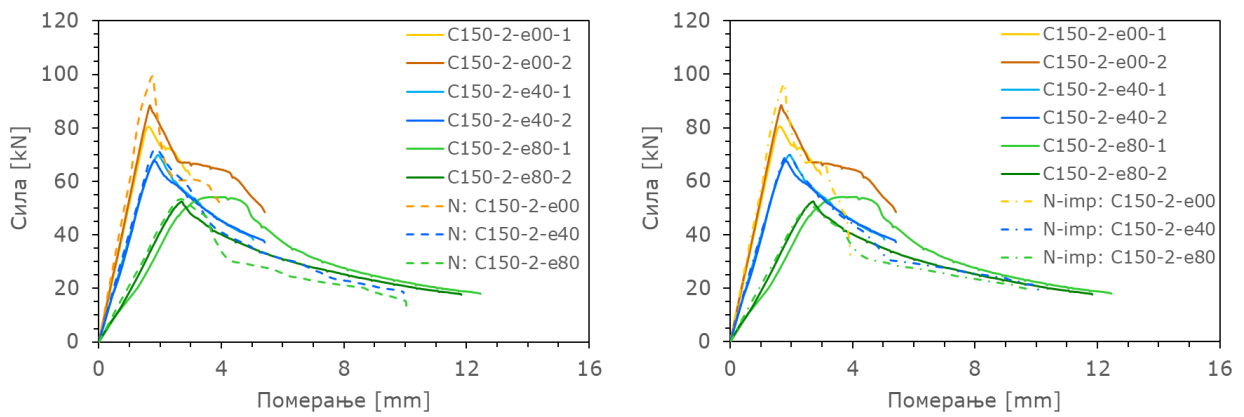


в)

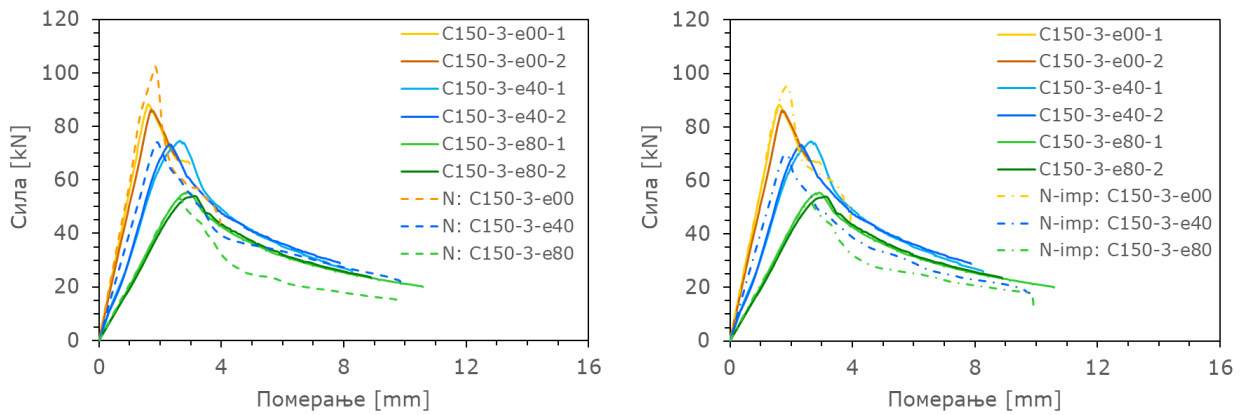
Слика 4.19. Поређење резултата експерименталног испитивања са резултатима нумеричких анализа за узорке: а) *C100-0*, б) *C100-2* и в) *C100-3*



а)

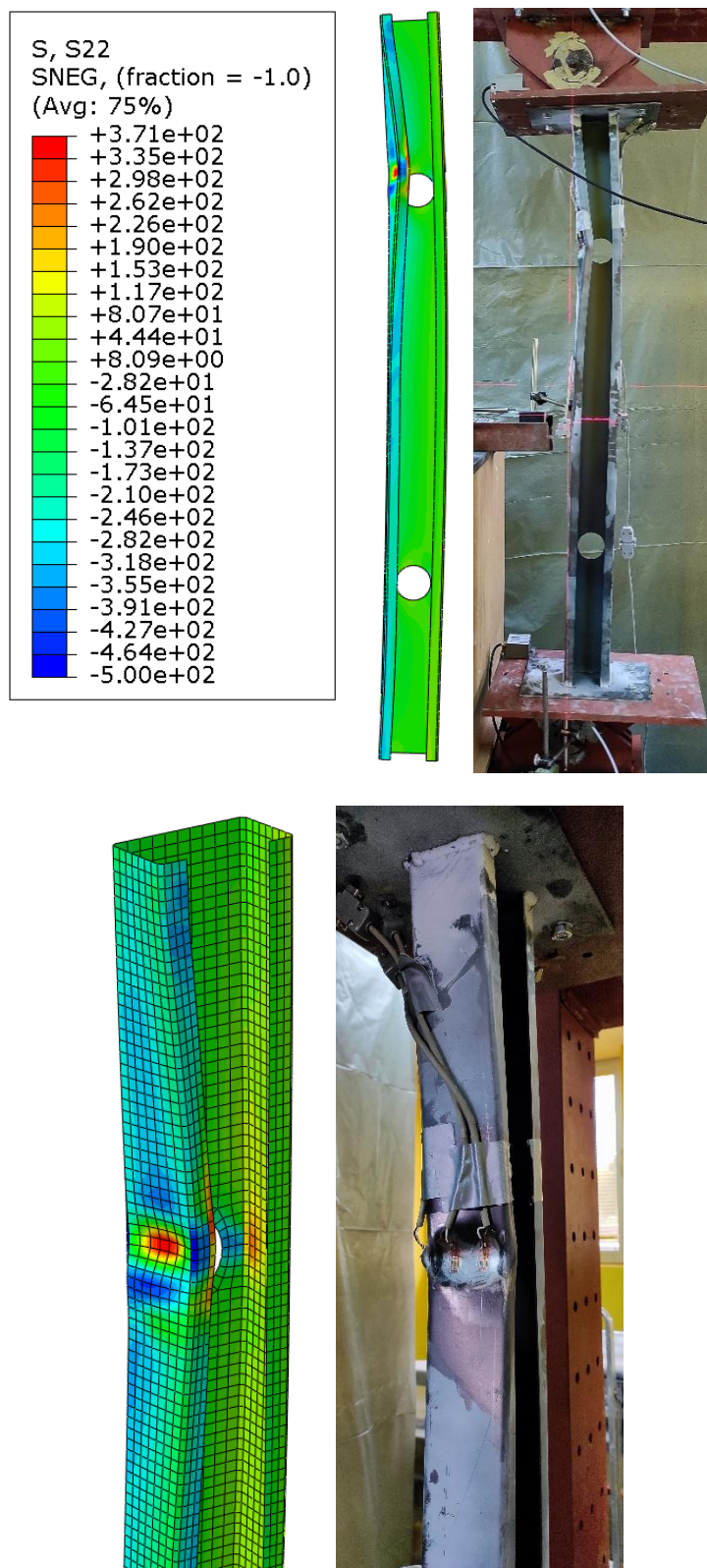


б)

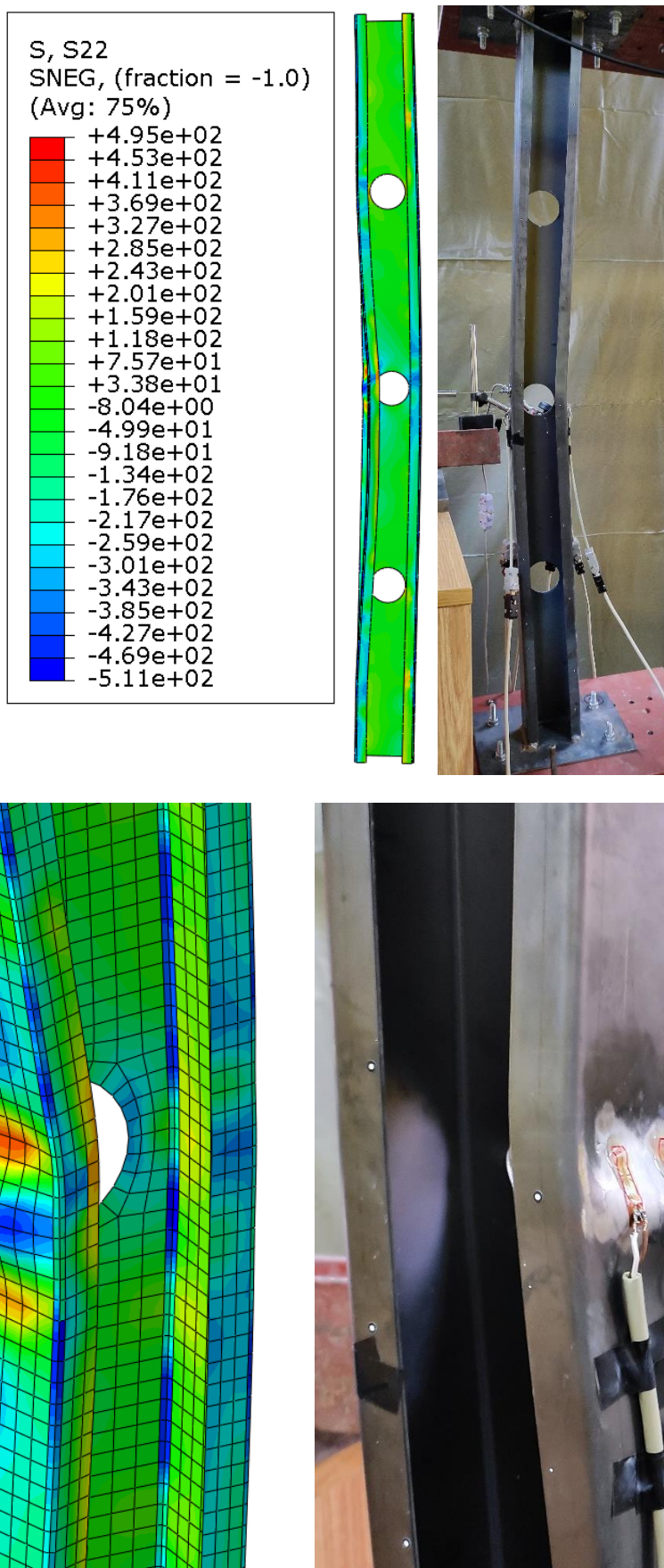


в)

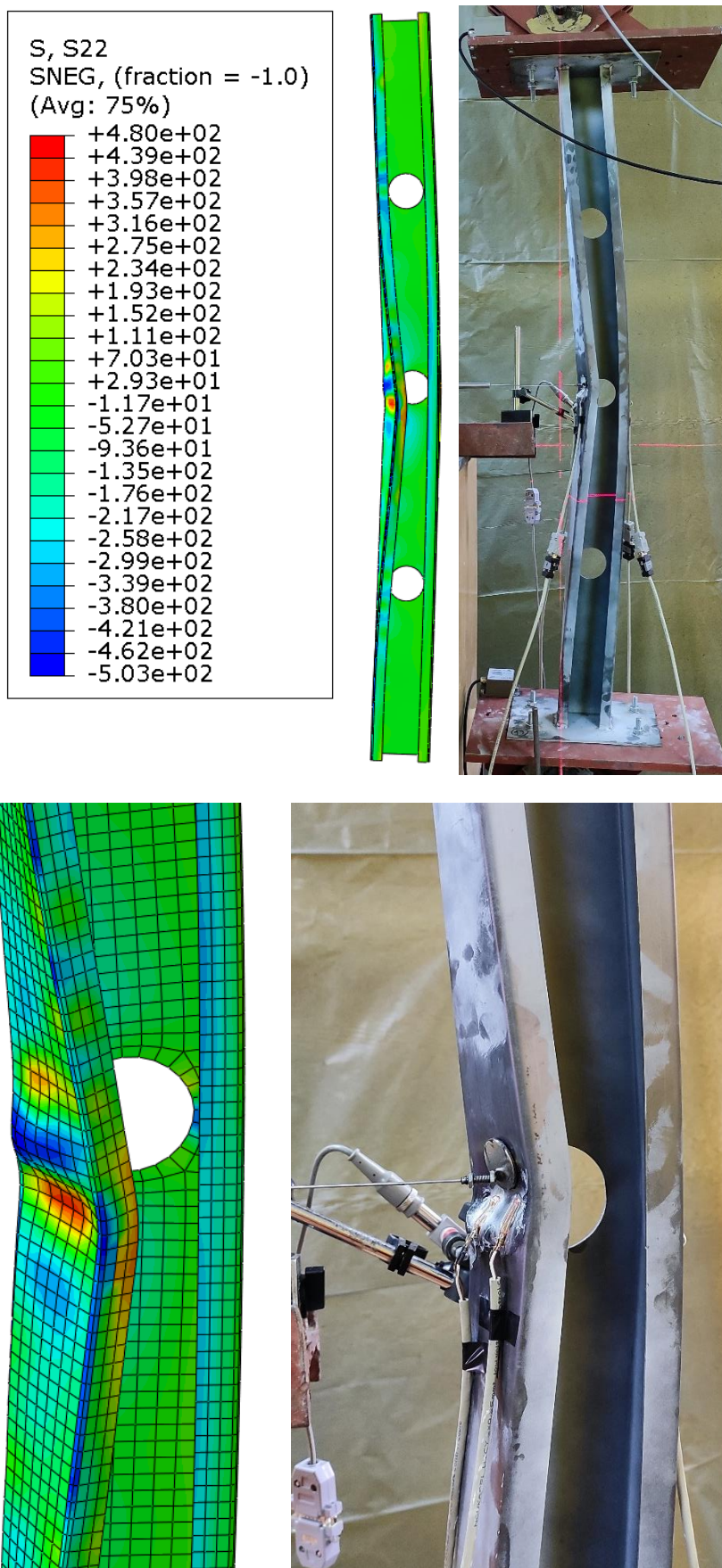
Слика 4.20. Поређење резултата експерименталног испитивања са резултатима нумеричких анализа за узорке: а) C150-0, б) C150-2 и в) C150-3



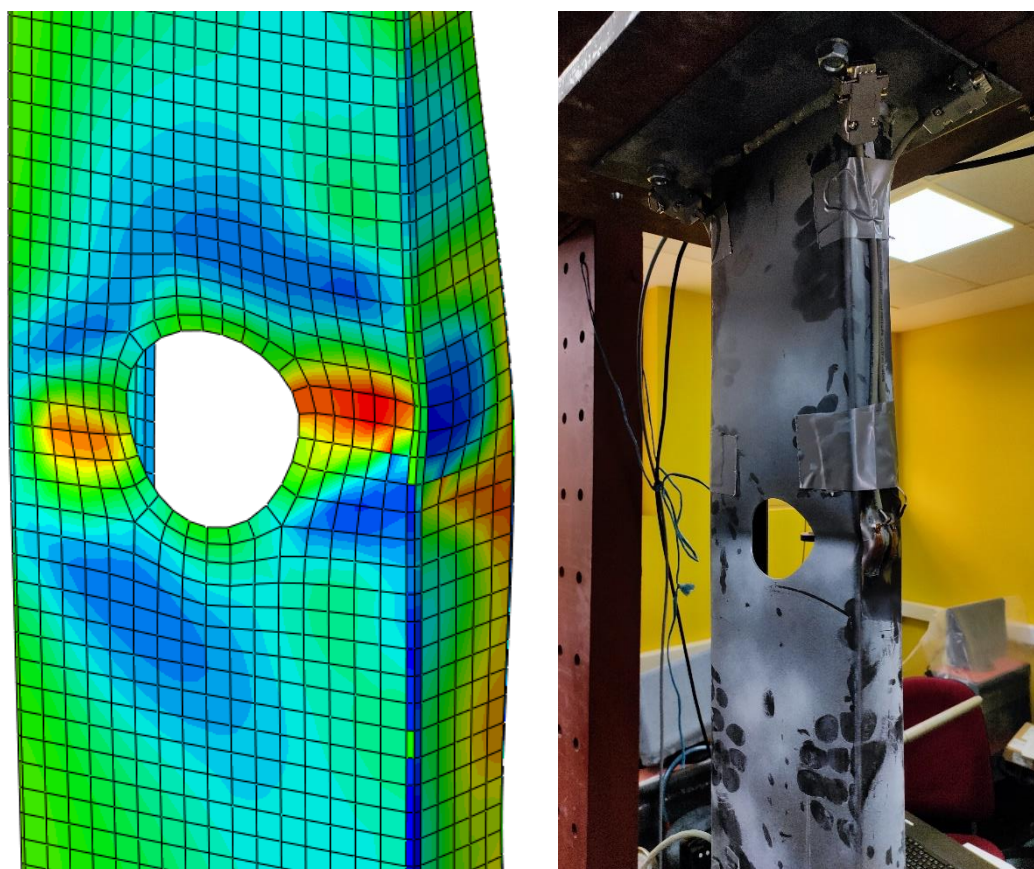
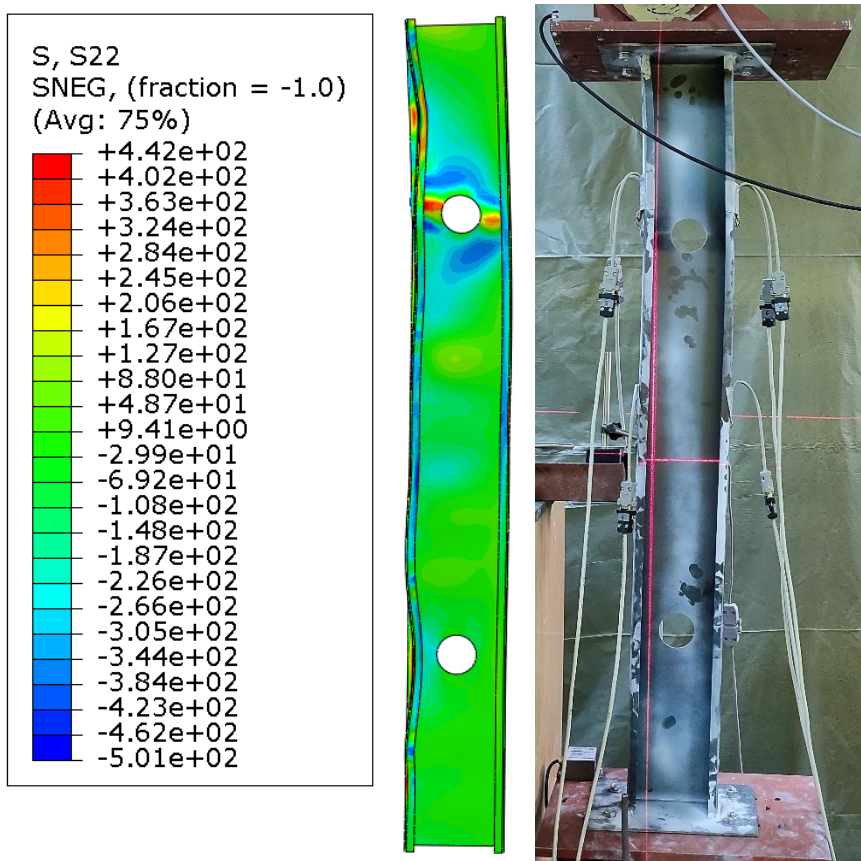
Слика 4.21. Поређење деформисаног облика експерименталног испитивања и нумеричких анализа за узорак C100-2-e40



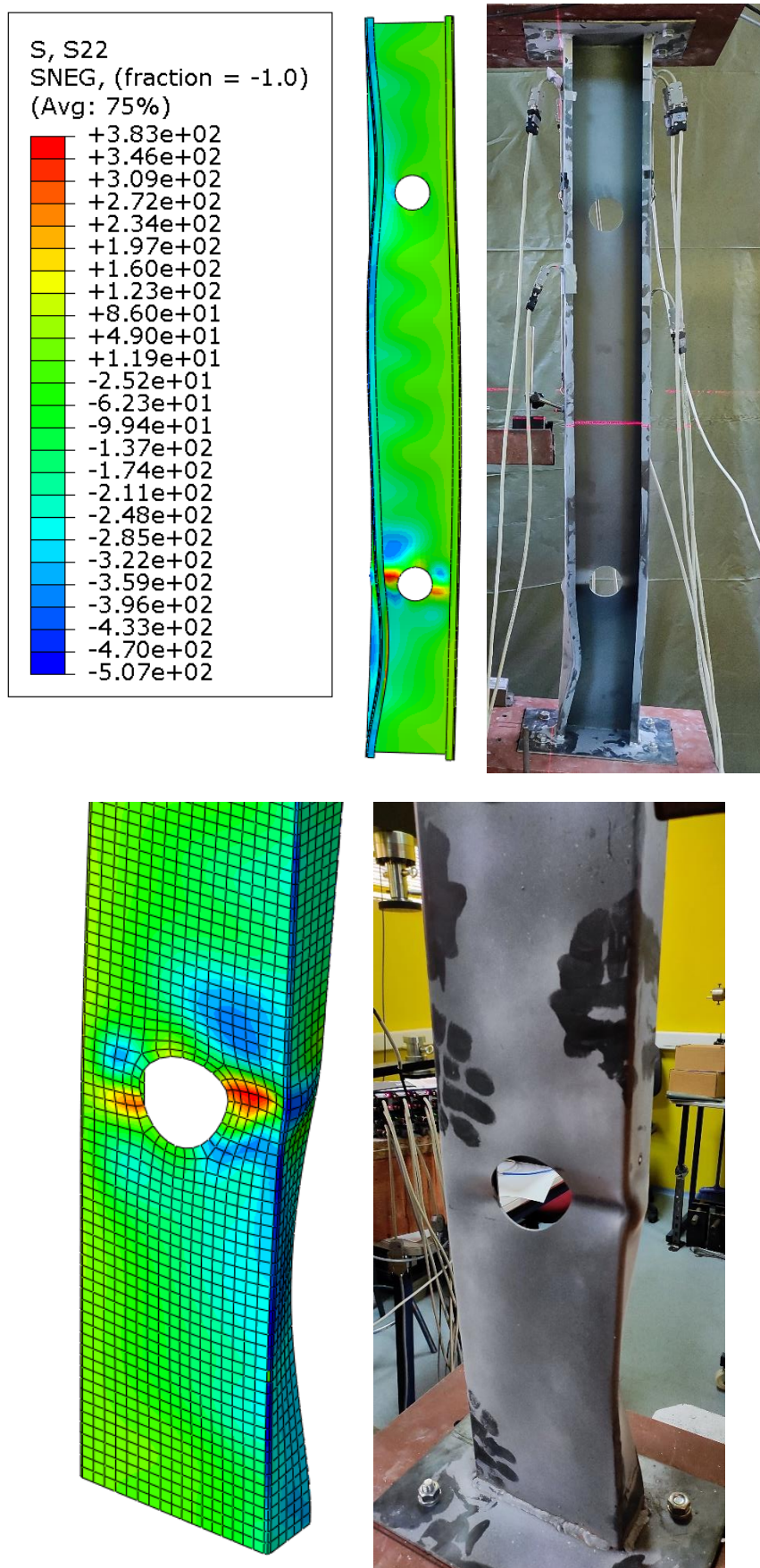
Слика 4.22. Поређење деформисаног облика експерименталног испитивања и нумеричких анализа за узорак C100-3-e00



Слика 4.23. Поређење деформисаног облика експерименталног испитивања и нумеричких анализа за узорак C100-3-e40



Слика 4.24. Поређење деформисаног облика експерименталног испитивања и нумеричких анализа за узорак C150-2-e40



Слика 4.25. Поређење деформисаног облика експерименталног испитивања и нумеричких анализа за узорак C150-2-e80

На основу приказаних резултата, може се закључити да је поклапање експерименталних и нумеричких резултата задовољавајуће у погледу остварених величина сила и померања. Такође, може се запазити да је обухватање утицаја почетних геометријских имперфекција веома значајно у случајевима централно притиснутих узорака, док је у случајевима ексцентрично оптерећених елемената њихов утицај знатно мањи. Ово може бити последица чињенице да је, у случајевима ексцентрично притиснутих елемената, релативна величина геометријских имперфекција у односу на већ постављен ексцентрицитет силе притиска готово занемарљива. Са друге стране, с обзиром на то да постојање геометријских имперфекција утиче на одступање правца тежишне осе елемента од идеално праве геометрије, њихов највећи утицај се и очекује управо у случајевима у којима су елементи оптерећени централним оптерећењем.

Осим што је постигнуто задовољавајуће поклапање експерименталних и нумеричких резултата у погледу вредности сила и померања, исто тако уочава се и поклапање деформисаних облика.

У наредним табелама приказано је поређење средњих максималних вредности сила притисака и момената савијања експерименталног и нумеричког испитивања.

Табела 4.2. Поређење максималних вредности нормалних сила и момената савијања експерименталног испитивања и нумеричких анализа за узорке C100

Узорак	Средња вредност експерименталног испитивања		МКЕ		Односи	
	$N_{u,t,sr}$ [kN]	$M_{u,t,sr}$ [kNm]	$N_{u,MKE}$ [kN]	$M_{u,MKE}$ [kNm]	$N_{u,t,sr} / N_{u,MKE}$	$M_{u,t,sr} / M_{u,MKE}$
C100-0-e00	119.22	0.136	125.82	-	0.95	-
C100-0-e40	65.46	3.219	64.13	2.560	1.03	1.26
C100-0-e80	43.09	4.103	41.92	3.356	1.03	1.22
Средња вредност					1.00	1.24
Стандардна девијација					0.04 (3.64%)	0.02 (1.52%)
C100-2-e00	86.16	0.454	97.54	-	0.88	-
C100-2-e40	55.78	2.651	56.54	2.262	0.99	1.17
C100-2-e80	37.18	3.450	38.37	3.071	0.97	1.12
Средња вредност					0.95	1.15
Стандардна девијација					0.05 (4.77%)	0.02 (2.12%)
C100-3-e00	88.74	0.981	101.89	-	0.87	-
C100-3-e40	56.16	2.734	54.50	2.183	1.03	1.25
C100-3-e80	37.48	3.567	37.44	2.995	1.00	1.19
Средња вредност					0.97	1.22
Стандардна девијација					0.07 (7.16%)	0.03 (2.55%)

Табела 4.3. Поређење максималних вредности нормалних сила и момената савијања експерименталног испитивања и нумеричких анализа за узорке C150

Узорак	Средња вредност експерименталног испитивања		МКЕ		Односи	
	$N_{u,t,sr}$ [kN]	$M_{u,t,sr}$ [kNm]	$N_{u,MKE}$ [kN]	$M_{u,MKE}$ [kNm]	$N_{u,t,sr} / N_{u,MKE}$	$M_{u,t,sr} / M_{u,MKE}$
C150-0-e00	89.48	0.055	93.12	-	0.96	-
C150-0-e40	77.44	3.281	78.85	3.155	0.98	1.04
C150-0-e80	56.23	4.807	56.03	4.481	1.00	1.07
Средња вредност					0.98	1.06
Стандардна девијација					0.02 (1.77%)	0.02 (1.69%)
C150-2-e00	84.50	0.222	96.45	-	0.88	-
C150-2-e40	68.94	2.906	71.87	2.877	0.96	1.01
C150-2-e80	53.30	4.507	53.38	4.269	1.00	1.06
Средња вредност					0.94	1.03
Стандардна девијација					0.05 (5.40%)	0.02 (2.22%)
C150-3-e00	87.22	0.116	95.17	-	0.92	-
C150-3-e40	73.96	3.162	74.11	2.960	1.00	1.07
C150-3-e80	54.71	4.635	52.83	4.226	1.04	1.09
Средња вредност					0.98	1.08
Стандардна девијација					0.05 (5.06%)	0.01 (1.25%)

Анализирањем максималних вредности сила притиска у елементима из серије C100, уочљиво је да су максималне силе узорака са рупама оптерећених центричним притиском биле нешто нижих вредности у односу на оне добијене МКЕ анализама. У свим осталим случајевима одступања су била мања од 5 %. Са друге стране, максималне вредности момената савијања су МКЕ анализама потцењена у односу на максималне моменте добијене експерименталним испитивањем, и то у појединим случајевима за више од 20 %. Одступања максималних вредности поређених

величина су се за узорке из серије C150 кретала у мањим границама, поготово када је реч о моментима савијања.

Табела 4.4. Поређење вредности на граници пропорционалности нормалних сила и момената савијања експерименталног истраживања и нумеричких анализа за узорке C100

Узорак	Средња вредност експерименталног испитивања		МКЕ		Односи	
	$N_{p,t,sr}$ [kN]	$M_{p,t,sr}$ [kNm]	$N_{p,MKE}$ [kN]	$M_{p,MKE}$ [kNm]	$N_{p,t,sr} / N_{p,MKE}$	$M_{p,t,sr} / M_{p,MKE}$
C100-0-e00	116.67	0.133	118.08	-	0.99	-
C100-0-e40	58.00	2.601	62.88	2.513	0.92	1.04
C100-0-e80	34.67	3.034	40.64	3.252	0.85	0.93
Средња вредност					0.92	0.98
Стандардна девијација					0.06 (5.98%)	0.05 (5.26%)
C100-2-e00	74.50	0.098	88.13	-	0.85	-
C100-2-e40	51.52	2.282	52.35	2.095	0.98	1.09
C100-2-e80	30.50	2.676	36.38	2.910	0.84	0.92
Средња вредност					0.89	1.00
Стандардна девијација					0.07 (7.55%)	0.08 (8.21%)
C100-3-e00	77.50	0.120	100.67	-	0.77	-
C100-3-e40	51.50	2.252	47.26	1.887	1.09	1.19
C100-3-e80	32.00	2.750	36.13	2.891	0.89	0.95
Средња вредност					0.92	1.07
Стандардна девијација					0.13 (14.45%)	0.12 (11.15%)

Табела 4.5. Поређење вредности на граници пропорционалности нормалних сила и момената савијања експерименталног истраживања и нумеричких анализа за узорке C150

Узорак	Средња вредност експерименталног испитивања		МКЕ		Односи	
	$N_{p,t,sr}$ [kN]	$M_{p,t,sr}$ [kNm]	$N_{p,MKE}$ [kN]	$M_{p,MKE}$ [kNm]	$N_{p,t,sr} / N_{p,MKE}$	$M_{p,t,sr} / M_{p,MKE}$
C150-0-e00	84.33	0.052	93.12	-	0.91	-
C150-0-e40	69.50	2.934	69.76	2.793	1.00	1.05
C150-0-e80	52.50	4.333	55.90	4.476	0.94	0.97
Средња вредност					0.95	1.01
Стандардна девијација					0.04 (3.95%)	0.04 (4.15%)
C150-2-e00	80.50	0.071	92.67	-	0.87	-
C150-2-e40	65.50	2.716	71.30	2.847	0.92	0.95
C150-2-e80	50.50	4.159	53.38	4.269	0.95	0.97
Средња вредност					0.91	0.96
Стандардна девијација					0.03 (3.52%)	0.01 (1.03%)
C150-3-e00	85.00	0.068	92.29	-	0.92	-
C150-3-e40	66.50	2.752	71.10	2.842	0.94	0.97
C150-3-e80	52.50	4.326	52.83	4.226	0.99	1.02
Средња вредност					0.95	1.00
Стандардна девијација					0.03 (3.31%)	0.03 (2.78%)

Поређењем експерименталних вредности нормалне силе притиска и момента савијања на граници пропорционалности са резултатима МКЕ анализа узорака из серије C100, уочено је да су вредности стандардне девијације нешто веће у односу на оне контролисане код максималних вредности. Одступања нормалних сила кретала су се од ≈ 6 до ≈ 14 %, док су одступања момента била нешто нижих вредности (од ≈ 5 до ≈ 11 %). Такође, запажено је да су одступања мања у случају

елемената без отвора у ребру, а да се са повећањем броја отвора повећава и вредност стандардне девијације. Одступања код узорака из серије *C150* су била много мања од оних код узорака *C100*, и уједначенија када је реч о поређењу елемената са и без отвора у оквиру исте серије. У овим случајевима, одступања нормалне силе кретала су се од ≈ 3 до ≈ 4 %, док су одступања момента била у оквиру граница од ≈ 1 до ≈ 4 %. Код свих узорака, нумеричким симулацијама добијене су веће вредности у односу на експериментално испитивање.

С обзиром на то да је постигнуто задовољавајуће поклапање експерименталних и нумеричких резултата, на основу спроведених нумеричких анализа, може се закључити да су коришћени модели довољно тачни у предвиђању понашања хладно-обликованих елемената са и без отвора у ребру. Овим су остварени сви предуслови за спровођење наредне фазе истраживања – параметарске анализе. Параметарска анализа ће послужити за детаљније сагледавање феномена извијања ексцентрично притиснутих хладно-обликованих елемената, узимајући при томе у обзир низ различитих фактора, које, због обимности, није било могуће обухватити експерименталним испитивањем.

5. ПАРАМЕТАРСКА АНАЛИЗА

5.1. ОПИС МОДЕЛА И АНАЛИЗЕ

Након верификације резултата спроведена је параметарска анализа са циљем сагледавања утицаја и осетљивости различитих фактора на понашање и носивост хладно-обликованих елемената са отворима у ребру. Варирани параметри су дужина елемента, облик попречног пресека, број и величина отвора у ребру, као и интензитет дејства силе притиска и момента савијања (ексцентрицитет силе притиска). Ради што прецизнијег формирања функције интеракционог дијаграма за сваки тип елемента, потребно је обезбедити што већи број испитивања са различитим вредностима ексцентрицитета, стога је свака грана интеракционог дијаграма у параметарској анализи ове дисертације дефинисана на основу скупа 11 тачака. Сви варирани параметри су приказани у табели 5.1.

Табела 5.1. Параметри варирани у параметарској анализи

Облик попречног пресека	Дужина елемента [mm]	Број отвора у ребру	Величина отвора [mm]	Ексцентрицитет силе притиска [mm]
C100	750	0	-	0, 20, 40, 60, 80, 100, 130, 160, 200, 300, r*
		1	40, 60	
	1250	0	-	
		2, 3, 4	40, 60	
	1750	0	-	
		2, 3, 4, 5	40, 60	
C150	750	0	-	0, 20, 40, 60, 80, 100, 130, 160, 200, 300, r*
		1	60, 90	
	1250	0	-	
		2, 3, 4	60, 90	
	1750	0	-	
		2, 3, 4, 5	60, 90	

*ротација крајева елемента за одређивање максималног момента савијања без присуства силе притиска

У циљу одређивања максималног момента савијања елемената без присуства силе притиска, као спољашње оптерећење су задате ротације крајева елемената у износу од 35 mrad. На овај начин, елементи су подвргнути константној вредности момента савијања дуж своје осе, што не уводи у проблем додатну непознату, а то

је утицај различитих вредности момента са различитих страна отвора у ребру (што би био случај код елемента оптерећеног попречним силама).

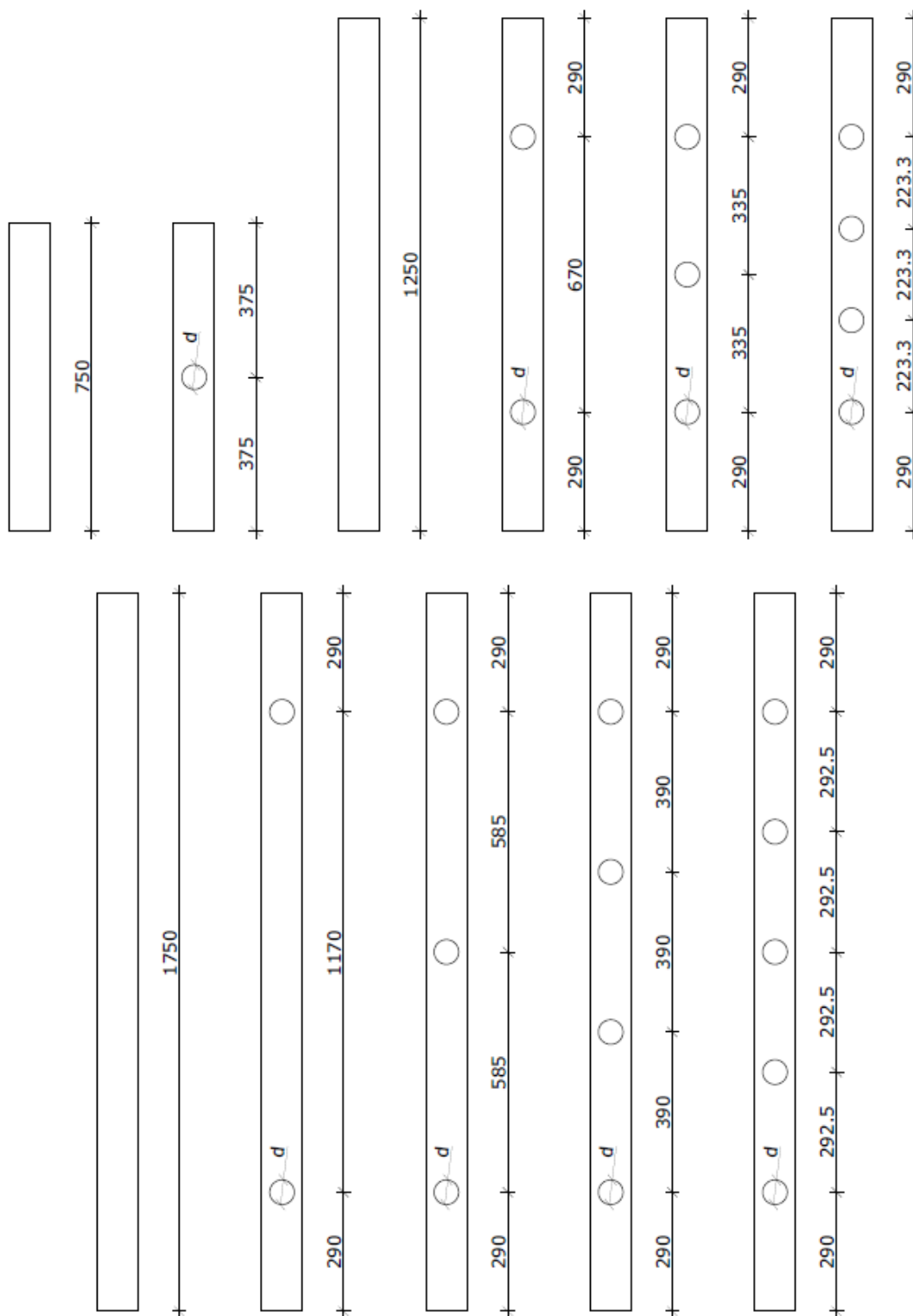
Како је у обзир узето много више параметара у односу на експериментално испитивање, потребно је усвојити нову конвенцију о називу узорака параметарске анализе. Начин означавања узорака параметарске анализе је приказан у табели 5.2.

Табела 5.2. Систем означавања узорака параметарске анализе

Р. бр. ознаке у називу	Ознака	Значење
1.	C100 / C150	Облик и висина попречног пресека
2.	750 / 1250 / 1750	Дужина узорка у [mm]
3.	0 / 1 / 2 / 3 / 4 / 5	Број отвора у ребру дуж елемента
4.	40 / 60 / 90	Пречник отвора у [mm]
5.	e00 / e20 / e40 / e60 / e80 / e100 / e130 / e160 / e200 / e300 / r	Ексцентрицитет у [mm] на којем се уноси сила притиска у односу на тежиште попречног пресека

За разлику од експерименталне поставке, где су осе ротације зглобова на растојању од 113.5 mm од крајева узорака, у моделима параметарских анализа су осе ротација зглобова дефинисане на крајевима елемената, те је ефективна дужина елемената модела њихова реална дужина, дата у табели 5.1. На слици 5.1 приказане су геометријске карактеристике елемената обухваћених параметарском анализом.

Будући да је у претходном поглављу показано да почетне геометријске имперфекције значајније утичу само у случајевима центрично оптерећених елемената, у параметарској анализи њихов утицај узет је у обзир само у тим случајевима. Облик почетних геометријских имперфекција, као и у претходном поглављу, уведен је у разматрање као комбинација (суперпозиција) еластичних облика извијања. Пошто је процесом контроле геометрије узорака утврђено да су доминантни облици почетних геометријских имперфекција глобални у виду савијања око јаче осе попречног пресека и дисторзиони са 2, односно 3 полуталаса дуж узорака, у складу са тим бирани су и облици почетних геометријских имперфекција у параметарским анализама. Одабир одговарајућих облика извијања урађен је на основу субјективног прегледа првих 300 облика, при чему су одабрани први глобални (савојни или бочно-торзиони) и први дисторзиони облик са 2 полуталаса, који се готово у свакој ситуацији јавља у комбинацији са локалним извијањем ребра и фланши.

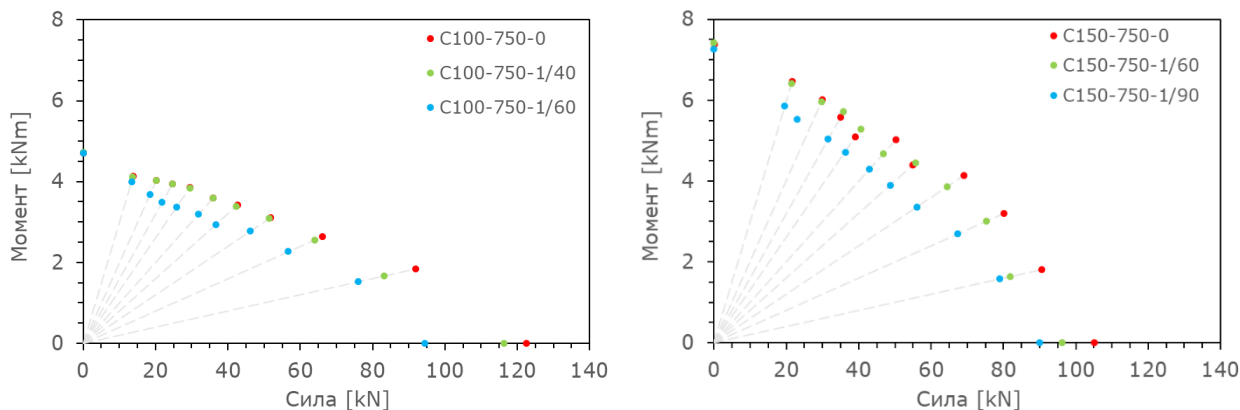


Слика 5.1. Геометријске карактеристике елемената обухваћених параметарском анализом

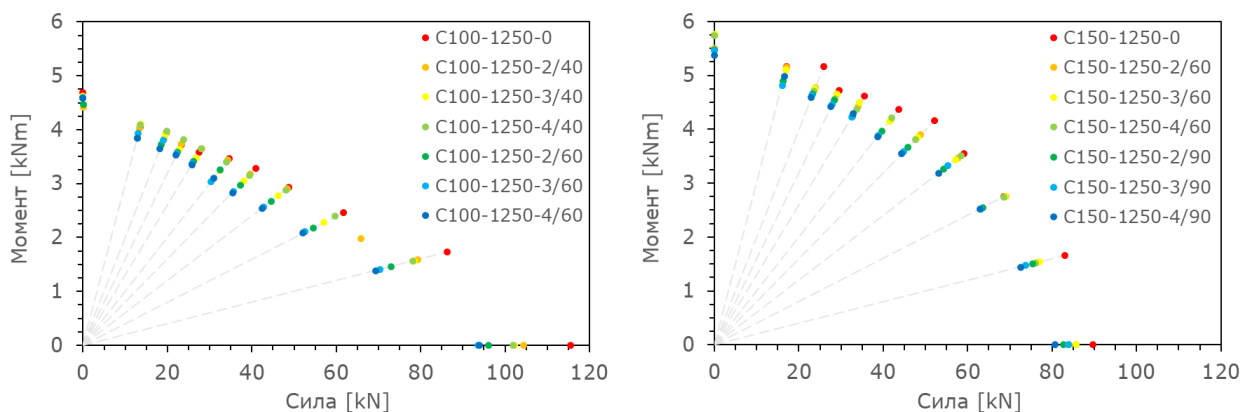
5.2. РЕЗУЛТАТИ ПАРАМЕТАРСКЕ АНАЛИЗЕ

Резултати параметарске анализе су приказани у форми интеракционих дијаграма зависности момента савијања и аксијалне силе притиска, како за апсолутне

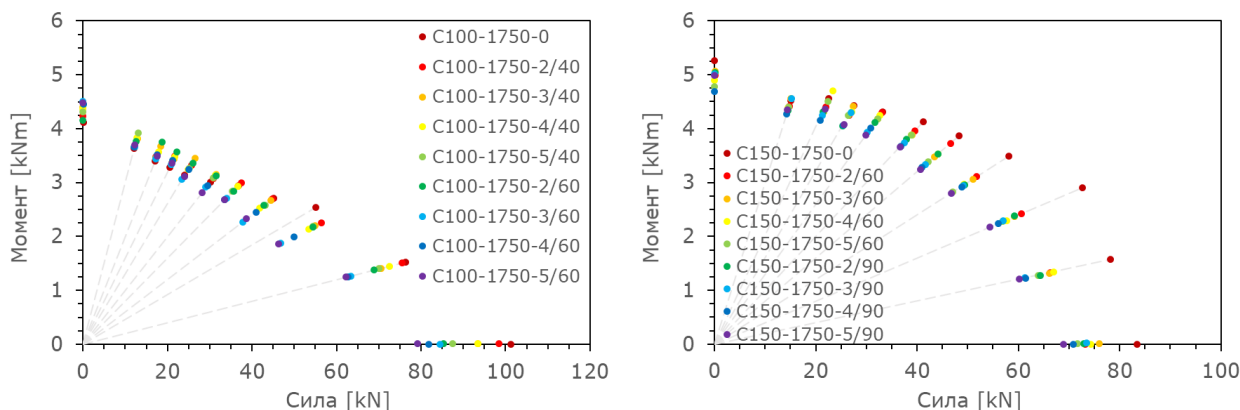
вредности ових величина, тако и за нормализоване вредности. На сликама 5.2 до 5.4 приказани су интеракциони дијаграми за апсолутне вредности посматраних величина.



Слика 5.2. Зависност силе притиска и момента савијања код елемената C100-750 (лево) и C150-750 (десно)



Слика 5.3. Зависност силе притиска и момента савијања код елемената C100-1250 (лево) и C150-1250 (десно)



Слика 5.4. Зависност силе притиска и момента савијања код елемената C100-1750 (лево) и C150-1750 (десно)

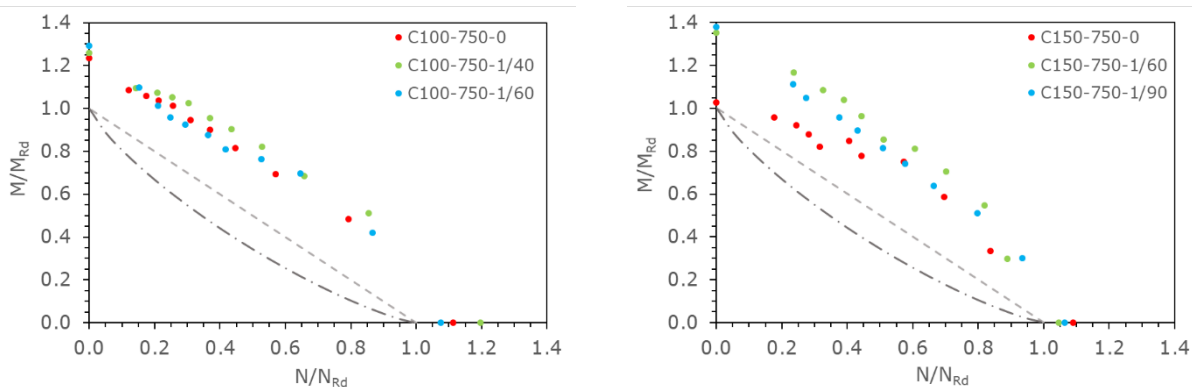
На основу претходних дијаграма, прва ствар која се може уочити јесте да носивост елемента опада са увођењем отвора у ребру, као и са повећањем димензије истог. Ово је разумљиво, с обзиром на то да повећање површине отвора утиче на смањење ефективне површине попречног пресека елемента. На дијаграмима који приказују резултате елемената код којих је вариран број отвора дуж елемента, може се такође уочити тренд смањења носивости са повећањем броја отвора у ребру. Разлог ове појаве, може се тражити у чињеници да како се растојање између отвора смањује, то се напони све више преусмеравају ка зонама око отвора, па чак и на делу ребра између самих отвора.

Посматрајући елементе $C100$ пресека једнаке дужине, а са различитим бројем отвора у ребру, уочава се да је разлика између максималних носивости највећа у случају центрично притиснутих елемената. Разлика носивости за ексцентрично притиснуте елементе опада са порастом ексцентрицитета, да би била најмања у случају савијаних елемената без силе притиска.

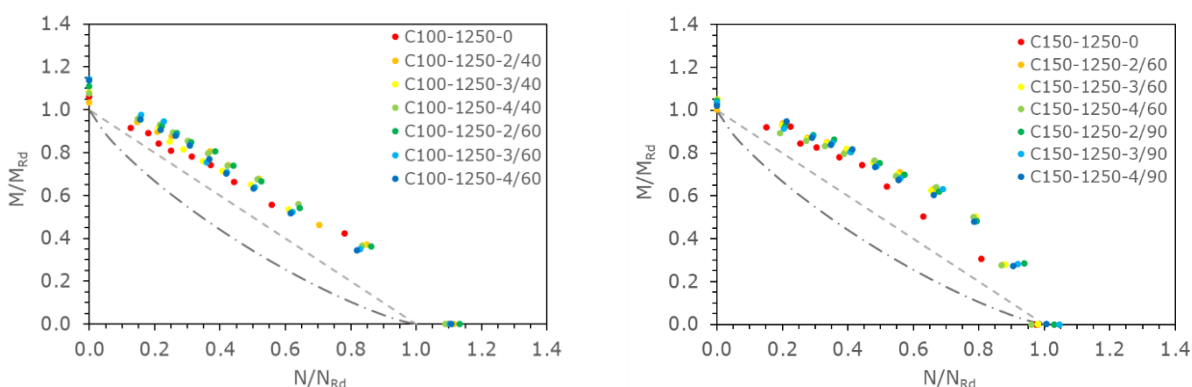
Код елемената $C150$ пресека, чија је виткост ребра већа, са повећањем дужине елемента уочава се све већа нелинеарност у погледу зависности силе притиска и момента савијања. Иако је разлика у носивости најмања у случају савијаних елемената без силе притиска, као у претходном случају, највећа разлика не јавља се код центрично притиснутих елемената, већ је премештена у зону средњих ексцентрицитета.

Такође, уочено је да резултати који се односе на једну вредност ексцентрицитета леже на истој испрекиданој линији у оквиру дијаграма. Стога, може се закључити да је пад носивости елемента линеаран са повећањем како величине, тако и броја отвора у ребру.

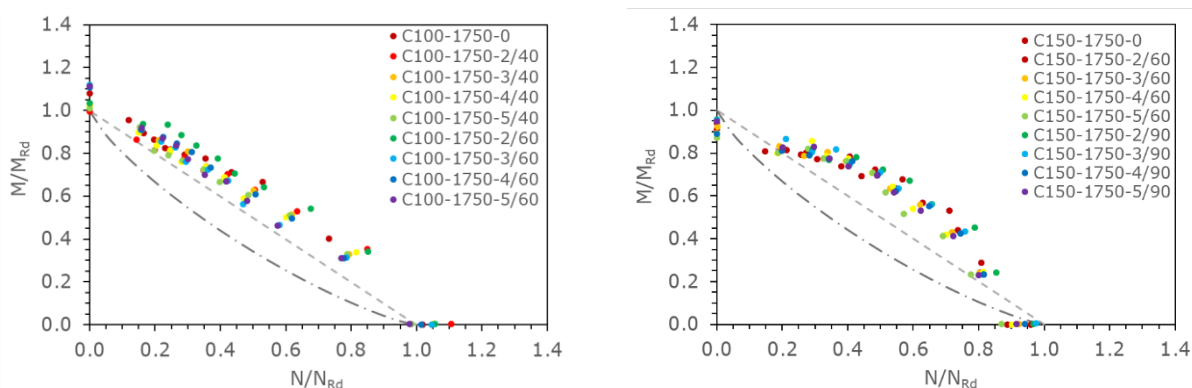
На сликама 5.5 до 5.7 приказани су интеракциони дијаграми за нормализоване вредности аксијалне силе и момента савијања. Нормализација је извршена на основу носивости на притисак и савијање одређених према [4]. За елементе са отворима у ребру је за одређивање носивости попречног пресека у обзир узет отвор приликом одређивања ефективног попречног пресека. На свакој од слика приказане су релације дефинисане једначинама (2.1) и (2.5), испрекиданим линијама црта-црта и црта-тачка-црта, редом. Прва једначина дефинисана је у односу на носивост попречног пресека, док друга одређује носивост на нивоу елемента, услед глобалног флексионог, торзионог или бочно-торзионог извијања.



Слика 5.5. Интеракциони дијаграм $N/N_{max} + M/M_{max}$ за елементе $C100-750$ (лево) и $C150-750$ (десно)



Слика 5.6. Интеракциони дијаграм $N/N_{max} + M/M_{max}$ за елементе $C100-1250$ (лево) и $C150-1250$ (десно)

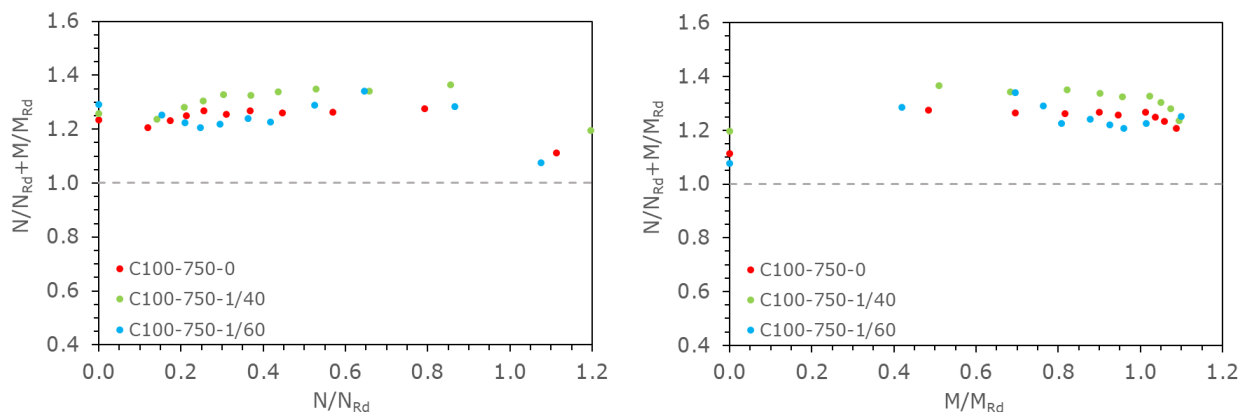


Слика 5.7. Интеракциони дијаграм $N/N_{max} + M/M_{max}$ за елементе $C100-1750$ (лево) и $C150-1750$ (десно)

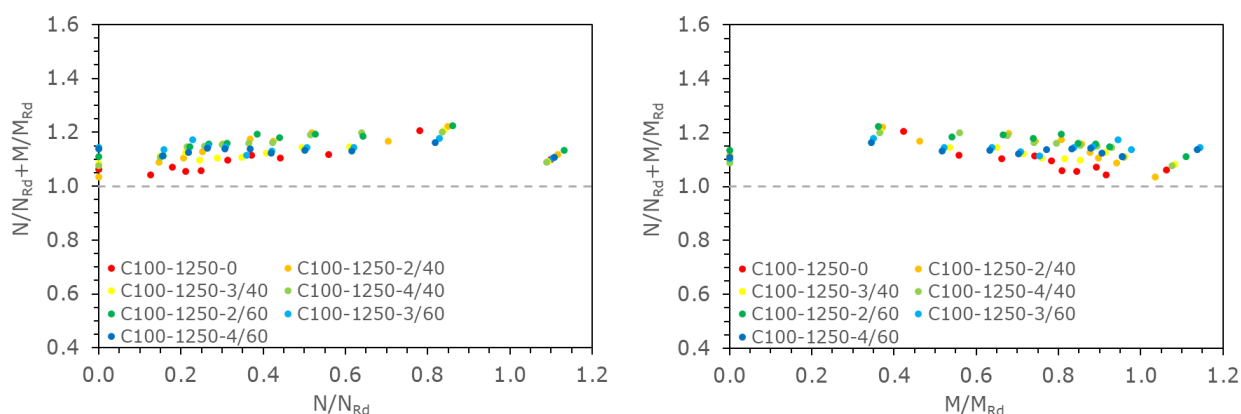
У случају елемената $C100$, критеријум (2.1) се испоставља прилично прецизним. Исти критеријум у случају елемената $C150$ даје резултате који су на већој страни сигурности у односу на елементе $C100$, иако је у појединим случајевима овим критеријумом носивост елемента на истовремено дејство притиска и савијања прецењена. Тренд закривљења функције носивости на истовремено дејство притиска и савијања се може запазити и на нормализованим интеракционим дијаграмима.

Критеријум дефинисан једначином (2.5) у случајевима оба типа попречног пресека даје резултате са мало већим коефицијентом сигурности у односу на критеријум (2.1). Код елемената дужине $C100-1250$ разлика између резултата које дају ова два критеријума је највећа и креће се до вредности од око 12 %, док је код елемената дужине 750 mm нешто нижа и не прелази вредност од 9 %. С обзиром на то да је проблем извијања танкозидних хладно-обликованих елемената у већини случајева диктиран комбинацијом локалног и дисторзионог извијања, употреба интеракционог дијаграма дефинисаног једначином (2.5) је упитна. Стога, већа поузданост би се могла приписати интеракционом дијаграму дефинисаном једначином (2.1), будући да је приликом одређивања носивости попречног пресека обухваћен утицај локалног и дисторзионог извијања.

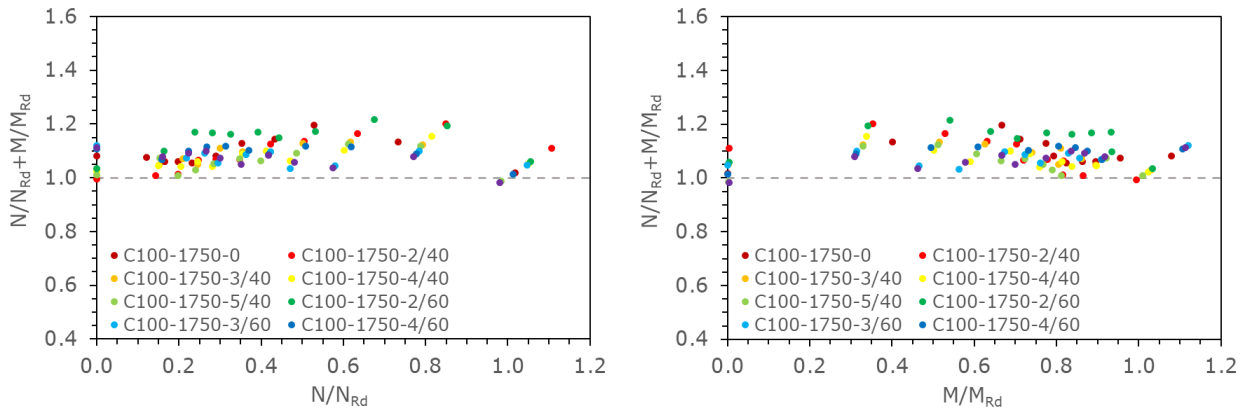
На сликама 5.8 до 5.13 приказане су зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања, као и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања.



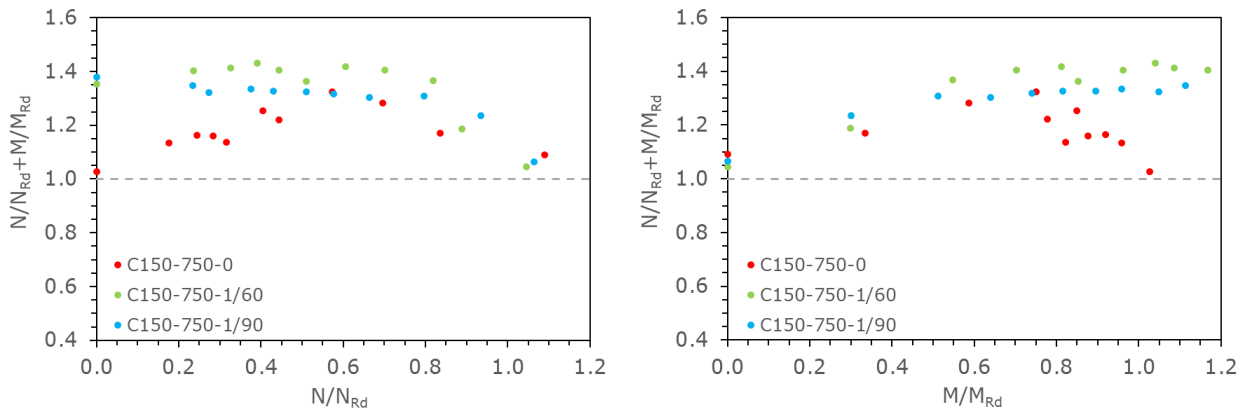
Слика 5.8. Зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања (лево) и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања (десно) за елементе $C100-750$



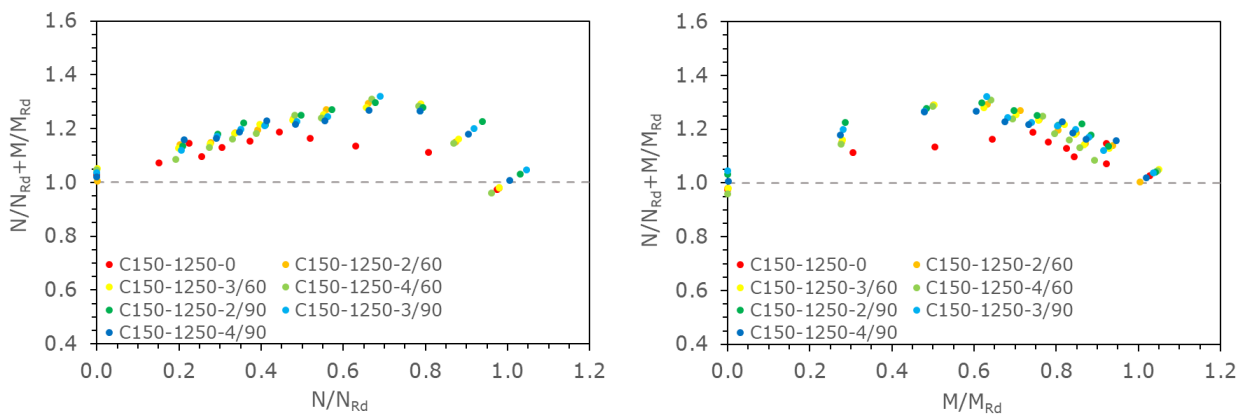
Слика 5.9. Зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања (лево) и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања (десно) за елементе $C100-1250$



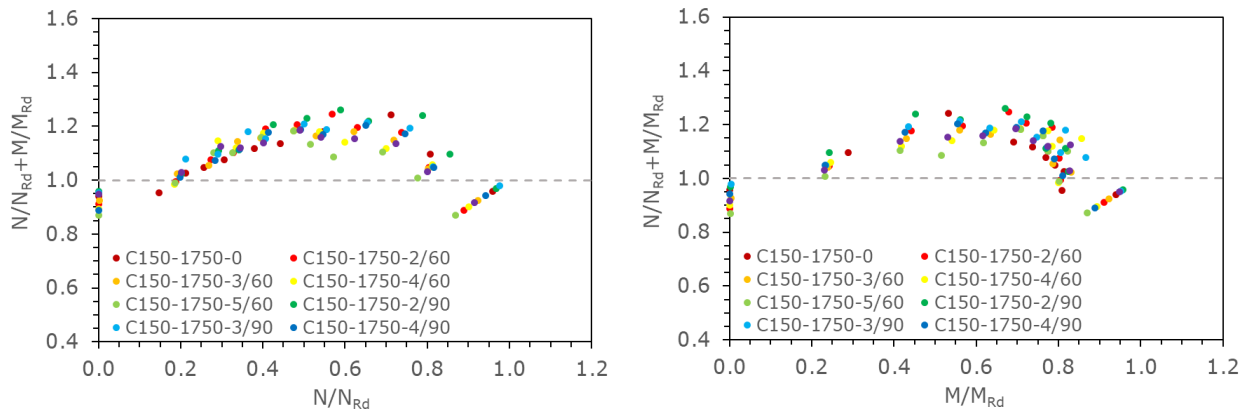
Слика 5.10. Зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања (лево) и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања (десно) за елементе *C100-1750*



Слика 5.11. Зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања (лево) и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања (десно) за елементе *C150-750*



Слика 5.12. Зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања (лево) и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања (десно) за елементе *C150-1250*

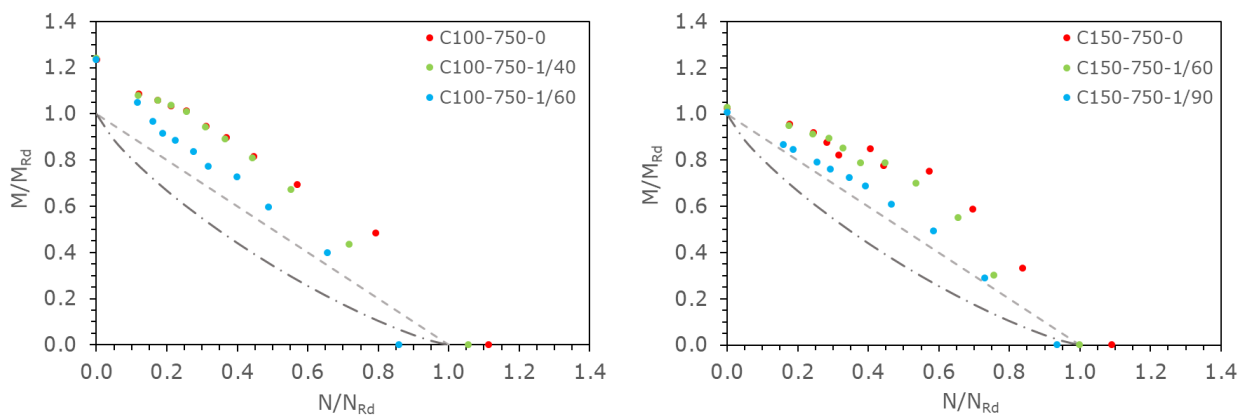


Слика 5.13. Зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања (лево) и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања (десно) за елементе *C150-1750*

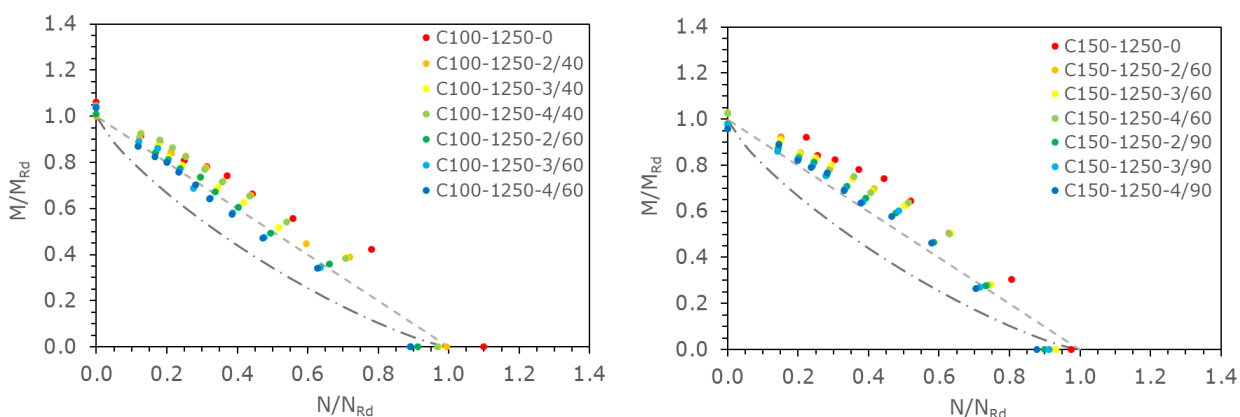
Збир нормализованих сила притиска и момента савијања код елемената *C100* у највећем броју случајева био је између вредности 1.0 и 1.3, док ни у једном случају није прекорачена вредност од 1.4. Веће вредности овог збира присутне су у областима малог ексцентрицитета, тачније, у зони у којој се вредност нормализоване силе притиска кретала између вредности 0.5 и 0.8.

У случају елемената *C150*, забележене су веће вредности збира нормализованих сила притиска и момента савијања. Неретко су ове вредности до 1.3, при чему је максимална забележена чак 1.431. Као и код елемената *C100*, и овде је примећен феномен већих вредности збира у области мањих ексцентрицитета, при чему је у случајевима елемената *C150* ова разлика још израженија. Вредности збира нормализоване силе притиска и момента савијања мање од 1.0 су пре свега уочене код елемената *C150*, а најбројније су у случајевима елемената дужине 1750 mm. Најнижа забележена вредност је била 0.87, при чему је забележено укупно 25 случајева код којих је збир нормализоване силе притиска и момента савијања мањи од 1.0, што представља 11.96 % у односу на укупно 209 анализираних *C150* узорак. Највећи број оваквих случајева, 3 укупно, примећен је у серијама *C150-1750-2/60*, *C150-1750-4/60* и *C150-1750-5/60*.

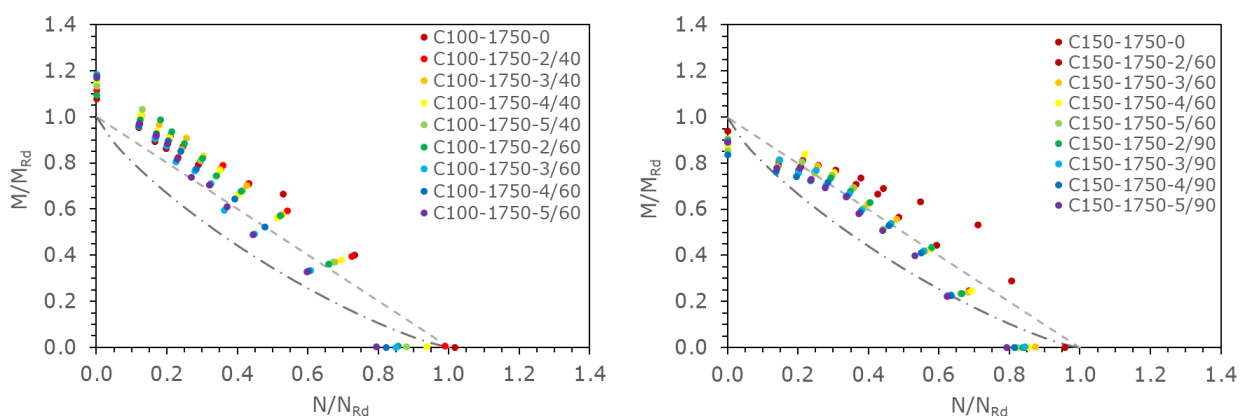
На сликама 5.14 до 5.16 приказани су интеракциони дијаграми за нормализоване вредности аксијалне силе и момента савијања узорак, при чему је нормализација извршена на основу носивости на притисак и савијање одређених према [4] за елементе без отвора у ребру. Као и на претходном сету интеракционих дијаграма, и овде су приказане релације дефинисане једначинама (2.1) и (2.5), испрекиданим линијама црта-црта и црта-тачка-црта, редом.



Слика 5.14. Интеракциони дијаграм $N/N_{RD} + M/M_{RD}$ за елементе $C100-750$ (лево) и $C150-750$ (десно)



Слика 5.15. Интеракциони дијаграм $N/N_{RD} + M/M_{RD}$ за елементе $C100-1250$ (лево) и $C150-1250$ (десно)

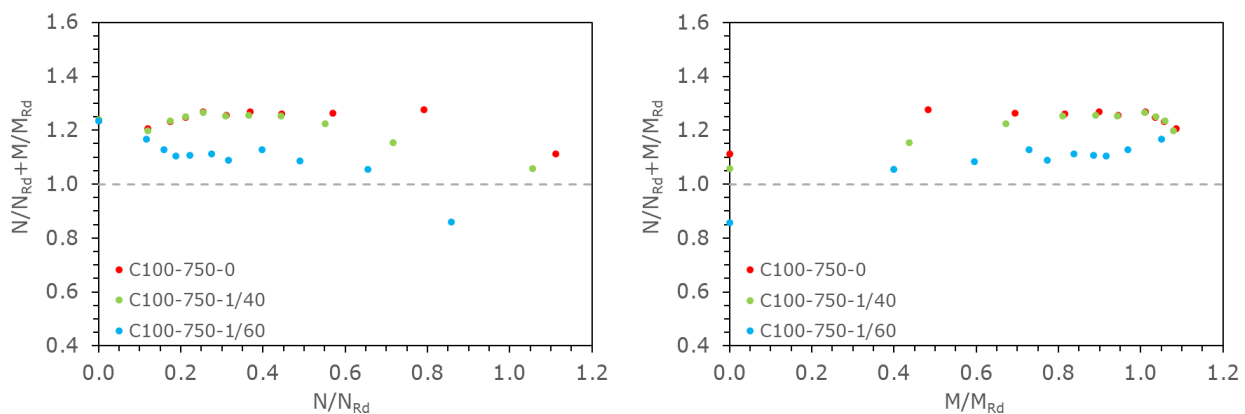


Слика 5.16. Интеракциони дијаграм $N/N_{RD} + M/M_{RD}$ за елементе $C100-1750$ (лево) и $C150-1750$ (десно)

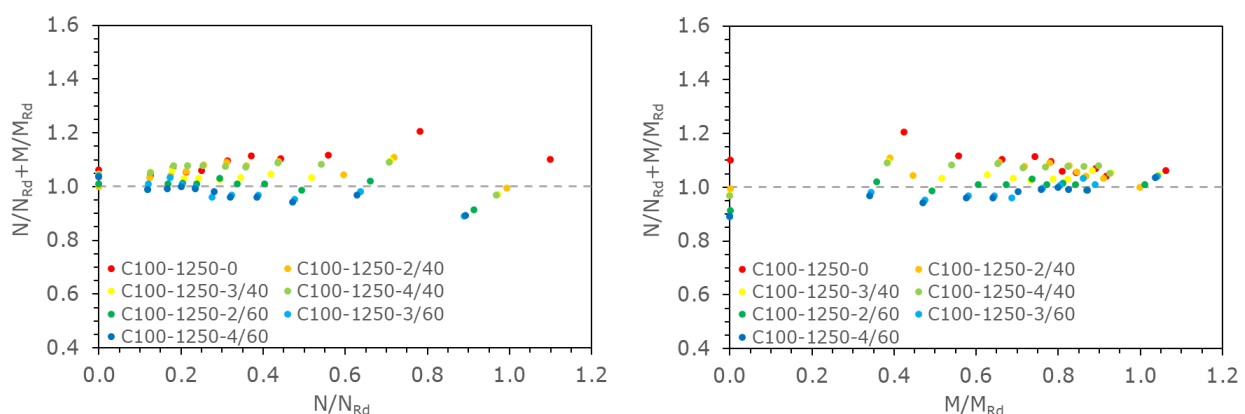
Критеријуми дефинисани једначинама (2.1) и (2.5) испоставили су се довољно прецизним у разматраним случајевима. Изузетак представљају случајеви центричног притиска и савијања без нормалне силе елемената са отворима у ребру, што је било очекивано. Критеријум (2.1) дефинисан према носивости попречног пресека је задовољен у свим испитаним случајевима елемената дужине 750 mm.

Међутим, у појединим случајевима елемената дужине 1250 mm и 1750 mm, где на носивост у одређеној мери утичу и глобални облици извијања, овај критеријум постаје строг, те се носивост мора контролисати критеријумом (2.5). Примећује се да увођењем отвора, те повећањем њихове величине и броја, интеракција нормалне силе притиска и момента савијања постаје све „ужа“ ка унутрашњости дијаграма, те се не може са сигурношћу тврдити да ће горе поменути постављени критеријуми задовољити случајеве елемената већих дужина, те веће величине и броја отвора од разматраних у овом истраживању.

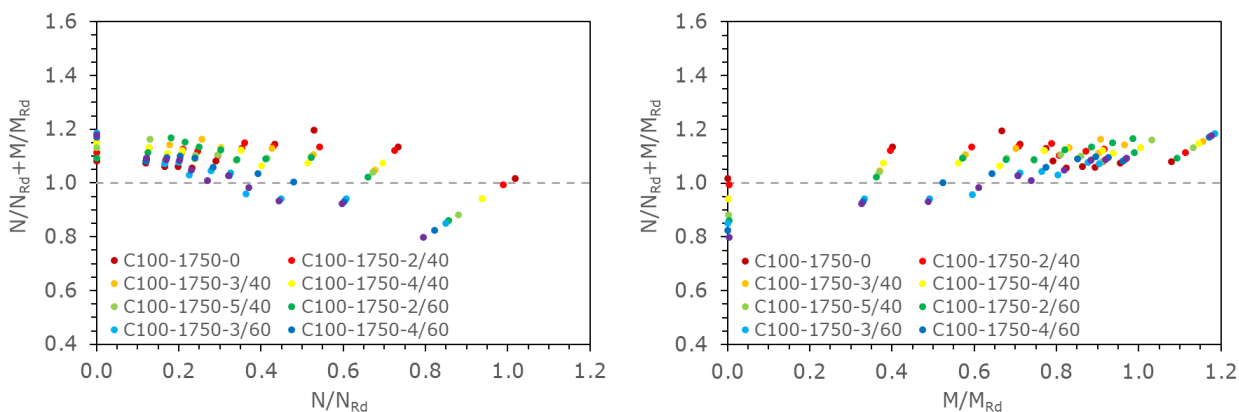
На сликама 5.17 до 5.22 су приказане зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања, као и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања, за нормализацију урађену на основу носивости на притисак и савијање одређених према [4] за елементе без отвора у ребру.



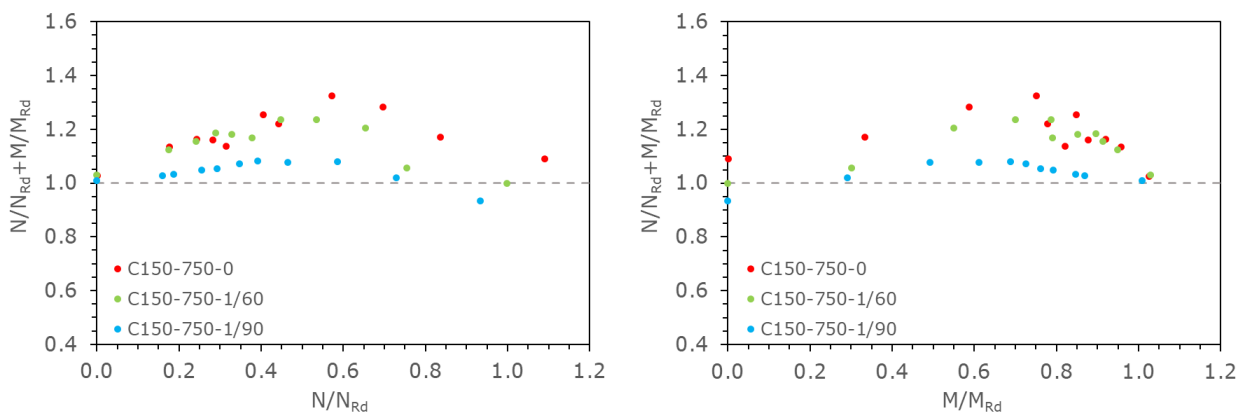
Слика 5.17. Зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања (лево) и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања (десно) за елементе *C100-750* (нормализација на основу носивости на одређених према [4] за елементе без отвора у ребру)



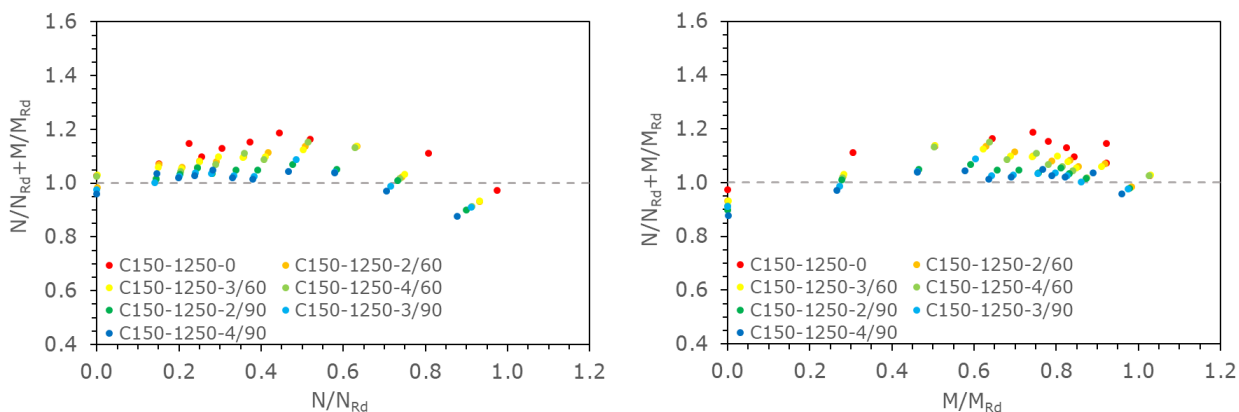
Слика 5.18. Зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања (лево) и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања (десно) за елементе *C100-1250* (нормализација на основу носивости на одређених према [4] за елементе без отвора у ребру)



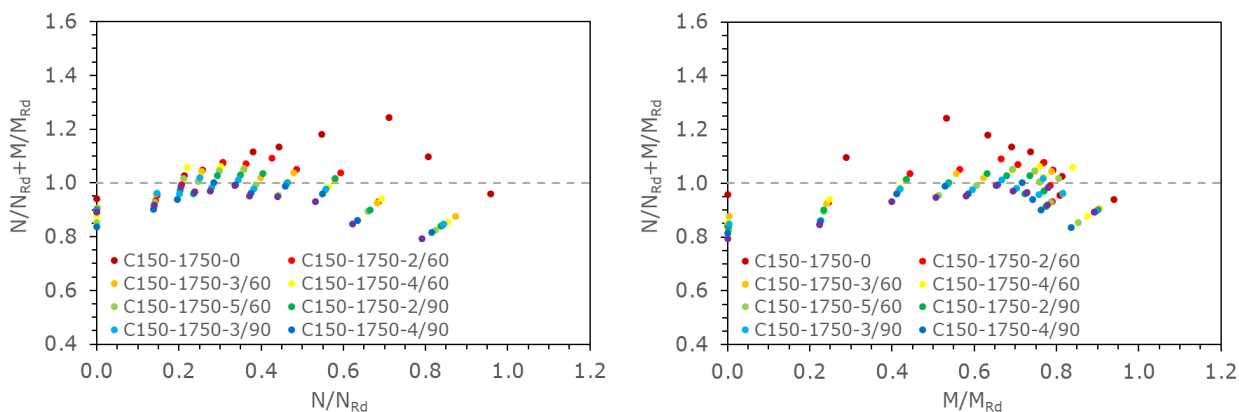
Слика 5.19. Зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања (лево) и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања (десно) за елементе C100-1750 (нормализација на основу носивости на одређених према [4] за елементе без отвора у ребру)



Слика 5.20. Зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања (лево) и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања (десно) за елементе C150-750 (нормализација на основу носивости на одређених према [4] за елементе без отвора у ребру)



Слика 5.21. Зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања (лево) и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања (десно) за елементе C150-1250 (нормализација на основу носивости на одређених према [4] за елементе без отвора у ребру)



Слика 5.22. Зависности нормализоване силе притиска и интеракције притиска и савијања (лево) и нормализованог момента савијања и интеракције притиска и савијања (десно) за елементе *C150-1750* (нормализација на основу носивости на одређених према [4] за елементе без отвора у ребру)

За разлику од нормализације утицаја према референтним вредностима елемената са отворима, у овом случају је збир нормализованих сила притиска и момента савијања у највећем броју случајева био између вредности 0.8 и 1.2. Вредности ниже од 1.0 су најбројније код елемената дужине 1750 mm, те код елемената дужине 1250 mm са 3 и 4 отвора у ребру. Веће вредности овог збира овог пута јављају се у областима средњег интензитета силе притиска.

Детаљнији резултати параметарске анализе приказани су у Прилогу Г. Посматрајући криве зависности аксијалне силе притиска и померања у правцу осе елемента, дате у овом прилогу, може се уочити пад крутости елемента са повећањем ексцентрицитета. Осим тога, као што је примећено у експерименталном делу истраживања, са порастом ексцентрицитета пад пост-критичне гране дијаграма је све блажи.

6. ПРЕПОРУКЕ ЗА ПРОРАЧУН

На основу резултата експерименталног испитивања и параметарске анализе, примећено је да за елементе код којих се локално и дисторзионо извијање јављају као доминантни облици услед губитка стабилности, линеарна функција интеракционог дијаграма N - M не даје увек резултате који су на страни сигурности. Ово је посебно изражено код елемената „средње“ дужине, тј. у овом истраживању код елемената дужине 1250 mm и 1750 mm. Такође, примећено је да се криве интеракционих дијаграма елемената са отворима у ребру „померају“ ка унутрашњости дијаграма, тј. ка границама успостављеним критеријумима (2.1) и (2.5). Стога, може се закључити да су постојање отвора, као и њиховог броја, значајни фактори у диктирању носивости хладно-обликованих елемената. Уколико отвор својим габаритима захвата делове ефективног попречног пресека, мењају се карактеристике од којих зависи носивост елемента, попут ефективне површине и ефективног отпорног момента попречног пресека. Увођењем релативних величина ових параметара, као и броја отвора у ребру елемента, предложене су корекције горе поменутих критеријума за елементе са отворима у ребру:

- За $0.178 \leq \bar{\lambda} < 0.455$:

$$\left[\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \right]^a + \left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \right]^b \leq 1.0 \quad \text{за } N_{Ed} \neq 0 \text{ и } M_{Ed} \neq 0$$

$$\frac{N_{Ed}}{aN_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{bM_{y,Rd}} \leq 1.0 \quad \text{за } \begin{cases} N_{Ed} \neq 0, M_{Ed} = 0 \\ \text{и} \\ N_{Ed} = 0, M_{Ed} \neq 0 \end{cases} \quad (6.1)$$

- За $0.455 \leq \bar{\lambda} \leq 0.581$:

$$\left[\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \right]^{0.8a} + \left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \right]^{0.8b} \leq 1.0 \quad \text{за } N_{Ed} \neq 0 \text{ и } M_{Ed} \neq 0$$

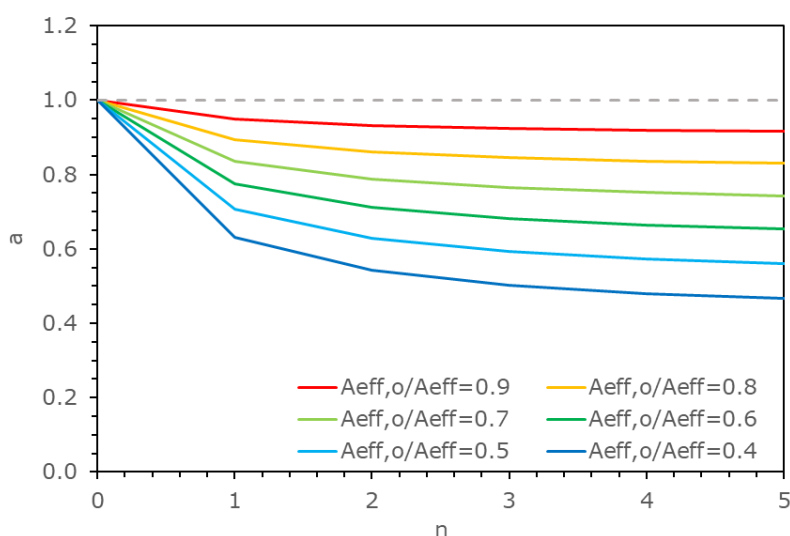
$$\frac{N_{Ed}}{(0.8a)N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{(0.8b)M_{y,Rd}} \leq 1.0 \quad \text{за } \begin{cases} N_{Ed} \neq 0, M_{Ed} = 0 \\ \text{и} \\ N_{Ed} = 0, M_{Ed} \neq 0 \end{cases} \quad (6.2)$$

где су $\bar{\lambda}$ глобална виткости елемента (дефинисана једначином (2.6)), а N_{Rd} и $M_{y,Rd}$, редом, прорачунске вредности носивости на дејство нормалне силе притиска и момента савијања елемента без отвора у ребру, одређене према [4]. Вредности експонената a и b зависе од карактеристика ефективног попречног пресека елемената (A_{eff} , $A_{eff,o}$, W_{eff} , $W_{eff,o}$) и броја отвора у ребру (n), и одређују се на следећи начин:

$$a = \left(\frac{A_{eff,o}}{A_{eff}} \right)^{\frac{n}{n+1}} \tag{6.3}$$

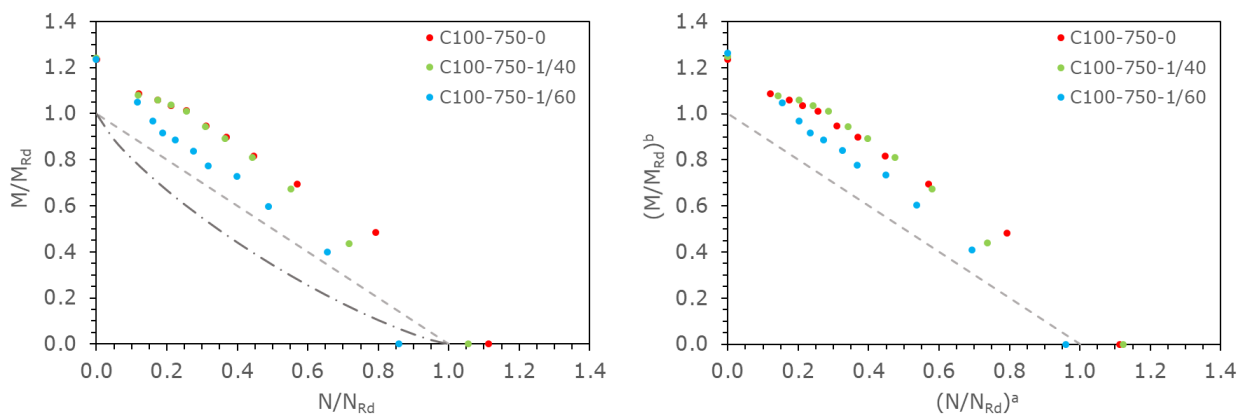
$$b = \left(\frac{W_{eff,o}}{W_{eff}} \right)^{\frac{n}{n+1}} \tag{6.4}$$

Уколико се вредности предложеног експонента a посматрају у зависности од односа површина ефективних попречних пресека и растојања између отвора у ребру, оне се могу представити кривама на слици 6.1. Криве идентичних облика и вредности важе и у случају експонента b , уз то да се уместо зависности између површина ефективног пресека јавља зависност између ефективних отпорних момената.

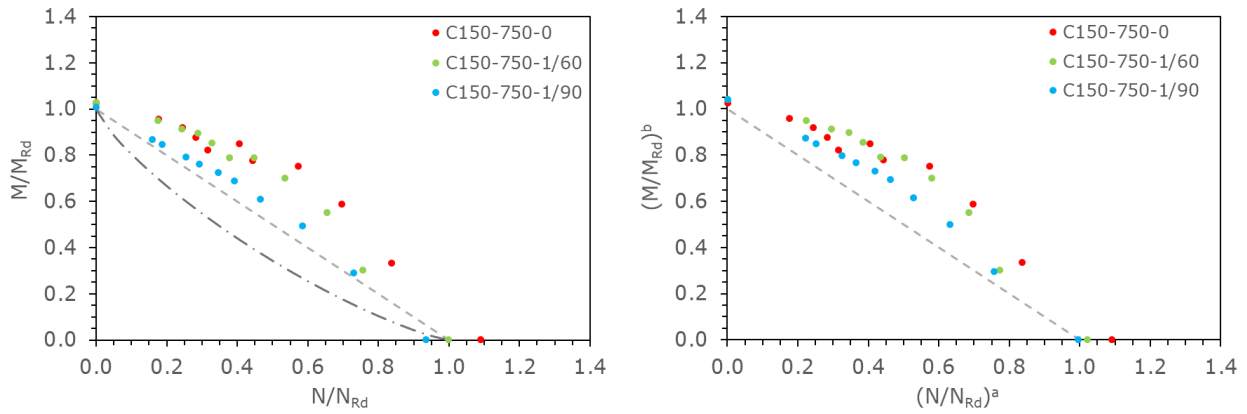


Слика 6.1. Промена вредности експонента a у зависности од односа површина ефективних попречних пресека и растојања између отвора у ребру

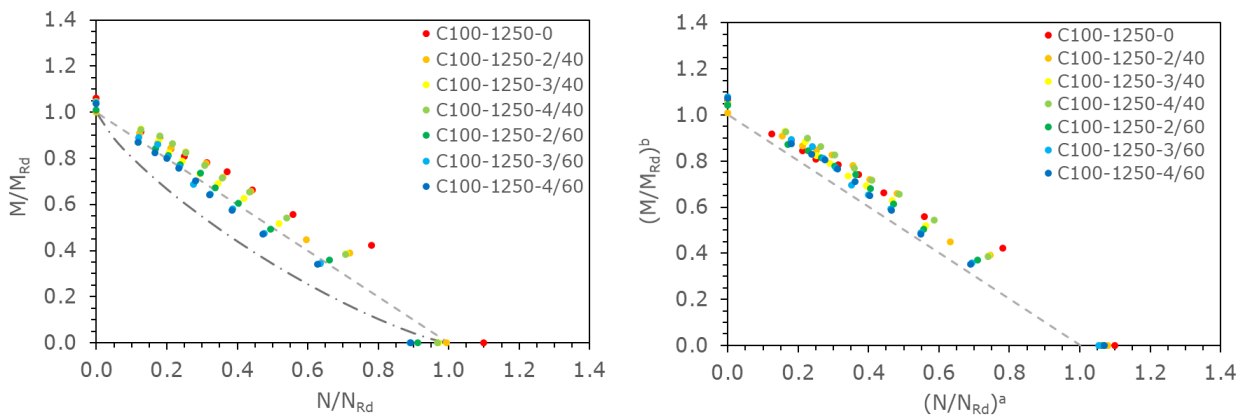
На сликама 6.2 до 6.7 приказано је поређење интеракционих дијаграма према [4] и према предложеним препорукама.



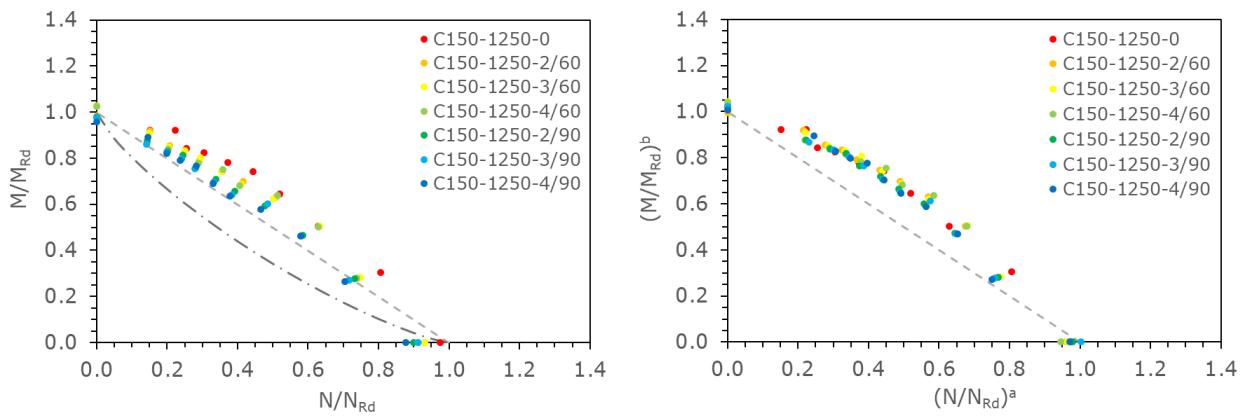
Слика 6.2. Поређење интеракционих дијаграма према [4] (лево) и према предложеним препорукама (десно) за елементе C100-750



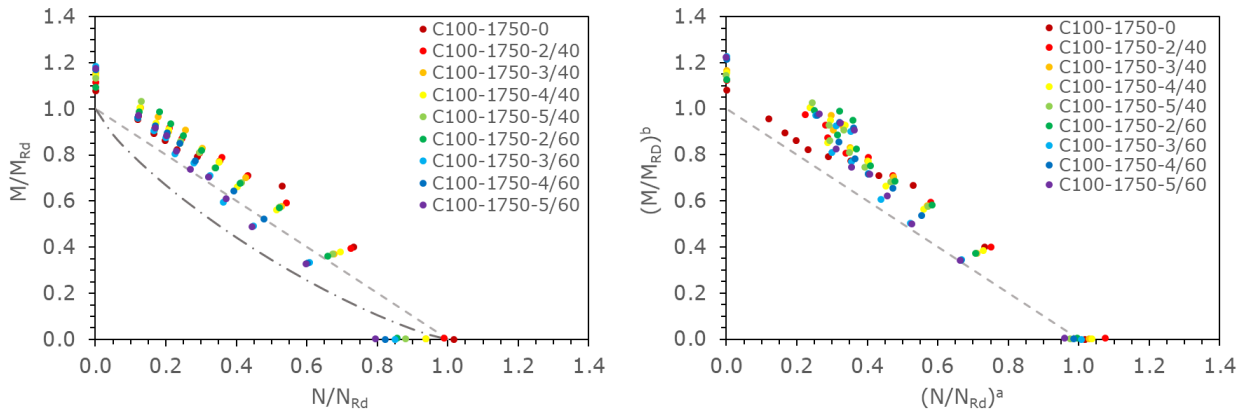
Слика 6.3. Поређење интеракционих дијаграма према [4] (лево) и према предложеним препорукама (десно) за елементе C150-750



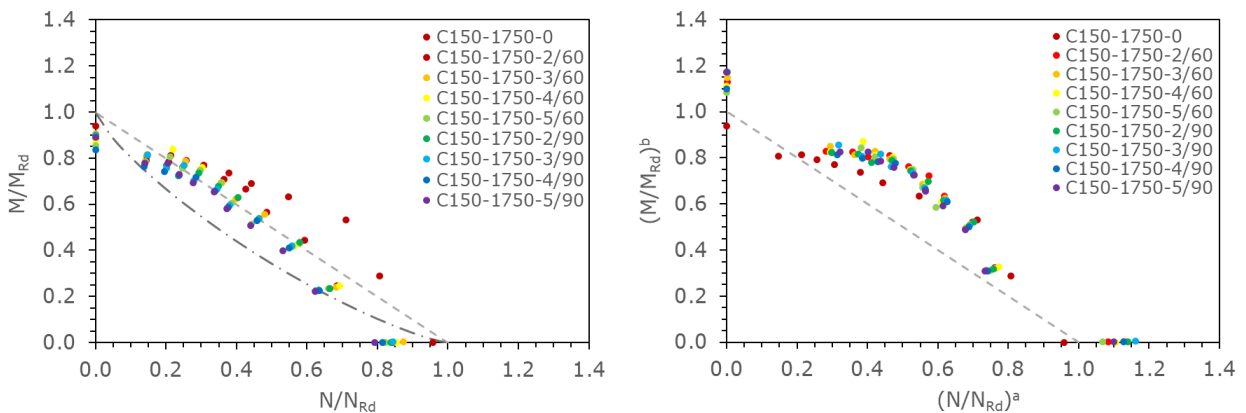
Слика 6.4. Поређење интеракционих дијаграма према [4] (лево) и према предложеним препорукама (десно) за елементе C100-1250



Слика 6.5. Поређење интеракционих дијаграма према [4] (лево) и према предложеним препорукама (десно) за елементе C150-1250



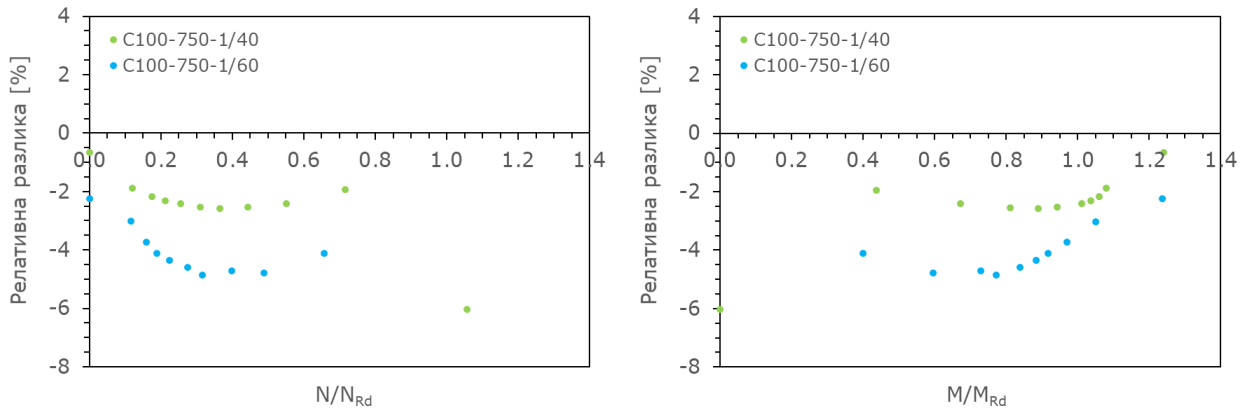
Слика 6.6. Поређење интеракционих дијаграма према [4] (лево) и према предложеним препорукама (десно) за елементе *C100-1750*



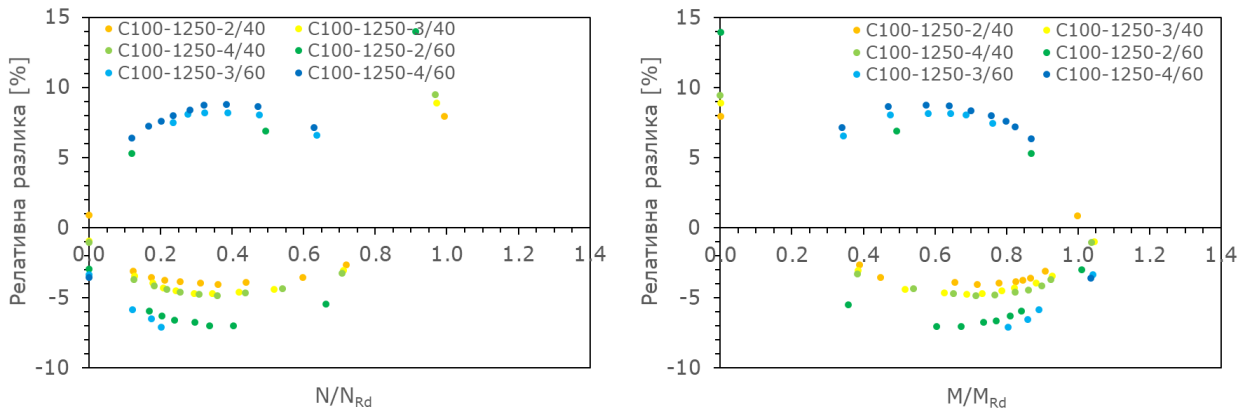
Слика 6.7. Поређење интеракционих дијаграма према [4] (лево) и према предложеним препорукама (десно) за елементе *C150-1750*

На приказаним интеракционим дијаграмима може се уочити је да у случају елемената дужине 750 mm новим прорачунским препорукама добијен нешто већи коефицијент сигурности за елементе са већим отвором у ребру. Када су у питању елементи *C100* дужина 1250 mm и 1750 mm, примећује се да се скуп резултата који се налази испод назначеног критеријума, а односи се, како на елементе са већим отворима, тако и на елементе са већим бројем отвора у ребру, након примене предложених једначина налази у зони резултата на страни сигурности. Запажа се, такође, да зона у оквиру које се налазе интеракциони дијаграми ових елемената приближно одговара облику праве траке, при чему је та трака изразито ужа код елемената дужине 1250 mm. Слично запажање се може изнети и за елементе *C150* дужина 1250 mm и 1750 mm, међутим, са разликом да „трака резултата“ више не одговара правом облику, већ закривљеном. Ова појава је израженија код дужих елемената.

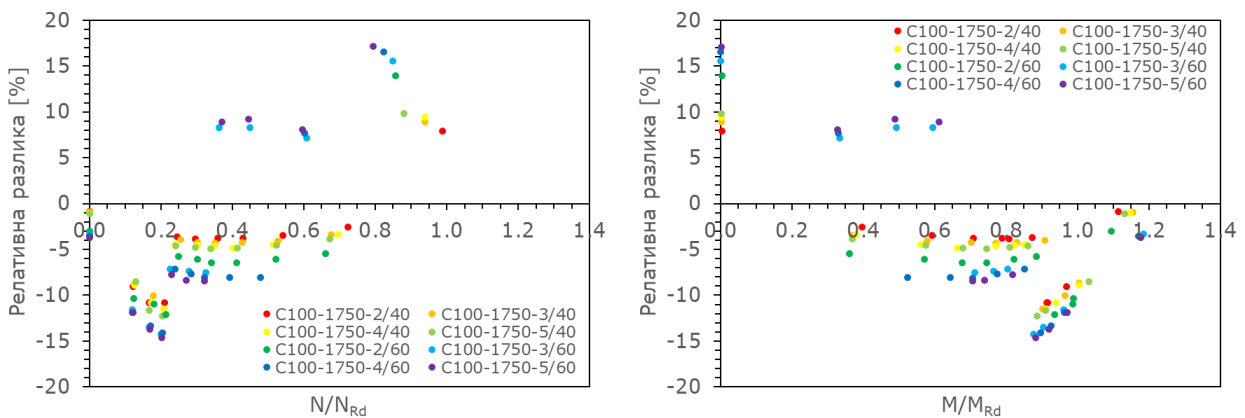
На сликама 6.8 до 6.13 приказана је релативна разлика између резултата контроле интеракције према [4] и према предложеним препорукама.



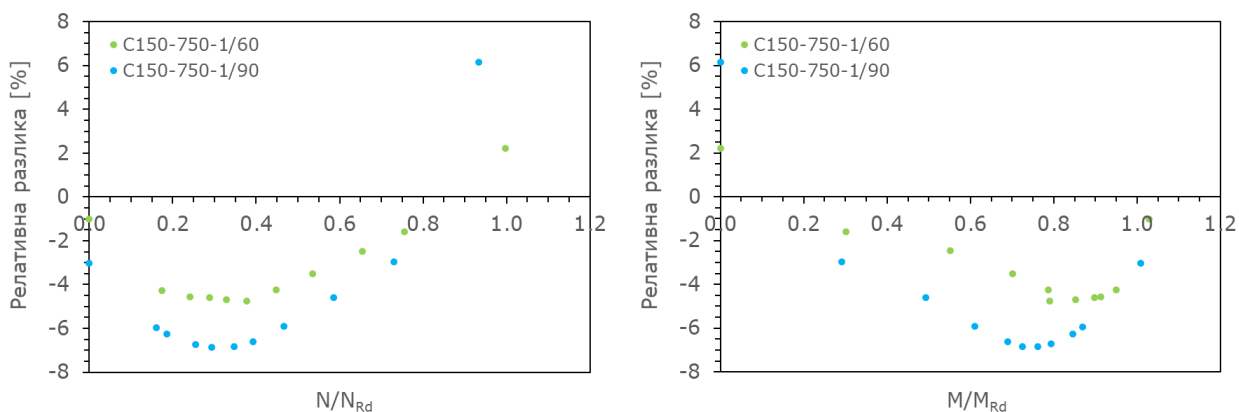
Слика 6.8. Релативна разлика између интеракције дефинисане према [4] и према предложеним препорукама у односу на нормализовану нормалну силу за (лево) и нормализовани момент савијања (десно) за елементе C100-750



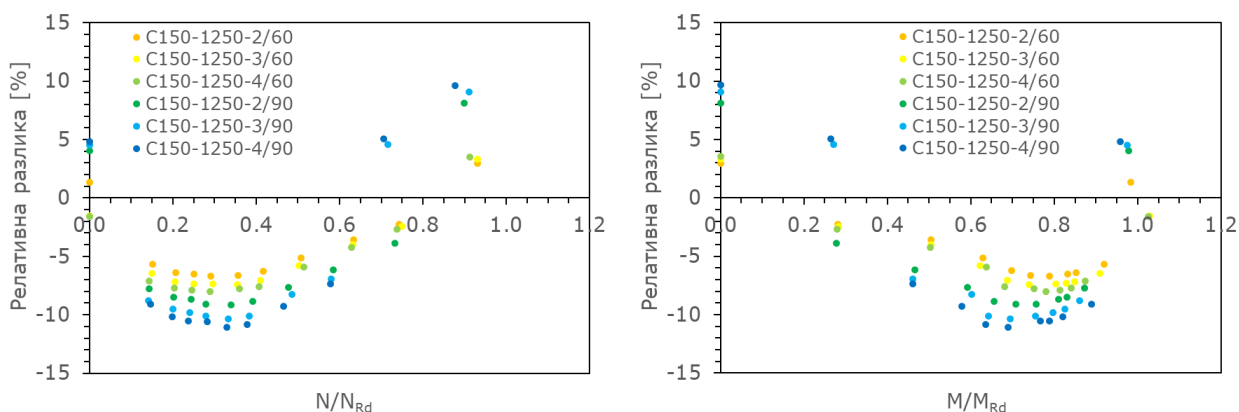
Слика 6.9. Релативна разлика између интеракције дефинисане према [4] и према предложеним препорукама у односу на нормализовану нормалну силу за (лево) и нормализовани момент савијања (десно) за елементе C100-1250



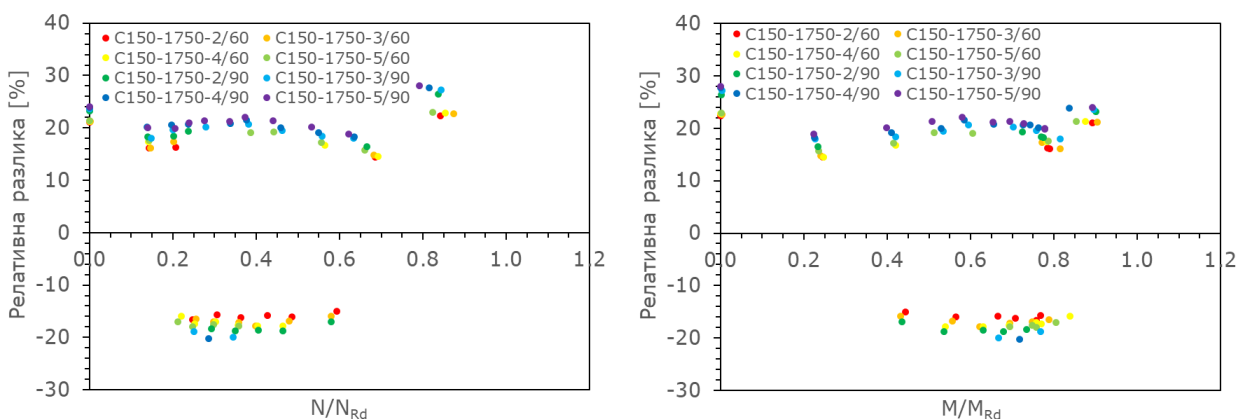
Слика 6.10. Релативна разлика између интеракције дефинисане према [4] и према предложеним препорукама у односу на нормализовану нормалну силу за (лево) и нормализовани момент савијања (десно) за елементе C100-1750



Слика 6.11. Релативна разлика између интеракције дефинисане према [4] и према предложеним препорукама у односу на нормализовану нормалну силу за (лево) и нормализовани момент савијања (десно) за елементе *C150-750*



Слика 6.12. Релативна разлика између интеракције дефинисане према [4] и према предложеним препорукама у односу на нормализовану нормалну силу за (лево) и нормализовани момент савијања (десно) за елементе *C150-1250*



Слика 6.13. Релативна разлика између интеракције дефинисане према [4] и према предложеним препорукама у односу на нормализовану нормалну силу за (лево) и нормализовани момент савијања (десно) за елементе *C150-1750*

На приказаним дијаграмима, позитивне вредности се односе на случајеве код којих је постигнуто побољшање контроле интеракције у односу на [4]. Са друге стране,

негативне вредности се односе на случајеве код којих је услов дефинисан према [4] већ био испуњен, а предложене препоруке дају нешто конзервативније резултате. Може се запазити да критеријум дефинисан према [4] може бити коришћен код кратких елемената (за $\bar{\lambda} \leq 0.25$) са једном рупом на средини распона, при чему рупа не сме захватати више од 60% ширине ребра. Такође, приметно је да предложене једначине највећи ефекат имају код елемената релативних виткости $\bar{\lambda} > 0.25$, а посебно у случајевима елемената са 4 и 5 отвора у ребру. Код елемената дужине 1250 mm постигнута су побољшања критеријума до око 10 %, а у појединим случајевима елемената дужине 1750 mm чак до око 25 %. Треба нагласити да ове препоруке важе само под условима под којим су спроведени експериментално испитивање и параметарска анализа, а то су:

- Попречни пресек је С облика, са ивичним укрућењима фланши;
- Ребра и фланше немају додатна, подужна укрућења;
- Отвор не захвата више од 60 % ширине ребра;
- Ивице отвора су такође без укрућења.

7. ЗАПАЖАЊА, ЗАКЉУЧЦИ И ПРАВЦИ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА

Примарни задатак ове докторске дисертације био је стицање увида у понашање хладно-обликованих елемената са отворима у ребру услед ексцентричног притиска. Како се ово истраживање састоји од неколико фаза, запажања и закључци изнети у овом поглављу приказани су у две одвојене целине. У првој целини изнета су општа запажања, уочена током експерименталног и нумеричког дела истраживања. С обзиром на то да је детаљнији увид у понашање елемената могуће стећи тек након сагледавања већег броја резултата параметарског испитивања, закључци о проучаваним феноменима изведени су тек након спровођења параметарске анализе, и приказани су у другој целини овог поглавља, као и правци даљих истраживања.

7.1. ОПШТА ЗАПАЖАЊА

Ради што детаљнијег сагледавања свих релевантних утицаја, након анализе актуелног стања у области дефинисано је и спроведено експериментално испитивање ових елемената, које је обухватило три фазе: испитивање механичких својстава конститутивног материјала, мерење почетних геометријских имперфекција елемената и испитивање хладно-обликованих елемената на дејство ексцентричног притиска. Следећи закључци су изведени из ових фаза испитивања:

- Испитивањем механичких својстава материјала обухваћено је испитивање епрувета у равним зонама и у зонама углова попречног пресека. Потврђена су побољшана својства материјала у зонама хладног обликовања у погледу чврстоћа, али и смањени капацитет деформације у односу на зоне које нису претрпеле пластичне деформације током производње. Уочено је да је за равне делове пресека карактеристичан знатно већи капацитет дуктилности у односу на делове у превојним зонама пресека, чак 2.33 пута већи. Максимална дилатација у равним епруветама је износила 35 %, док је у угаоним достигла максималну вредност од 15 %. Међутим, у погледу чврстоће на затезање, забележене су максималне вредности од 441 МПа код угаоних и 412 МПа код равних епрувета.
- Мерење дилатација у оквиру овог истраживања урађено је КДС методом. Поузданост КДС методе је потврђена на пробном узорку, на коме су дилатације, осим поменутом методом, мерене и екстензометром. Закључено је да, упркос постојању варијација у резултатима у зонама течења, које се могу сматрати занемарљивим, КДС метода представља поуздан начин за

регистровање дилатација приликом испитивања механичких својстава материјала.

- Мерењем почетних геометријских имперфекција уочено је да је највећа забележена вредност имперфекције у виду девијације осе елемента била 1.2 mm, што у односу на дужину узорка представља вредност $\approx L/1040$. У односу на критеријум величине имперфекције од $L/750$ дефинисан стандардом *SRPS EN 1090-2:2018*, измерене вредности су упоредиве, и не могу се сматрати занемарљивим.
- Осим имперфекција у виду девијације осе елемента, уочена је и ротација зидова ребра, што указује на постојање имперфекција у виду торзије попречног пресека. Максимални забележени угао отклона износи 2.12° .
- Такође, регистроване релативне ротације зидова фланши у односу на зид ребра указују на постојање имперфекције дисторзионог облика формираних од 2 до 3 полуталаса код свих узорака.
- Експерименталним испитивањем хладно-обликованих елемената потврђена је већ позната чињеница да се извијање код центрично оптерећених узорака дешава тренутно, без претходне најаве. При томе, забележен је и нагли пад носивости. Међутим, губитак стабилности код ексцентрично притиснутих елемената се одвијао мањом брзином у поређењу са центрично притиснутим, при чему је са повећањем ексцентрицитета тај губитак био све спорији, а пад носивости све блажи. Истовремено, са повећањем ексцентрицитета силе притиска, повећавала се и дуктилност узорака.
- За узорке без отвора у ребру, очекивано, карактеристична је већа носивост у односу на узорке са отворима. Примећено је да величина отвора има утицај на пад носивости, будући да је код елемената са релативно већим отвором у односу на ширину ребра забележен и већи пад носивости, како код центрично оптерећених, тако и код ексцентрично оптерећених елемената. Како је код оба типа узорака (*C100* и *C150*) димензија отвора у апсолутним мерама била иста, посматрано релативно у односу на површину ребра, већи део ефективне површине био је захваћен отвором код узорака *C100*, што је утицало на већи пад носивости.
- Губитак стабилности центрично притиснутих *C100* узорака је у свим случајевима био праћен локалним извијањем, изузев код једног узорка са три отвора у ребру, код којег је преовладао глобални облик извијања у комбинацији са локалним. Ексцентрично притиснути *C100* узорци без и са два отвора су испољавали извијање у комбинацији локалног и дисторзионог облика, док је извијање узорака са три отвора у ребру, са једним изузетком, било праћено комбинацијом глобалне и локалне форме извијања. С обзиром на то да се код узорака са три отвора један од њих налази на средини дужине

елемента, тј. на месту где су ефекти другог реда најизраженији, већа флексибилност попречних пресека у тој зони је разлог развитка већих померања, као и веће осетљивости на глобално извијање.

- Извијање *C150* узорака се у највећем броју случајева одвијало у локалном облику. Изузеци су ексцентрично оптерећени узорци без отвора и два ексцентрично оптерећена узорка са два отвора, код којих је локално извијање наступило у комбинацији са дисторзионом. Већа савојна крутост *C150* елемената у односу на *C100*, као и чињеница да се примењени ексцентрицитети налазе ближе језгру пресека, утицали су на изостанак глобалног облика извијања ових узорака.
- Највеће варијације носивости у оквиру исте серије узорака примећене су код центрично оптерећених елемената. Носивост ексцентрично притиснутих узорака била је у том смислу уједначенија.

Након експерименталног дела истраживања уследила је фаза израде нумеричких модела и спровођења нумеричких симулација у софтверу *Abaqus*. Експериментални резултати валидирани су нумеричким прорачунима, а уочена су следећа запажања:

- Понашање танкозидних хладно-обликованих елемената може се довољно тачно описати коришћењем *shell* КЕ, будући да је овим моделима постигнуто задовољавајуће поклапање експерименталних и нумеричких резултата у погледу остварених величина сила и померања.
- Уочено је, такође, да почетне геометријске имперфекције утичу у већој мери једино у случајевима центрично притиснутих узорака, док је у случајевима ексцентрично оптерећених елемената њихов утицај готово занемарљив.

7.2. ЗАКЉУЧЦИ И ПРАВЦИ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА

У циљу сагледавања утицаја различитих фактора на понашање и носивост хладно-обликованих елемената са отворима у ребру и извођења генералних закључака, спроведена је параметарска анализа. У оквиру овог дела истраживања, параметризовани су дужина елемента, облик попречног пресека, број и величина отвора у ребру, као и интензитет дејства силе притиска и момента савијања (ексцентрицитет силе притиска). Основна запажања у оквиру ове анализе су:

- Параметарском анализом потврђена је чињеница да са увођењем отвора у ребру, као и са повећањем његове површине, носивост елемента опада, будући да долази до смањења ефективне површине попречног пресека. Штавише, носивост не само да опада увођењем отвора, већ и повећањем броја истих.
- Најмања разлика у носивости између елемената са различим бројем отвора у ребру уочена је у случајевима савијаних елемената без силе притиска.

Највећа разлика у том смислу код елемената *C100* пресека присутна је у случају центрично оптерећених елемената, док је код *C150* елемената она премештена у зону средњих ексцентрицитета.

- Интеракциони дијаграм *C100* елемената заузима линеарни облик, без обзира на посматране дужине. Посматрано у односу на носивости на притисак и савијање елемента са отвором, збир нормализованих сила притиска и момента савијања кретао се углавном између вредности 1.0 и 1.3 (са максималном вредношћу од 1.365) код елемената дужине 750 mm, и између 1.0 и 1.2 (са максималном вредношћу од 1.224) код елемената дужина 1250 mm и 1750 mm. За разлику од њих, *C150* елементи су са повећањем дужине елемента испољавали све већу нелинеарност везе између максималне постигнуте нормалне силе и момента савијања, при чему су уочене веће вредности збира нормализованих сила притиска и момента савијања. Код ових елемената, највећа забележена вредност износила је чак 1.431. Веће вредности овог збира су код свих елемената примећене у зонама високог интензитета силе притиска, а мањег момента савијања. Вредности овог збира мање од 1.0 појављивале су се најчешће код елемената *C150*, пре свега у случајевима елемената дужине 1750 mm, док их код елемената *C100* готово није ни било.
- Нормализовани у односу на носивости на притисак и савијање елемента без отвора, интеракциони дијаграми елемената *C100* такође имају тенденцију ка линеарном облику, а *C150* тенденцију ка нелинеарном. У највећем броју случајева збир нормализованих сила притиска и момента савијања био је између вредности 0.8 и 1.2. Код елемената дужине 1750 mm и дужине 1250 mm са 3 и 4 отвора у ребру су вредности ниже од 1.0 најприсутније.

У последњој фази овог истраживања представљене су препоруке за дефинисање критеријума интеракције силе притиска и момента савијања за хладно-обликоване елементе са отворима у ребру, и закључено је следеће:

- На облик функције зависности аксијалне силе притиска и момента савијања утиче глобална виткост елемента $\bar{\lambda}$.
- Побољшање критеријума у односу на критеријум дефинисан према *SRPS EN 1993-1-3* постигнуто је код елемената релативних виткости $\bar{\lambda} > 0.25$, а посебно у случајевима елемената са 4 и 5 отвора у ребру. Ово побољшање износи око 10 % у случајевима елемената дужине 1250 mm, док је оно вредности чак до око 25 % код елемената дужине 1750 mm.
- Унапређење израза за контролу интеракције остварено је увођењем експонената сабирака у оквиру критеријума интеракције, који зависе од карактеристика ефективног попречног пресека елемената (A_{eff} , $A_{eff,o}$, W_{eff} , $W_{eff,o}$) и броја отвора у ребру (n).

Иако већ неколико деценија присутни у сфери грађевинарства, хладно-обликовани елементи често подлежу променама у смислу обликовања, пре свега ради проналажења најефикаснијег решења које ће задовољити архитектонске, конструктерске и функционалне потребе. Подстакнути развојем друштва и експанзијом тржишта, произвођачи су често принуђени да уводе промене некада и брже у односу на актуелну науку. Током израде ове дисертације уочене су области у оквиру поља хладно-обликованих елемената са отворима у ребру, које због обима истраживања нису могле да буду укључене у ово истраживање, а које су до данас остале недовољно истражене, те се овде напомињу у виду смерница за будућа истраживања:

- Испитивање понашања већег броја ексцентрично-притиснутих елемената, различитих дужина, као и димензија и облика попречних пресека;
- Испитивање понашања ексцентрично-притиснутих елемената са ивичним укрућењима отвора;
- Испитивање интеракције аксијалне силе притиска и двоосног савијања хладно-обликованих елемената.

8. ЛИТЕРАТУРА

1. Moen, C.D.; Schafer, B.W. Experiments on Cold-Formed Steel Columns with Holes. *Thin-Walled Struct.* **2008**, *46*, 1164–1182, doi:10.1016/j.tws.2008.01.021.
2. Moen, C.D.; Schafer, B.W. Direct Strength Method for Design of Cold-Formed Steel Columns with Holes. *J. Struct. Eng.* **2011**, *137*, 559–570, doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000310.
3. Gardner, L.; Yun, X. Description of Stress-Strain Curves for Cold-Formed Steels. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *189*, 527–538, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.08.195.
4. *SRPS EN 1993-1-3:2013: Evrokod 3 - Projektovanje Čeličnih Konstrukcija - Deo 1-3: Opšta Pravila - Dodatna Pravila Za Hladno Oblikovane Tankozidne Elemente i Limove*; 2013;
5. American Iron and Steel Institute *AISI S100-2016: North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*; American Iron and Steel Institute: Washington, DC, USA, 2016;
6. Buđevac, D.; Marković, Z.; Bogavac, D.; Tošić, D. *Metalne Konstrukcije: Osnove Proračuna i Konstruisanja*; Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1999; ISBN 86-80049-91-3.
7. Euler, L. *Methodus Inveniendi Lineas Curvas Maximi Minimive Proprietate Gaudentes, Sive, Solutio Problematis Isoperimetrici Latissimo Sensu Accepti*; 1744;
8. Bauschinger, J. Über Die Veränderung Der Elastizitätsgrenze Und Des Elastizitätsmoduls Verschiedener Metalle. *Civilingenieur* **1881**, 289–348.
9. Engesser, F. Über Knickfragen Schweizerische Bauzeitung. *Schweizerische Bauzeitung* **1895**, 24–26.
10. Tetmajer, L. *Von Die Gesetze Der Knickungs Und Der Zusammengesetzten Druckfestigkeit Der Technisch Wichtigsten Baustoffe*; 1903;
11. Karman, T. von Untersuchungen Über Die Knickfestigkeit. *Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesen, Springer* **1910**.
12. Shanley, F.R. Inelastic Column Theory. *J. Aeronaut. Sci.* **1947**, *14*, 261–268.
13. Ádány, S.; Silvestre, N.; Schafer, B.W.; Camotim, D. GBT and CFSM: Two Modal Approaches to the Buckling Analysis of Unbranched Thin-Walled Members. *Adv. Steel Constr.* **2009**, *5*, 195–223.
14. Li, Z.; Schafer, B.W. Constrained Finite Strip Method for Thin-Walled Members with General End Boundary Conditions. *J. Eng. Mech.* **2013**, *139*, 1566–1576, doi:10.1061/(asce)em.1943-7889.0000591.
15. Li, Z.; Schafer, B.W. Buckling Analysis of Cold-Formed Steel Members with General Boundary Conditions Using CFSM: Conventional and Constrained Finite Strip Methods. In Proceedings of the 20th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures; St. Louis, Missouri, USA, 2010.
16. Moen, C.D.; Schafer, B.W. Extending Direct Strength Design to Cold-Formed Steel Beams with Holes. In Proceedings of the 20th International Specialty Conference

- on Cold-Formed Steel Structures; St. Louis, Missouri, USA, 2010.
17. Silvestre, N.; Camotim, D. First-Order Generalised Beam Theory for Arbitrary Orthotropic Materials. *Thin-Walled Struct.* **2002**, *40*, 755–789, doi:10.1016/S0263-8231(02)00025-3.
 18. Silvestre, N.; Camotim, D. Second-Order Generalised Beam Theory for Arbitrary Orthotropic Materials. *Thin-Walled Struct.* **2002**, *40*, 791–820, doi:10.1016/S0263-8231(02)00026-5.
 19. Abambres, M.; Camotim, D.; Silvestre, N. Modal Decomposition of Thin-Walled Member Collapse Mechanisms. *Thin-Walled Struct.* **2014**, *74*, 269–291, doi:10.1016/j.tws.2013.10.002.
 20. Bebiano, R.; Basaglia, C.; Camotim, D.; Gonçalves, R. GBT Buckling Analysis of Generally Loaded Thin-Walled Members with Arbitrary Flat-Walled Cross-Sections. *Thin-Walled Struct.* **2018**, *123*, 11–24, doi:10.1016/j.tws.2017.10.045.
 21. Bebiano, R.; Camotim, D.; Gonçalves, R. GBTUL 2.0 – A Second-Generation Code for the GBT-Based Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members. *Thin-Walled Struct.* **2018**, *124*, 235–257, doi:10.1016/j.tws.2017.12.002.
 22. Wang, C.; Guo, Q.; Zhang, Z.; Guo, Y. Experimental and Numerical Investigation of Perforated Cold-Formed Steel Built-up I-Section Columns with Web Stiffeners and Complex Edge Stiffeners. *Adv. Struct. Eng.* **2019**, *22*, 2205–2221, doi:10.1177/1369433219836174.
 23. He, Z.; Yang, G.; Schafer, B.; Zhou, X. Effect of Holes and Stiffeners on the Behavior of Eccentric Loaded Cold-Formed Steel Built-up Channel Columns - Numerical Investigation. **2020**, *2020*, 1–8.
 24. Madugula, M.K.S.; Ray, S.K. Ultimate Strength of Eccentrically Loaded Cold-Formed Angles. *Can. J. Civ. Eng.* **1984**, *11*, 225–233, doi:10.1139/l84-034.
 25. Wang, C.; Zhang, Z.; Zhao, D.; Liu, Q. Compression Tests and Numerical Analysis of Web-Stiffened Channels with Complex Edge Stiffeners. *J. Constr. Steel Res.* **2016**, *116*, 29–39, doi:10.1016/j.jcsr.2015.08.013.
 26. Ma, J.-L.; Chan, T.-M.; Young, B. Investigation on Cold-Formed High Strength Steel Circular Hollow Sections under Combined Compression and Bending. In Proceedings of the Eurosteel 2017; 2017; Vol. 1, pp. 3622–3630.
 27. Merkl, C.; Toffolon, A.; Taras, A. Experimental and Numerical Study of the Behaviour of Eccentrically Loaded Cold-Formed Channel Sections - Determination of an Optimal Load Eccentricity. In Proceedings of the Eurosteel 2017; 2017; Vol. 1, pp. 1553–1562.
 28. Sadovský, Z.; Kriváček, J. Influence of Boundary Conditions and Load Eccentricity on Strength of Cold-Formed Lipped Channel Columns. *Thin-Walled Struct.* **2018**, *131*, 556–565, doi:10.1016/j.tws.2018.07.031.
 29. Ghandi, E.; Niari, S.E. Flexural-Torsional Buckling of Cold-Formed Steel Columns with Arbitrary Cross-Section under Eccentric Axial Load. *Structures* **2020**, *28*, 2122–2134, doi:10.1016/j.istruc.2020.09.081.
 30. Meza, F.J.; Becque, J.; Hajirasouliha, I. Experimental Study of Cold-Formed Steel Built-up Columns. *Thin-Walled Struct.* **2020**, *149*, 106291, doi:10.1016/j.tws.2019.106291.
 31. Chen, M.T.; Young, B. Beam-Column Tests of Cold-Formed Steel Elliptical Hollow

- Sections. *Eng. Struct.* **2020**, 210, 109911, doi:10.1016/j.engstruct.2019.109911.
32. Peiris, M.; Mahendran, M. Behaviour of Cold-Formed Steel Lipped Channel Sections Subject to Eccentric Axial Compression. *J. Constr. Steel Res.* **2021**, 184, 106808, doi:10.1016/j.jcsr.2021.106808.
33. Zhang, J.-F.; Wang, B.; Wang, S.; Deng, E.-F.; Zhang, P.; Pang, S.-Y.; Wen, M.-G.; Ye, L.; Guo, X.-S.; Gao, J. Eccentric Compressive Distortional Buckling and Design of Non-Symmetric Cold-Formed Angular Column with Complex Edges. *Thin-Walled Struct.* **2021**, 165, 107981, doi:10.1016/j.tws.2021.107981.
34. Li, Q.-Y.; Young, B. Tests of Cold-Formed Steel Built-up Open Section Members under Eccentric Compressive Load. *J. Constr. Steel Res.* **2021**, 184, 106775, doi:10.1016/j.jcsr.2021.106775.
35. Bonada, J.; Pastor, M.M.; Roure, F.; Casafont, M. Distortional Influence of Pallet Rack Uprights Subject to Combined Compression and Bending. *Structures* **2016**, 8, 275–285, doi:10.1016/j.istruc.2016.05.007.
36. Bertocci, L.; Comparini, D.; Lavacchini, G.; Orlando, M.; Salvatori, L.; Spinelli, P. Experimental, Numerical, and Regulatory P-Mx-My Domains for Cold-Formed Perforated Steel Uprights of Pallet-Racks. *Thin-Walled Struct.* **2017**, 119, 151–165, doi:10.1016/j.tws.2017.06.001.
37. Pastor, M.M.; Bonada, J.; Roure, F.; Casafont, M.; Somalo, M.R. Rack Uprights under Combined Compression and Bi-Axial Bending: Experimental Testing, Numerical Analysis and European Standard Approach. In Proceedings of the Eurosteel 2017; 2017; Vol. 1, pp. 1609–1616.
38. Yu, W.; Davis, C.S. Buckling Behavior and Post-Buckling Strength of Perforated Stiffened Compression Elements. In Proceedings of the International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures; 1971.
39. Davis, C.S.; Yu, W.W. *The Structural Behavior of Cold-Formed Steel Members with Perforated Elements*; Rolla, Missouri, USA, 1972;
40. Loov, R. Local Buckling Capacity of C-Shaped Cold-Formed Steel Sections with Punched Webs. *Can. J. Civ. Eng.* **1984**, 11, 1–7, doi:10.1139/l84-001.
41. Sivakumaran, K.S. Load Capacity of Uniformly Compressed Cold-Formed Steel Section with Punched Web. *Can. J. Civ. Eng.* **1987**, 14, 550–558, doi:10.1139/l87-080.
42. Sivakumaran, K.S. Some Studies on Cold-Formed Steel Sections with Web Openings. In Proceedings of the Ninth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures; St. Louis, Missouri, USA, 1988.
43. Association, C.S. *S136-1974. Cold Formed Steel Structural Members*; Canadian Standards Association: Rexdale, Ontario, Canada, 1974;
44. American Iron and Steel Institute *Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members Design*; American Iron and Steel Institute: Washington, DC, USA, 1986;
45. Pu, Y.; Godley, M.H.; Beale, R.G.; Lau, H.H. Prediction of Ultimate Capacity of Perforated Lipped Channels. *J. Struct. Eng.* **1999**, 125, 510–514.
46. Abdel-Rahman, N.; Sivakumaran, K.S. Effective Design Width for Perforated Cold-Formed Steel Compression Members. *Can. J. Civ. Eng.* **1998**, 25, 319–330,

- doi:10.1139/I97-095.
47. Abdel-Rahman, N. Cold-Formed Steel Compression Members with Perforations, McMaster University, 1997.
 48. Shanmugam, N.E.; Dhanalakshmi, M. Design for Openings in Cold-Formed Steel Channel Stub Columns. *Thin-Walled Struct.* **2001**, *39*, 961–981, doi:10.1016/S0263-8231(01)00045-3.
 49. Moen, C.D. Direct Strength Design of Cold-Formed Steel Members with Perforations, Johns Hopkins University, 2008.
 50. Moen, C.D.; Schafer, B.W. Elastic Buckling of Cold-Formed Steel Columns and Beams with Holes. *Eng. Struct.* **2009**, *31*, 2812–2824, doi:10.1016/j.engstruct.2009.07.007.
 51. Yao, Z.; Rasmussen, K.J.R. Inelastic Local Buckling Behaviour of Perforated Plates and Sections under Compression. *Thin-Walled Struct.* **2012**, *61*, 49–70, doi:10.1016/j.tws.2012.07.002.
 52. Yao, Z.; Rasmussen, K.J.R. Material and Geometric Nonlinear Isoparametric Spline Finite Strip Analysis of Perforated Thin-Walled Steel Structures - Analytical Developments. *Thin-Walled Struct.* **2011**, *49*, 1374–1391, doi:10.1016/j.tws.2011.06.005.
 53. Yao, Z.; Rasmussen, K.J.R. Material and Geometric Nonlinear Isoparametric Spline Finite Strip Analysis of Perforated Thin-Walled Steel Structures - Numerical Investigations. *Thin-Walled Struct.* **2011**, *49*, 1359–1373, doi:10.1016/j.tws.2011.06.004.
 54. Yao, Z.; Rasmussen, K.J.R. *Design of Perforated Thin-Walled Steel Columns*; Sydney, Australia, 2014;
 55. Yao, Z.; Rasmussen, K.J.R. Perforated Cold-Formed Steel Members in Compression. I: Parametric Studies. *J. Struct. Eng.* **2016**, *143*, doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001635.
 56. Yao, Z.; Rasmussen, K.J.R. Perforated Cold-Formed Steel Members in Compression. II: Design. *J. Struct. Eng.* **2016**, *143*, doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001636.
 57. *AS/NZS 4600:2018. Cold-Formed Steel Structures*; Standards Australia/Standards New Zealand: Sydney, Australia, 2018;
 58. Kulatunga, M.P.; Macdonald, M. Investigation of Cold-Formed Steel Structural Members with Perforations of Different Arrangements Subjected to Compression Loading. *Thin-Walled Struct.* **2013**, *67*, 78–87, doi:10.1016/j.tws.2013.02.014.
 59. Kulatunga, M.P.; Macdonald, M.; Rhodes, J.; Harrison, D.K. Load Capacity of Cold-Formed Column Members of Lipped Channel Cross-Section with Perforations Subjected to Compression Loading - Part I: FE Simulation and Test Results. *Thin-Walled Struct.* **2014**, *80*, 1–12, doi:10.1016/j.tws.2014.02.017.
 60. American Iron and Steel Institute *AISI S100-2012: North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*; American Iron and Steel Institute: Washington, DC, USA, 2012;
 61. *BS 5950-5:1998. Structural Use of Steelwork in Building - Part 5. Code of Practice for Design of Cold Formed Thin Gauge Sections*; British Standards Institution: London, UK, 1998; ISBN 0580282481.

62. *EN 1993-1-3:2006: Eurocode 3 - Design of Steel Structures - Part 1-3: General Rules - Supplementary Rules for Cold-Formed Members and Sheeting*; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2006;
63. Chen, B.; Roy, K.; Uzzaman, A.; Raftery, G.M.; Nash, D.; Clifton, G.C.; Pouladi, P.; Lim, J.B.P. Effects of Edge-Stiffened Web Openings on the Behaviour of Cold-Formed Steel Channel Sections under Compression. *Thin-Walled Struct.* **2019**, *144*, 106307, doi:10.1016/j.tws.2019.106307.
64. Chen, B.; Roy, K.; Uzzaman, A.; Raftery, G.M.; Lim, J.B.P. Parametric Study and Simplified Design Equations for Cold-Formed Steel Channels with Edge-Stiffened Holes under Axial Compression. *J. Constr. Steel Res.* **2020**, *172*, 106161, doi:10.1016/j.jcsr.2020.106161.
65. Moen, C.D.; Schafer, B.W. *Direct Strength Design of Cold-Formed Steel Members with Perforations*; Washington, DC, USA, 2009;
66. Grey, C.N.; Moen, C.D. Elastic Buckling Simplified Methods for Cold-Formed Columns and Beams with Edge-Stiffened Holes. *Struct. Stab. Res. Counc. Annu. Stab. Conf. 2011, ASC* **2011**, 92–103.
67. Wang, C.; Zhang, Z.; Zhao, D.; Bai, Y. Experimental and Numerical Study on Perforated Channel Columns with Complex Edge Stiffeners and Web Stiffeners. *Adv. Struct. Eng.* **2015**, *18*, 1303–1318, doi:10.1260/1369-4332.18.8.1303.
68. Wang, C.; Bai, Y.; Liu, Q.; Zhao, D. Stability Behavior of Perforated Lipped Channel Columns. In Proceedings of the MATEC Web of Conferences; 2016; Vol. 67.
69. Xiang, Y.; Zhou, X.; Shi, Y.; Xu, L.; Xu, Y. Experimental Investigation and Finite Element Analysis of Cold-Formed Steel Channel Columns with Complex Edge Stiffeners. *Thin-Walled Struct.* **2020**, *152*, 106769, doi:10.1016/j.tws.2020.106769.
70. Dhanalakshmi, M.; Shanmugam, N.E. Design for Openings in Equal-Angle Cold-Formed Steel Stub Columns. *Thin-Walled Struct.* **2001**, *39*, 167–187, doi:10.1016/S0263-8231(01)00045-3.
71. Shan, M.-Y.; LaBoube, R. *Behavior of Web Elements with Openings Subjected to Bending, Shear and the Combination of Bending and Shear*; Rolla, Missouri, USA, 1994;
72. Shan, M.Y.; Batson, K.D.; LaBoube, R.A.; Yu, W.W. Local Buckling Flexural Strength of Webs with Openings. *Eng. Struct.* **1994**, *16*, 317–323, doi:10.1016/0141-0296(94)90023-X.
73. American Iron and Steel Institute *Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members Design*; American Iron and Steel Institute, 1986;
74. Shan, M.Y.; LaBoube, R.A.; Yu, W.W. Bending and Shear Behavior of Web Elements with Openings. *J. Struct. Eng.* **1996**, *122*, 854–859, doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:8(854).
75. Moen, C.D.; Schudlich, A.; Von Der Heyden, A. Experiments on Cold-Formed Steel C-Section Joists with Unstiffened Web Holes. *J. Struct. Eng. (United States)* **2013**, *139*, 695–704, doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000652.
76. American Iron and Steel Institute *AISI S100-2007: North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*; American Iron and Steel Institute: Washington, DC, 2007;

-
77. Wang, L.; Young, B. Beam Tests of Cold-Formed Steel Built-up Sections with Web Perforations. *J. Constr. Steel Res.* **2015**, *115*, 18–33, doi:10.1016/j.jcsr.2015.08.001.
 78. Wang, L.; Young, B. Design of Cold-Formed Steel Built-up Sections with Web Perforations Subjected to Bending. *Thin-Walled Struct.* **2017**, *120*, 458–469, doi:10.1016/j.tws.2017.06.016.
 79. Yuan, W. bin; Yu, N. ting; Li, L. yuan Distortional Buckling of Perforated Cold-Formed Steel Channel-Section Beams with Circular Holes in Web. *Int. J. Mech. Sci.* **2017**, *126*, 255–260, doi:10.1016/j.ijmecsci.2017.04.001.
 80. Yu, N. ting; Kim, B.; Yuan, W. bin; Li, L. yuan; Yu, F. An Analytical Solution of Distortional Buckling Resistance of Cold-Formed Steel Channel-Section Beams with Web Openings. *Thin-Walled Struct.* **2019**, *135*, 446–452, doi:10.1016/j.tws.2018.11.012.
 81. Hancock, G.J. Design for Distortional Buckling of Flexural Members. *Thin-Walled Struct.* **1997**, *27*, 3–12, doi:10.1016/0263-8231(96)00020-1.
 82. Zhao, J.; Sun, K.; Yu, C.; Wang, J. Tests and Direct Strength Design on Cold-Formed Steel Channel Beams with Web Holes. *Eng. Struct.* **2019**, *184*, 434–446, doi:10.1016/j.engstruct.2019.01.062.
 83. Ling, J.Y.; Kong, S.L.; De'nan, F. Numerical Study of Buckling Behaviour of Cold-Formed C-Channel Steel Purlin with Perforation. *Procedia Eng.* **2015**, *125*, 1135–1141, doi:10.1016/j.proeng.2015.11.140.
 84. Yu, C. Cold-Formed Steel Flexural Member with Edge Stiffened Holes: Behavior, Optimization, and Design. *J. Constr. Steel Res.* **2012**, *71*, 210–218, doi:10.1016/j.jcsr.2011.09.008.
 85. Sivakumaran, K.S.; Ng, M.Y.; Fox, S.R. Flexural Strength of Cold-Formed Steel Joists with Reinforced Web Openings. *Can. J. Civ. Eng.* **2006**, *33*, 1195–1208, doi:10.1139/L06-064.
 86. Pokharel, N.; Mahendran, M. *Experimental Study of the Member Capacity of LSB Floor Joists Containing Web Openings*; Brisbane, Australia, 2006;
 87. Seo, J.K.; Mahendran, M. Member Moment Capacities of Mono-Symmetric LiteSteel Beam Floor Joists with Web Openings. *J. Constr. Steel Res.* **2012**, *70*, 153–166, doi:10.1016/j.jcsr.2011.07.008.
 88. Seo, J.K.; Mahendran, M.; Kee Paik, J. Numerical Method for Predicting the Elastic Lateral Distortional Buckling Moment of a Mono-Symmetric Beam with Web Openings. *Thin-Walled Struct.* **2011**, *49*, 713–723, doi:10.1016/j.tws.2011.01.003.
 89. *Specification for the Design of Light Gage Steel Structural Members*; American Iron and Steel Institute: New York, USA, 1946;
 90. *GB50018-2002: Technical Code of Cold-Formed Thin-Wall Steel Structures*; General Administration of Quality Supervision Inspection and Quarantine: Beijing, China, 2002;
 91. *EN 15512: Steel Static Storage Systems- Adjustable Pallet Racking Systems - Principles for Structural Design.*; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2009;
 92. Dubina, D.; Ungureanu, V.; Landolfo, R. *Design of Cold-Formed Steel Structures*;
-

- European Convention for Constructional Steelwork: Brussels, Belgium, 2012; ISBN 978-92-9147-107-2.
93. Marković, Z. *Granična Stanja Čeličnih Konstrukcija Prema Evrokodu*; Akademska misao, Beograd: Beograd, Srbija, 2014;
 94. *SRPS EN 1993-1-5:2013: Evrokod 3 - Projektovanje Čeličnih Konstrukcija - Deo 1-5: Puni Limeni Elementi*; 2013;
 95. *SRPS EN 1993-1-1:2012: Evrokod 3 - Projektovanje Čeličnih Konstrukcija - Deo 1-1: Opšta Pravila i Pravila Za Zgrade*; 2012;
 96. Harničárová, M.; Zajac, J.; Stoić, A. Comparison of Different Material Cutting Technologies in Terms of Their Impact on the Cutting Quality of Structural Steel. *Teh. Vjesn.* **2010**, 17, 371–376.
 97. *EN 10002-1: Metallic Materials - Tensile Testing - Part 1: Method of Test at Ambient Temperature*; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2001;
 98. GOM Correlate Professional V8 SR1 Manual Basic – Inspection – 3D Testing 2015.
 99. Živaljević, V.; Jovanović, Đ.; Kovačević, D.; Lađinović, Đ. Numerical Investigation of CFS Beam-Columns with and without Perforations. In Proceedings of the ASES International Symposium Proceedings; Association of Structural Engineers of Serbia, 2021; pp. 394–403.
 100. *SRPS EN 1090-2:2018: Izvođenje Čeličnih i Aluminijskih Konstrukcija – Deo 2: Tehnički Zahtevi Za Čelične Konstrukcije*; 2018;
 101. www.3d-engineering.net.
 102. Morovič, L.; Vagovský, J.; Buranský, I. Shape Investigation of Worn Cutting Inserts with Utilization of Active Triangulation. *Key Eng. Mater.* **2014**, 581, 22–25, doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.581.22.
 103. Blagojević, M.; Rakić, D.; Topalović, M.; Živković, M. Optical Coordinate Measurements of Parts and Assemblies in Automotive Industry. *Teh. Vjesn.* **2016**, 23, 1541–1546, doi:10.17559/TV-20130918160442.
 104. Blagojević, M.; Živković, M.; Topalović, M. Registration and Surface Inspection of Automotive Pressed Parts Based on Point Cloud Generated By Optical Measuring Techniques. *Mobil. Veh. Mech.* **2017**, 43, 1–11, doi:10.24874/mvm.2017.43.04.01.
 105. Blagojević, M.; Živković, M.; Jovanović, S. Calibration Certification of Vehicle Wheel Alignment Line Using Photogrammetry. *Mobil. Veh. Mech.* **2017**, 43, 49–62, doi:10.24874/mvm.2017.43.03.04.
 106. Vagovský, J.; Buranský, I.; Görög, A. Evaluation of Measuring Capability of the Optical 3D Scanner. *Procedia Eng.* **2015**, 100, 1198–1206, doi:10.1016/j.proeng.2015.01.484.
 107. *GOM ATOS Compact Scan User Manual - Hardware*; Braunschweig, Germany, 2015;
 108. Blagojević, M.; Rakić, D.; Živković, M.; Bogdanović, Z. Kontrola Dimenzione Stabilnosti Optičkim Mernim Instrumentima.
 109. Abaqus/CAE User's Guide, Ver. 6.14 2014.
 110. Gunalan, S. Structural Behaviour and Design of Cold-Formed Steel Wall Systems

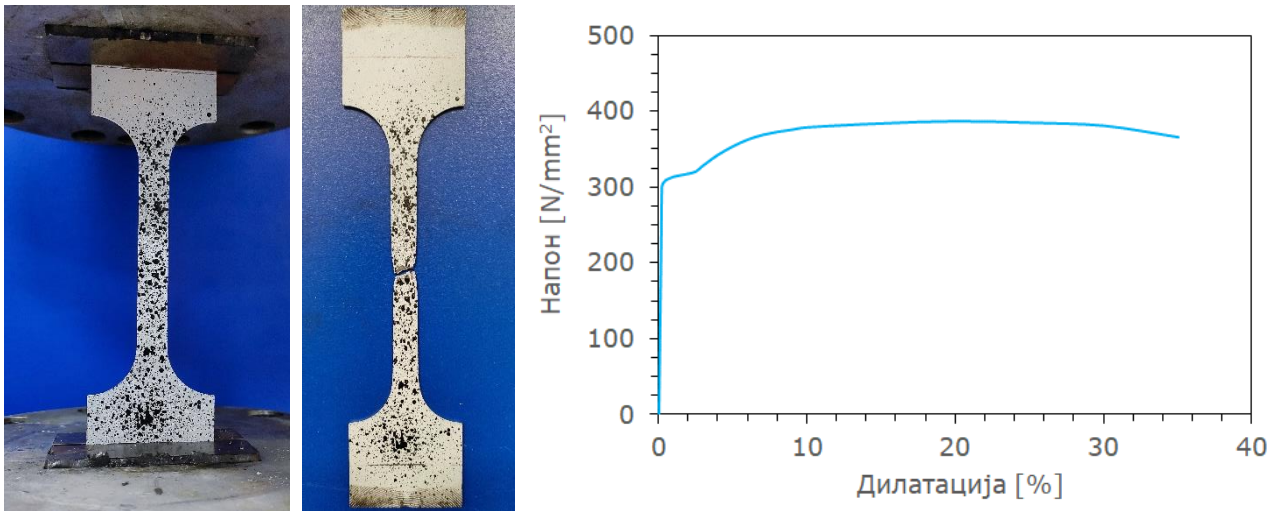
Under Fire Conditions, Queensland University of Technology, 2011.

111. Dong, S.; Xian, A.; Lian, Z.; Mohamed, H.S.; Ren, H. Necking Phenomenon Based on the Aramis System. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* **2018**, 3904–3916, doi:10.1177/0954406218802306.
112. Jovanović, Đ. Ponašanje Momentnih Veza Sa Čeonom Pločom i Četiri Zavrtnja u Redu, Univerzitet u Novom Sadu, 2020.
113. Schafer, B.W.; Peköz, T. Computational Modeling of Cold-Formed Steel: Characterizing Geometric Imperfections and Residual Stresses. *J. Constr. Steel Res.* **1998**, 47, 193–210, doi:10.1016/S0143-974X(98)00007-8.
114. Gardner, L.; Nethercot, D.A. Numerical Modeling of Stainless Steel Structural Components—A Consistent Approach. *J. Struct. Eng.* **2004**, 130, 1586–1601, doi:10.1061/(asce)0733-9445(2004)130:10(1586).

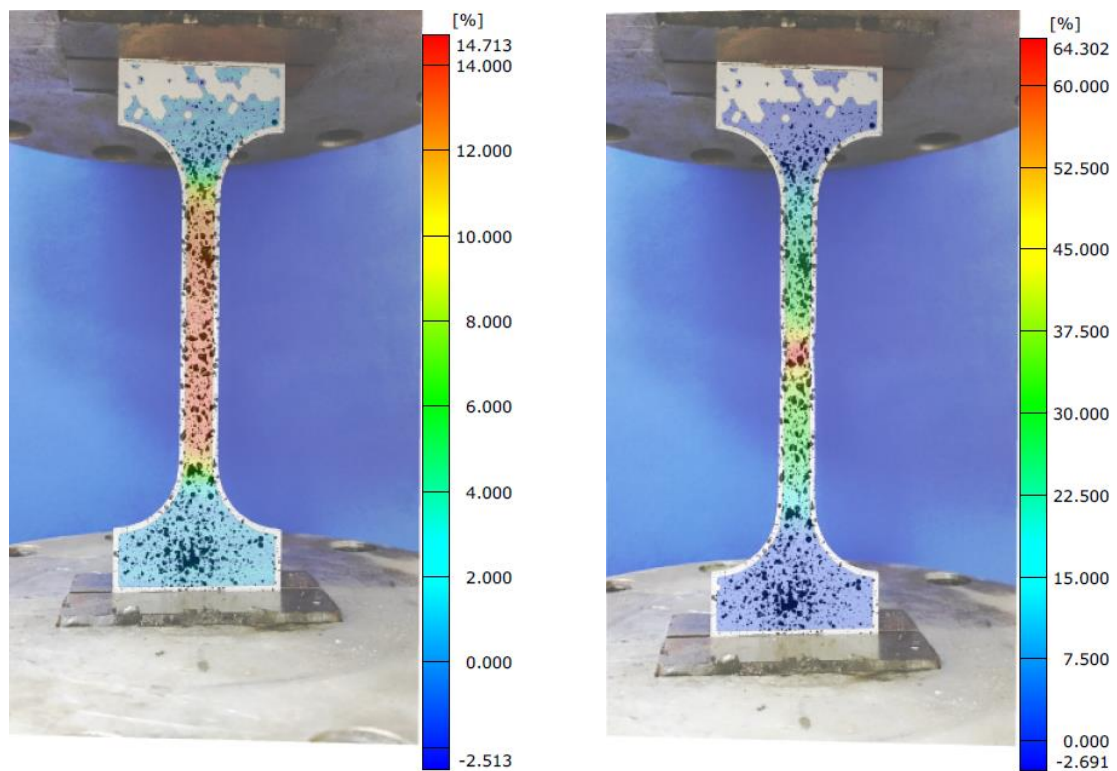
9. ПРИЛОЗИ

9.1. ПРИЛОГ А: РЕЗУЛТАТИ ПРВЕ ФАЗЕ ЕКСПЕРИМЕНТА: ИСПИТИВАЊЕ МЕХАНИЧКИХ СВОЈСТАВА МАТЕРИЈАЛА

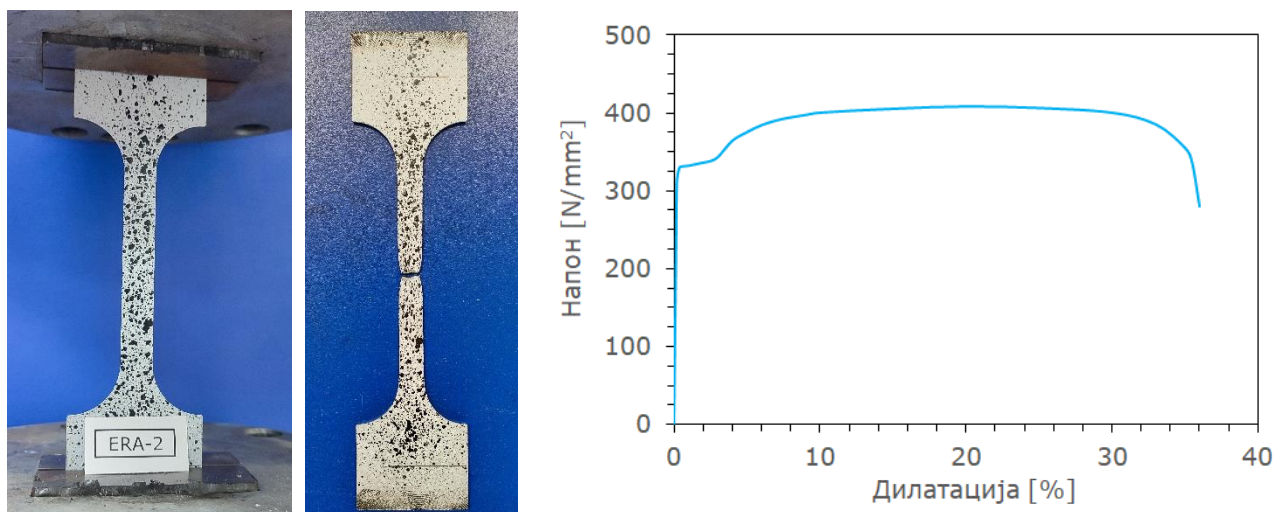
На сликама које следе су приказане испитане епрувете пре и после лома, дијаграми зависности напона и дилатације, као и поља дилатације епрувета.



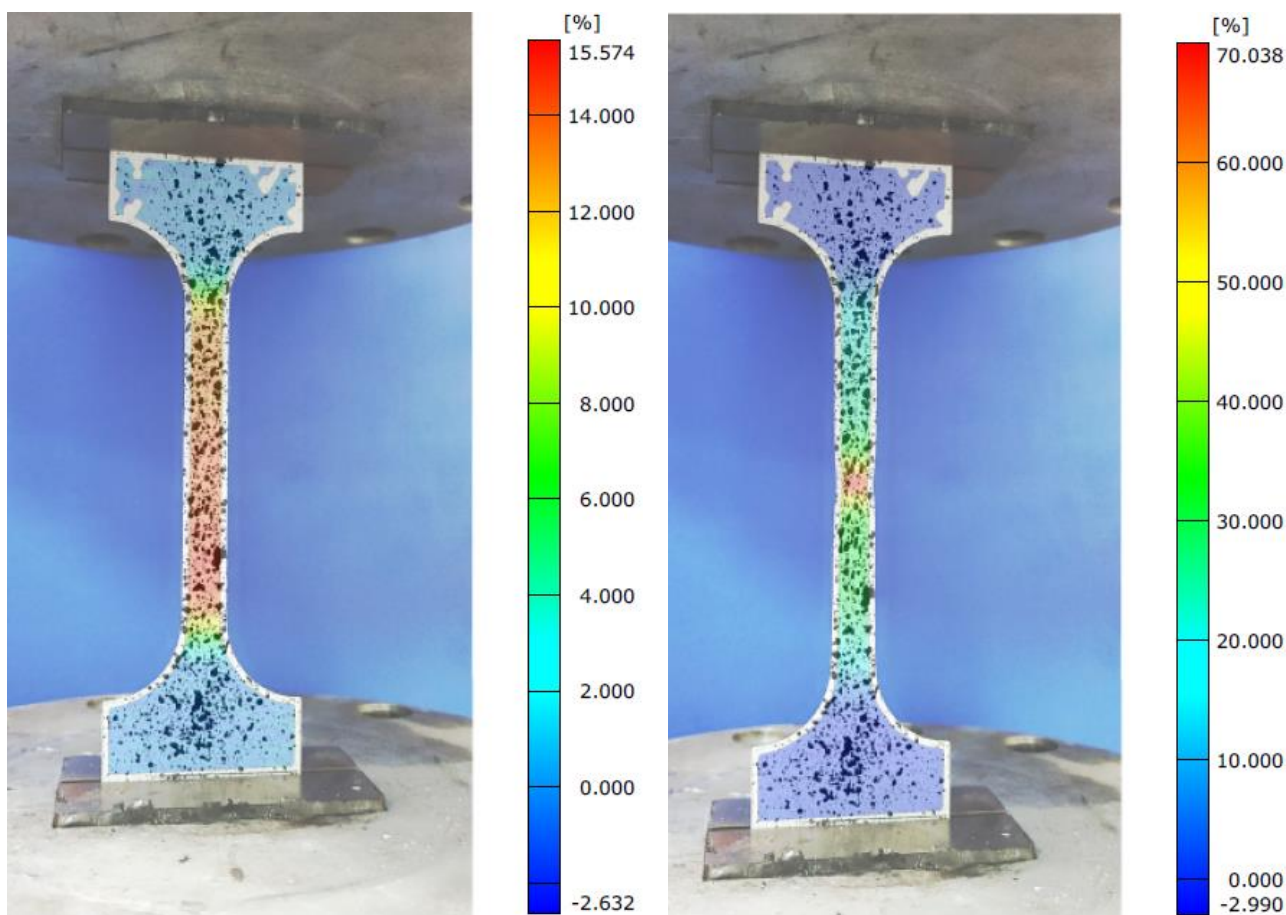
Слика 9.1. Дијаграм напон-дилатација за епрувету *ERA-1* и епрувета пре и после лома



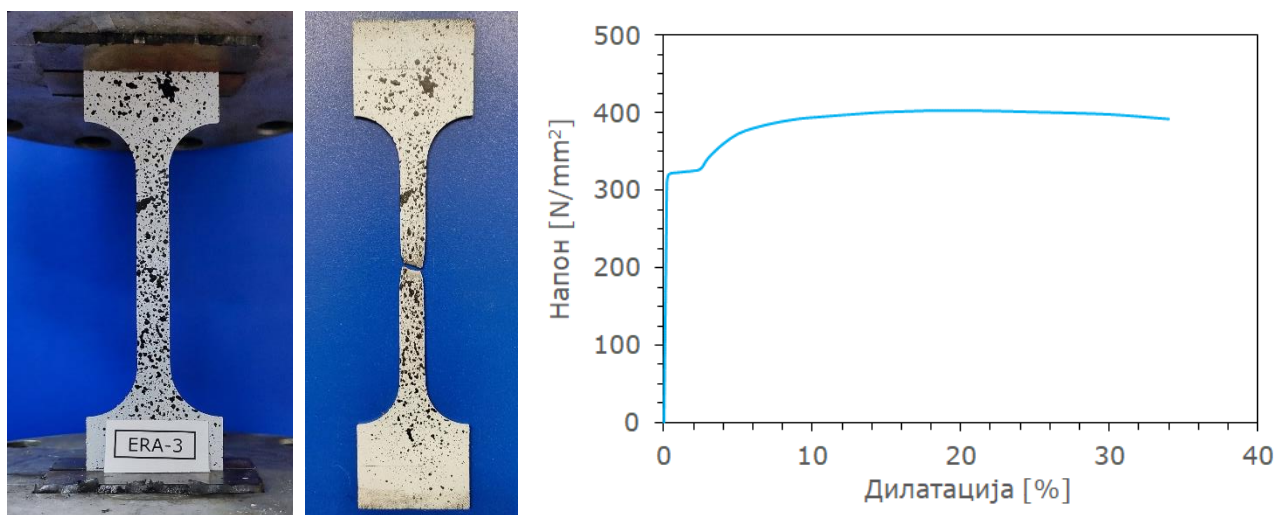
Слика 9.2. Дилатација епрувете *ERA-1* за укупно размицање чељусти кидалице од 11.242 mm (лево) и 24.876 mm (десно)



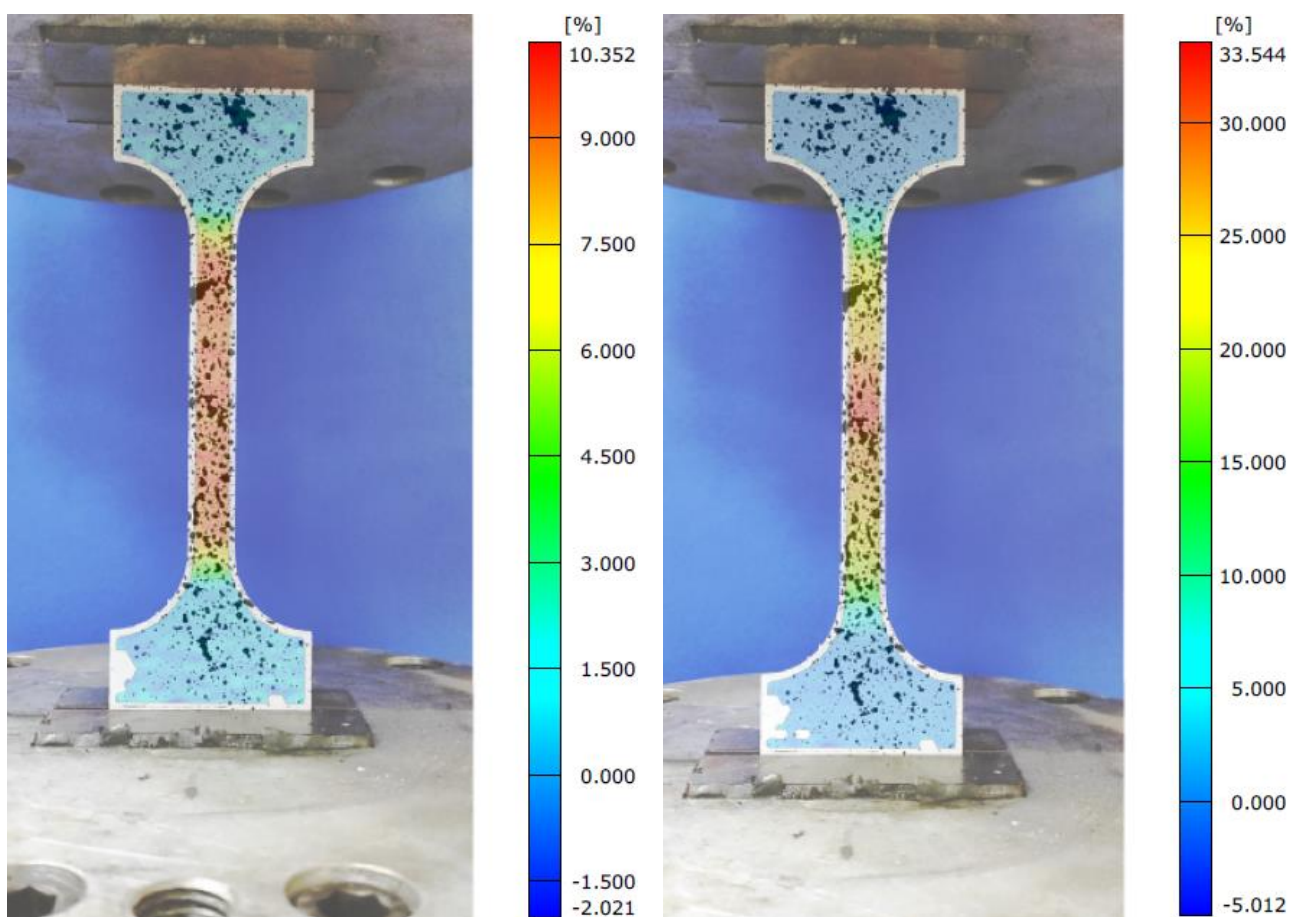
Слика 9.3. Дијаграм напон-дилатација за епрувету ERA-2 и епрувета пре и после лома



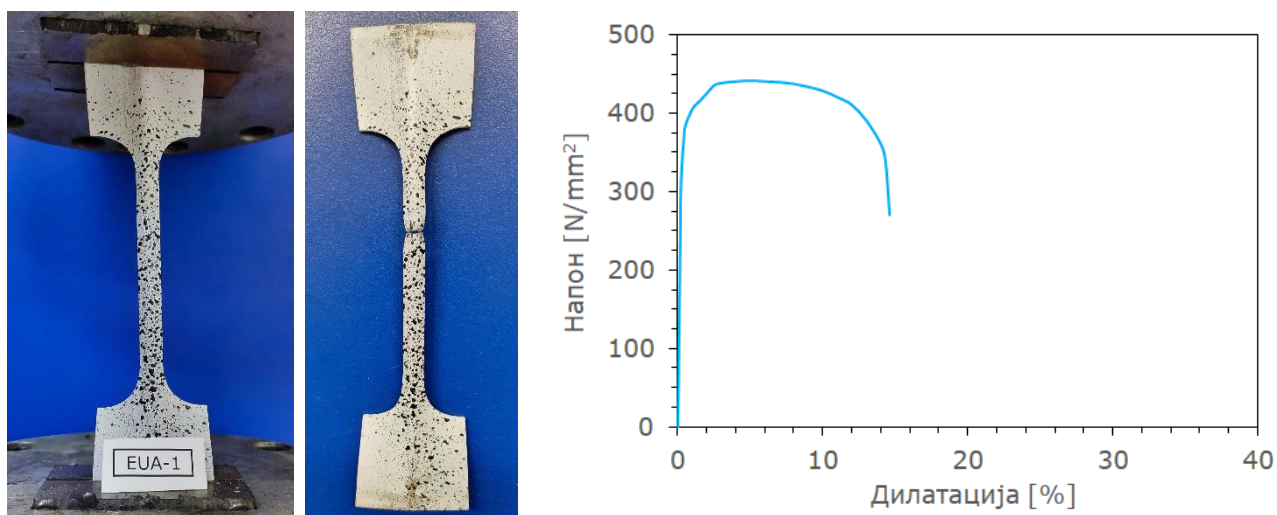
Слика 9.4. Дилатација епрувете ERA-2 за укупно размицање чељуссти кидалице од 11.591 mm (лево) и 23.483 mm (десно)



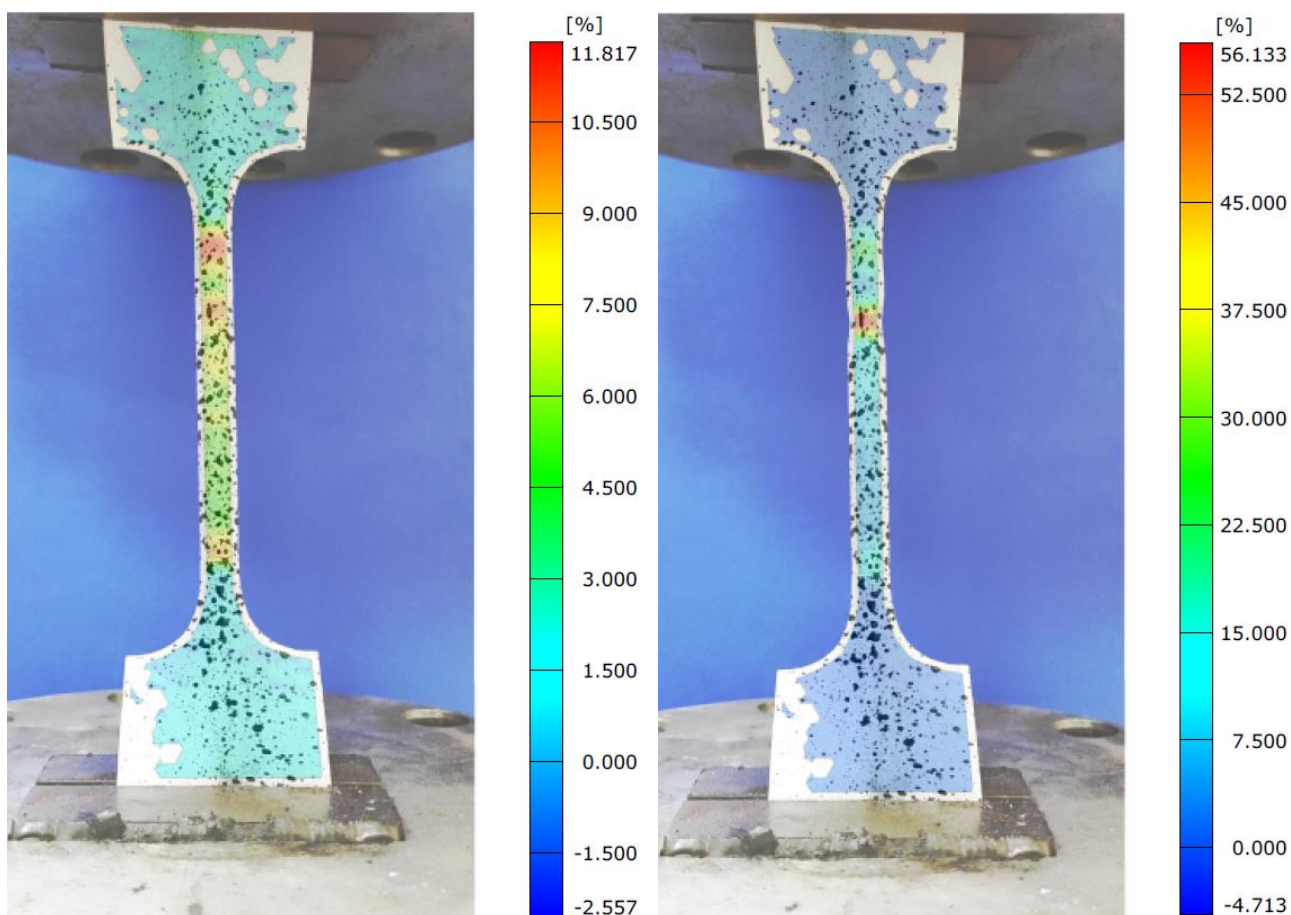
Слика 9.5. Дијаграм напон-дилатација за епрувету ERA-3 и епрувета пре и после лома



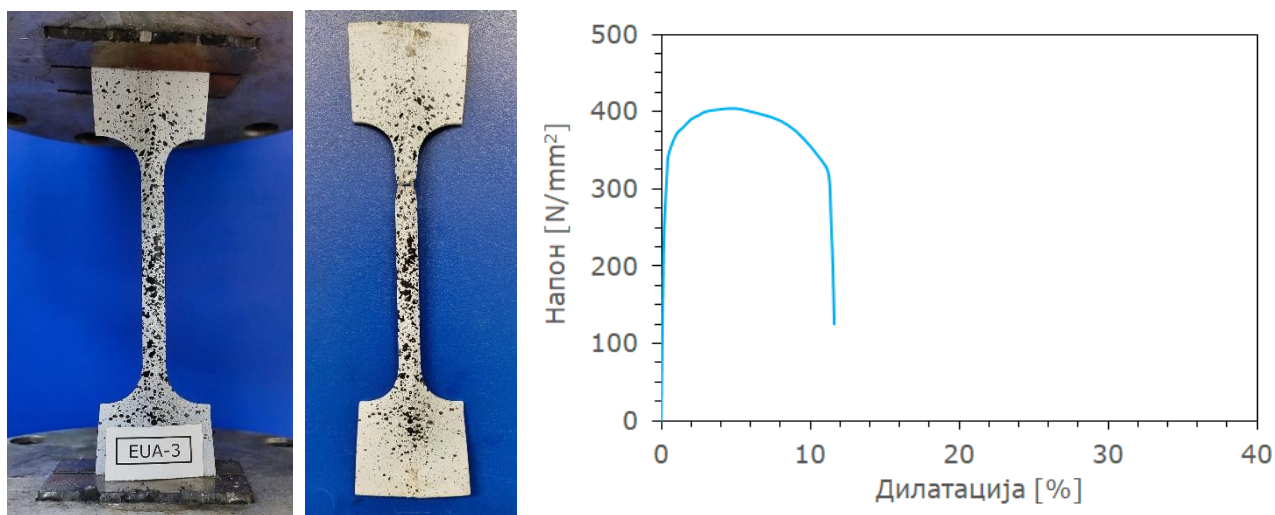
Слика 9.6. Дилатација епрувете ERA-3 за укупно размицање чељуси кидалице од 8.003 mm (лево) и 20.228 mm (десно)



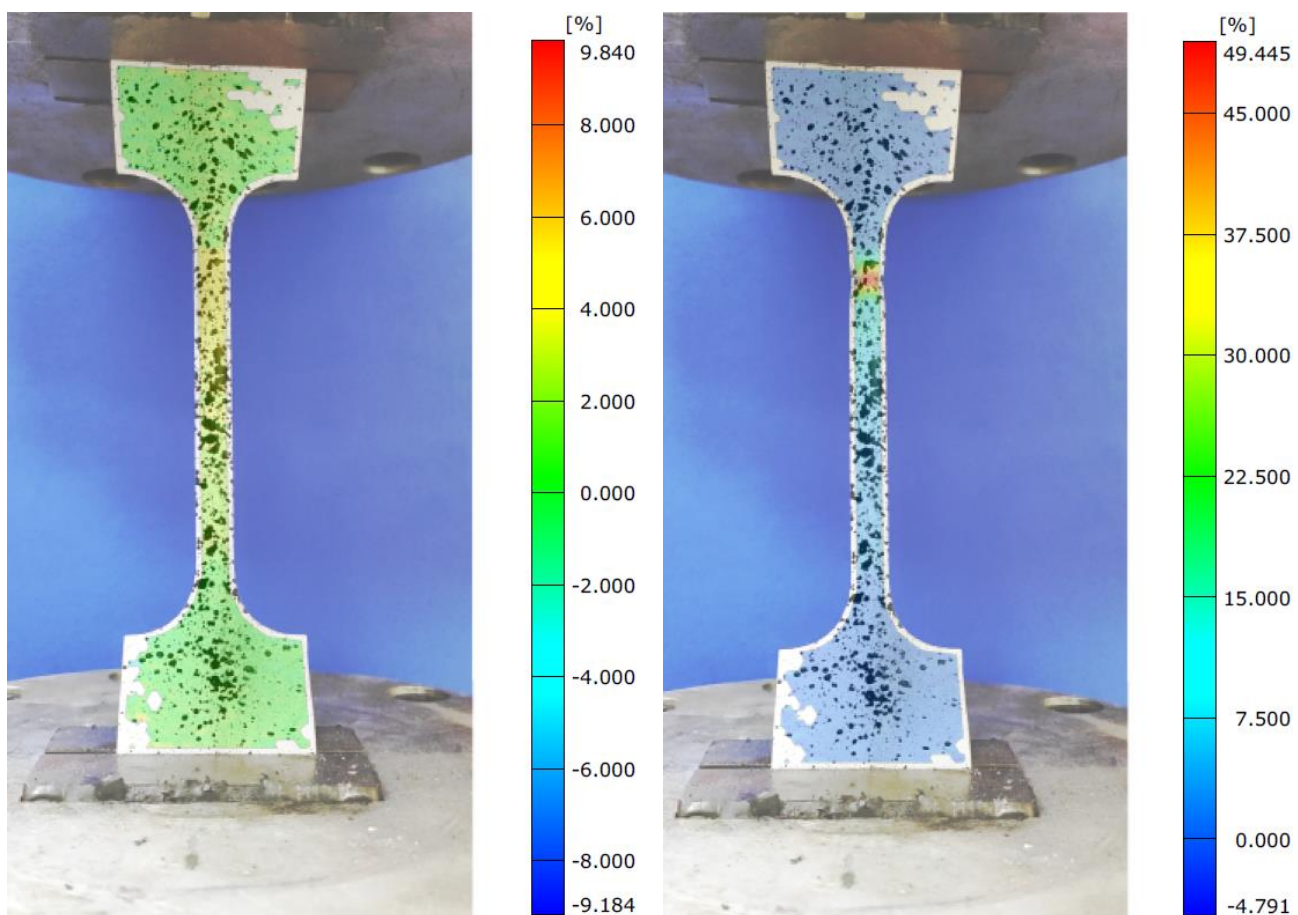
Слика 9.7. Дијаграм напон-дилатација за епрувету *EUA-1* и епрувета пре и после лома



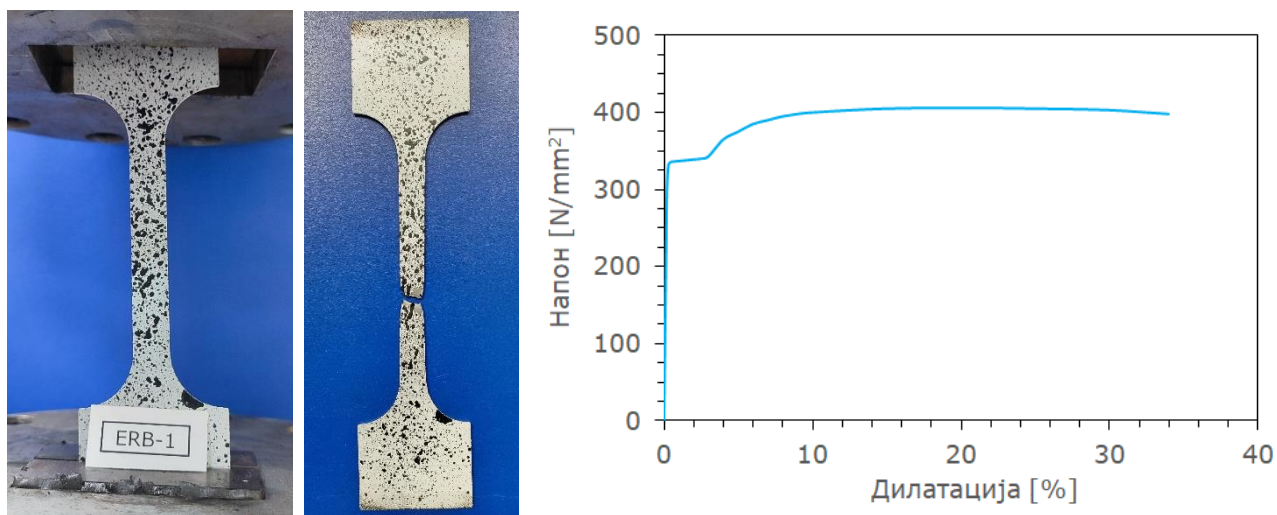
Слика 9.8. Дилатација епрувете *EUA-1* за укупно размицање чељуси кидалице од 7.024 mm (лево) и 10.607 mm (десно)



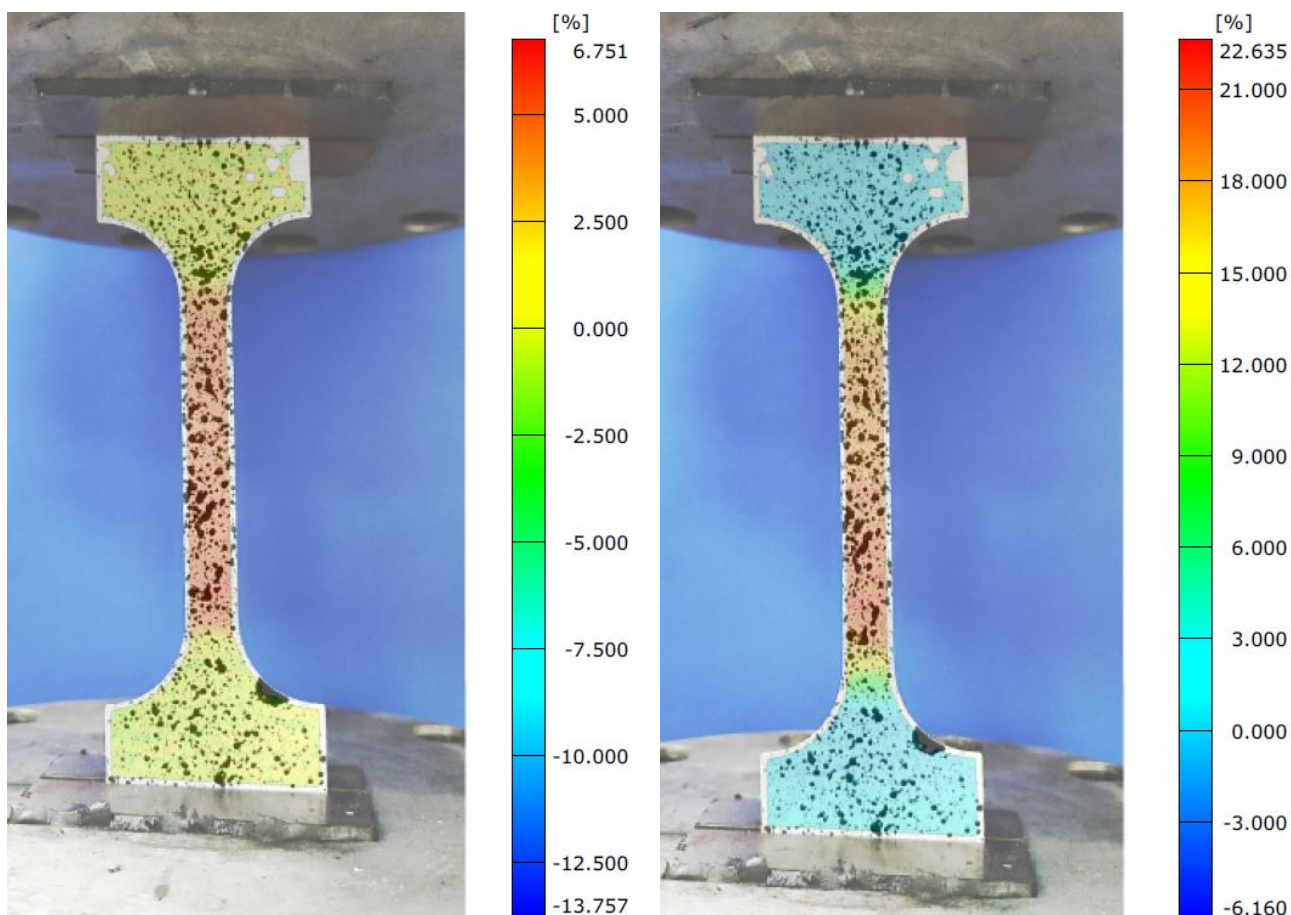
Слика 9.9. Дијаграм напон-дилатација за епрувету *EUA-2* и епрувета пре и после лома



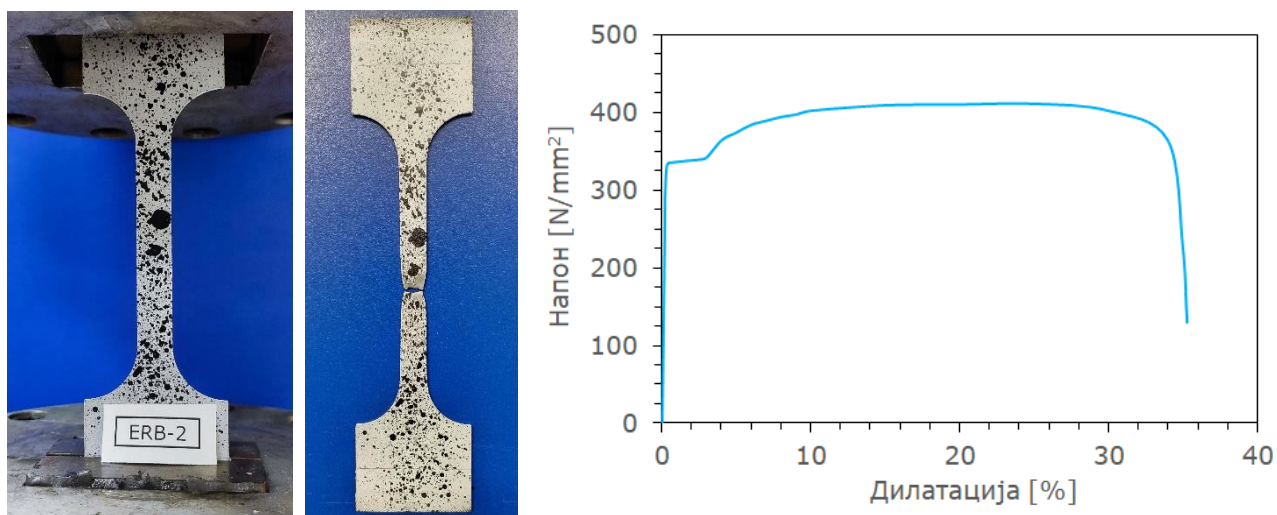
Слика 9.10. Дилатација епрувете *EUA-2* за укупно размицање чељусту кидалице од 3.833 mm (лево) и mm 6.983 (десно)



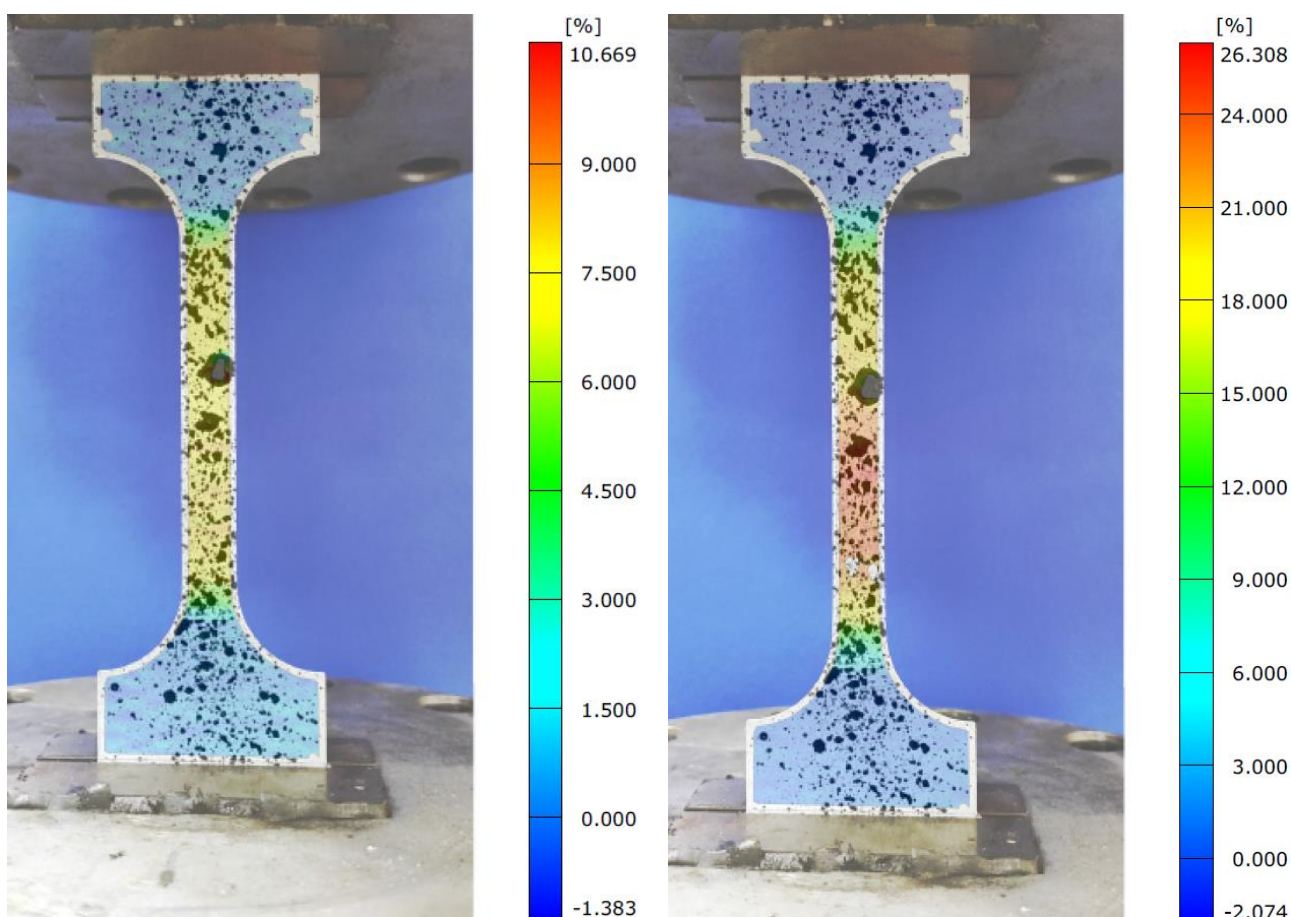
Слика 9.11. Дијаграм напон-дилатација за епрувету *ERB-1* и епрувета пре и после лома



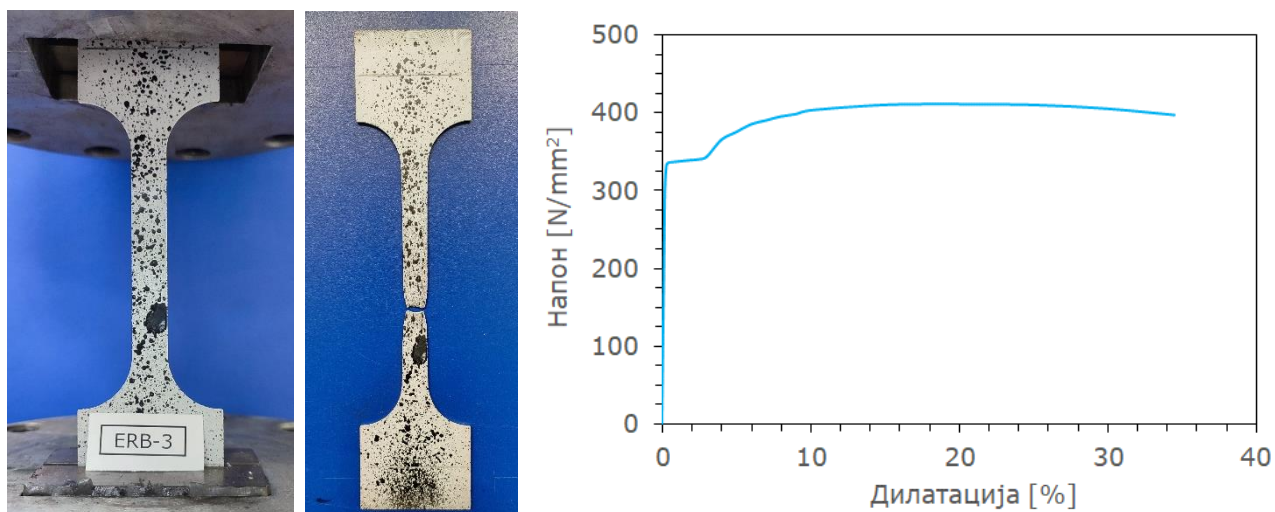
Слика 9.12. Дилатација епрувете *ERB-1* за укупно размицање чељусту кидалице од 1 mm (лево) и 16.139 mm (десно)



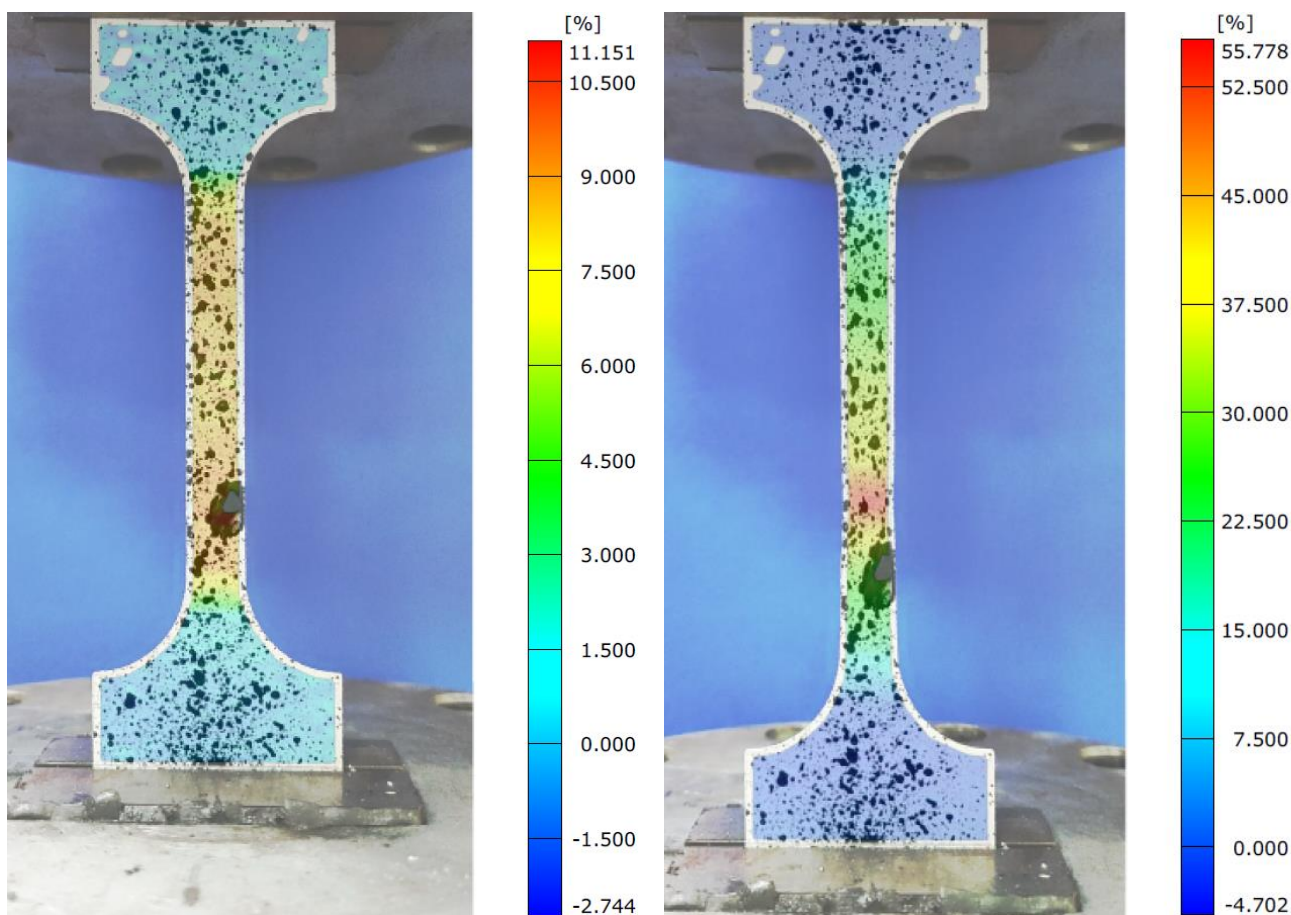
Слика 9.13. Дијаграм напон-дилатација за епрувету *ERB-2* и епрувета пре и после лома



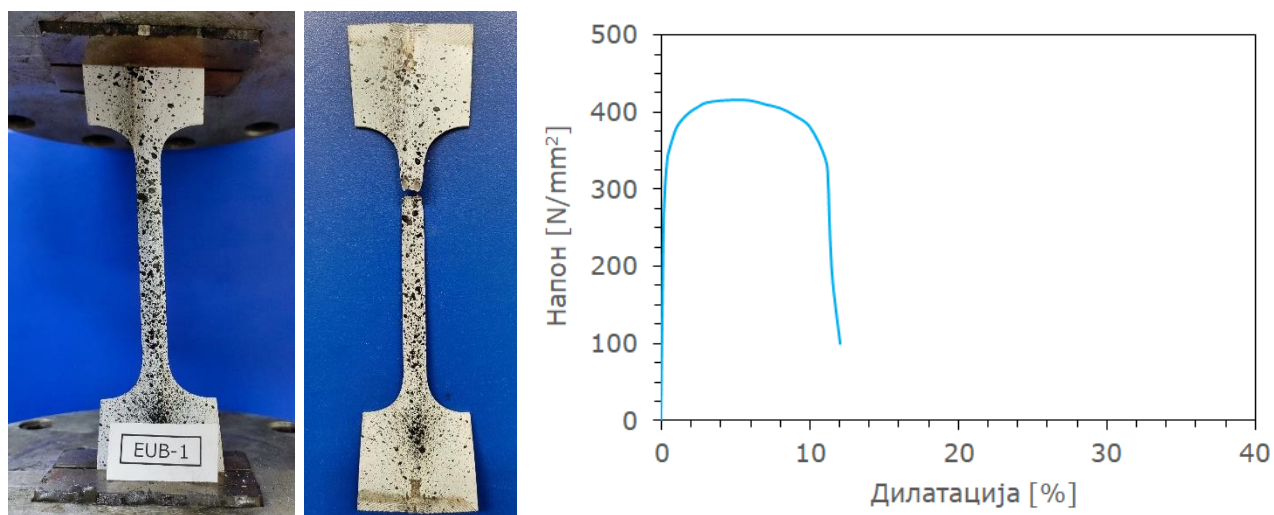
Слика 9.14. Дилатација епрувете *ERB-2* за укупно размицање чељусти кидалице од 6.673 mm (лево) и 17.394 mm (десно)



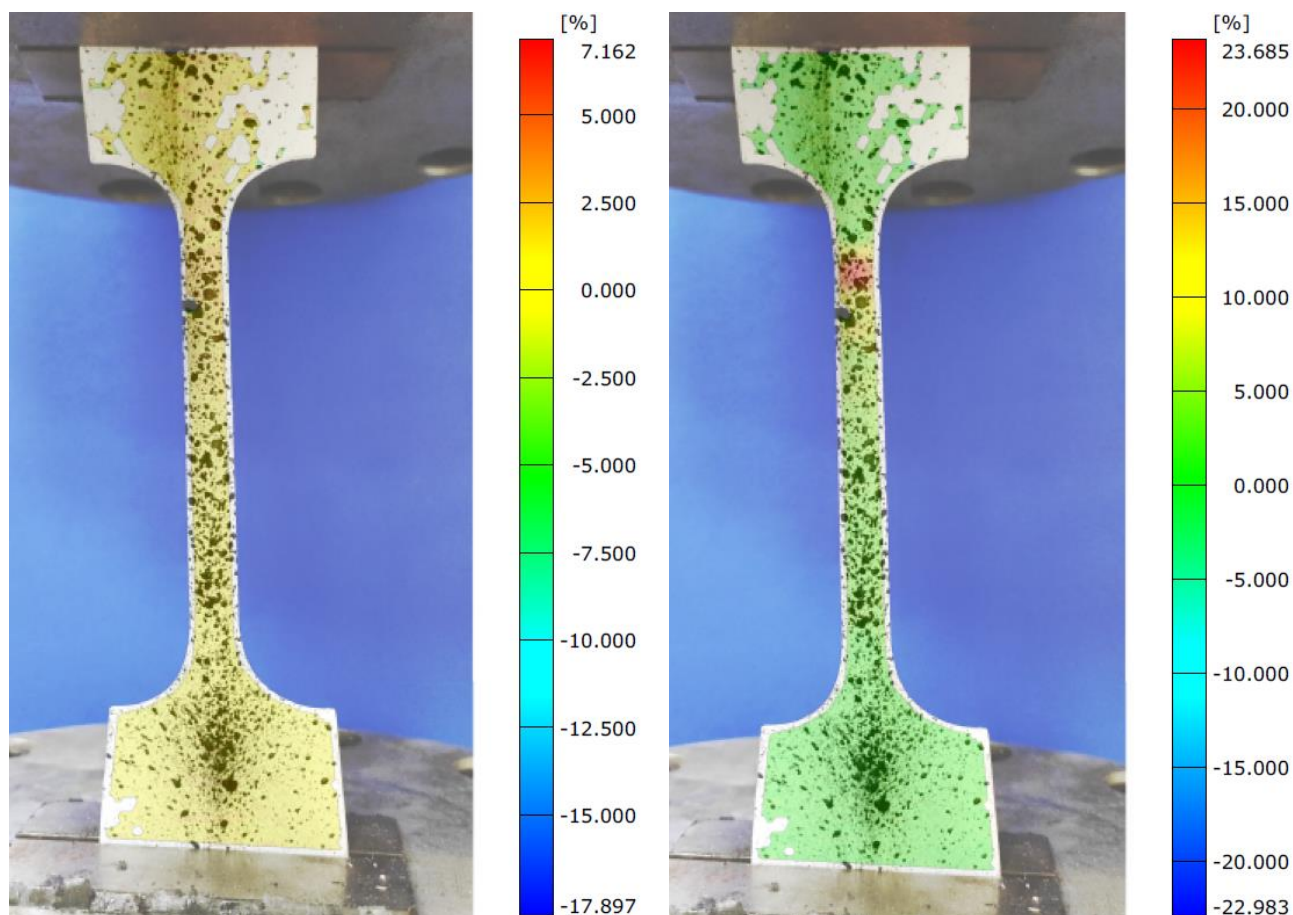
Слика 9.15. Дијаграм напон-дилатација за епрувету *ERB-3* и епрувета пре и после лома



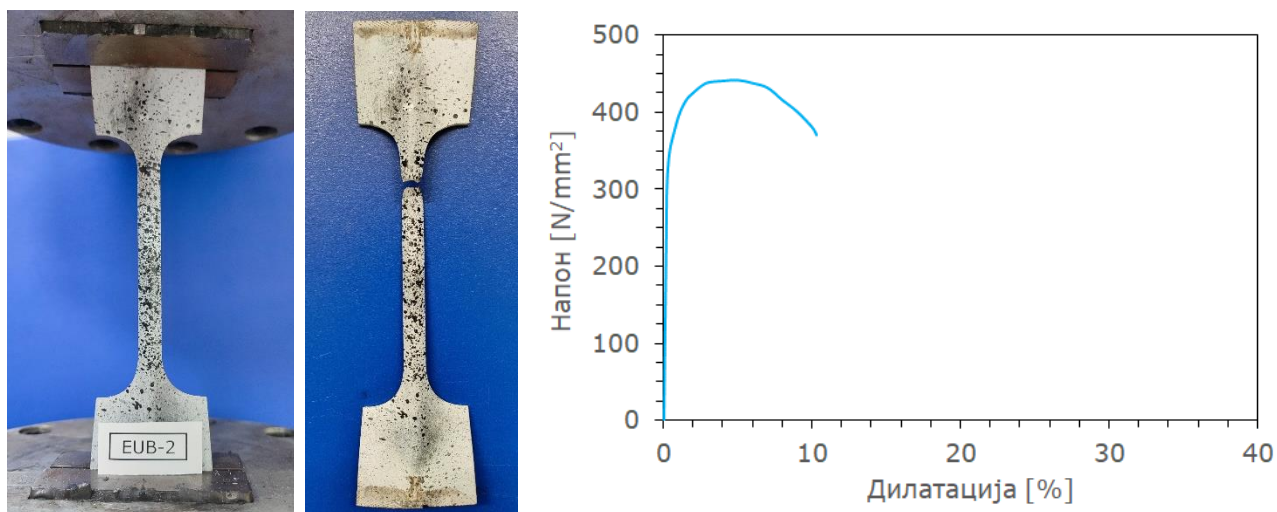
Слика 9.16. Дилатација епрувете *ERB-3* за укупно размицање чељусти кидалице од 7.495 mm (лево) и 24.510 mm (десно)



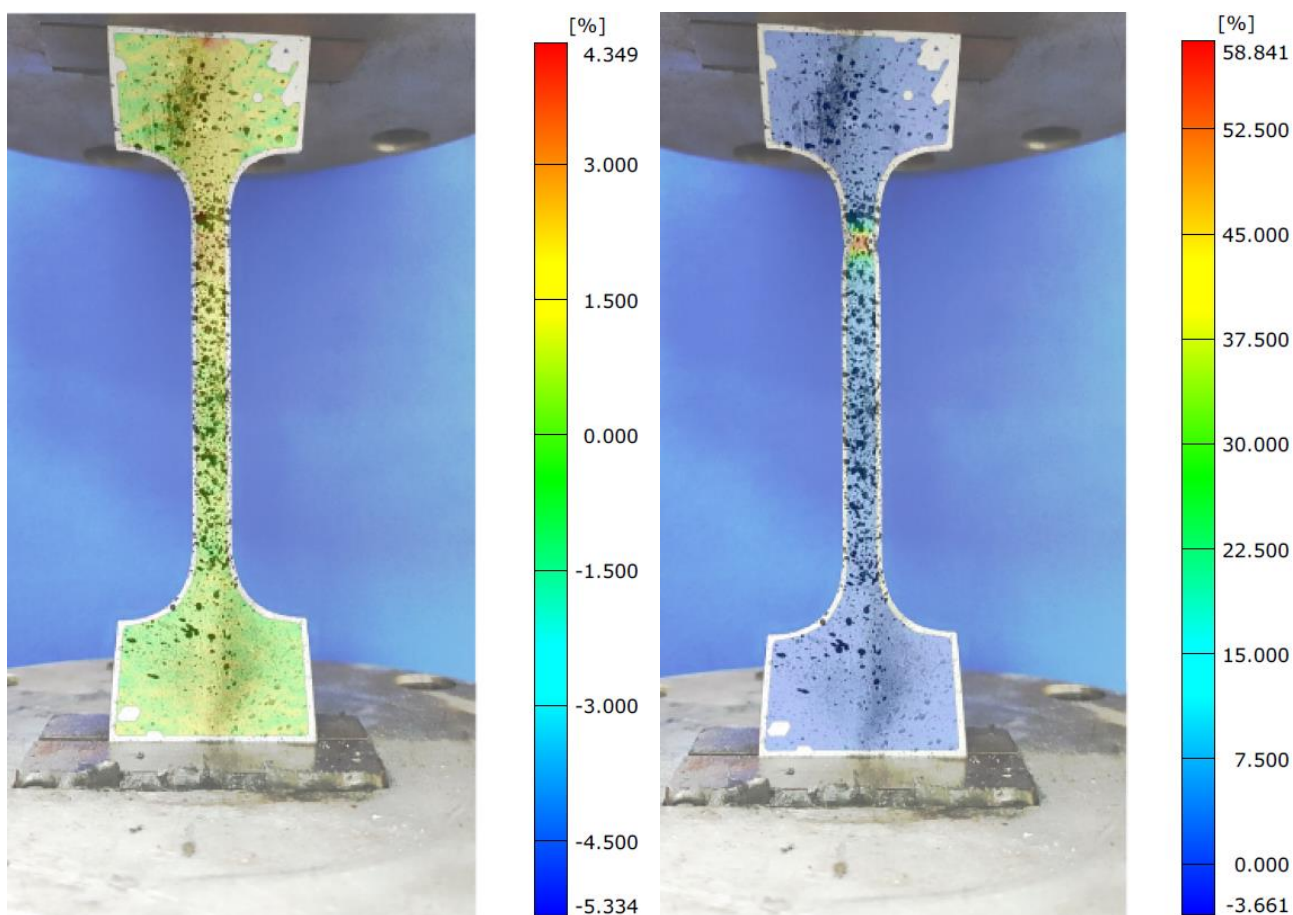
Слика 9.17. Дијаграм напон-дилатација за епрувету *EUB-1* и епрувета пре и после лома



Слика 9.18. Дилатација епрувете *EUB-1* за укупно размицање чељусту кидалице од 2.621 mm (лево) и 6.156 mm (десно)

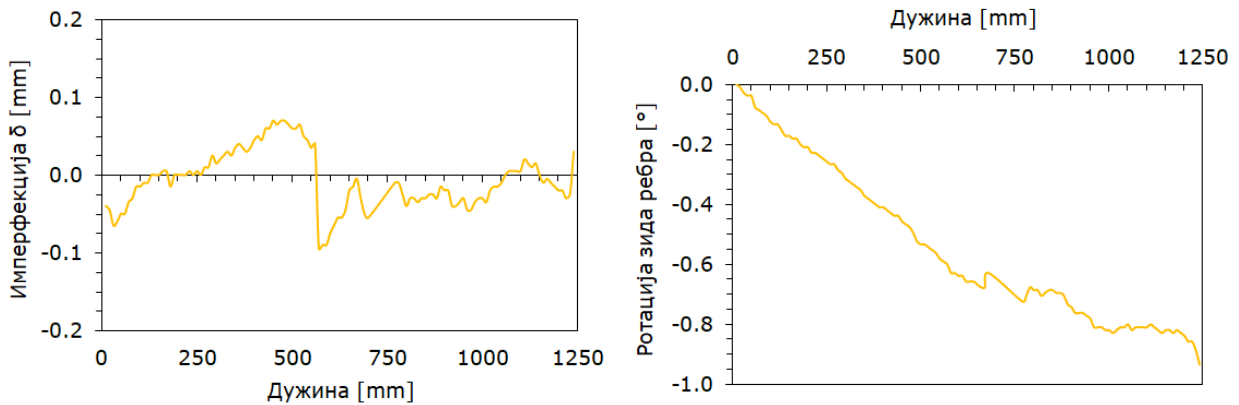


Слика 9.19. Дијаграм напон-дилатација за епрувету *EUB-2* и епрувета пре и после лома

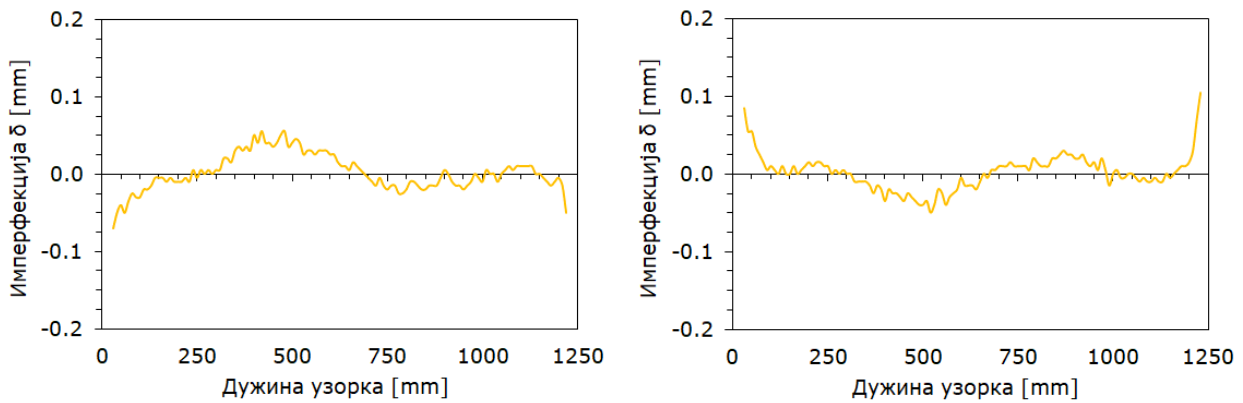


Слика 9.20. Дилатација епрувете *EUB-2* за укупно размицање чељусту кидалице од 2.342 mm (лево) и 6.078 mm (десно)

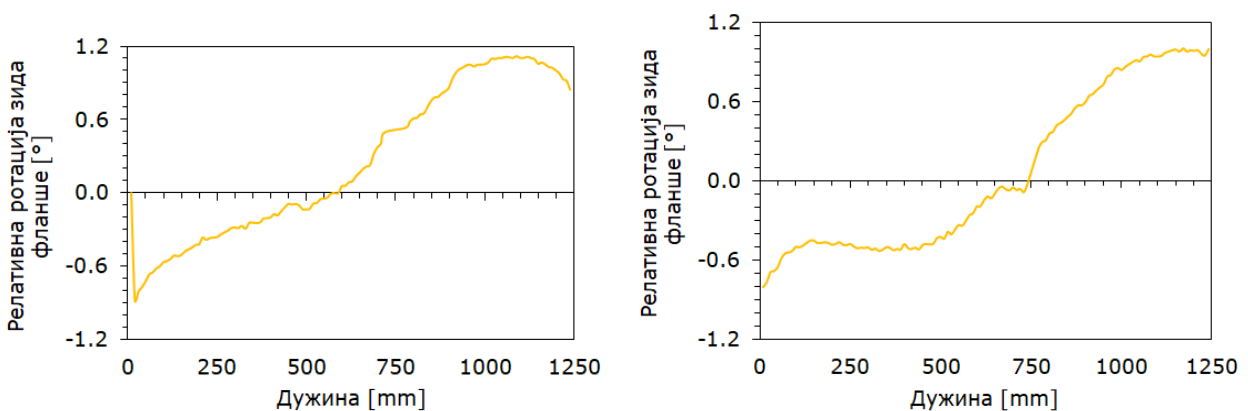
9.2. ПРИЛОГ Б: РЕЗУЛТАТИ ДРУГЕ ФАЗЕ ЕКСПЕРИМЕНТА: МЕРЕЊЕ ПОЧЕТНИХ ГЕОМЕТРИЈСКИХ ИМПЕРФЕКЦИЈА



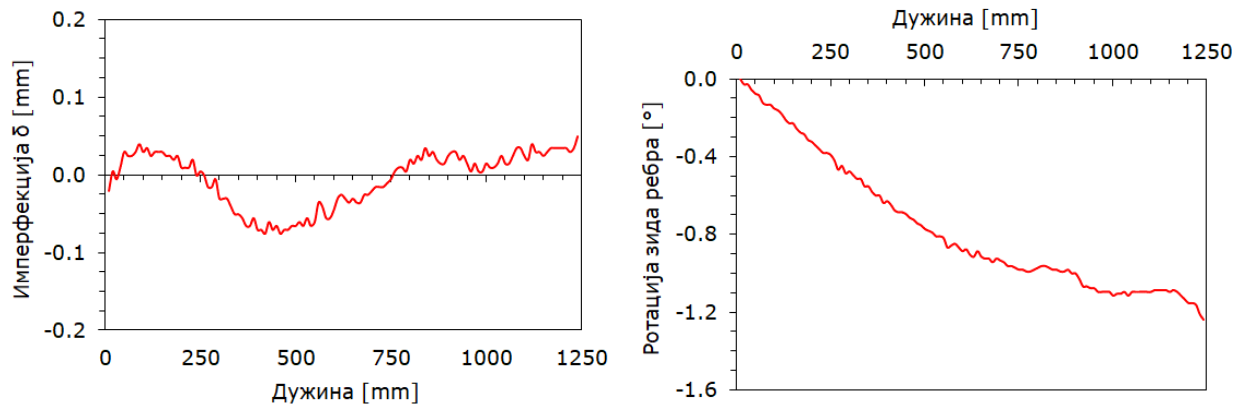
Слика 9.21. Имперфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека (лево) и ротација зида ребра (десно) узорка *C100-0-e00-1*



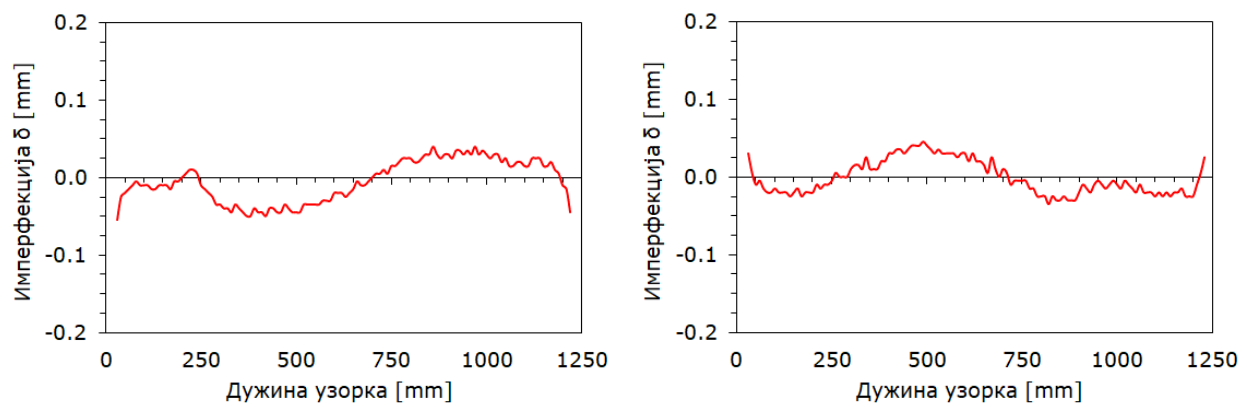
Слика 9.22. Имперфекција фланши у правцу јаче осе попречног пресека узорка *C100-0-e00-1*



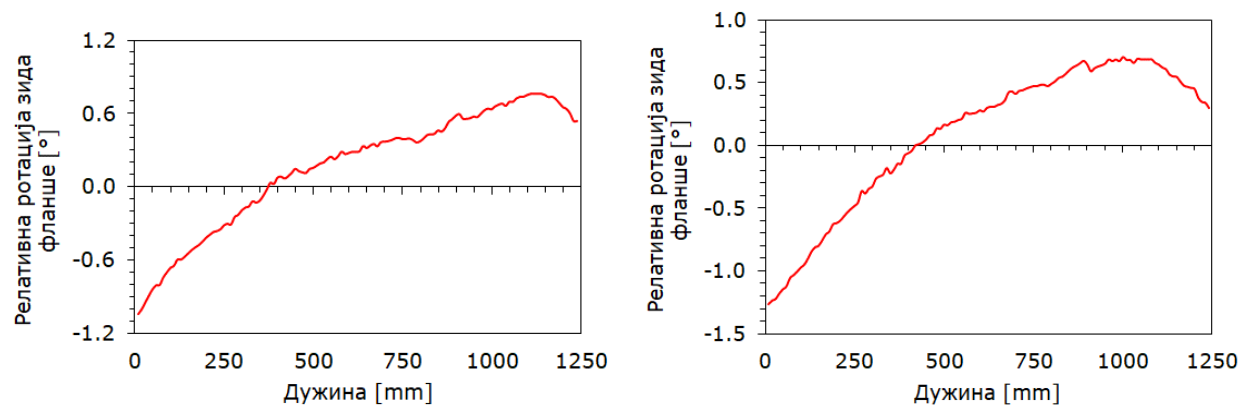
Слика 9.23. Релативне ротације фланши у односу на ребро узорка *C100-0-e00-1*



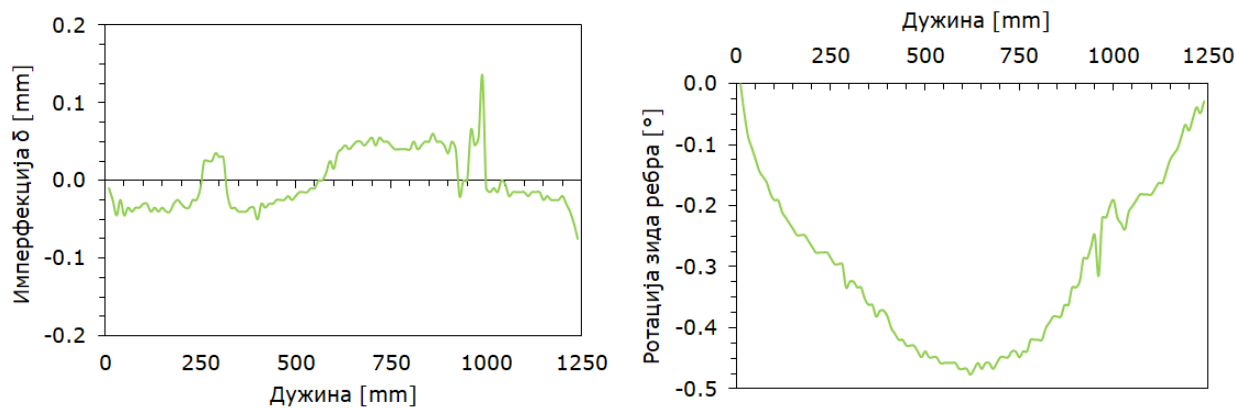
Слика 9.24. Имперфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека (лево) и ротација зида ребра (десно) узорка *C100-0-e00-2*



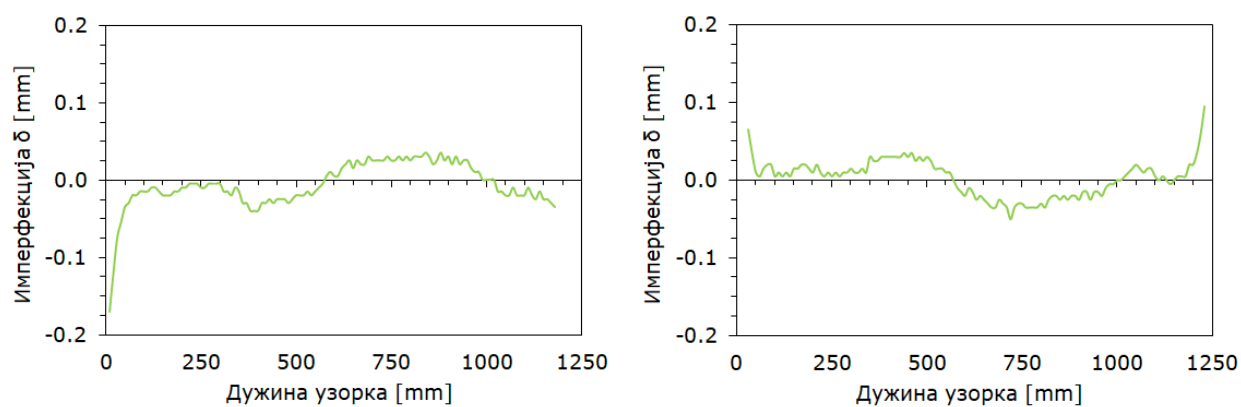
Слика 9.25. Имперфекција фланши у правцу јаче осе попречног пресека узорка *C100-0-e00-2*



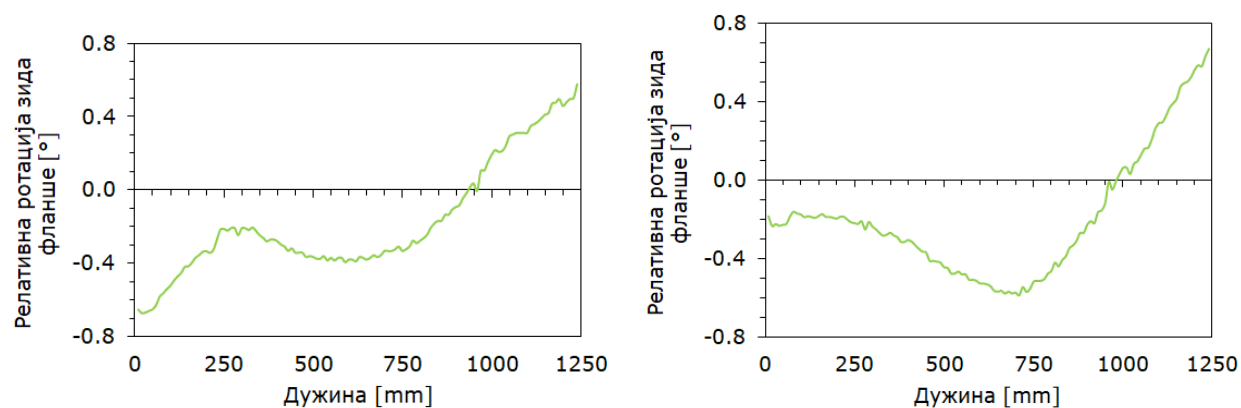
Слика 9.26. Релативне ротације фланши у односу на ребро узорка *C100-0-e00-2*



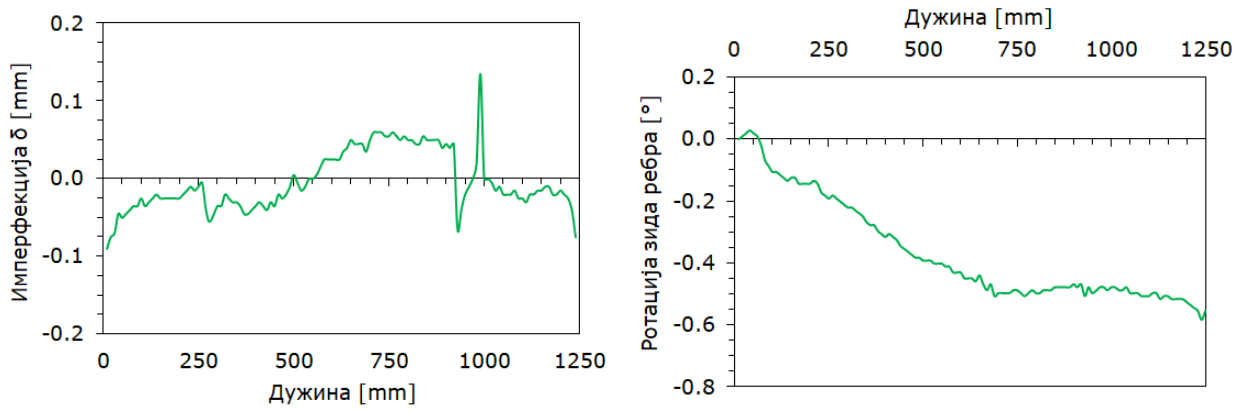
Слика 9.27. Имперфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека (лево) и ротација зида ребра (десно) узорка *C100-2-e00-1*



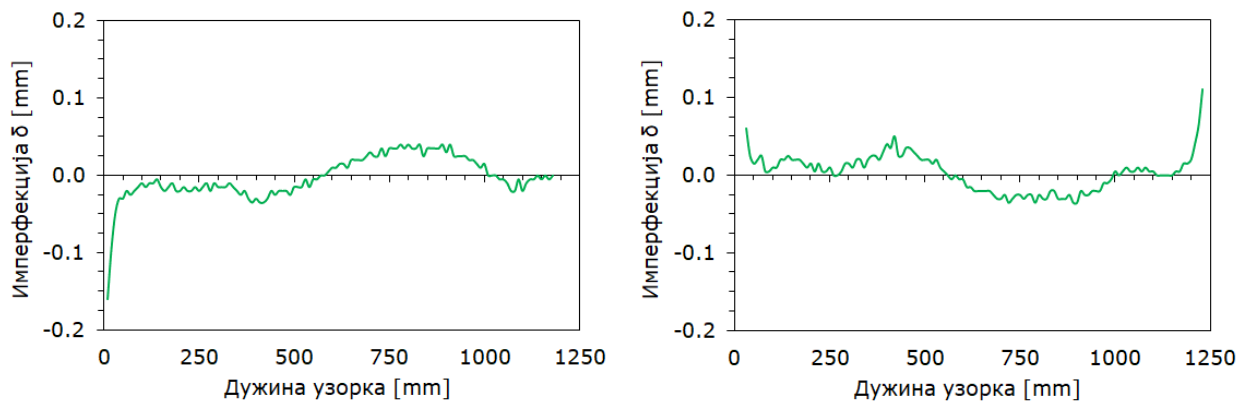
Слика 9.28. Имперфекција фланши у правцу јаче осе попречног пресека узорка *C100-2-e00-1*



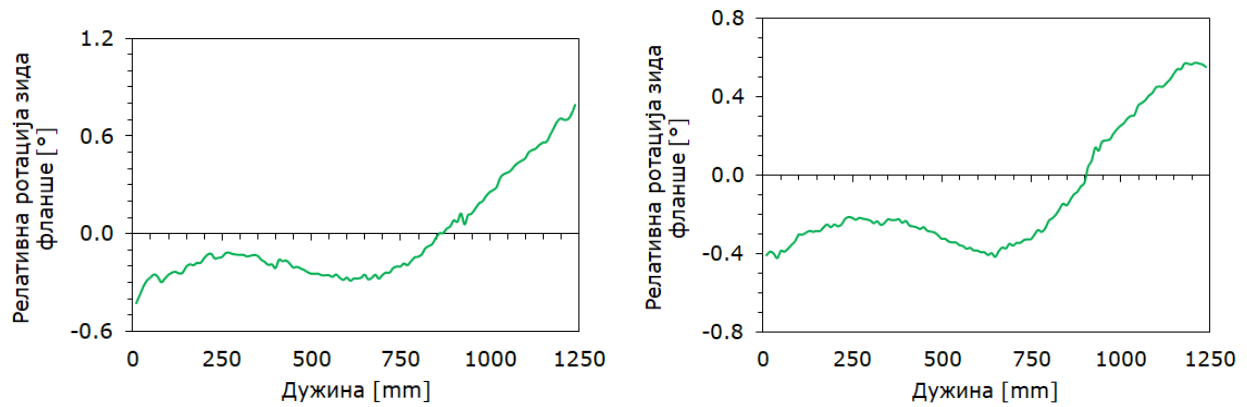
Слика 9.29. Релативне ротације фланши у односу на ребро узорка *C100-2-e00-1*



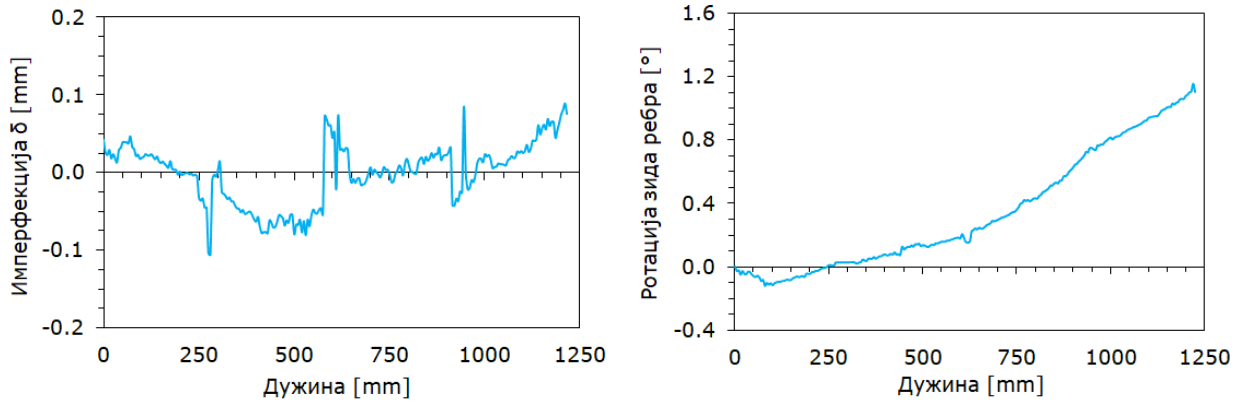
Слика 9.30. Имперфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека (лево) и ротација зида ребра (десно) узорка *C100-2-e00-2*



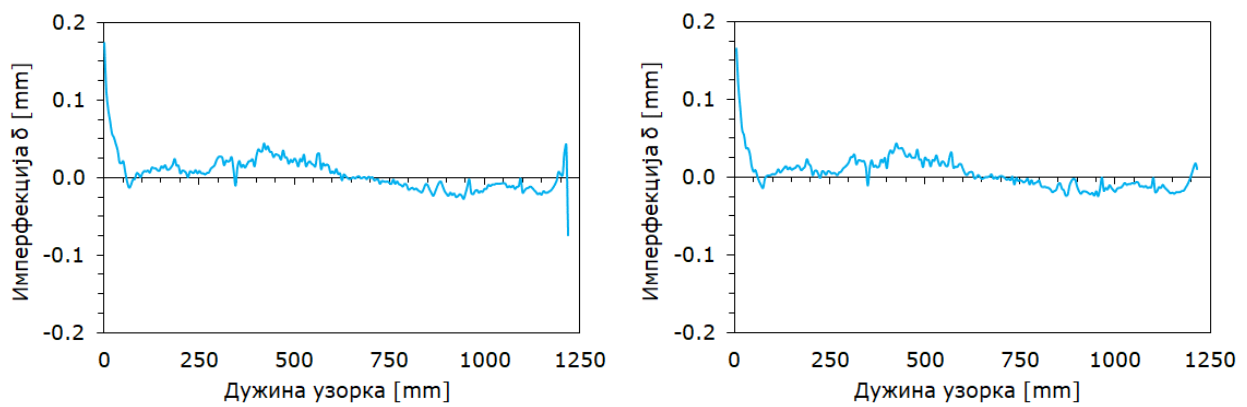
Слика 9.31. Имперфекција фланши у правцу јаче осе попречног пресека узорка *C100-2-e00-2*



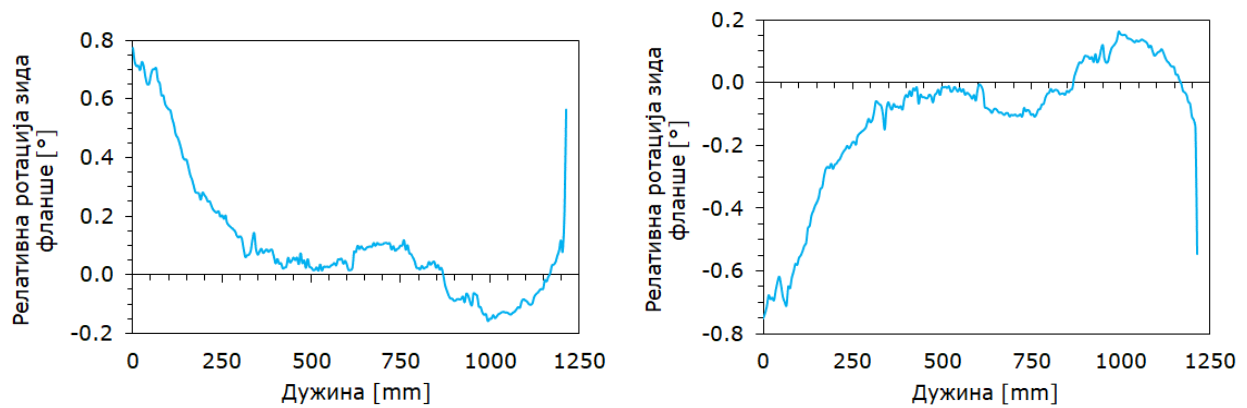
Слика 9.32. Релативне ротације фланши у односу на ребро узорка *C100-2-e00-2*



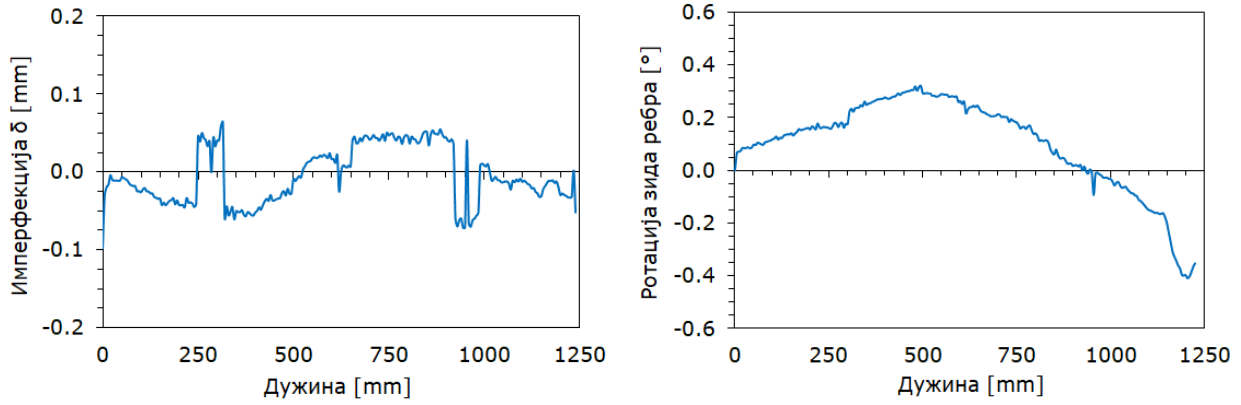
Слика 9.33. Имперфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека (лево) и ротација зида ребра (десно) узорка *C100-3-e00-1*



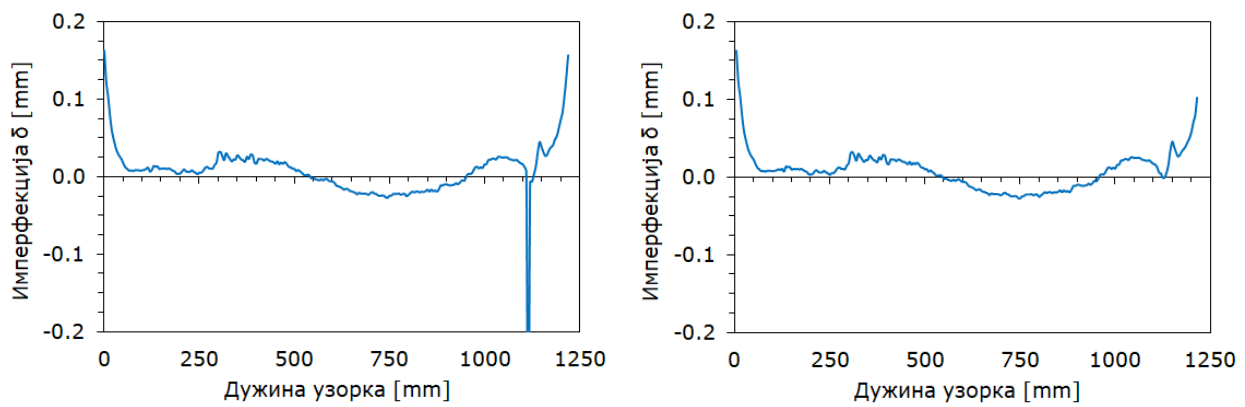
Слика 9.34. Имперфекција фланши у правцу јаче осе попречног пресека узорка *C100-3-e00-1*



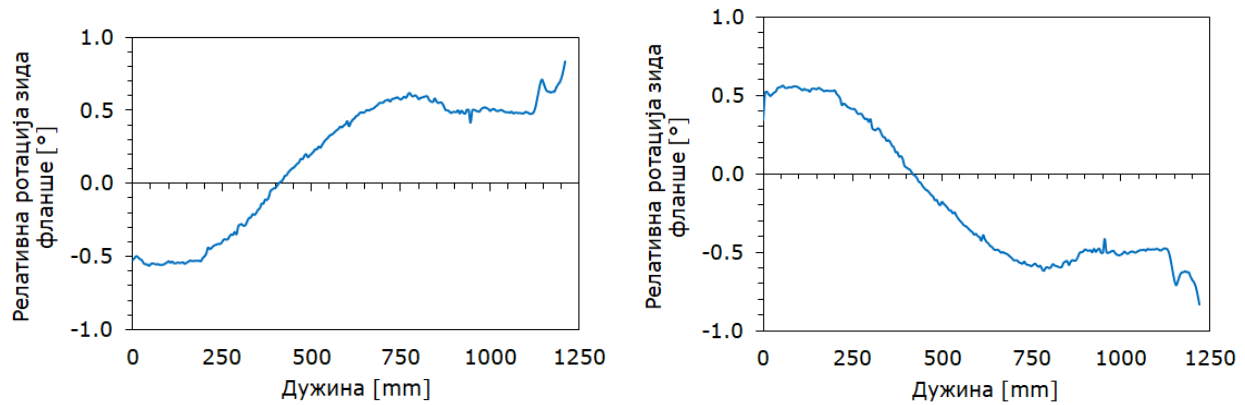
Слика 9.35. Релативне ротације фланши у односу на ребро узорка *C100-3-e00-1*



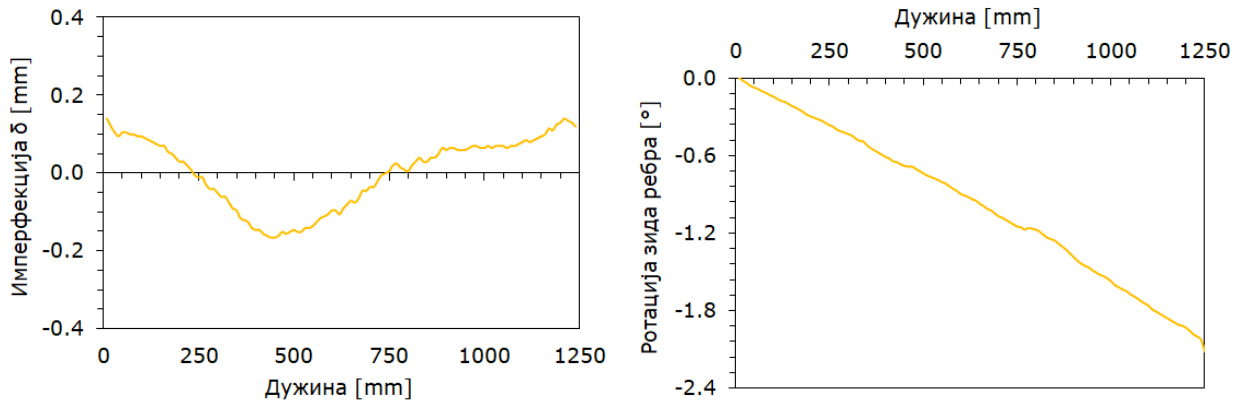
Слика 9.36. Имперфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека (лево) и ротација зида ребра (десно) узорка *C100-3-e00-2*



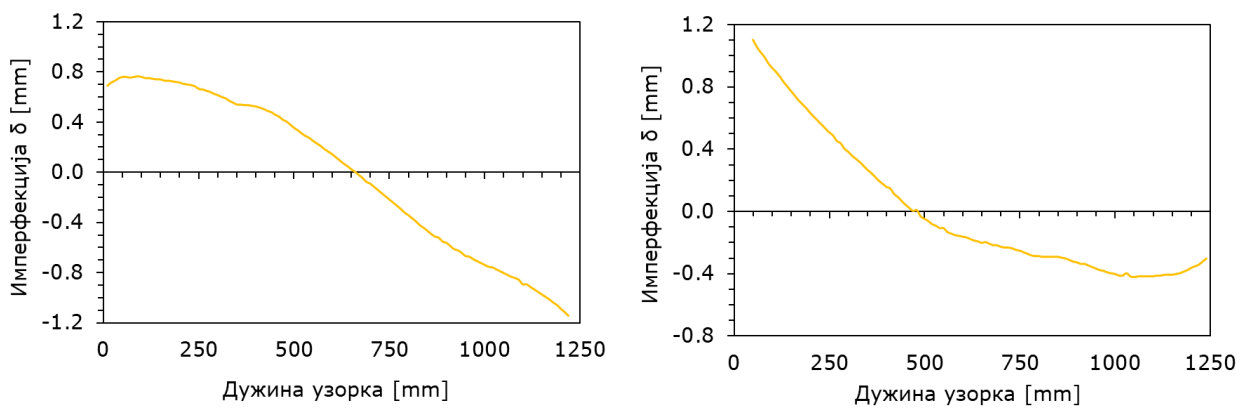
Слика 9.37. Имперфекција фланши у правцу јаче осе попречног пресека узорка *C100-3-e00-2*



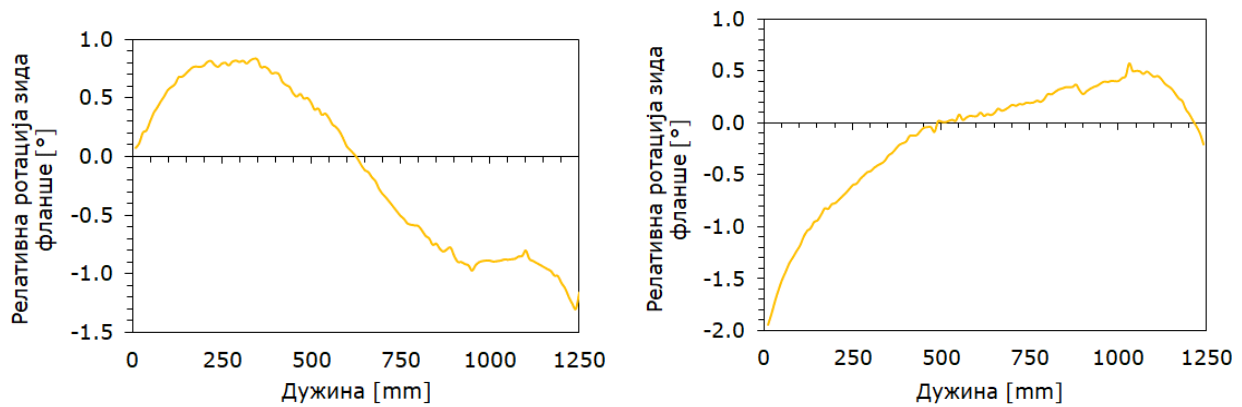
Слика 9.38. Релативне ротације фланши у односу на ребро узорка *C100-3-e00-2*



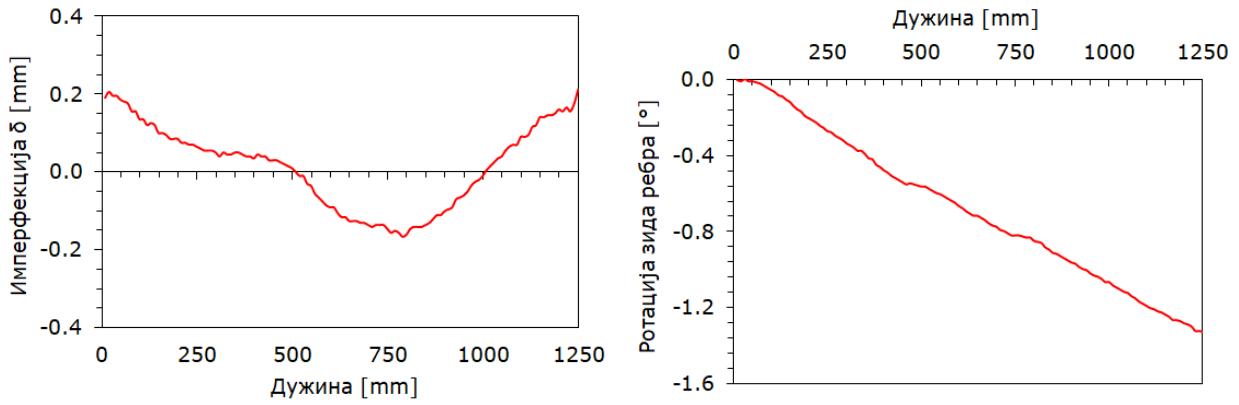
Слика 9.39. Имперфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека (лево) и ротација зида ребра (десно) узорка *C150-0-e00-1*



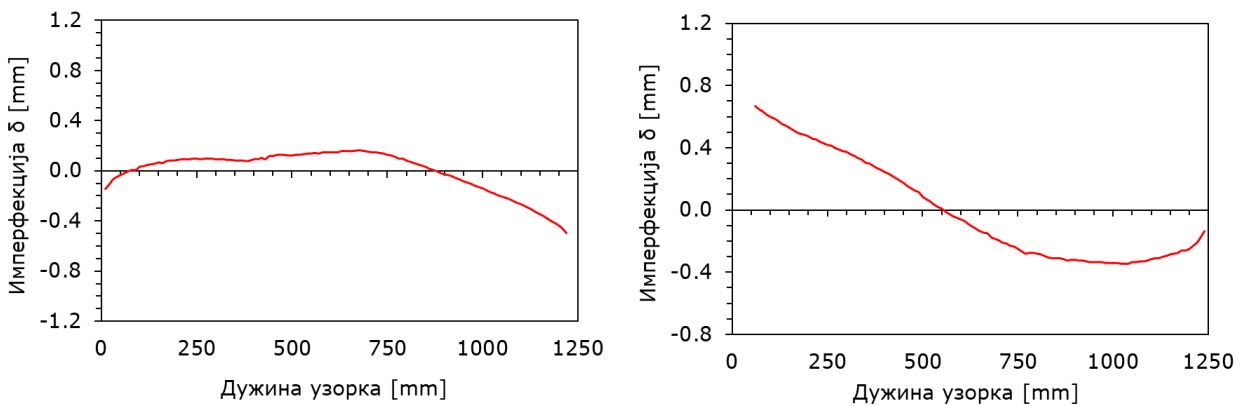
Слика 9.40. Имперфекција фланши у правцу јаче осе попречног пресека узорка *C150-0-e00-1*



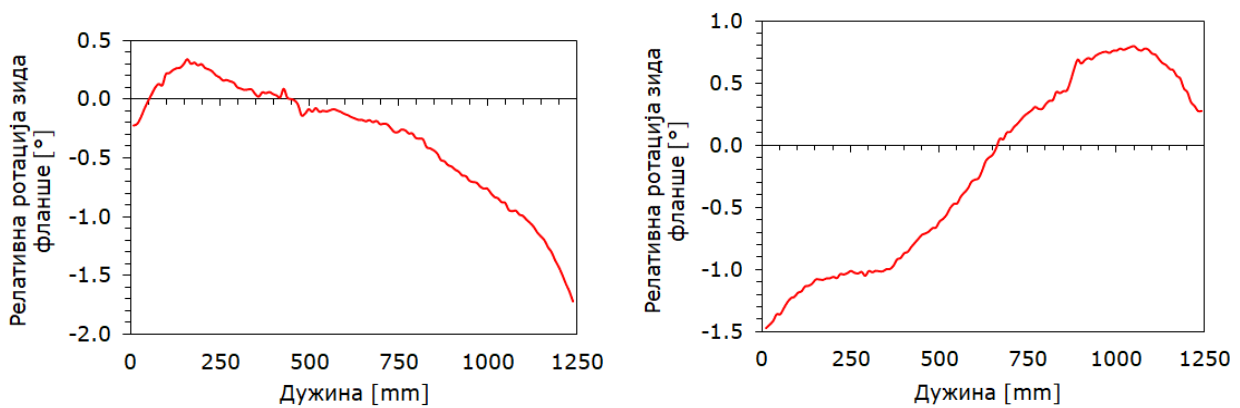
Слика 9.41. Релативне ротације фланши у односу на ребро узорка *C150-0-e00-1*



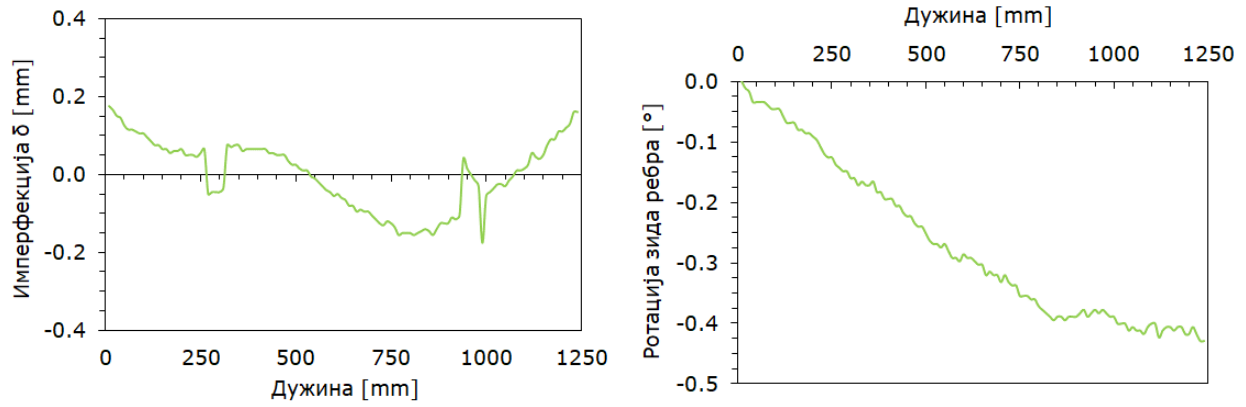
Слика 9.42. Имперфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека (лево) и ротација зида ребра (десно) узорка *C150-0-e00-2*



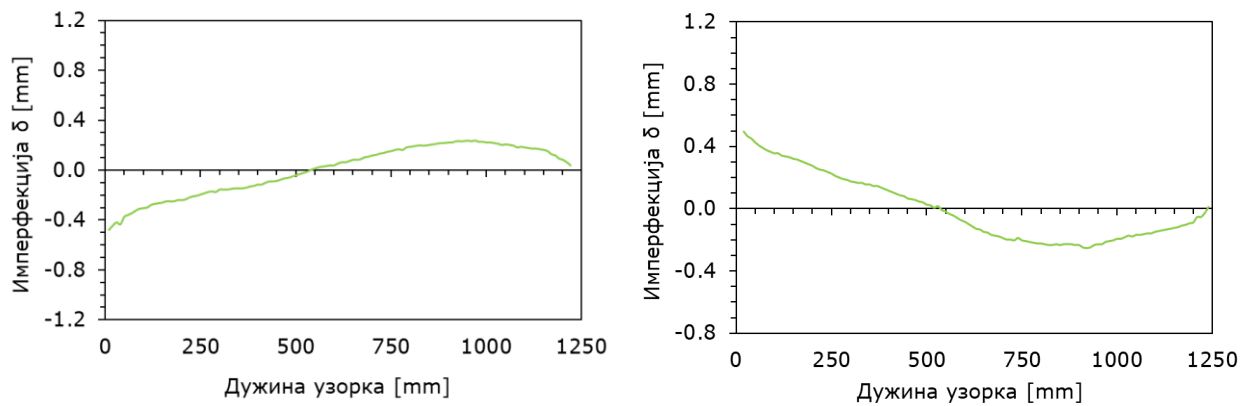
Слика 9.43. Имперфекција фланши у правцу јаче осе попречног пресека узорка *C150-0-e00-2*



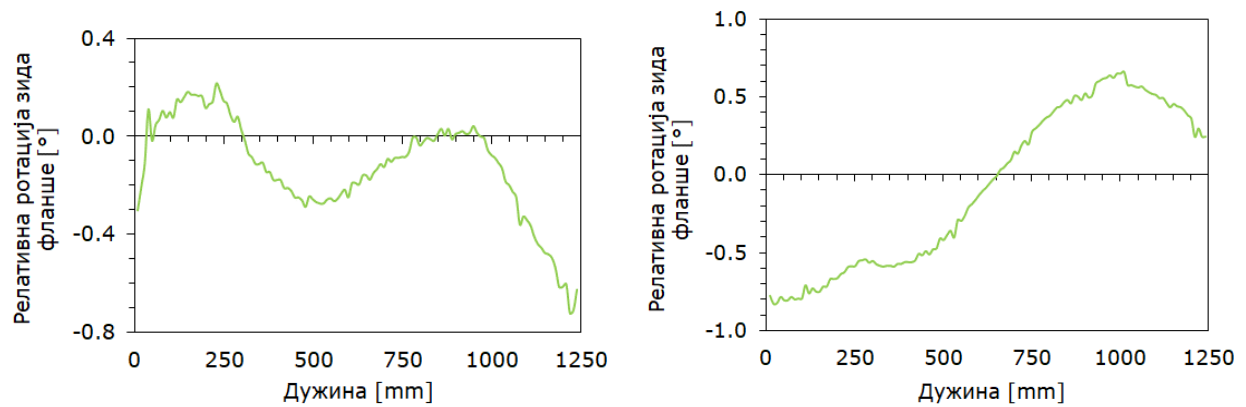
Слика 9.44. Релативне ротације фланши у односу на ребро узорка *C150-0-e00-2*



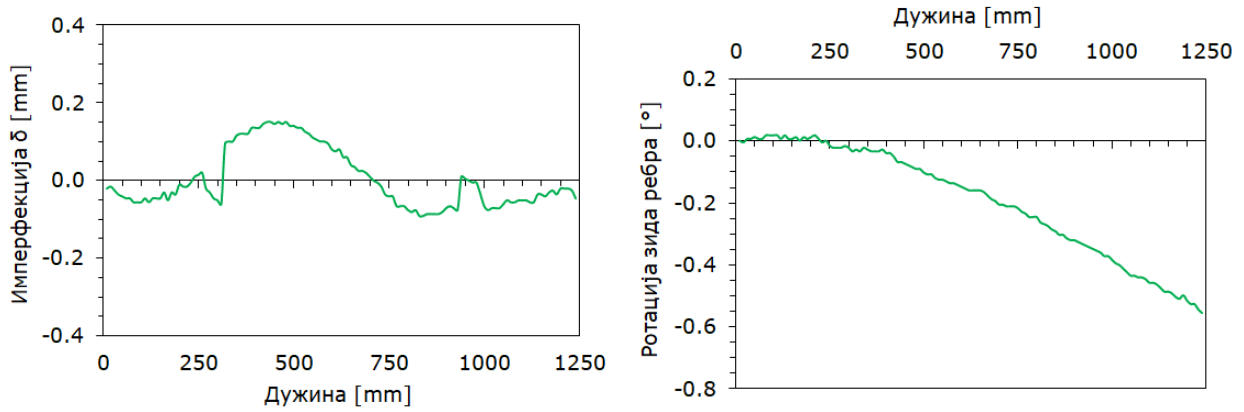
Слика 9.45. Имперфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека (лево) и ротација зида ребра (десно) узорка *C150-2-e00-1*



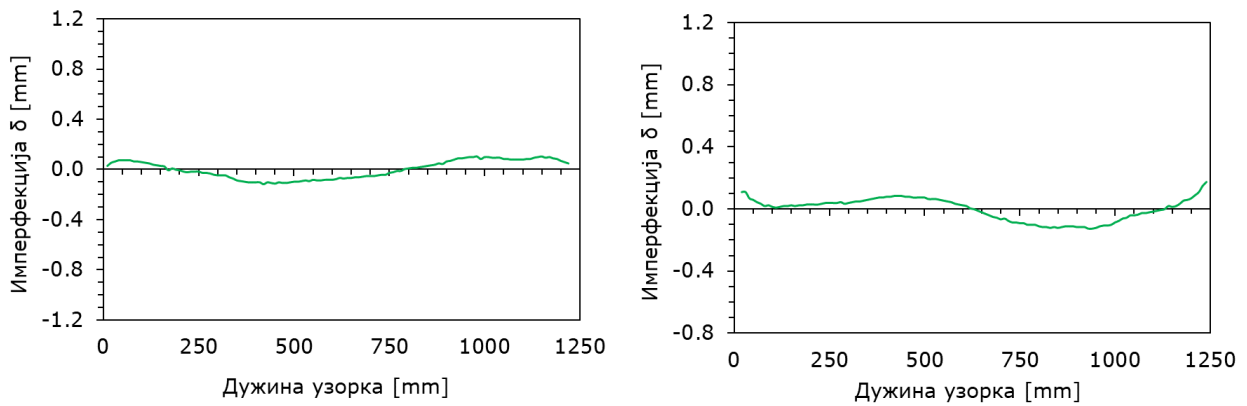
Слика 9.46. Имперфекција фланши у правцу јаче осе попречног пресека узорка *C150-2-e00-1*



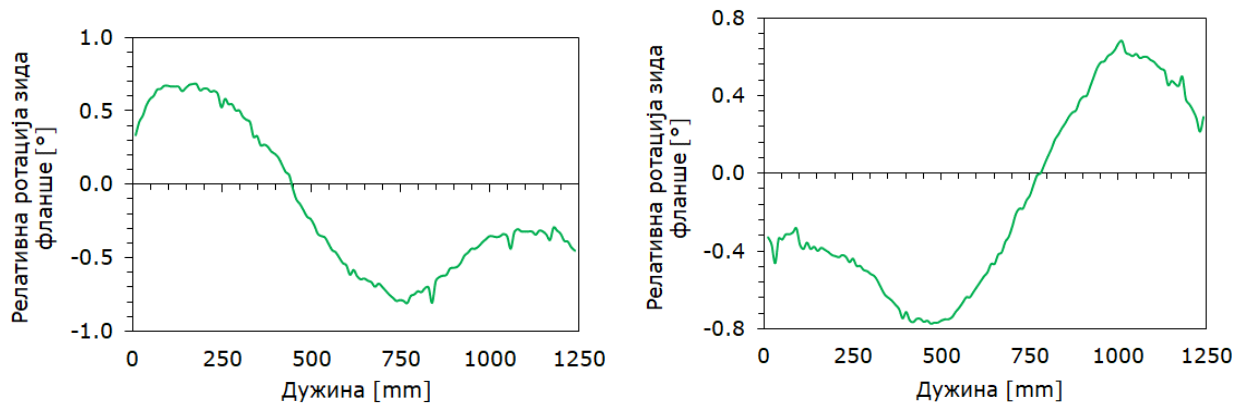
Слика 9.47. Релативне ротације фланши у односу на ребро узорка *C150-2-e00-1*



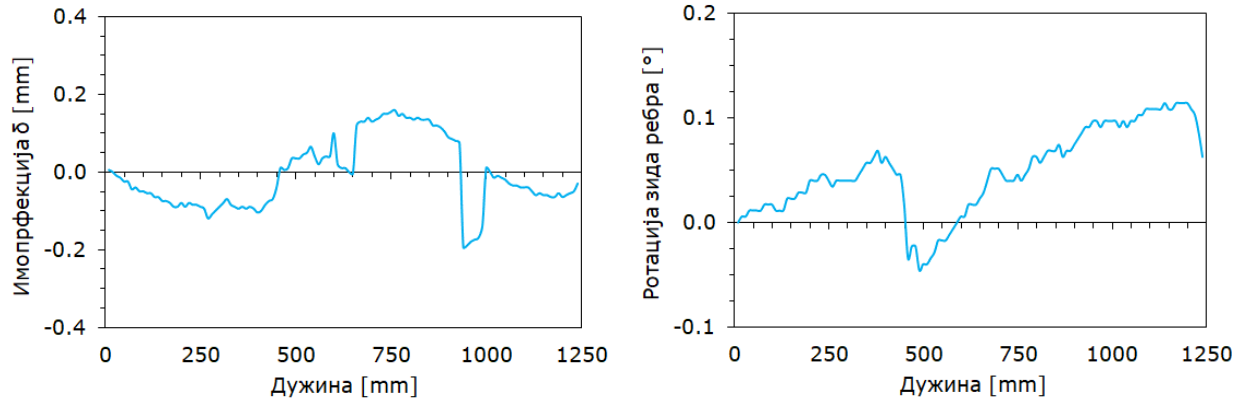
Слика 9.48. Имперфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека (лево) и ротација зида ребра (десно) узорка C150-2-e00-2



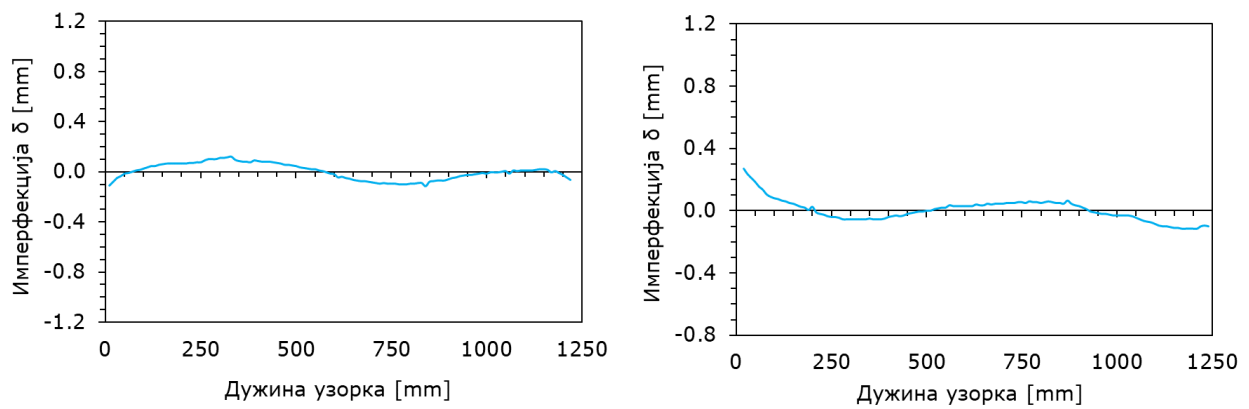
Слика 9.49. Имперфекција фланши у правцу јаче осе попречног пресека узорка C150-2-e00-2



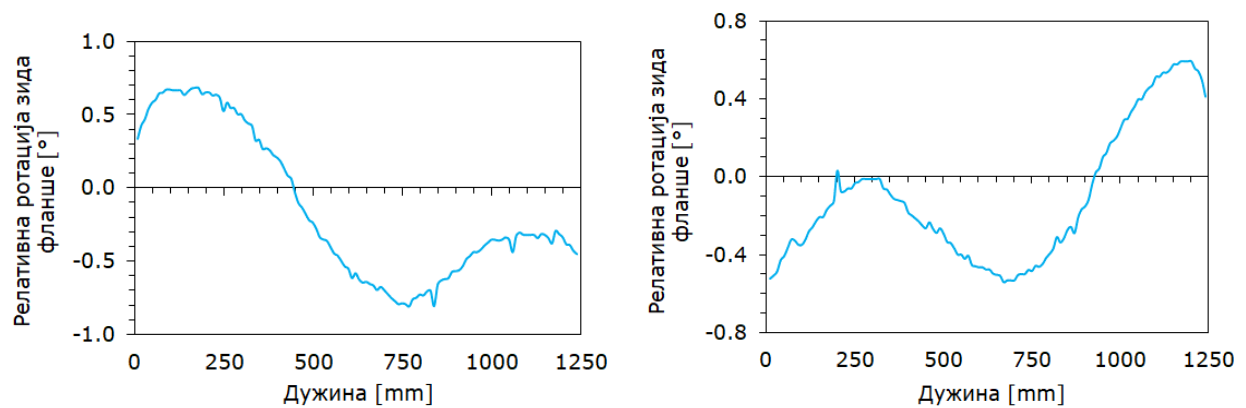
Слика 9.50. Релативне ротације фланши у односу на ребро узорка C150-2-e00-2



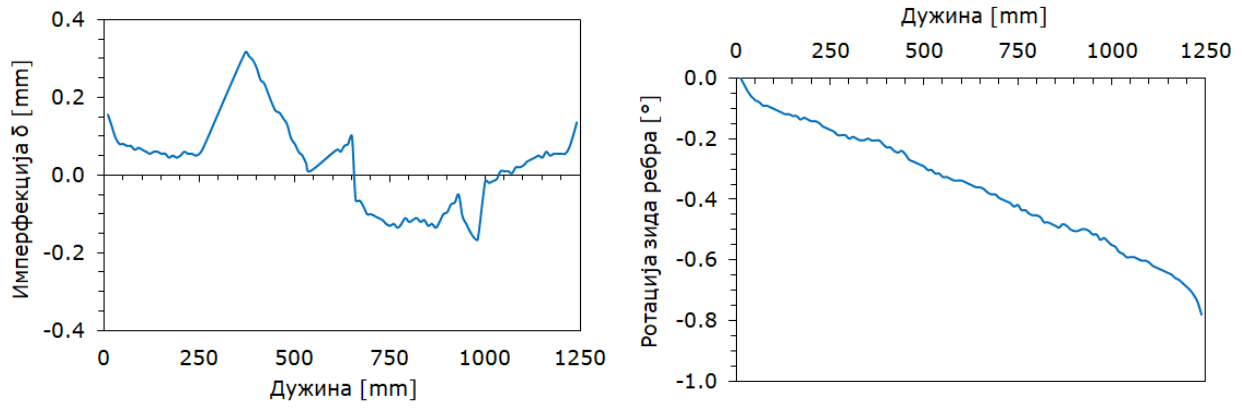
Слика 9.51. Импорфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека (лево) и ротација зида ребра (десно) узорка *C150-3-e00-1*



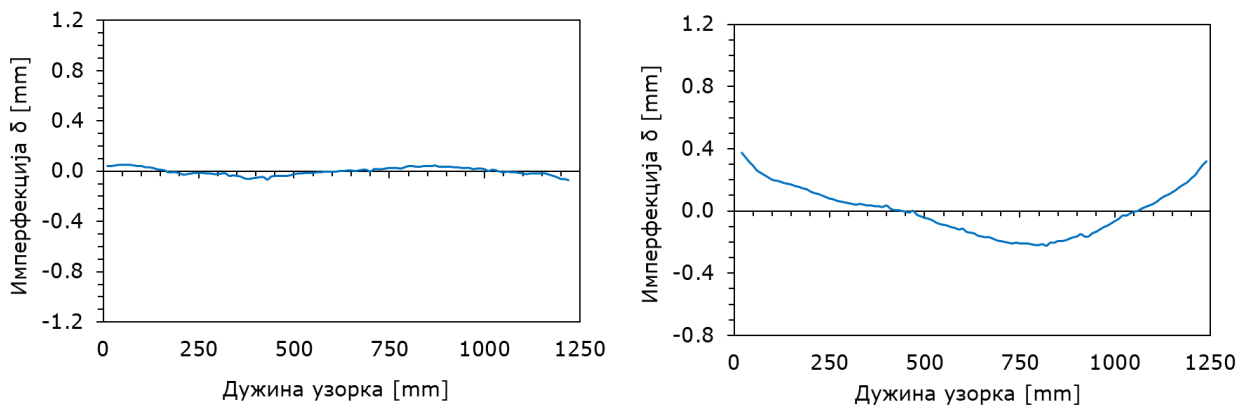
Слика 9.52. Импорфекција фланши у правцу јаче осе попречног пресека узорка *C150-3-e00-1*



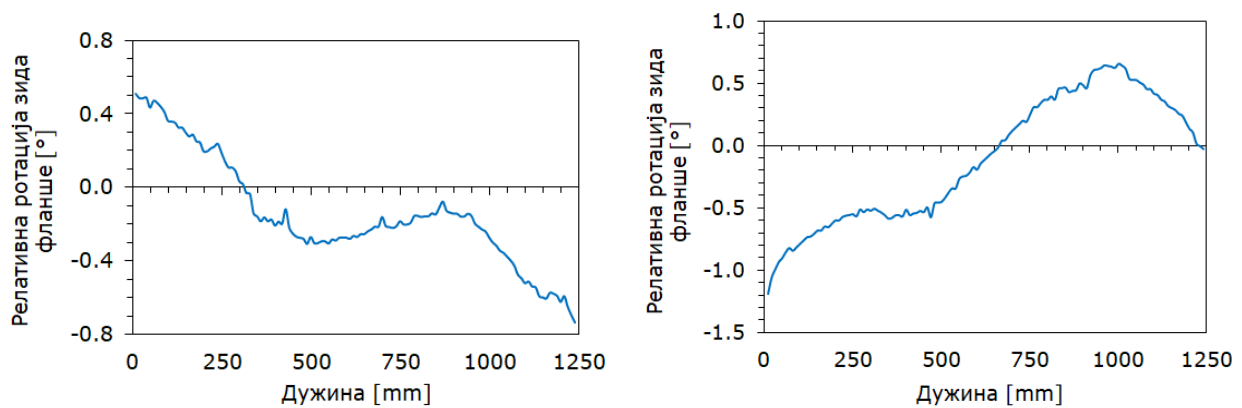
Слика 9.53. Релативне ротације фланши у односу на ребро узорка *C150-3-e00-1*



Слика 9.54. Имперфекција ребра у правцу слабије осе попречног пресека (лево) и ротација зида ребра (десно) узорка C150-3-e00-2

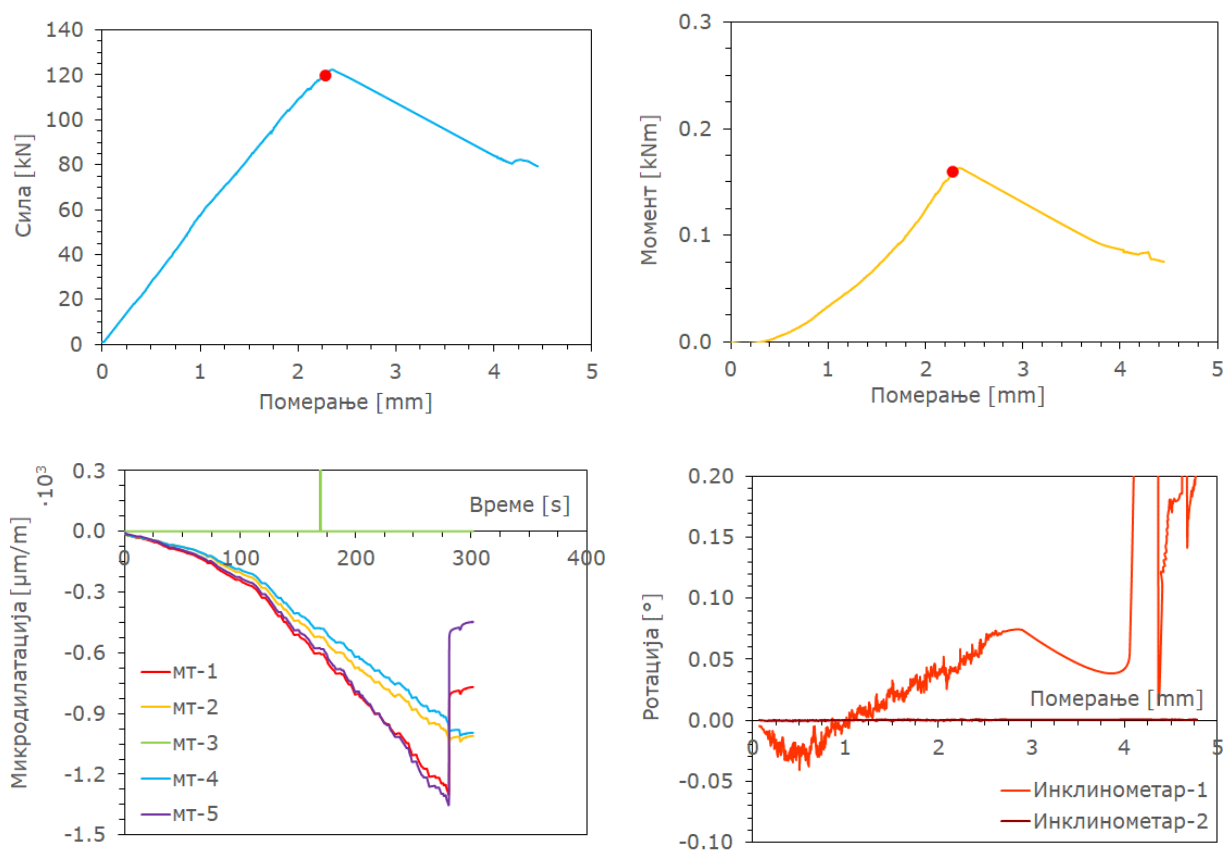


Слика 9.55. Имперфекција фланши у правцу јаче осе попречног пресека узорка C150-3-e00-2



Слика 9.56. Релативне ротације фланши у односу на ребро узорка C150-3-e00-2

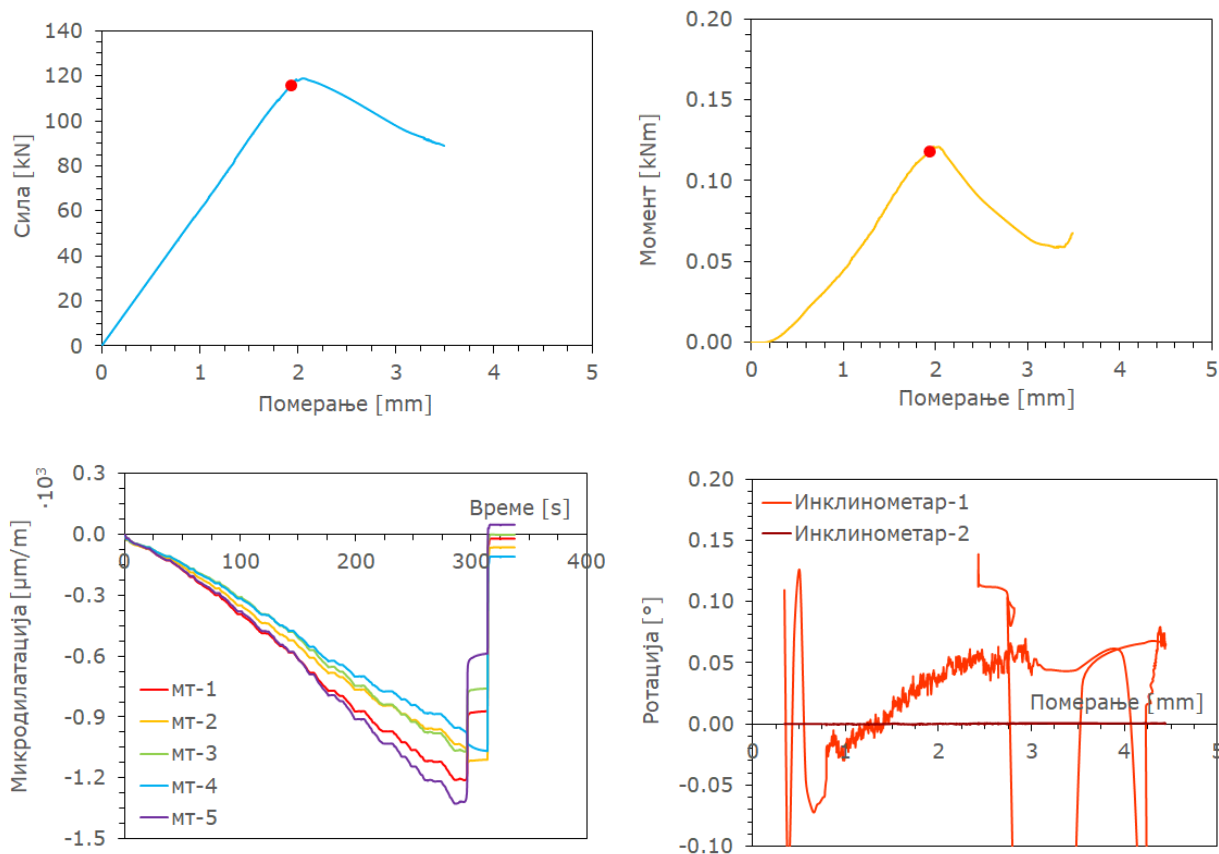
9.3. ПРИЛОГ В: РЕЗУЛТАТИ ТРЕЋЕ ФАЗЕ ЕКСПЕРИМЕНТА: ИСПИТИВАЊЕ ХЛАДНО-ОБЛИКОВАНИХ ЕЛЕМЕНАТА



Слика 9.57. Резултати испитивања узорка *C100-0-e00-1*



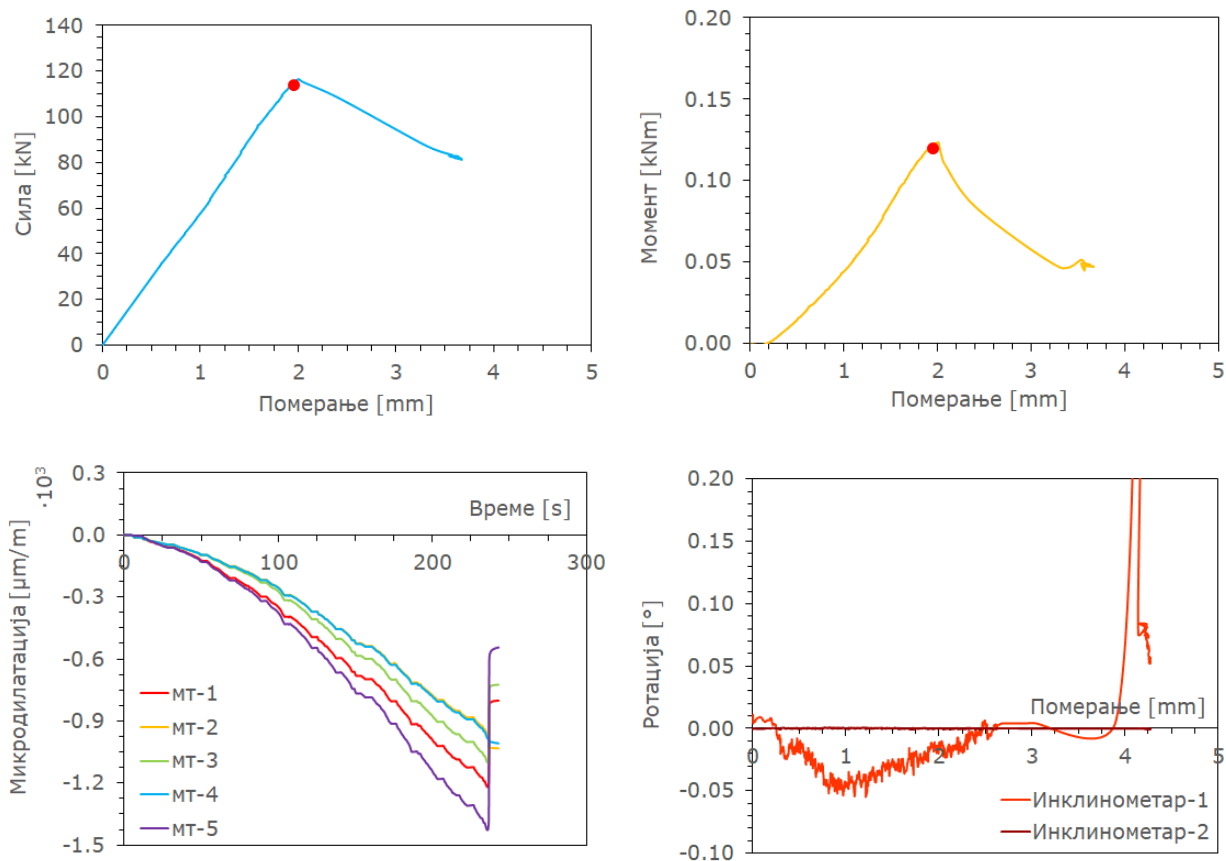
Слика 9.58. Испитивање узорка *C100-0-e00-1*



Слика 9.59. Резултати испитивања узорка C100-0-e00-2



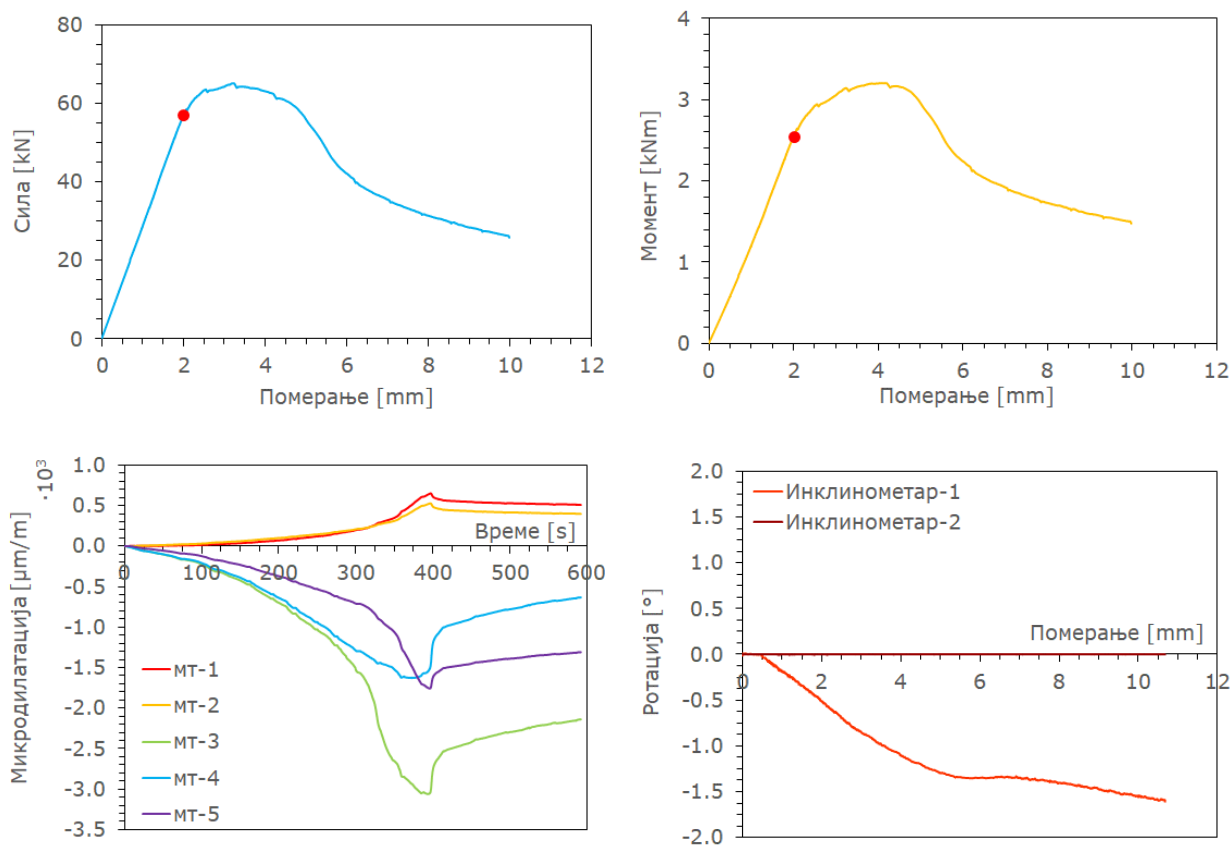
Слика 9.60. Испитивање узорка C100-0-e00-2



Слика 9.61. Резултати испитивања узорка C100-0-e00-3



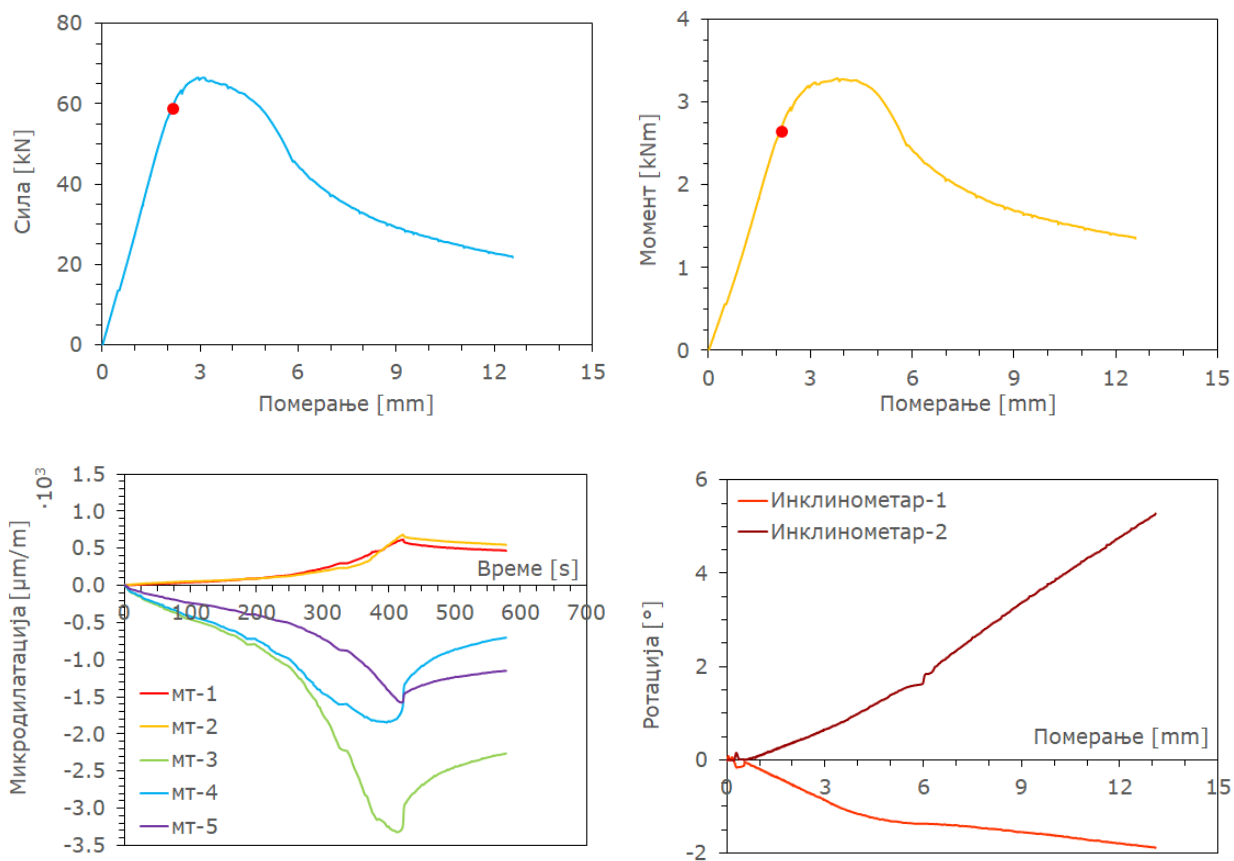
Слика 9.62. Испитивање узорка C100-0-e00-3



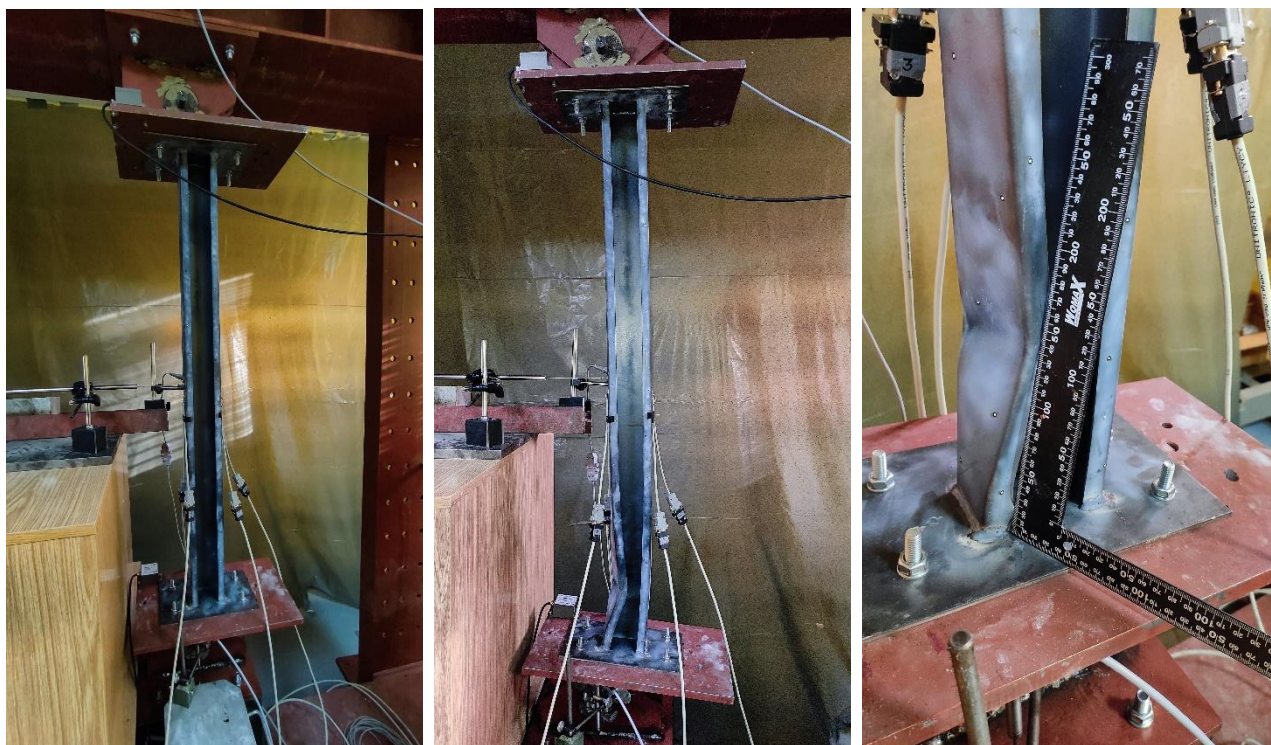
Слика 9.63. Резултати испитивања узорка C100-0-e40-1



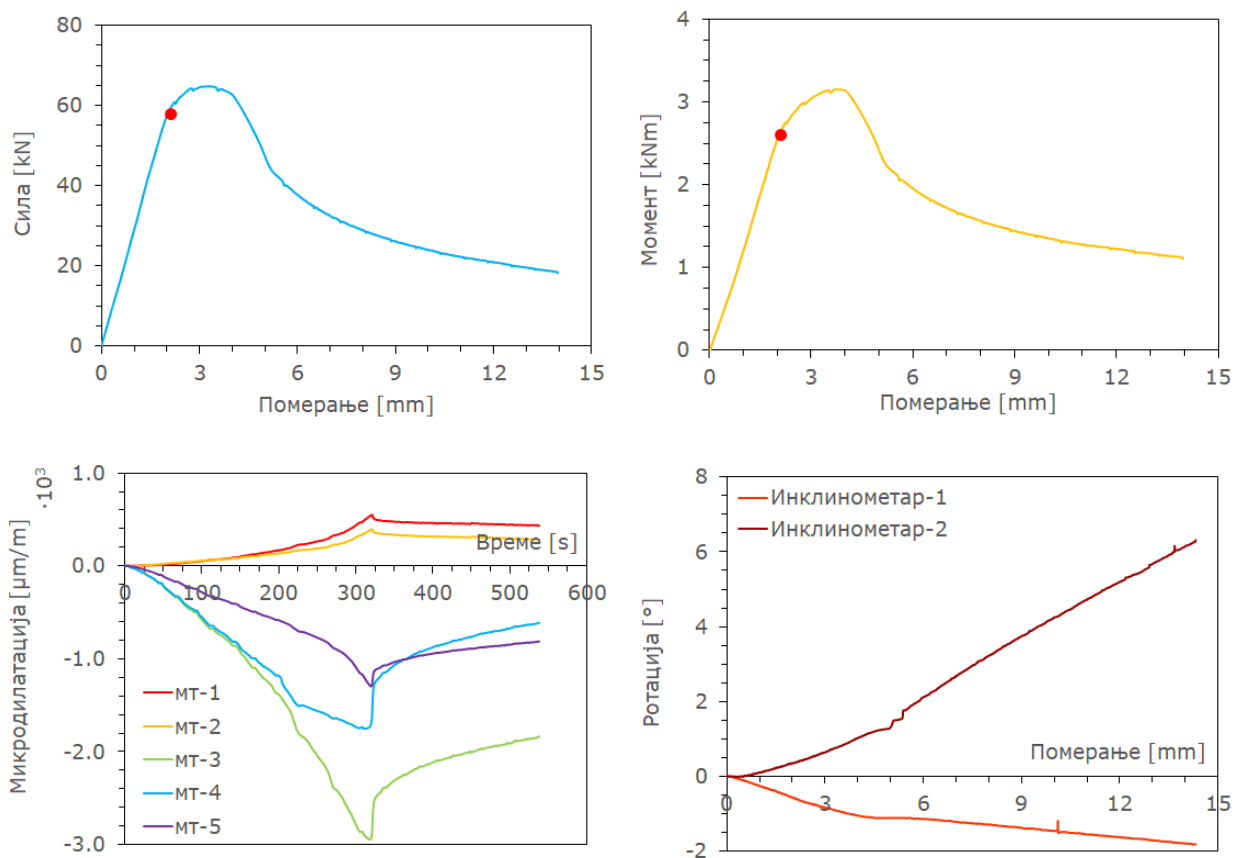
Слика 9.64. Испитивање узорка C100-0-e40-1



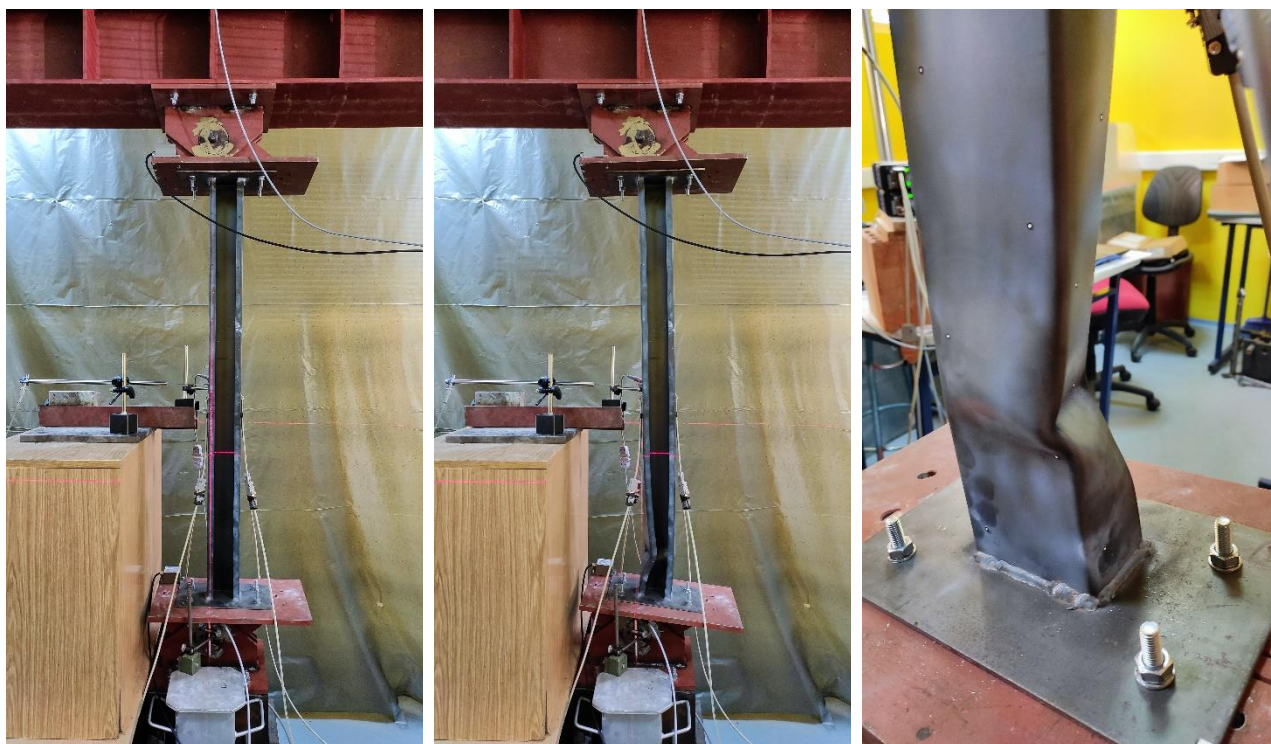
Слика 9.65. Резултати испитивања узорка C100-0-e40-2



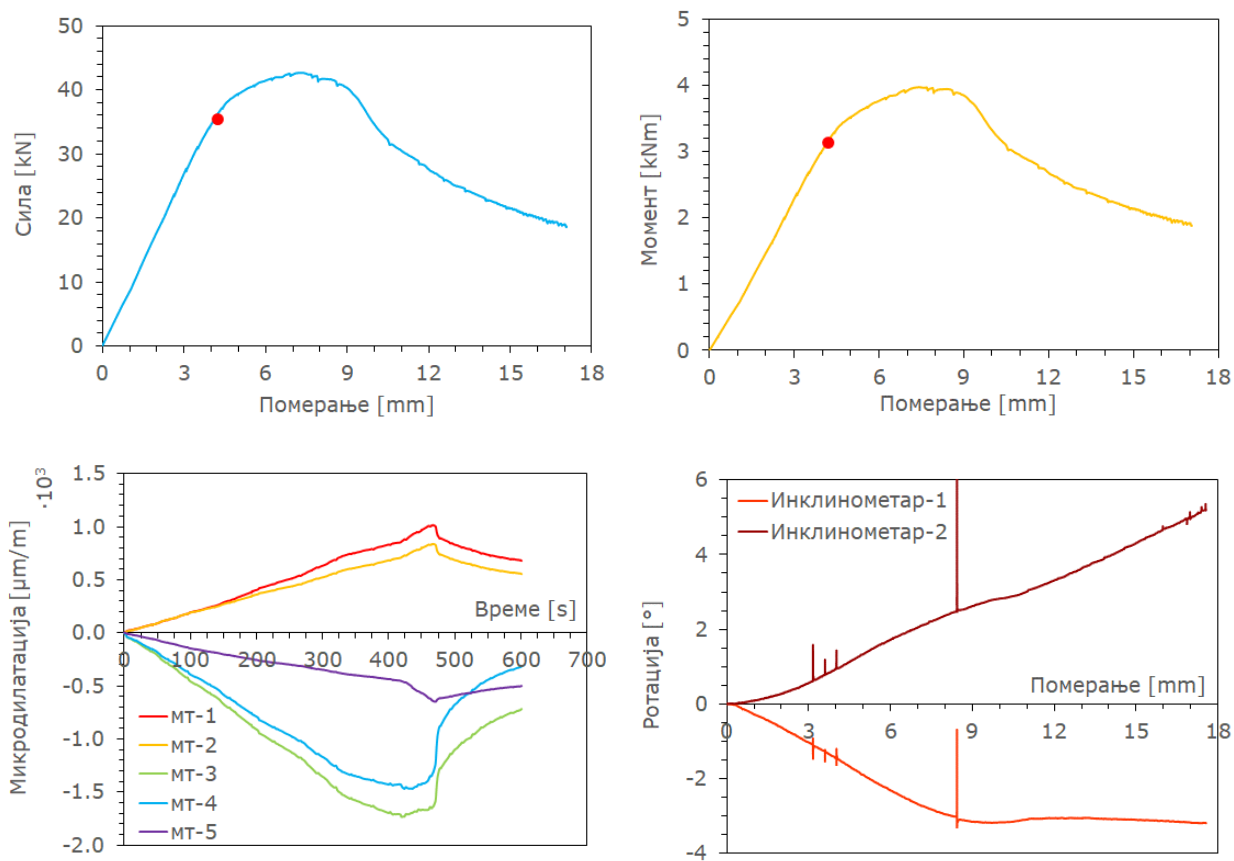
Слика 9.66. Испитивање узорка C100-0-e40-2



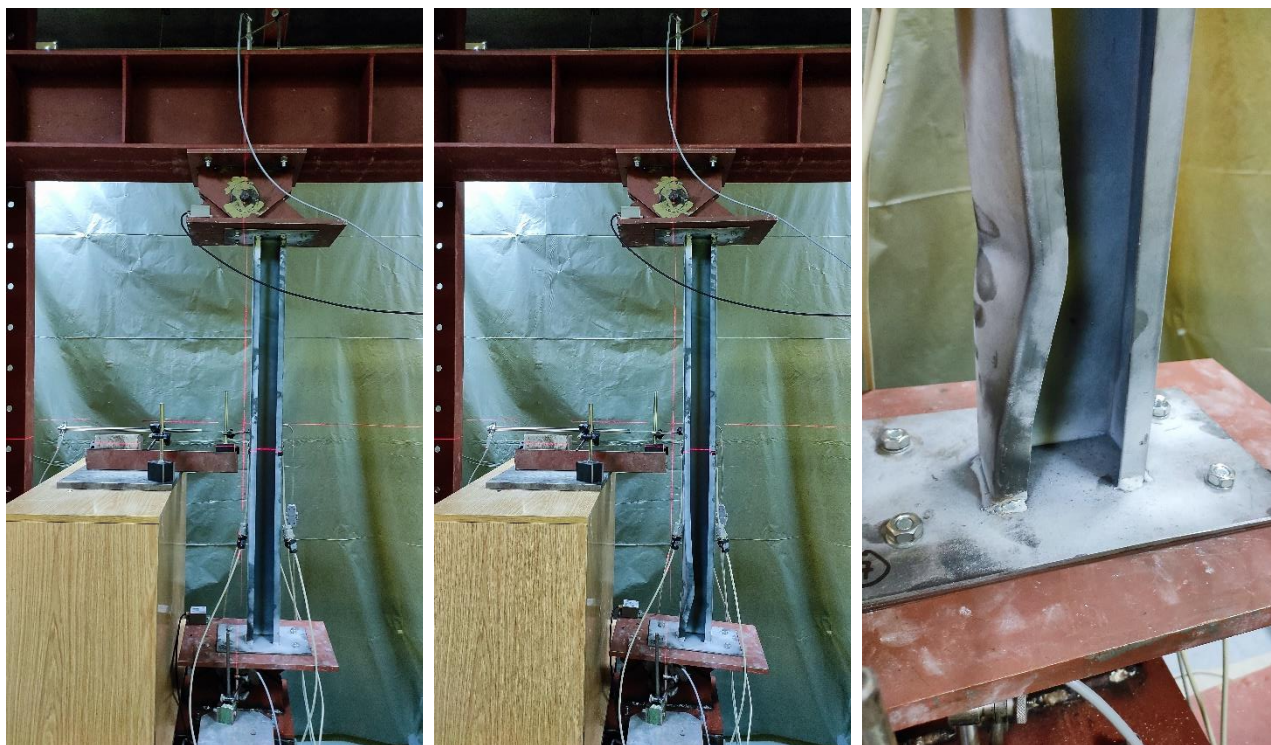
Слика 9.67. Резултати испитивања узорка C100-0-e40-3



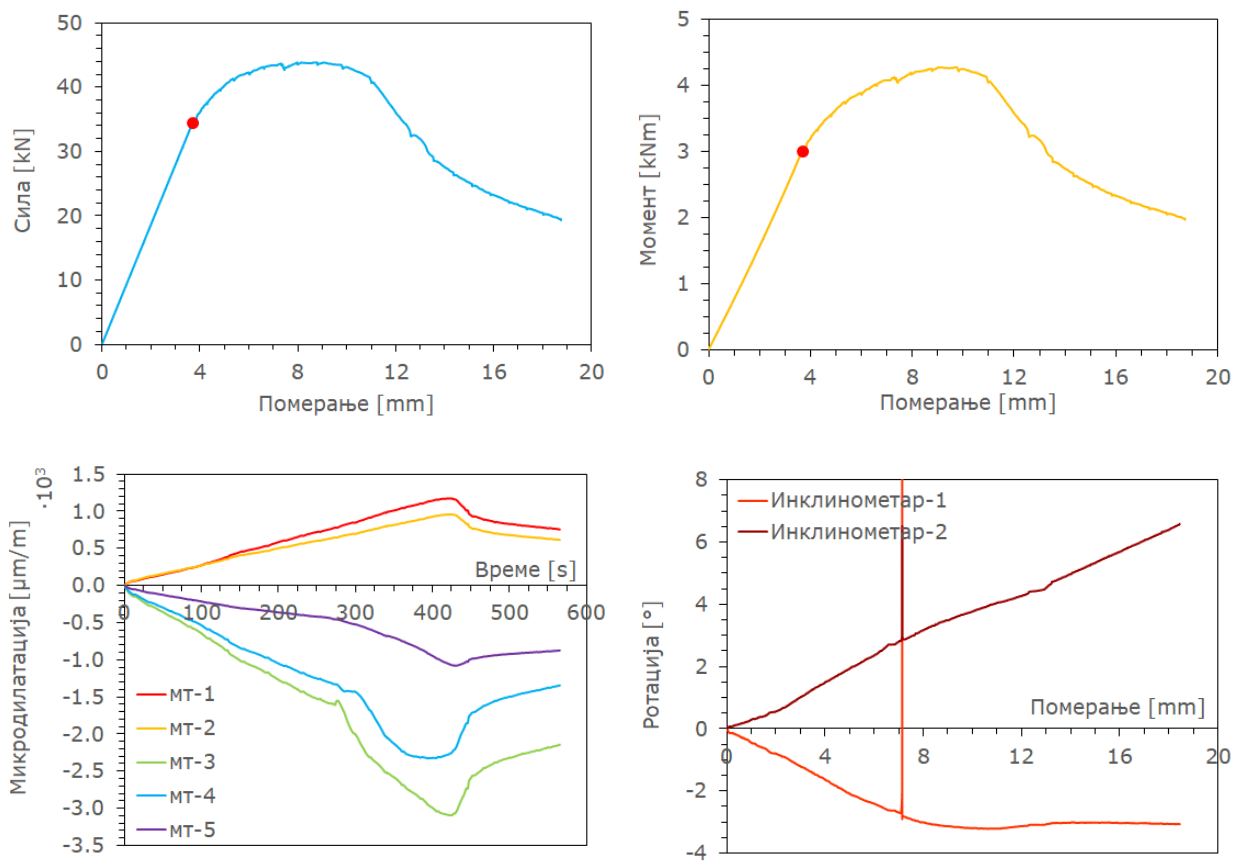
Слика 9.68. Испитивање узорка C100-0-e40-3



Слика 9.69. Резултати испитивања узорка C100-0-e80-1



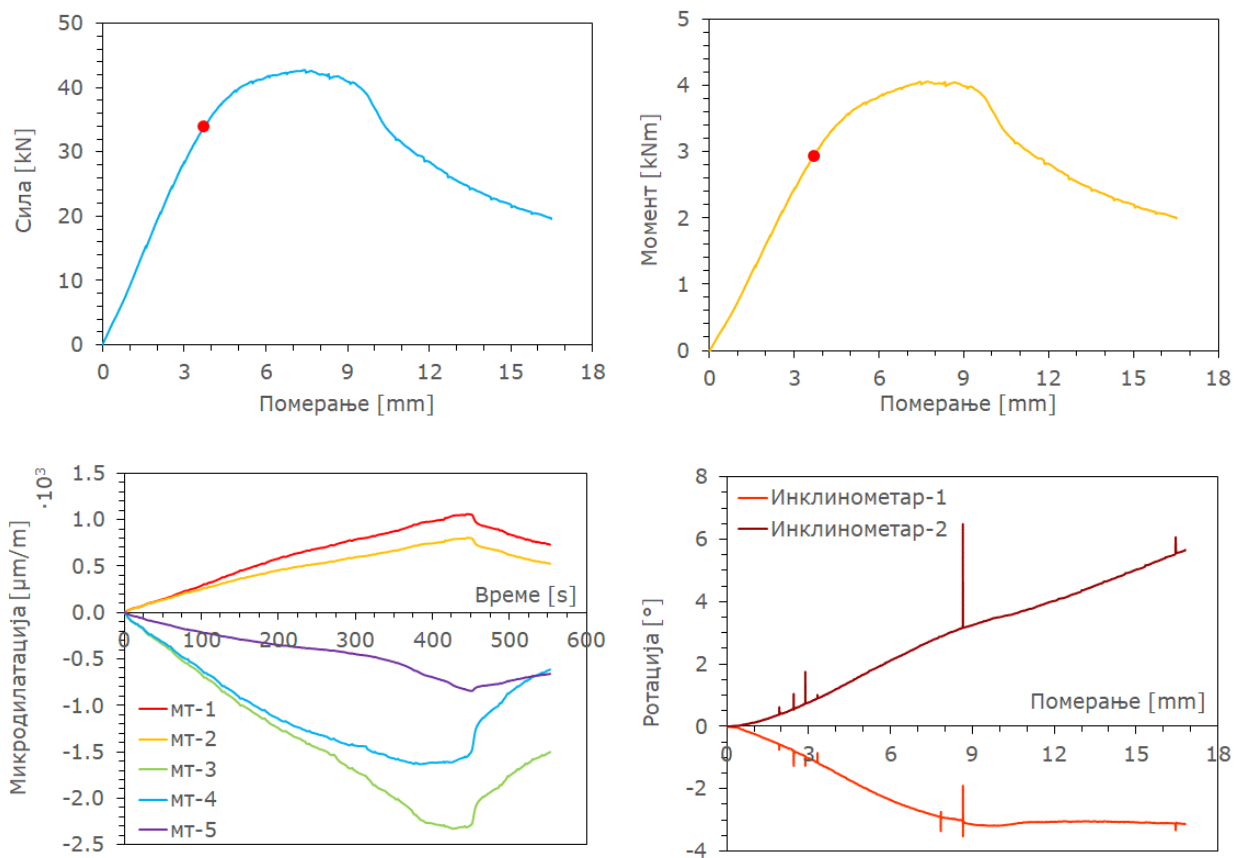
Слика 9.70. Испитивање узорка C100-0-e80-1



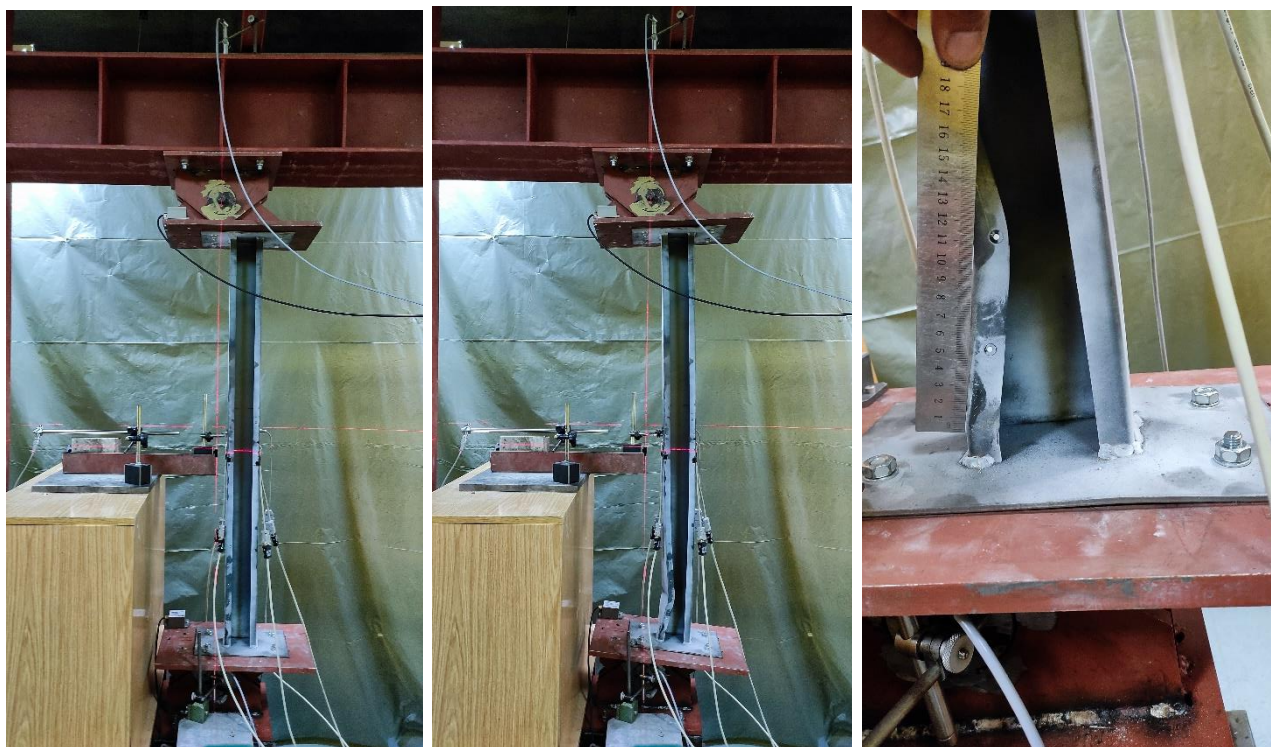
Слика 9.71. Резултати испитивања узорка C100-0-e80-2



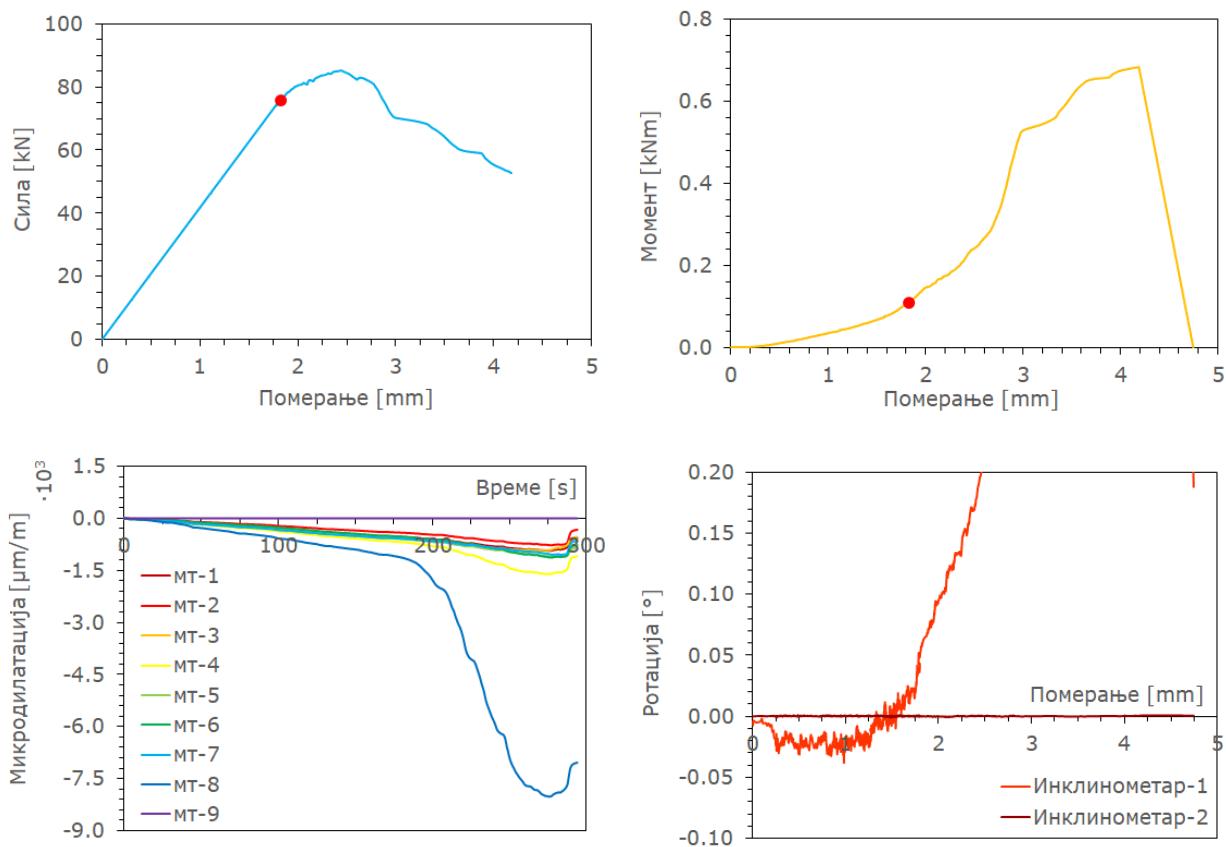
Слика 9.72. Испитивање узорка C100-0-e80-2



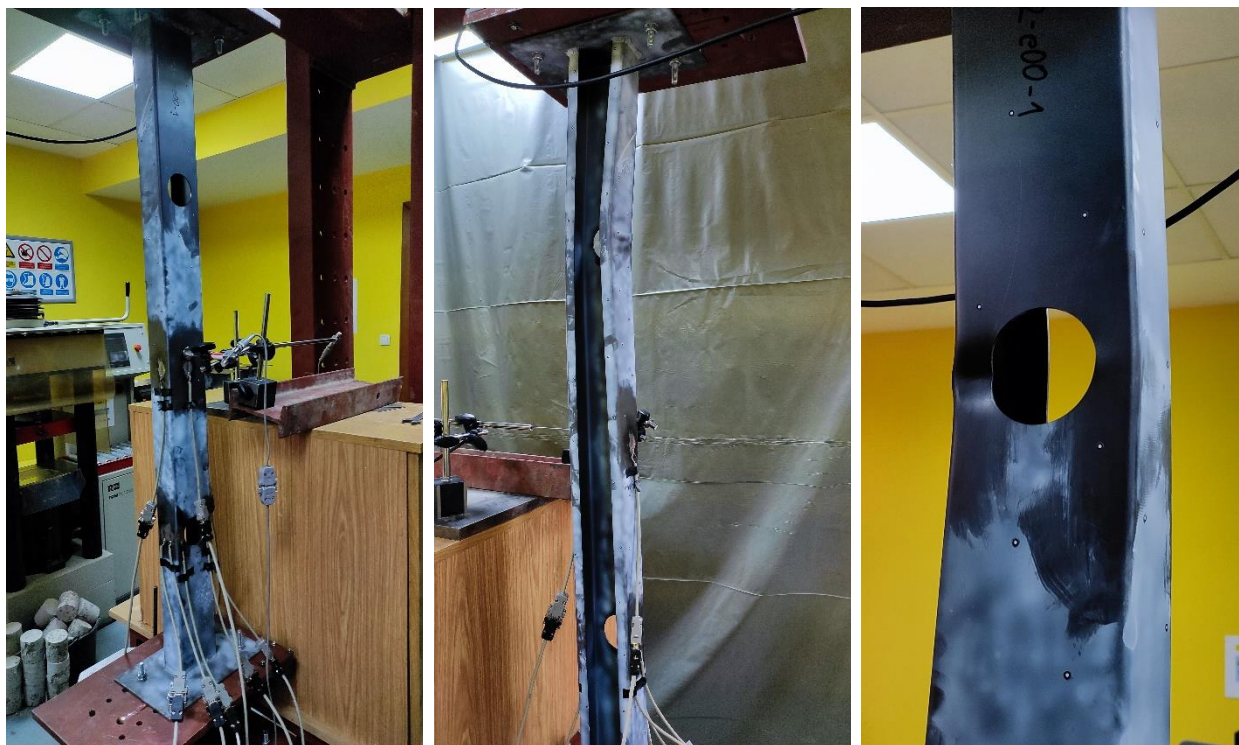
Слика 9.73. Резултати испитивања узорка C100-0-e80-3



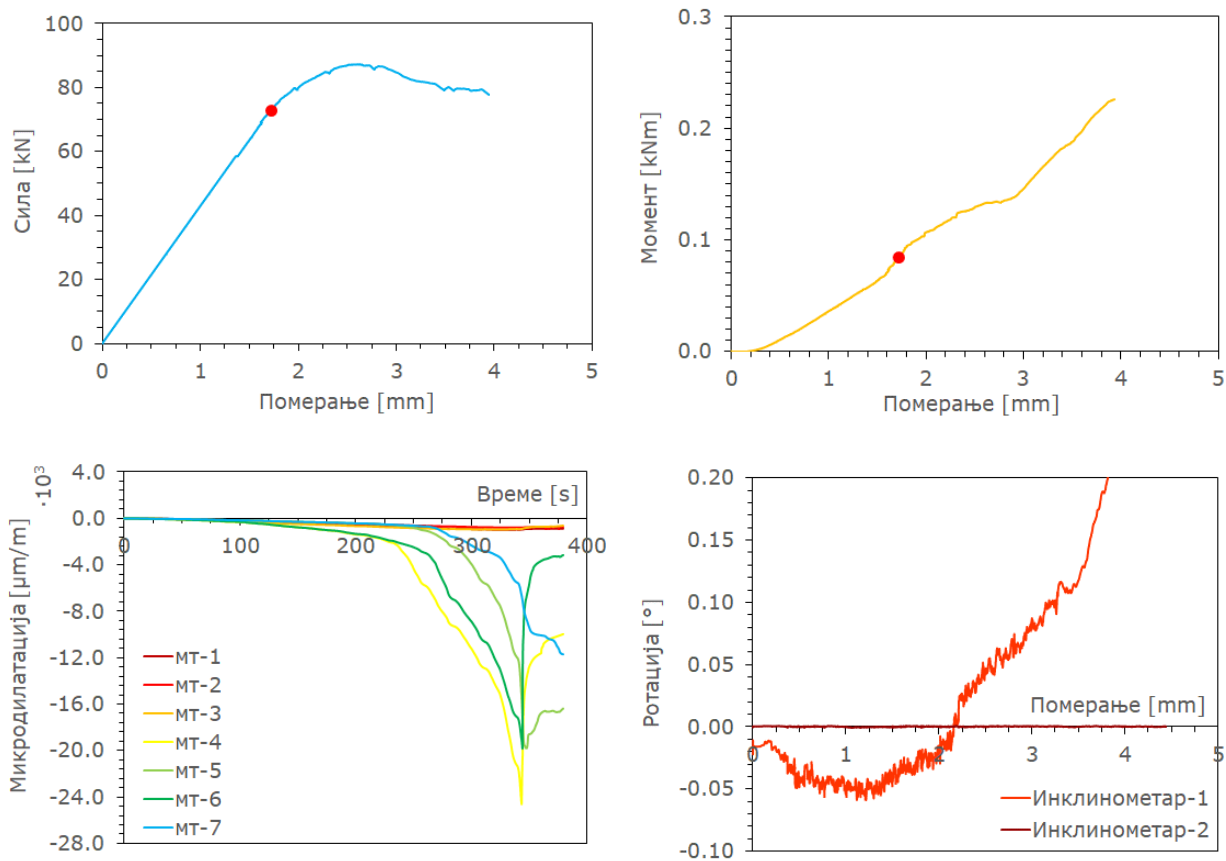
Слика 9.74. Испитивање узорка C100-0-e80-3



Слика 9.75. Резултати испитивања узорка C100-2-e00-1



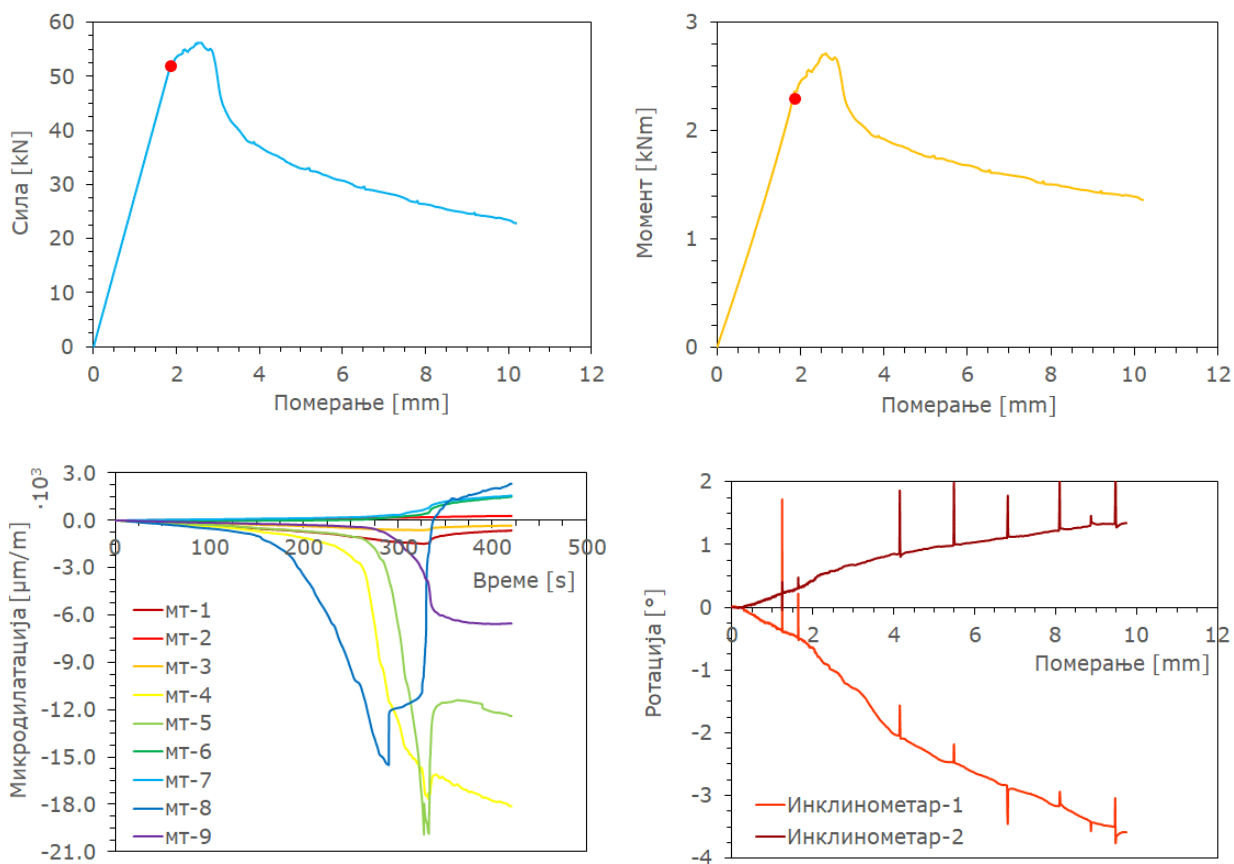
Слика 9.76. Испитивање узорка C100-2-e00-1



Слика 9.77. Резултати испитивања узорка C100-2-e00-2



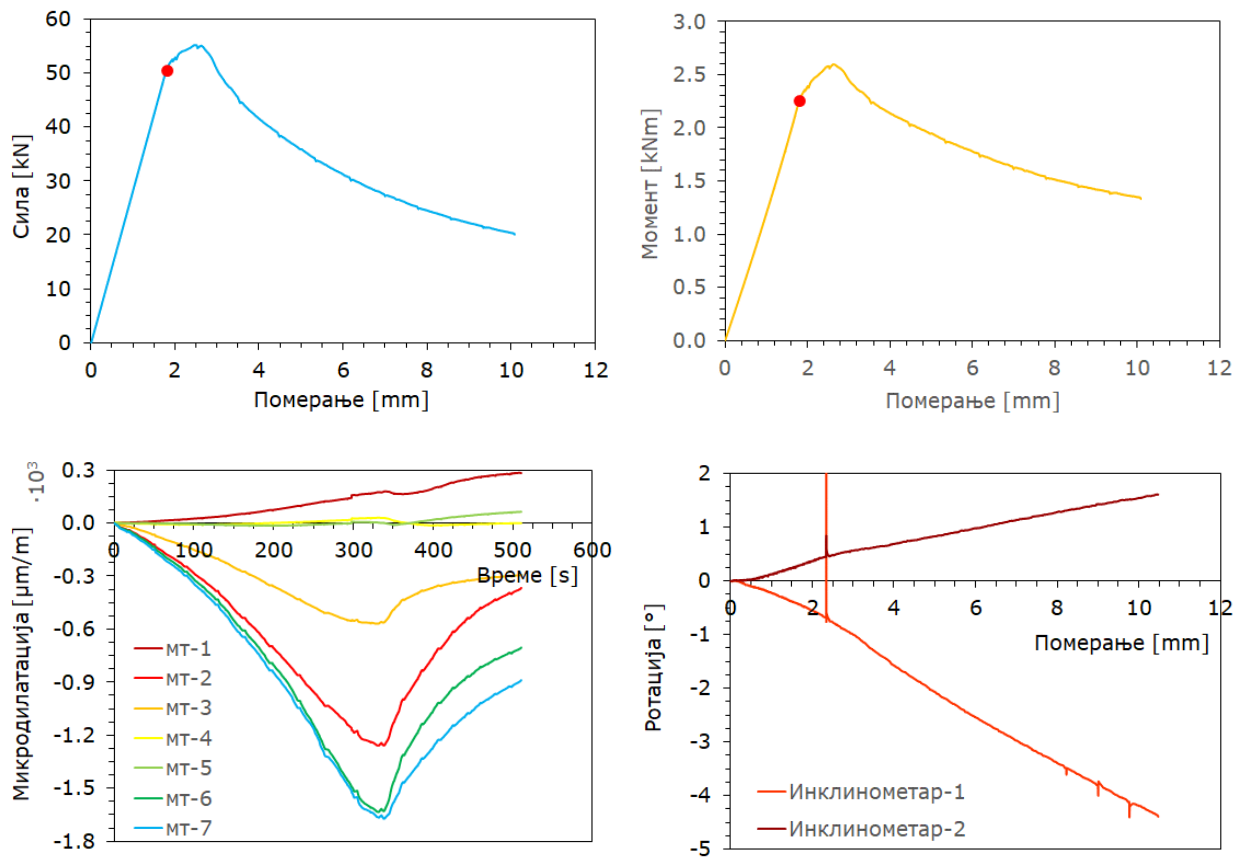
Слика 9.78. Испитивање узорка C100-2-e00-2



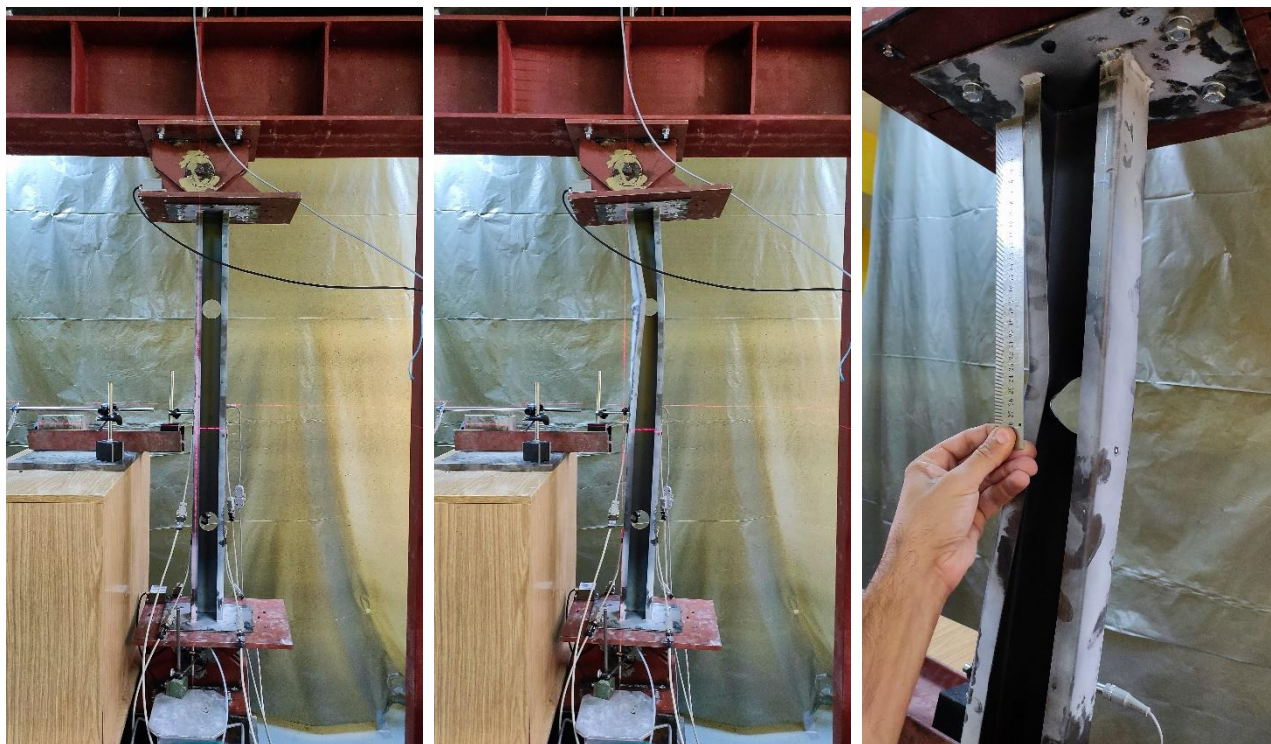
Слика 9.79. Резултати испитивања узорка C100-2-e40-1



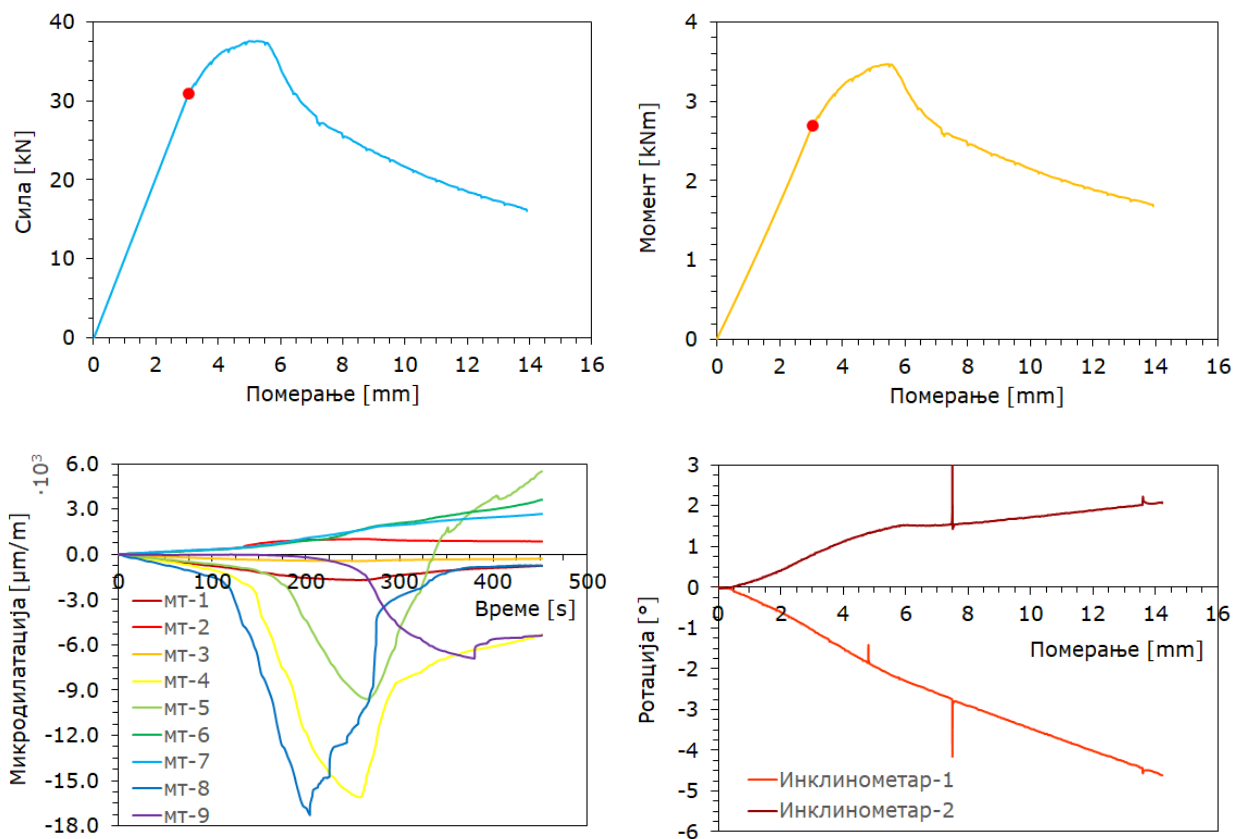
Слика 9.80. Испитивање узорка C100-2-e40-1



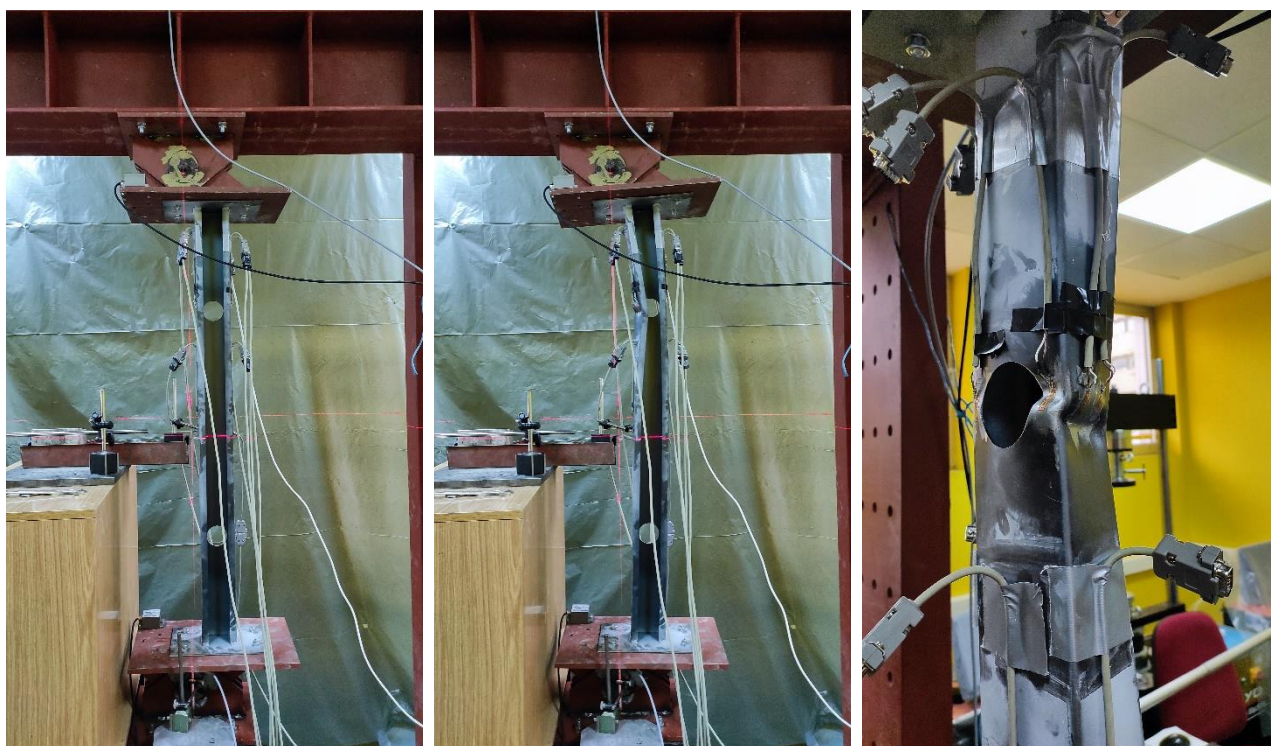
Слика 9.81. Резултати испитивања узорка C100-2-e40-2



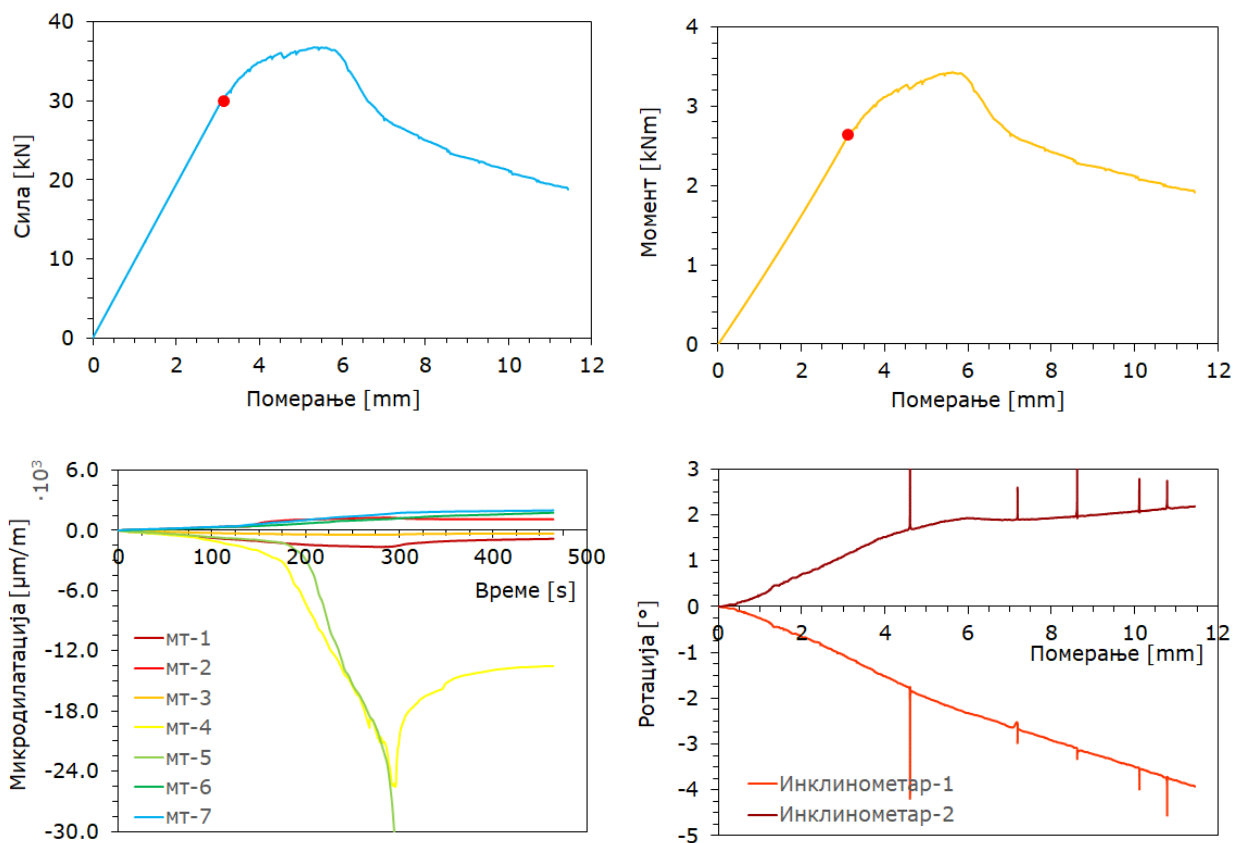
Слика 9.82. Испитивање узорка C100-2-e40-2



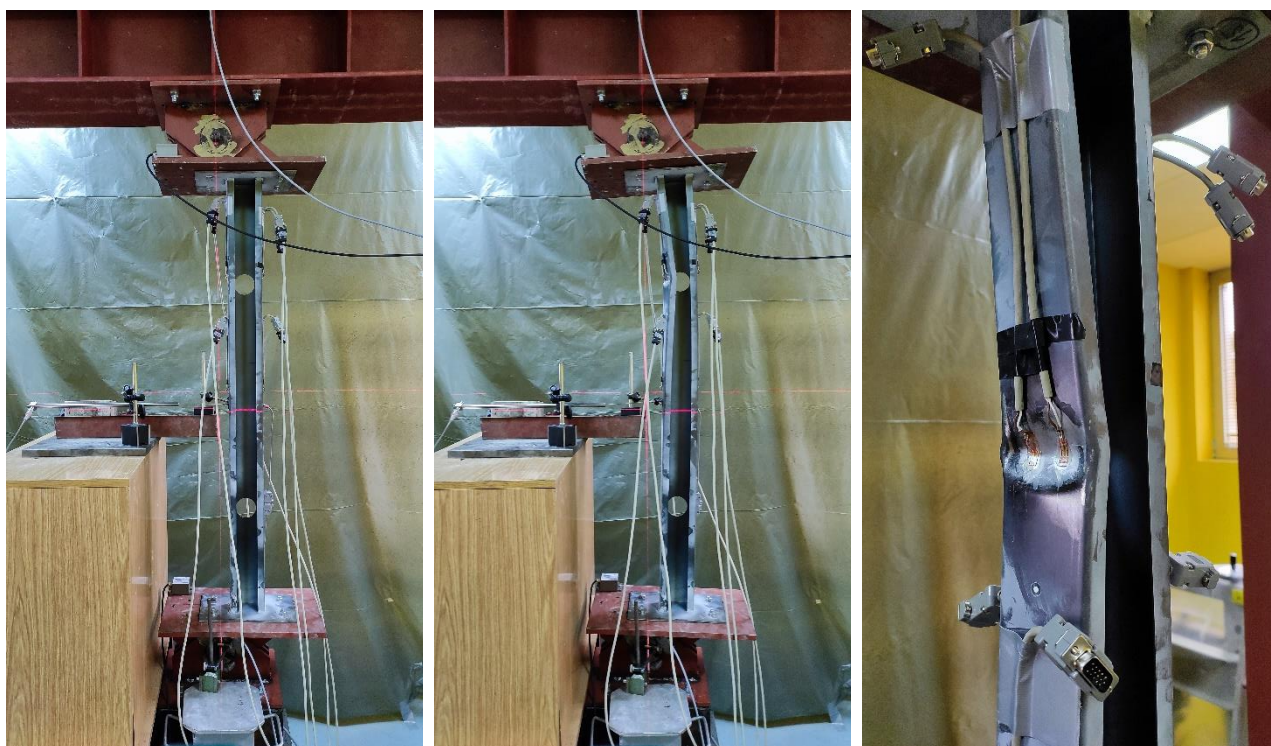
Слика 9.83. Резултати испитивања узорка C100-2-e80-1



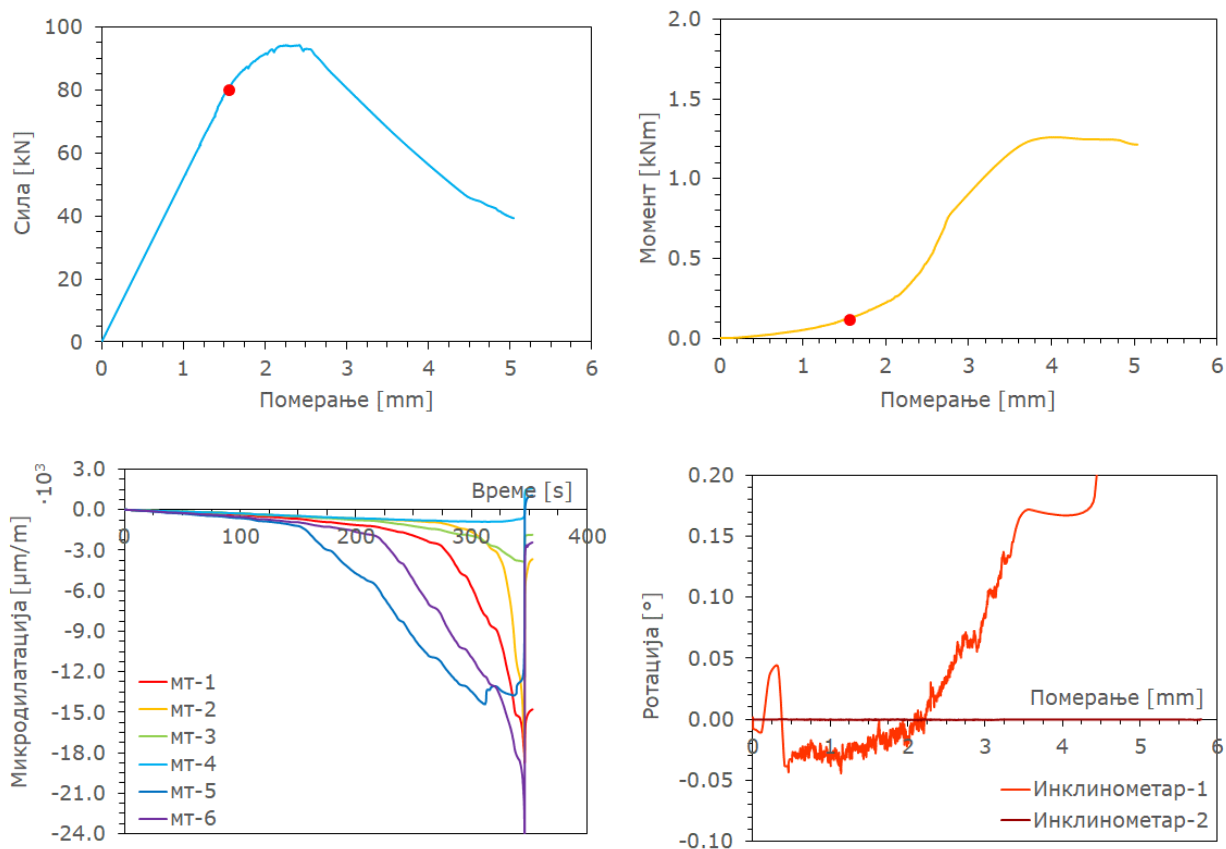
Слика 9.84. Испитивање узорка C100-2-e80-1



Слика 9.85. Резултати испитивања узорка C100-2-e80-2



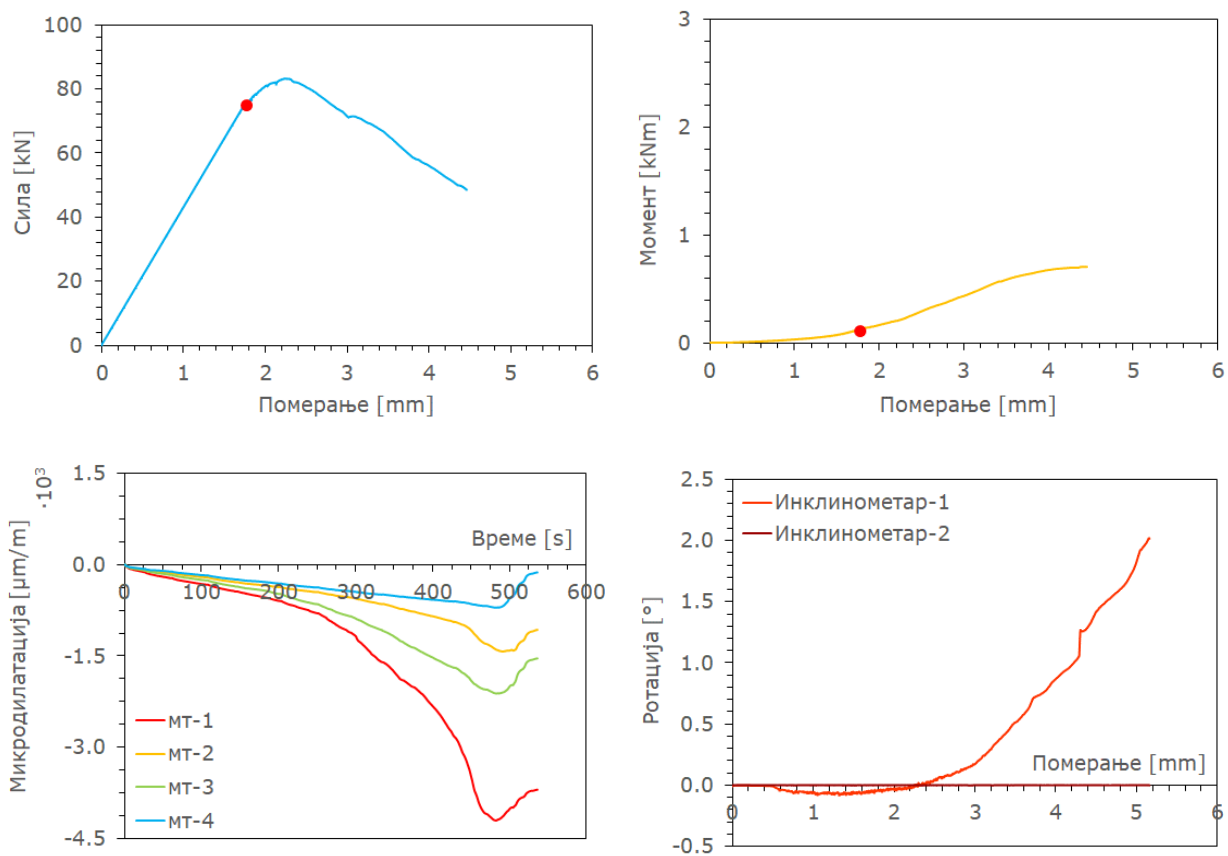
Слика 9.86. Испитивање узорка C100-2-e80-2



Слика 9.87. Резултати испитивања узорка C100-3-e00-1



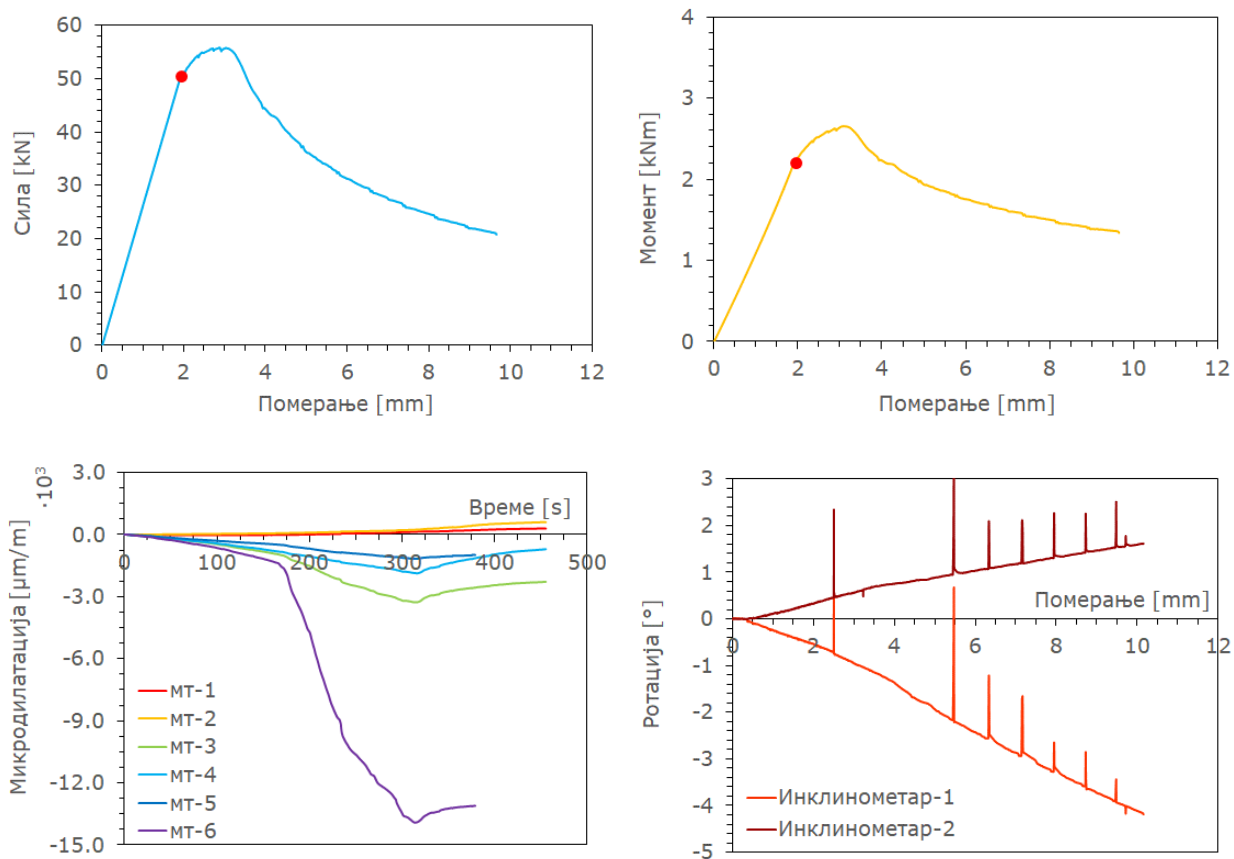
Слика 9.88. Испитивање узорка C100-3-e00-1



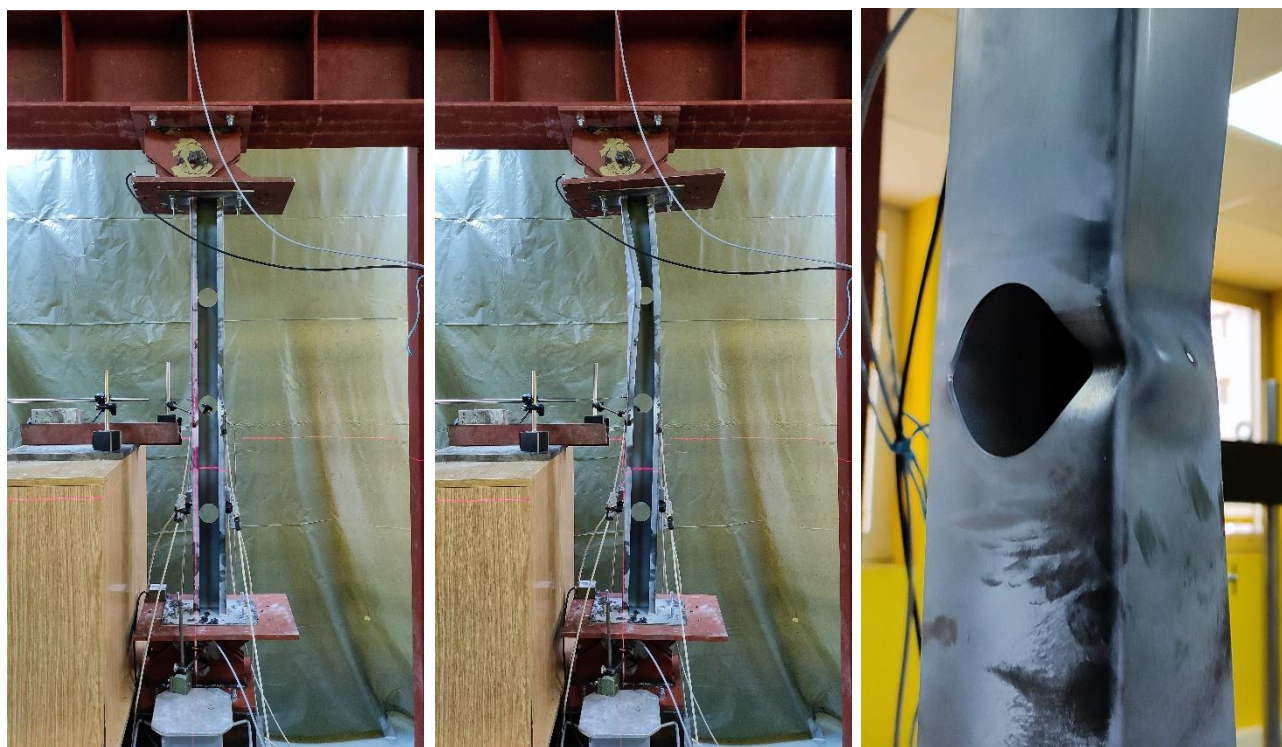
Слика 9.89. Резултати испитивања узорка C100-3-e00-2



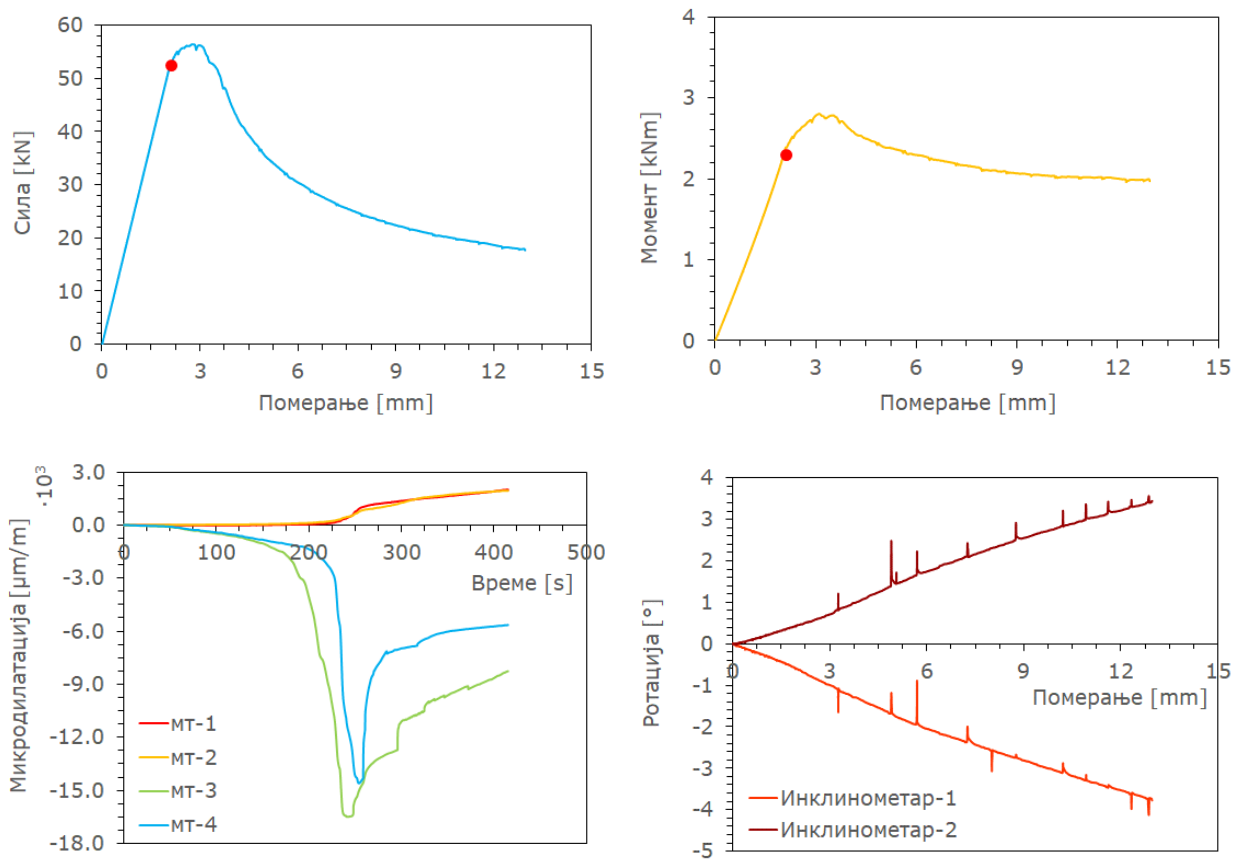
Слика 9.90. Испитивање узорка C100-3-e00-2



Слика 9.91. Резултати испитивања узорка C100-3-e40-1



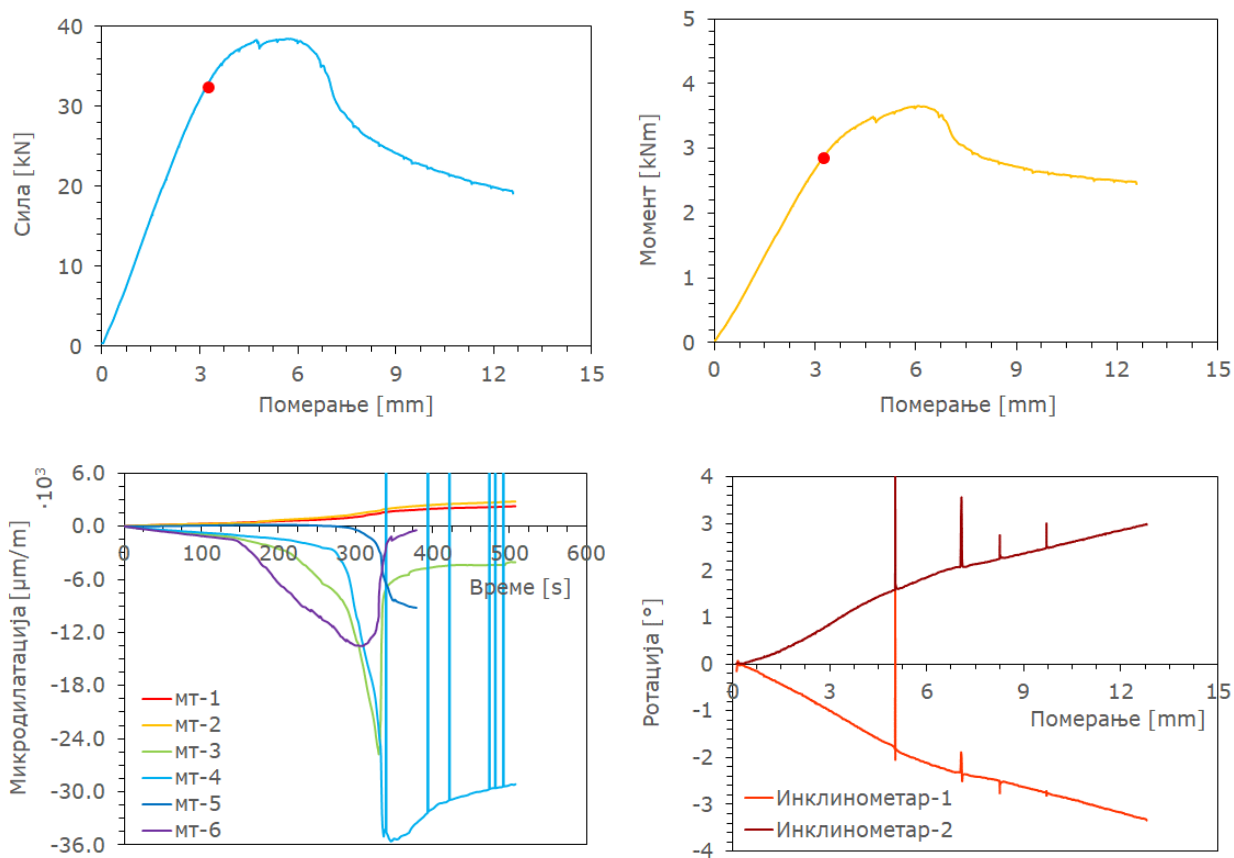
Слика 9.92. Испитивање узорка C100-3-e40-1



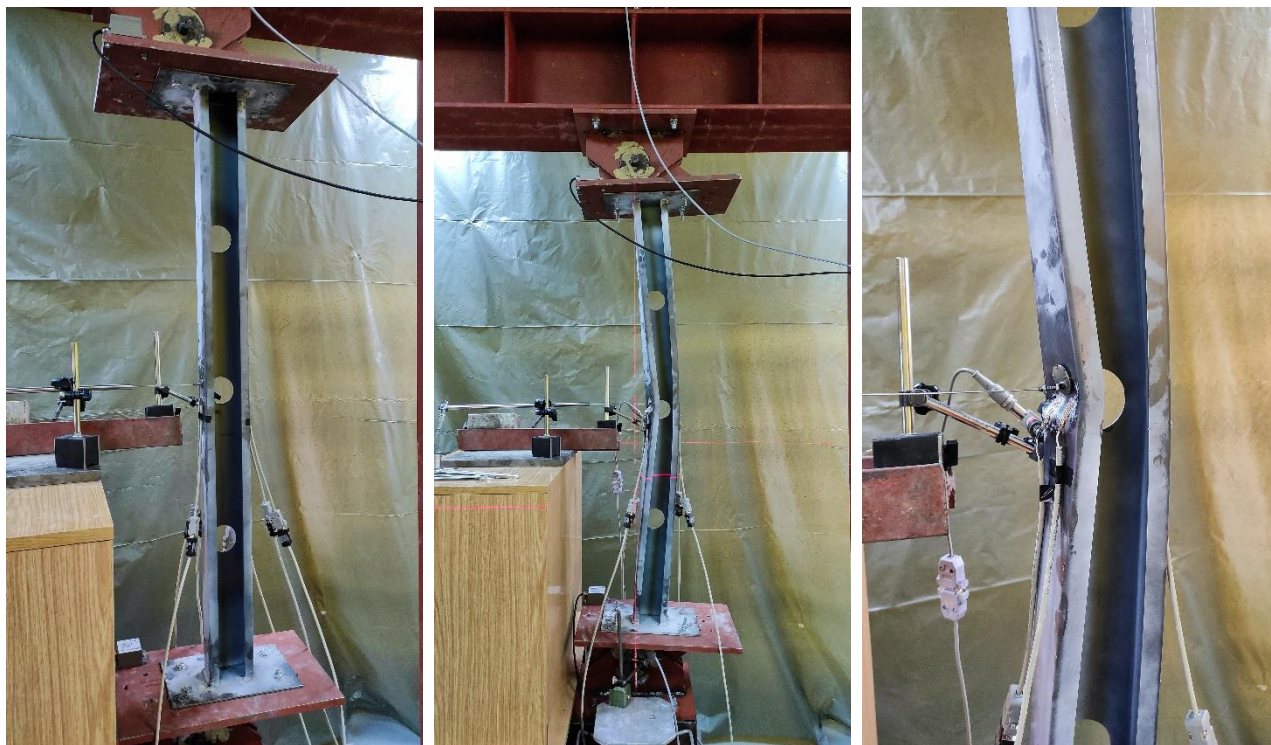
Слика 9.93. Резултати испитивања узорка C100-3-e40-2



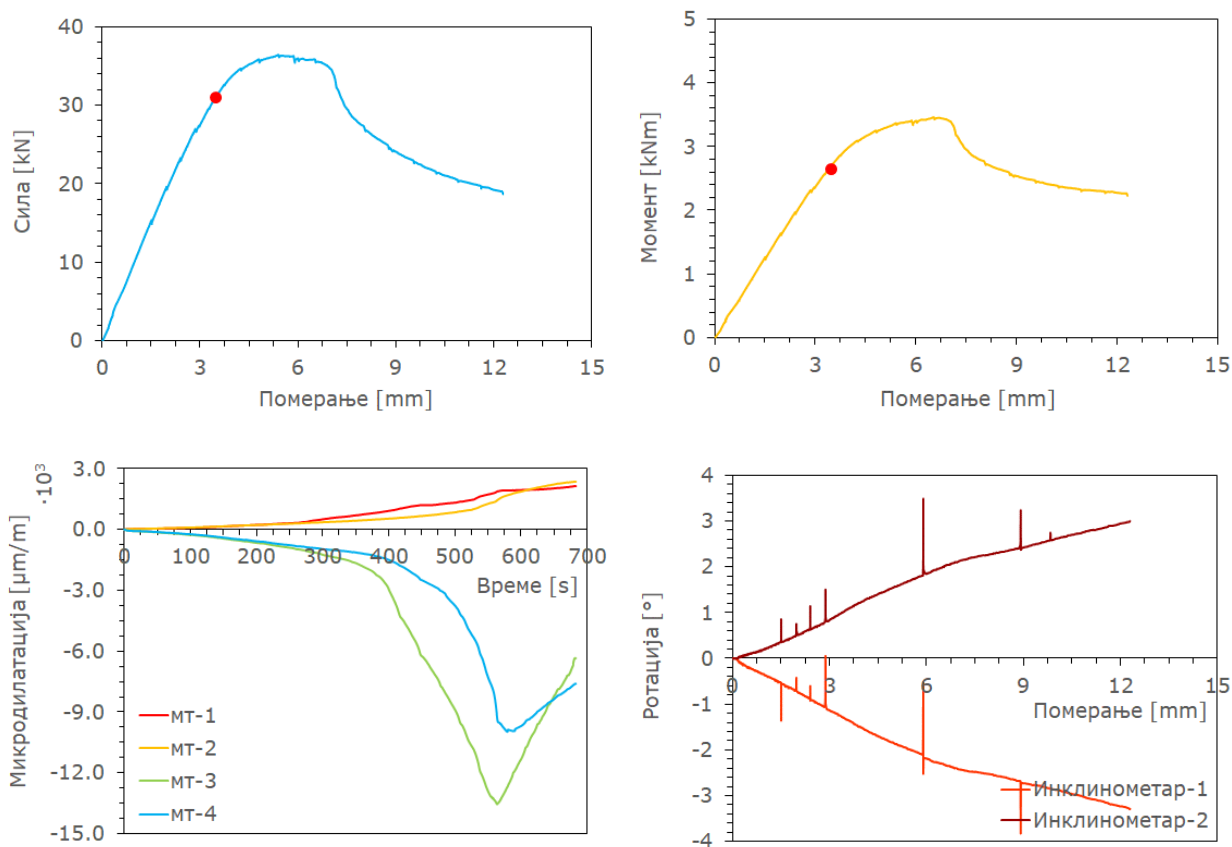
Слика 9.94. Испитивање узорка C100-3-e40-2



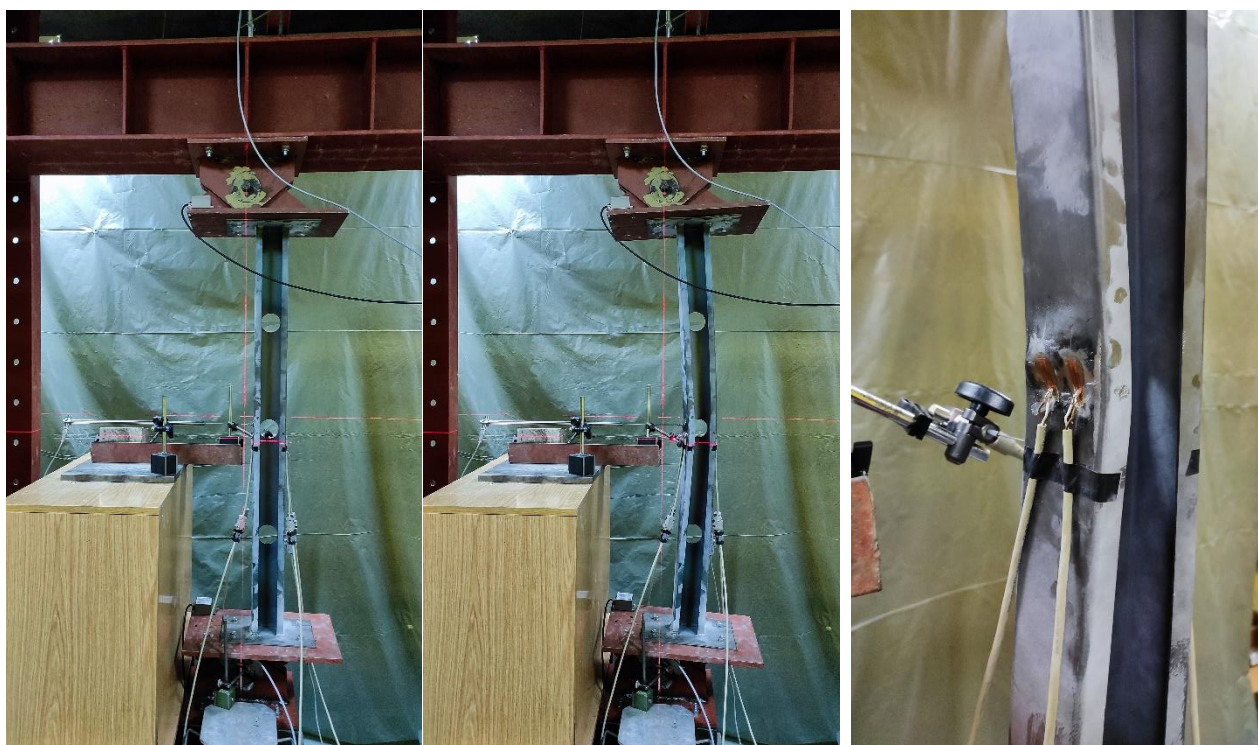
Слика 9.95. Резултати испитивања узорка C100-3-e80-1



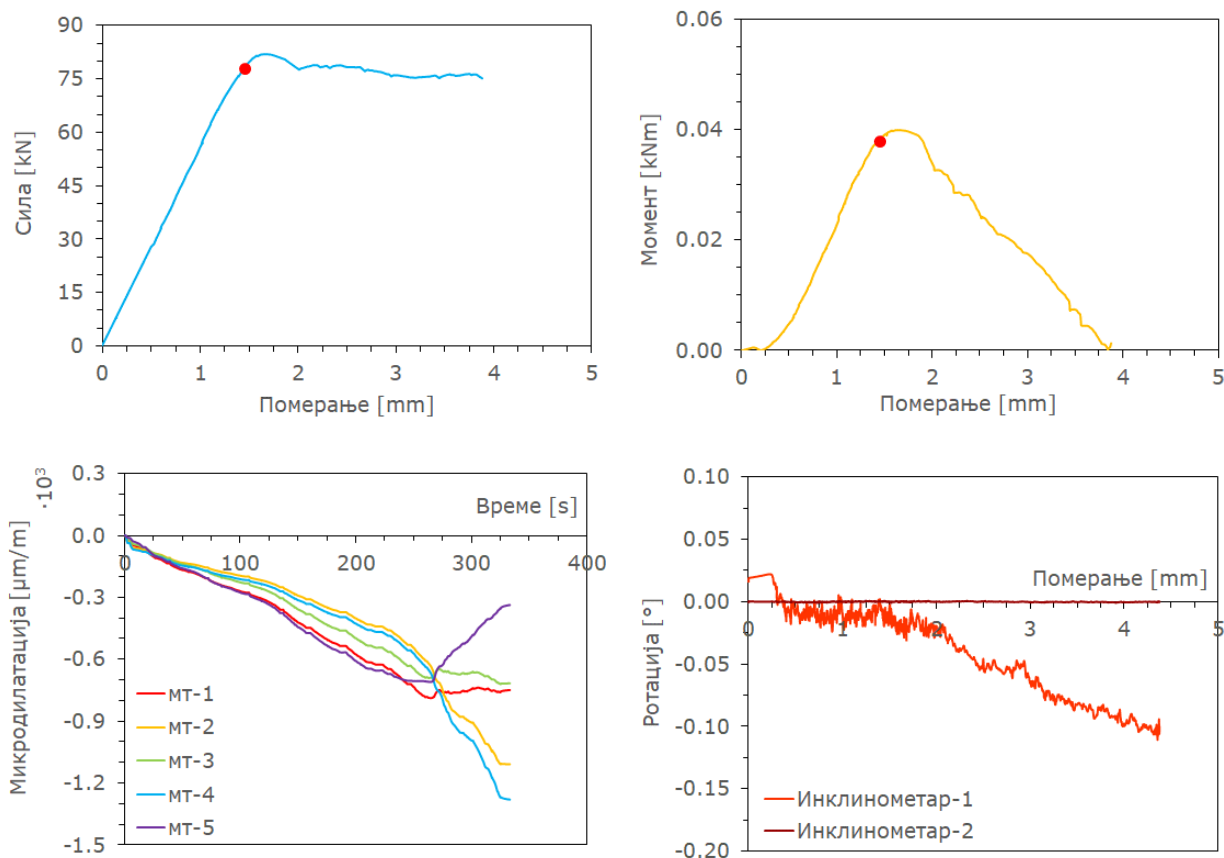
Слика 9.96. Испитивање узорка C100-3-e80-1



Слика 9.97. Резултати испитивања узорка C100-3-e80-2



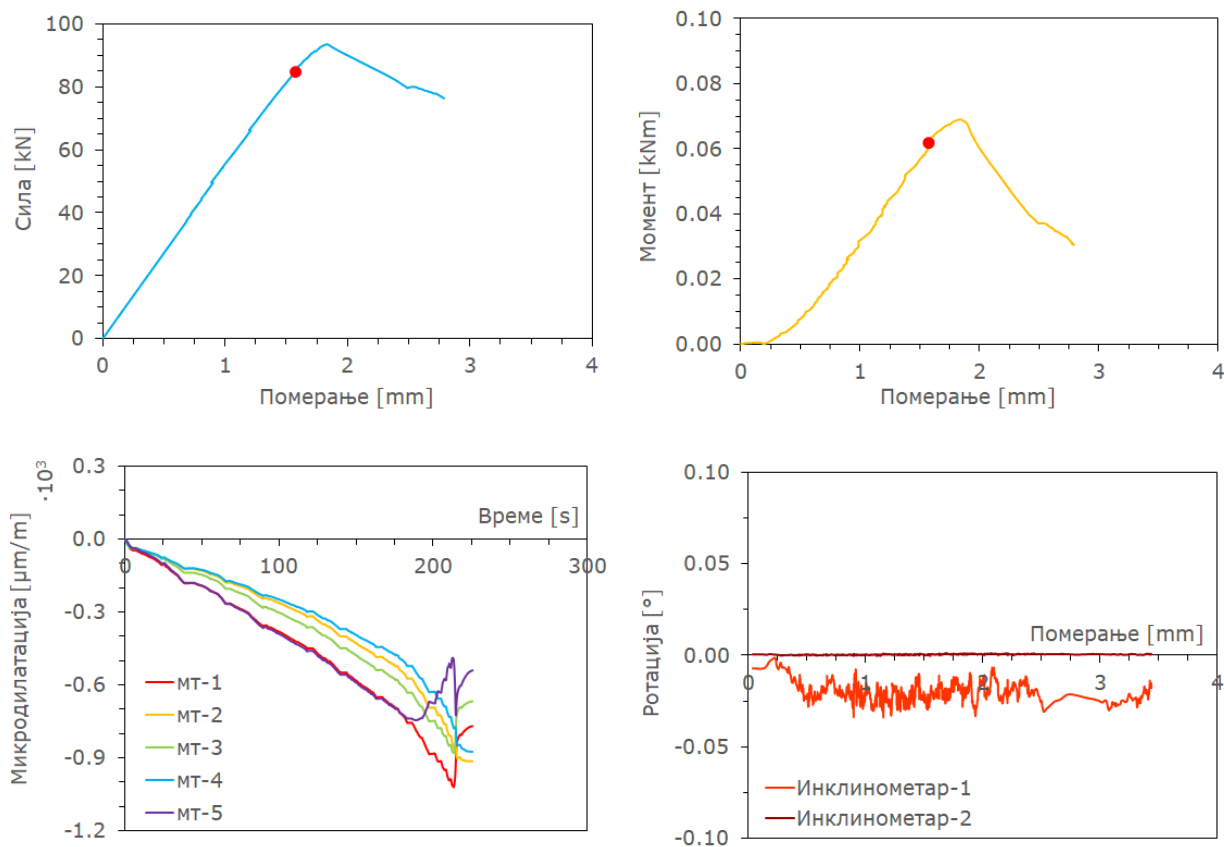
Слика 9.98. Испитивање узорка C100-3-e80-2



Слика 9.99. Резултати испитивања узорка C150-0-e00-1



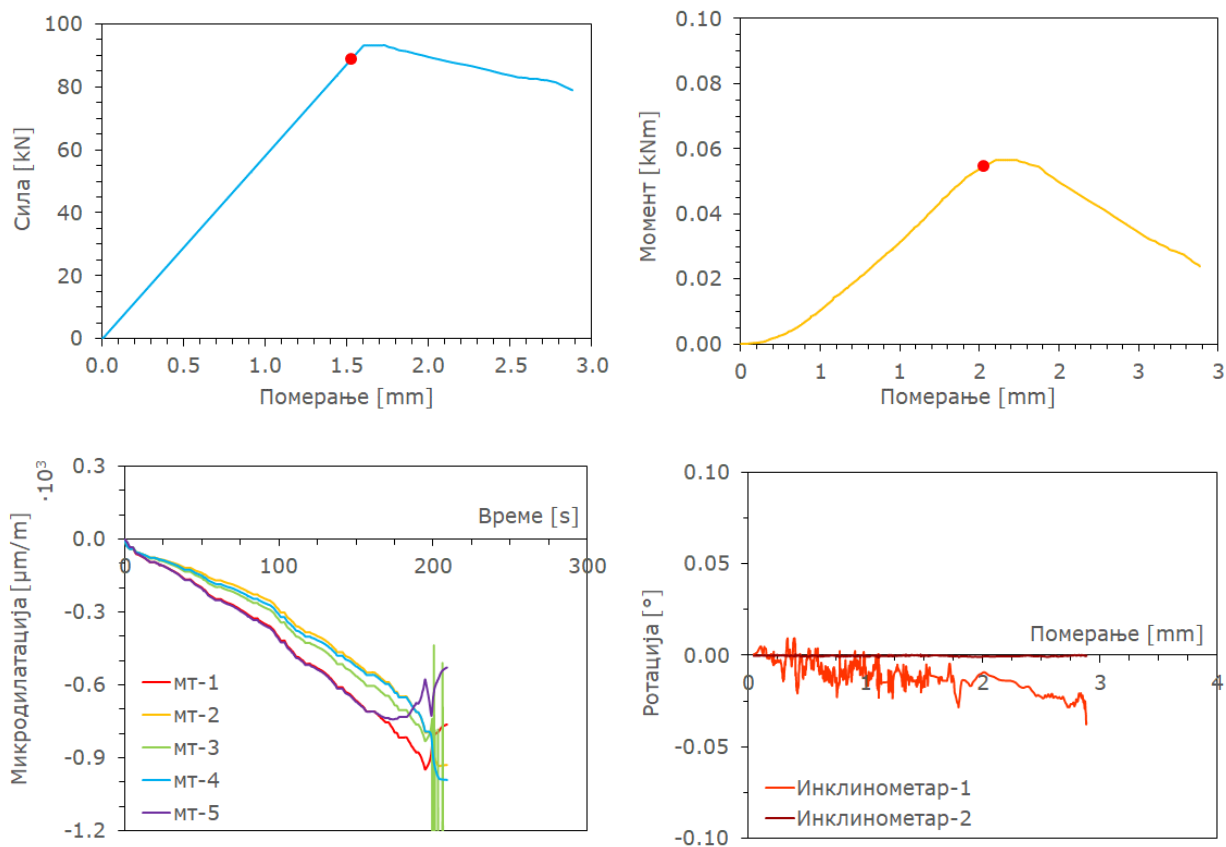
Слика 9.100. Испитивање узорка C150-0-e00-1



Слика 9.101. Резултати испитивања узорка C150-0-e00-2



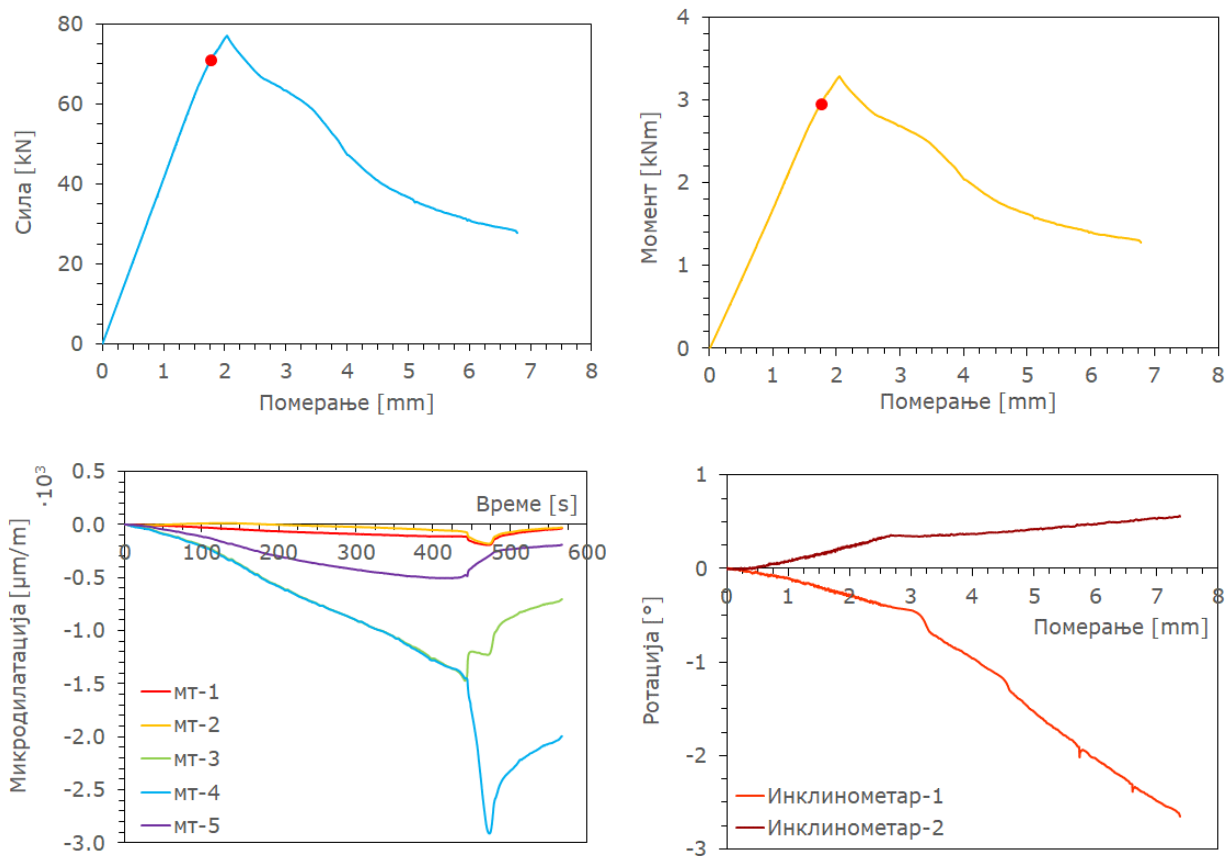
Слика 9.102. Испитивање узорка C150-0-e00-2



Слика 9.103. Резултати испитивања узорка C150-0-e00-3



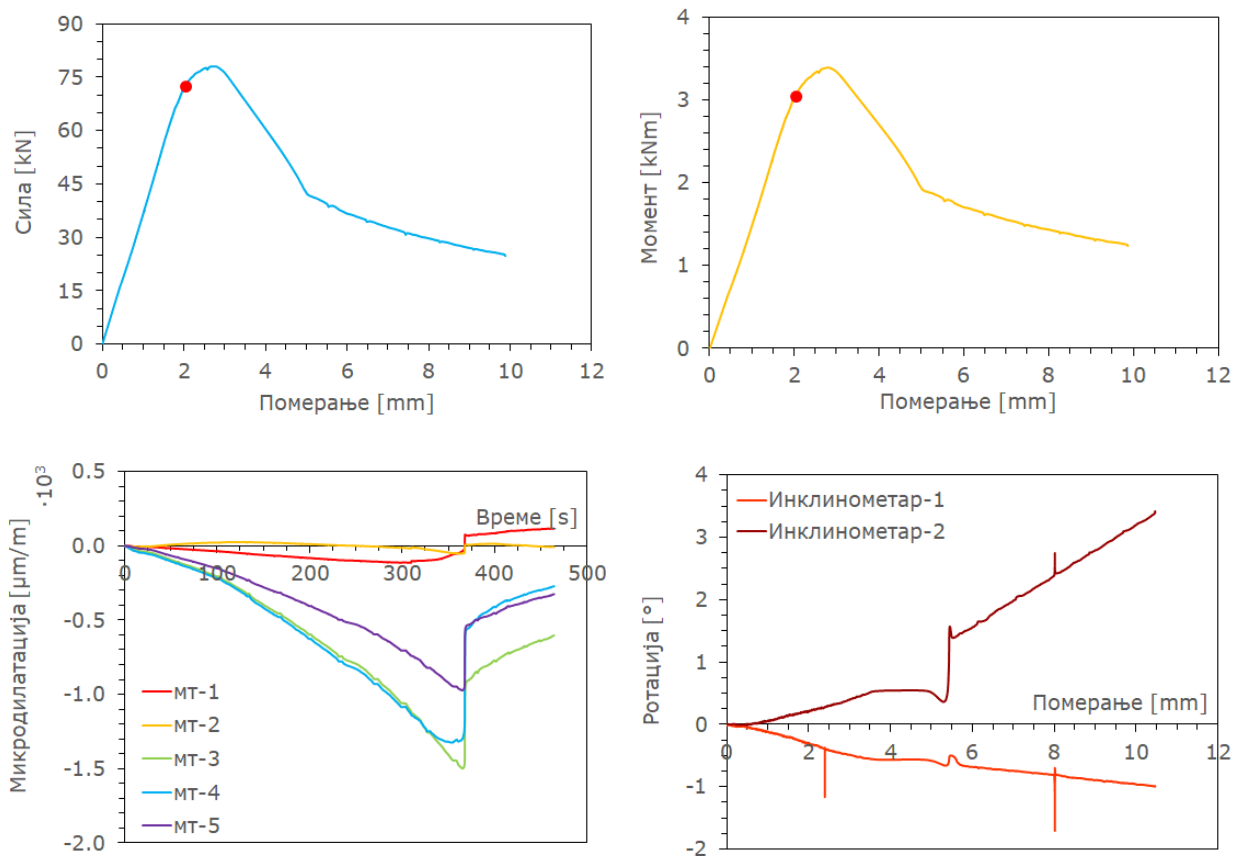
Слика 9.104. Испитивање узорка C150-0-e00-3



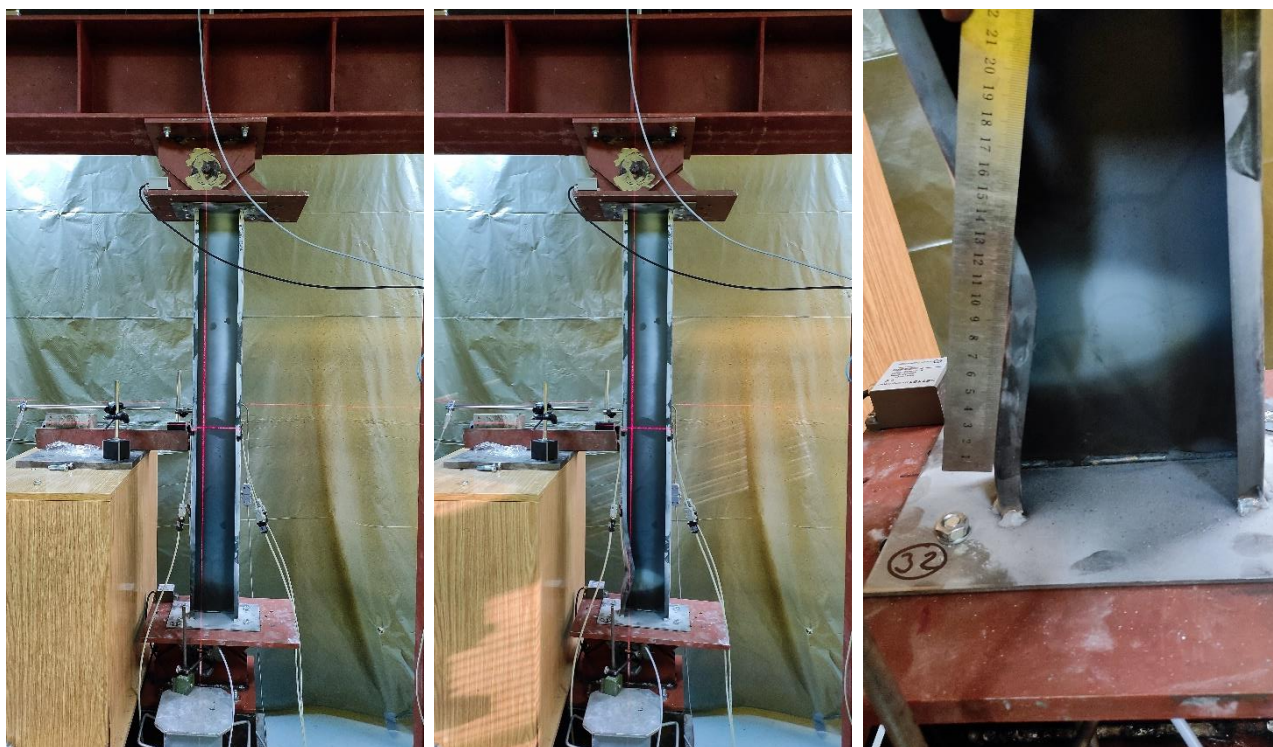
Слика 9.105. Резултати испитивања узорка C150-0-e40-1



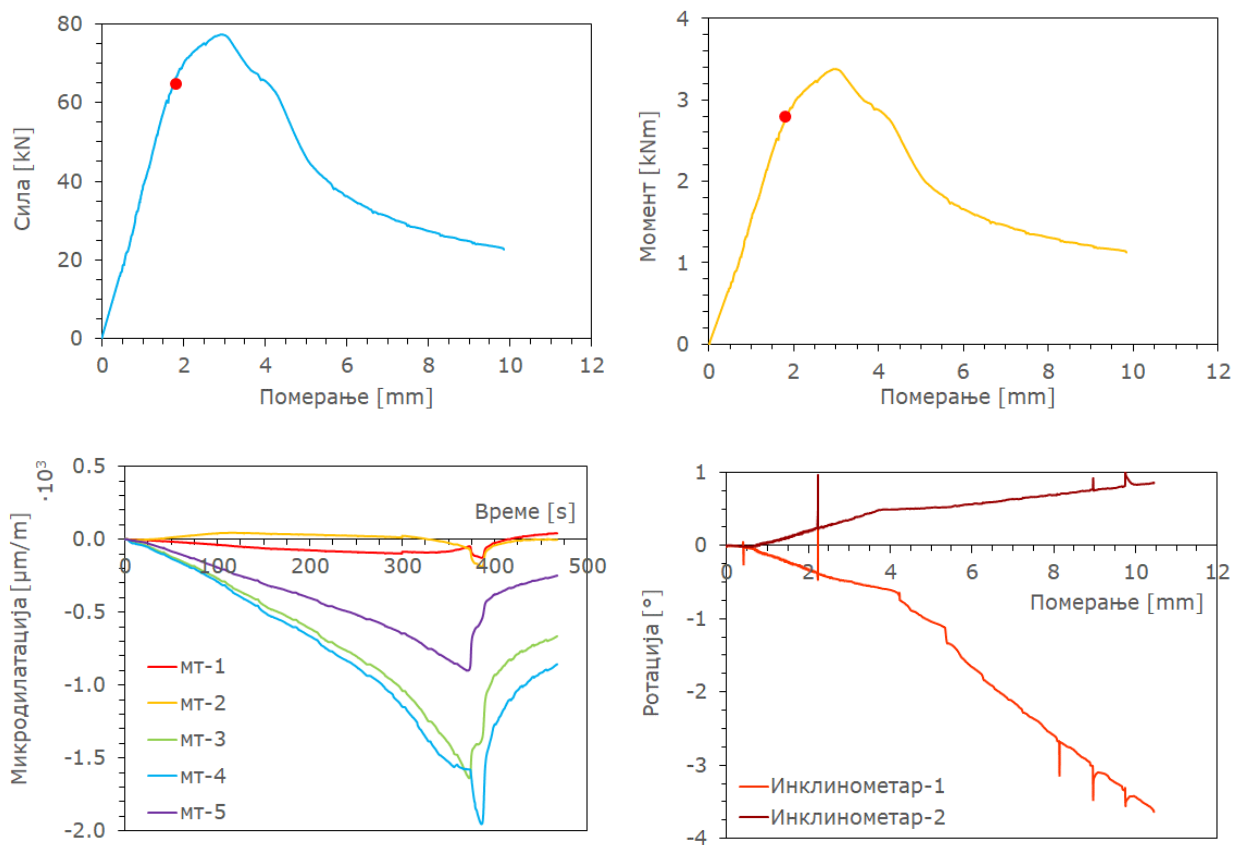
Слика 9.106. Испитивање узорка C150-0-e40-1



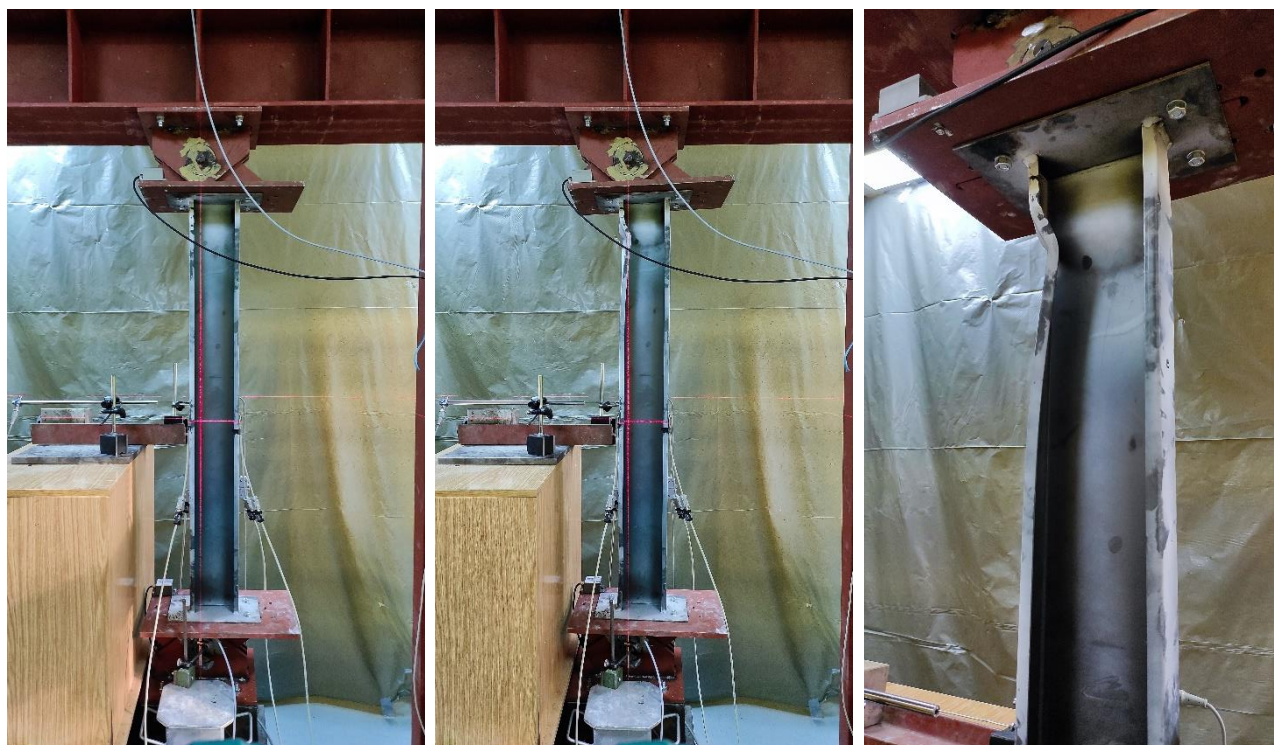
Слика 9.107. Резултати испитивања узорка C150-0-e40-2



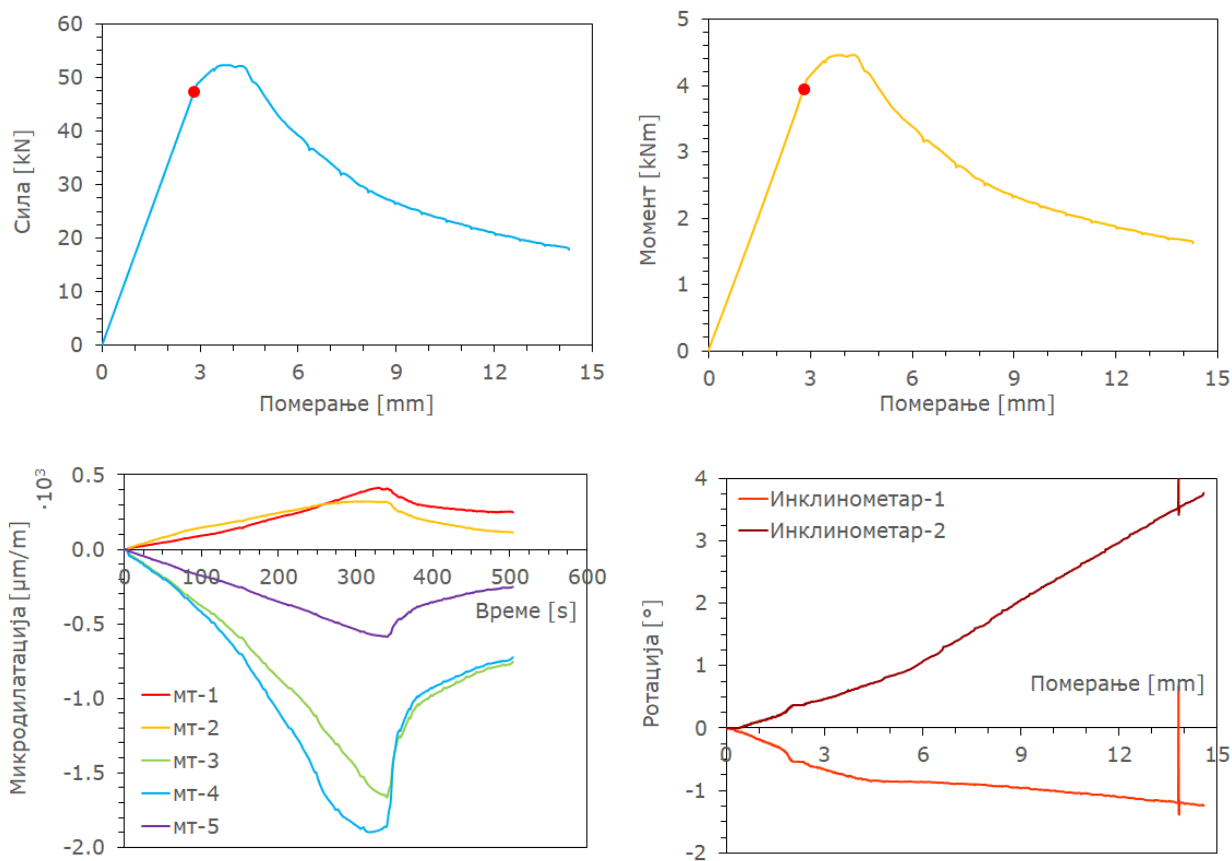
Слика 9.108. Испитивање узорка C150-0-e40-2



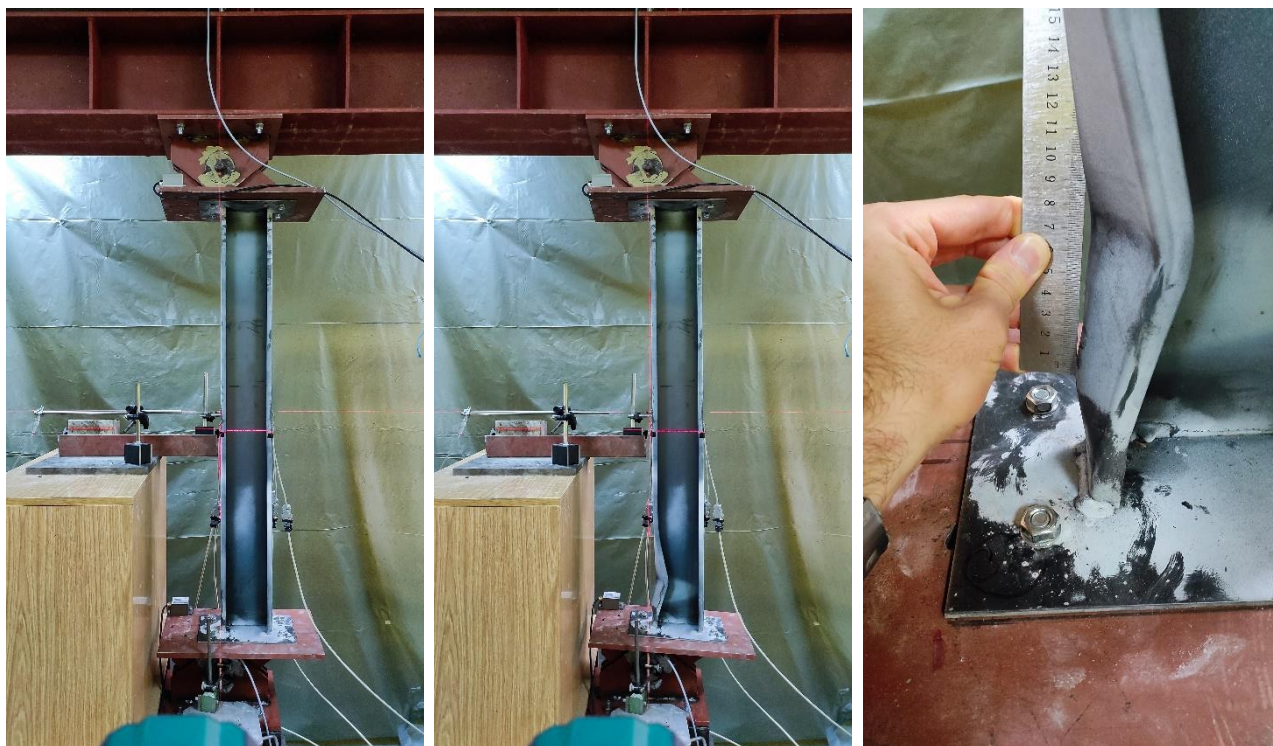
Слика 9.109. Резултати испитивања узорка C150-0-e40-3



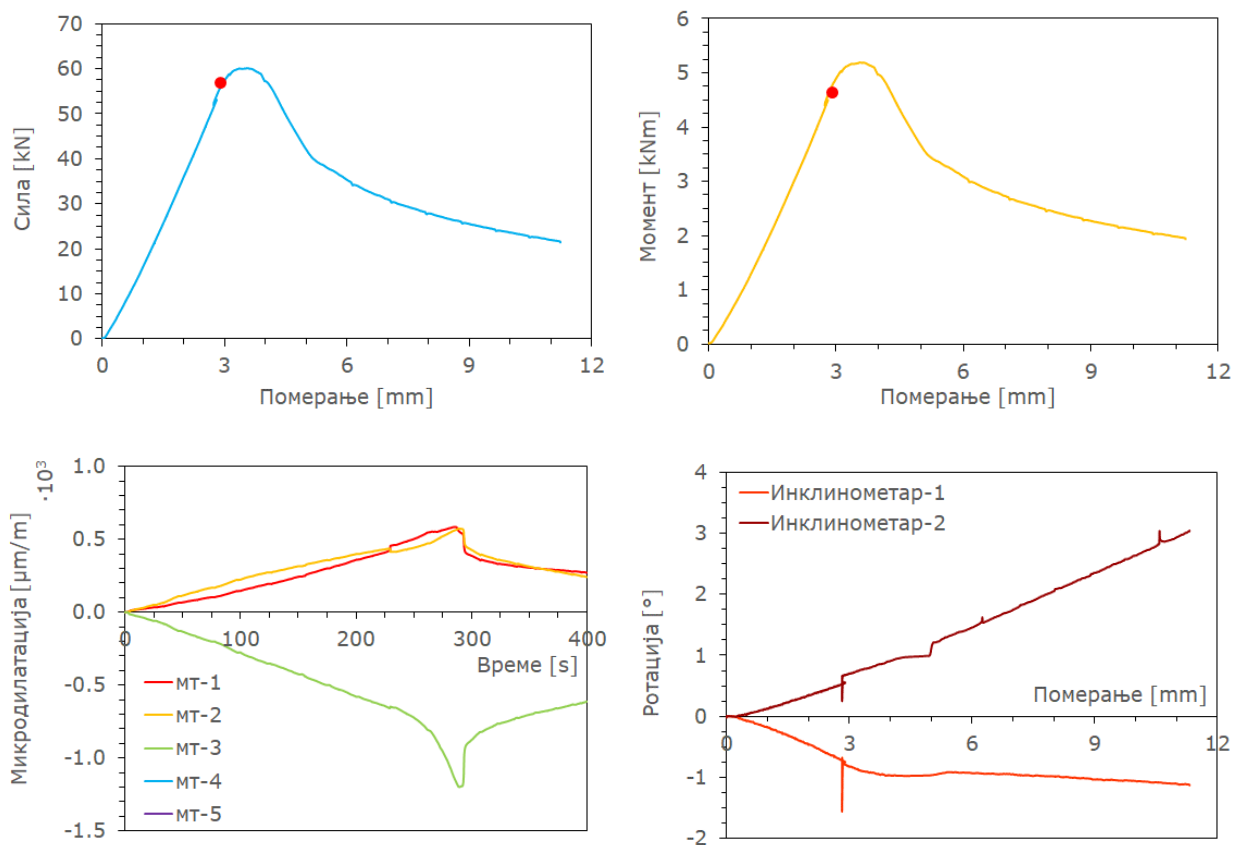
Слика 9.110. Испитивање узорка C150-0-e40-3



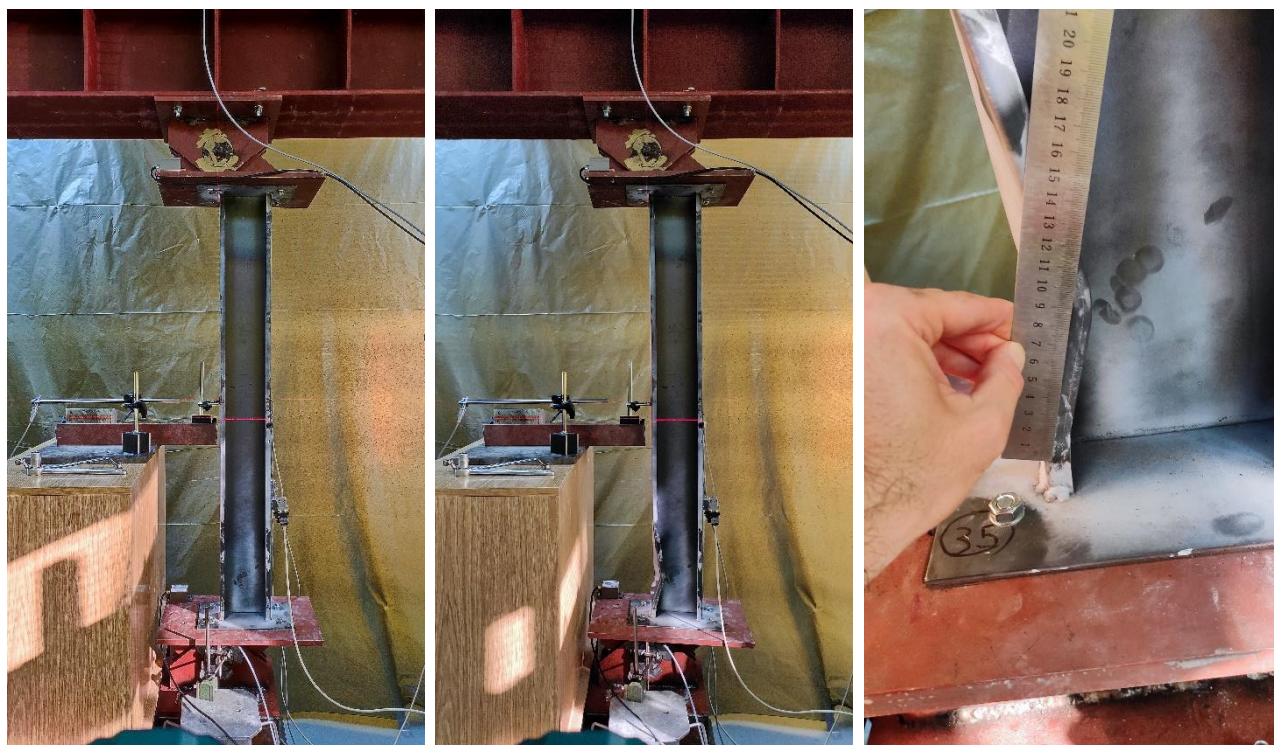
Слика 9.111. Резултати испитивања узорка C150-0-e80-1



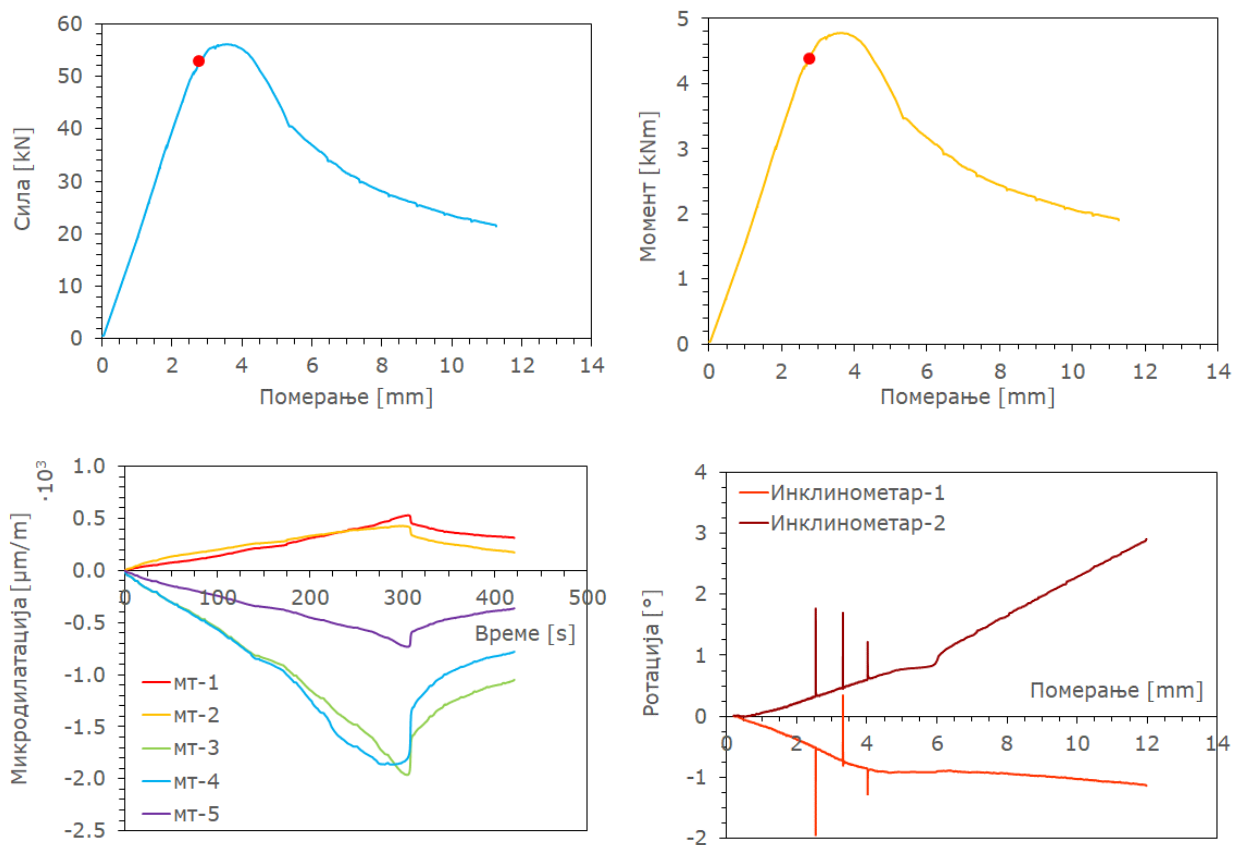
Слика 9.112. Испитивање узорка C150-0-e80-1



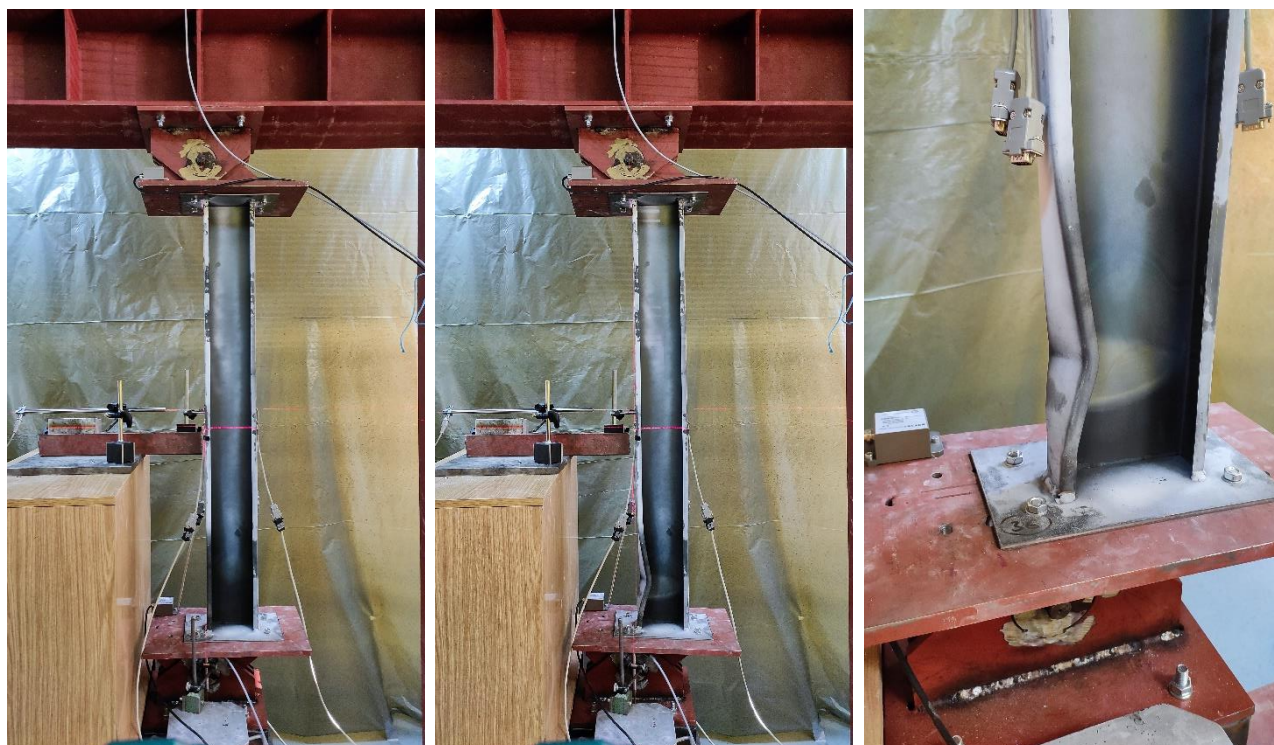
Слика 9.113. Резултати испитивања узорка C150-0-e80-2



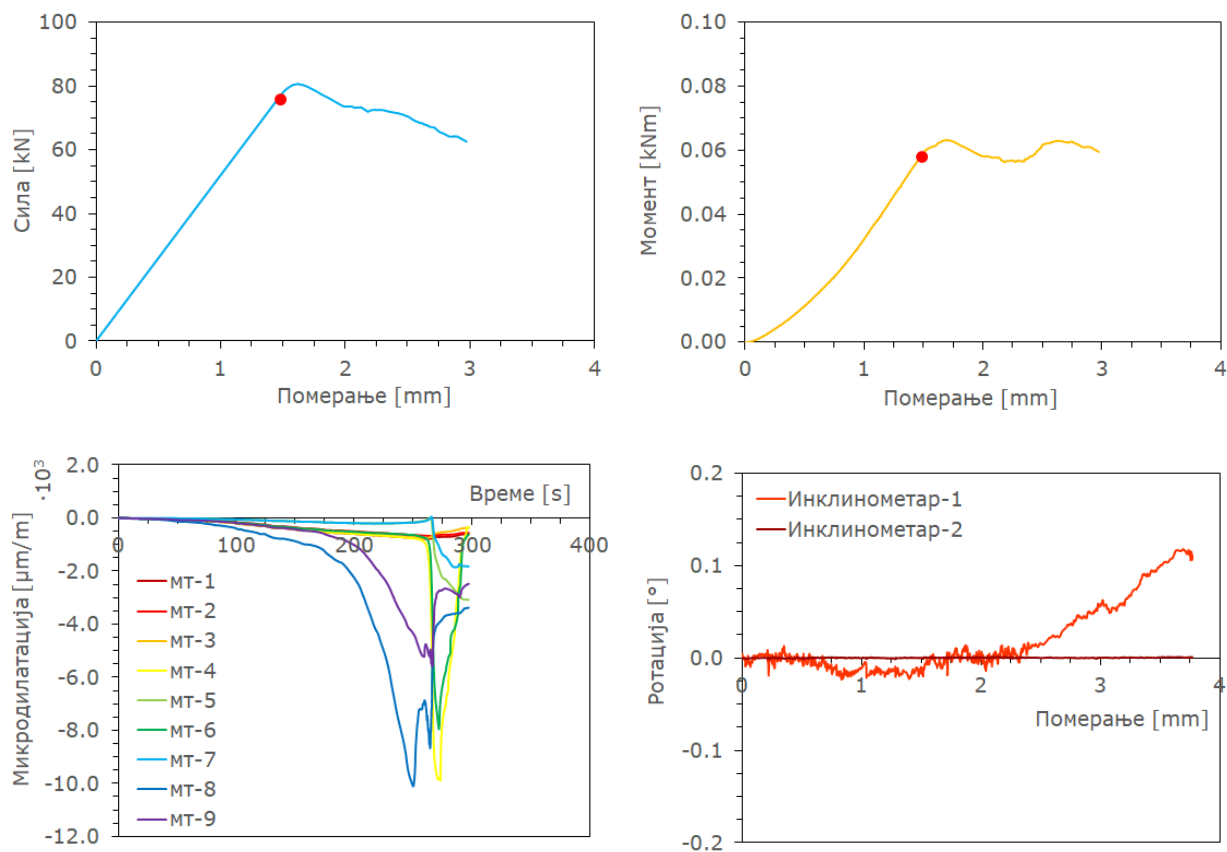
Слика 9.114. Испитивање узорка C150-0-e80-2



Слика 9.115. Резултати испитивања узорка C150-0-e80-3



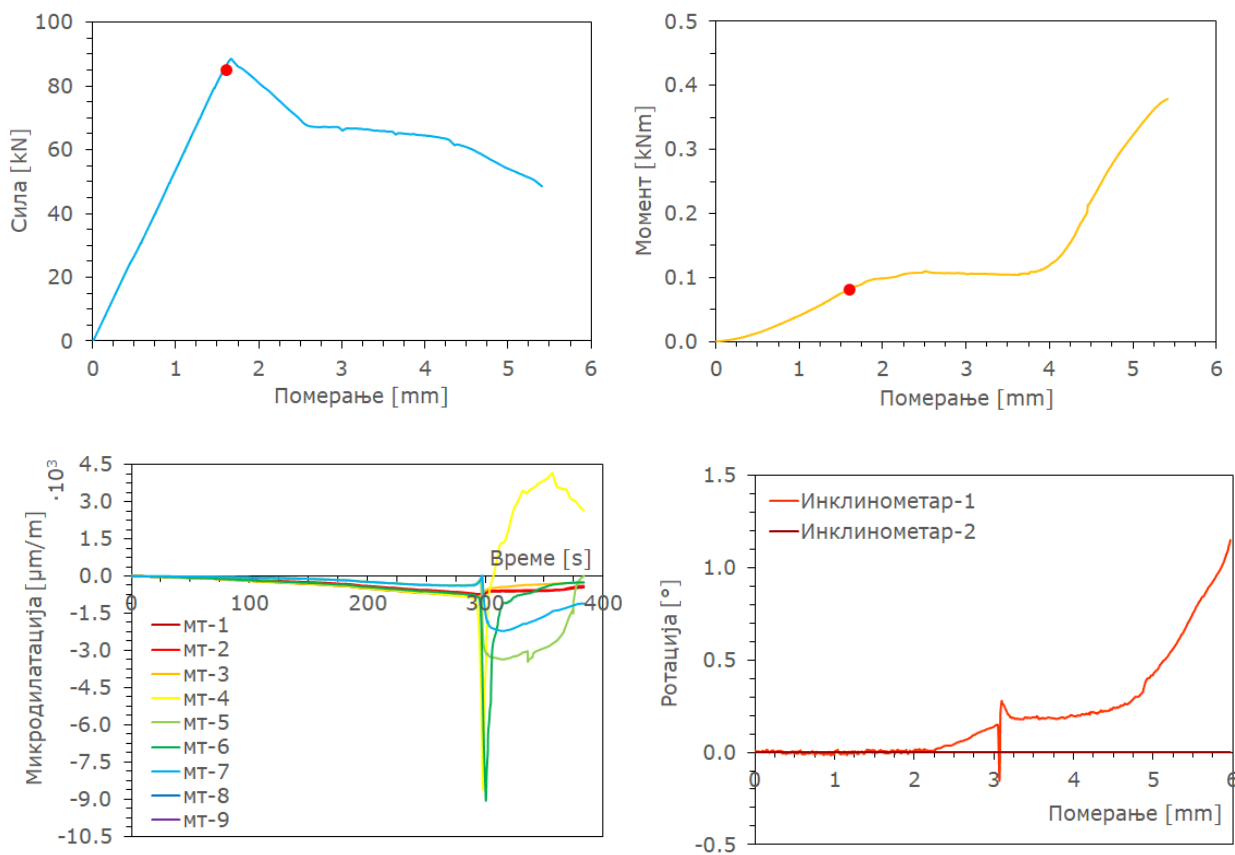
Слика 9.116. Испитивање узорка C150-0-e80-3



Слика 9.117. Резултати испитивања узорка C150-2-e00-1



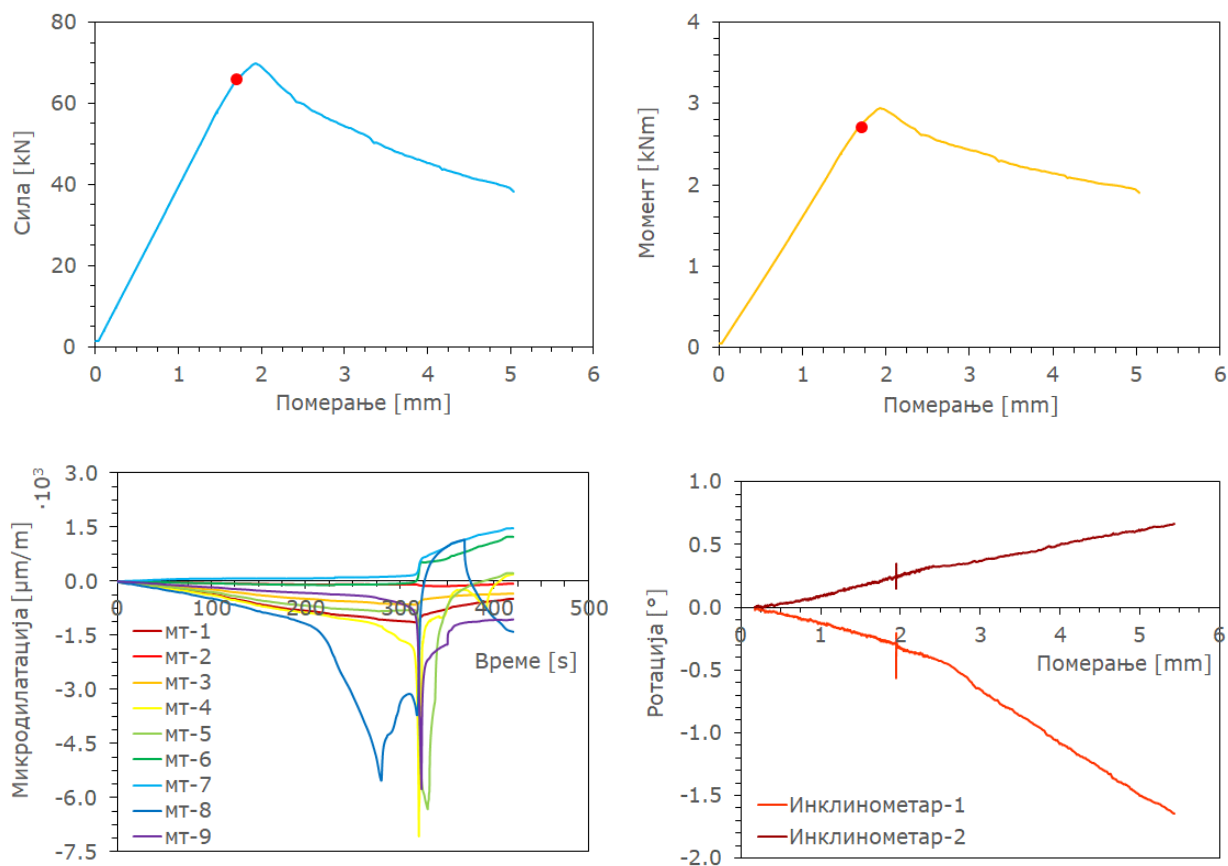
Слика 9.118. Испитивање узорка C150-2-e00-1



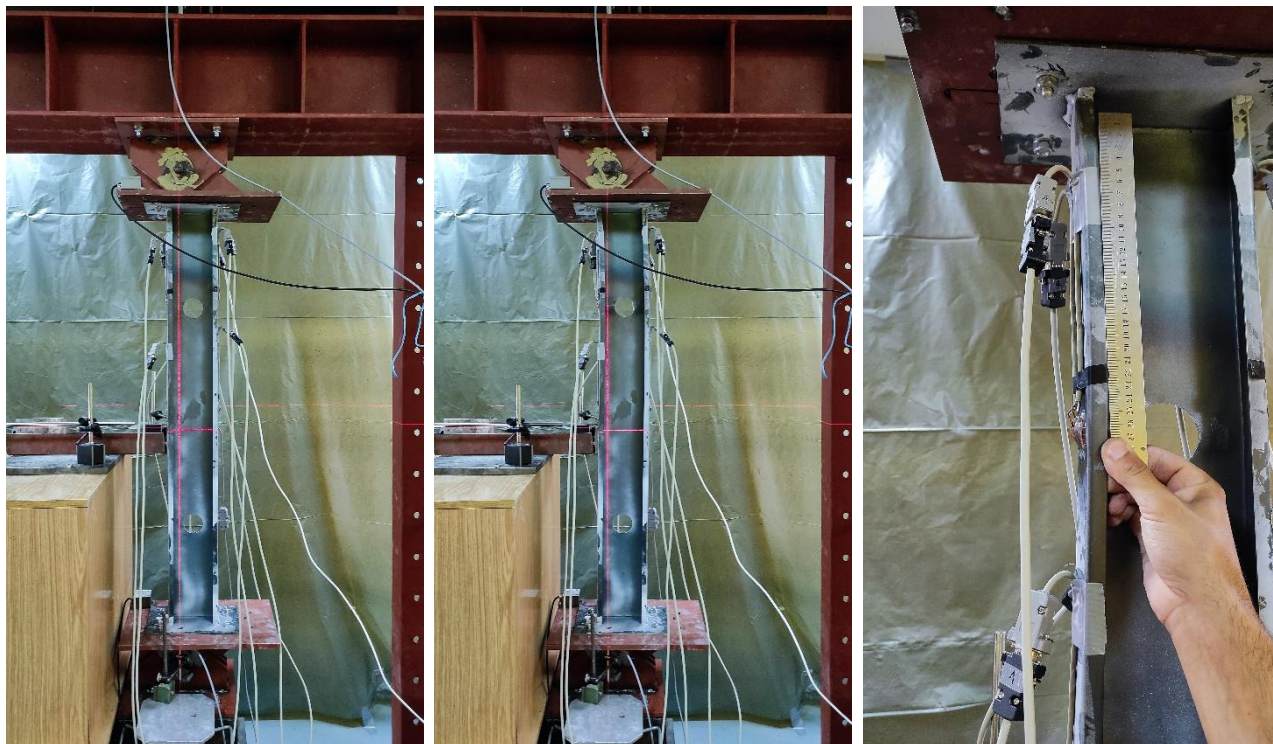
Слика 9.119. Резултати испитивања узорка C150-2-e00-2



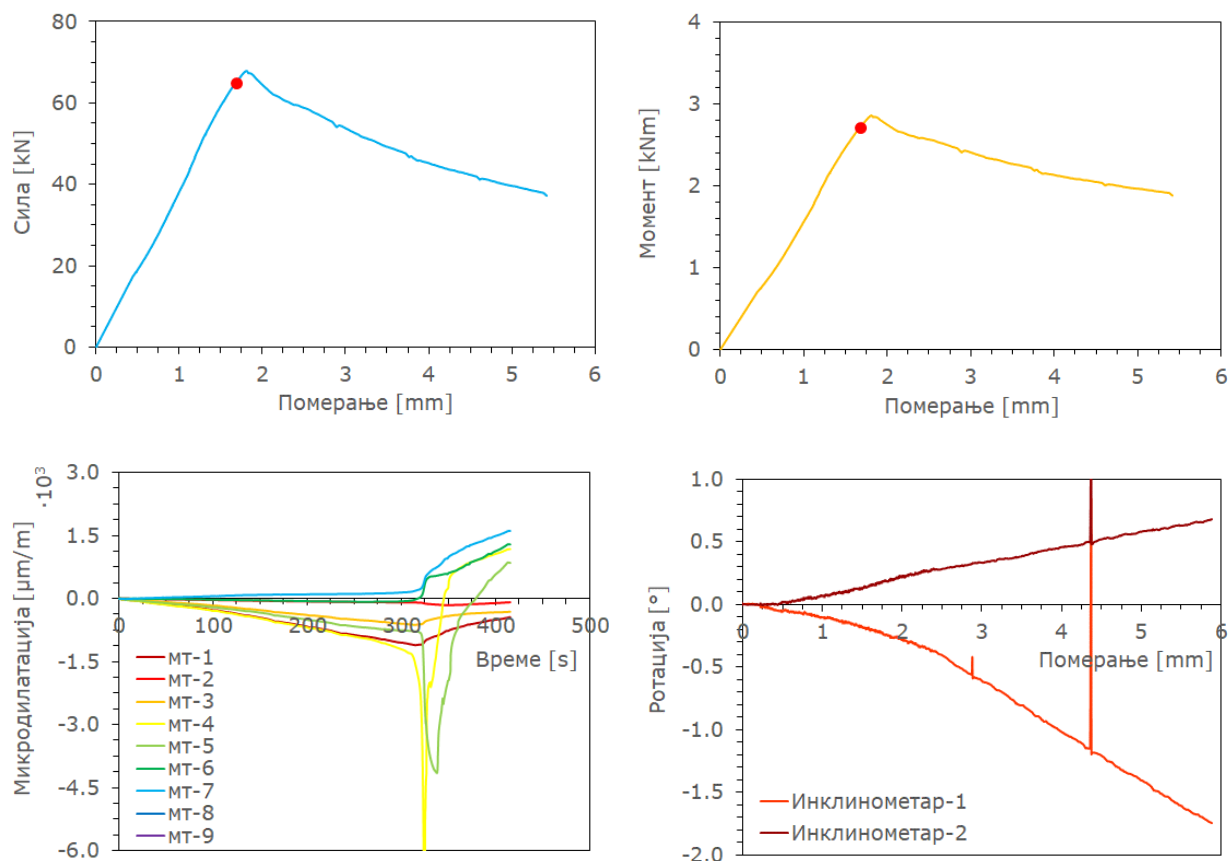
Слика 9.120. Испитивање узорка C150-2-e00-2



Слика 9.121. Резултати испитивања узорка C150-2-e40-1



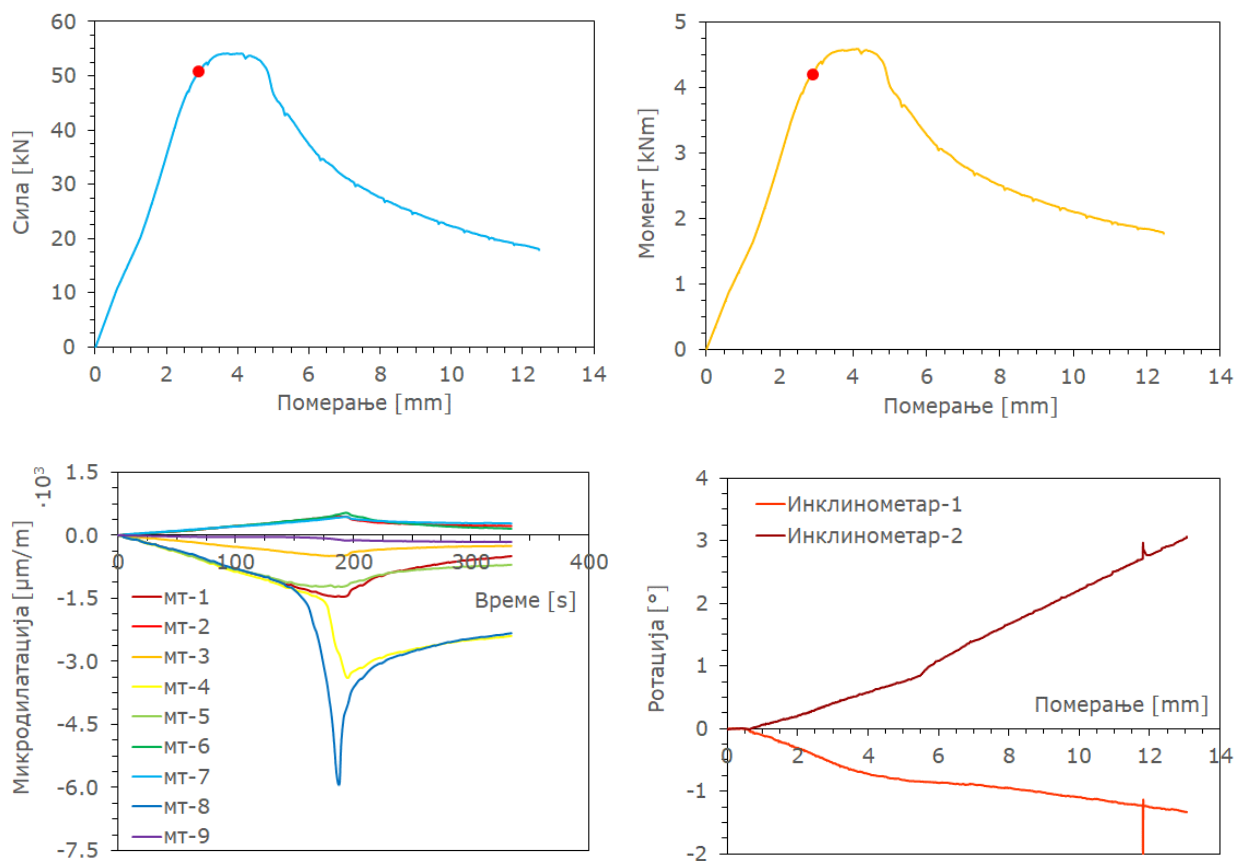
Слика 9.122. Испитивање узорка C150-2-e40-1



Слика 9.123. Резултати испитивања узорка C150-2-e40-2



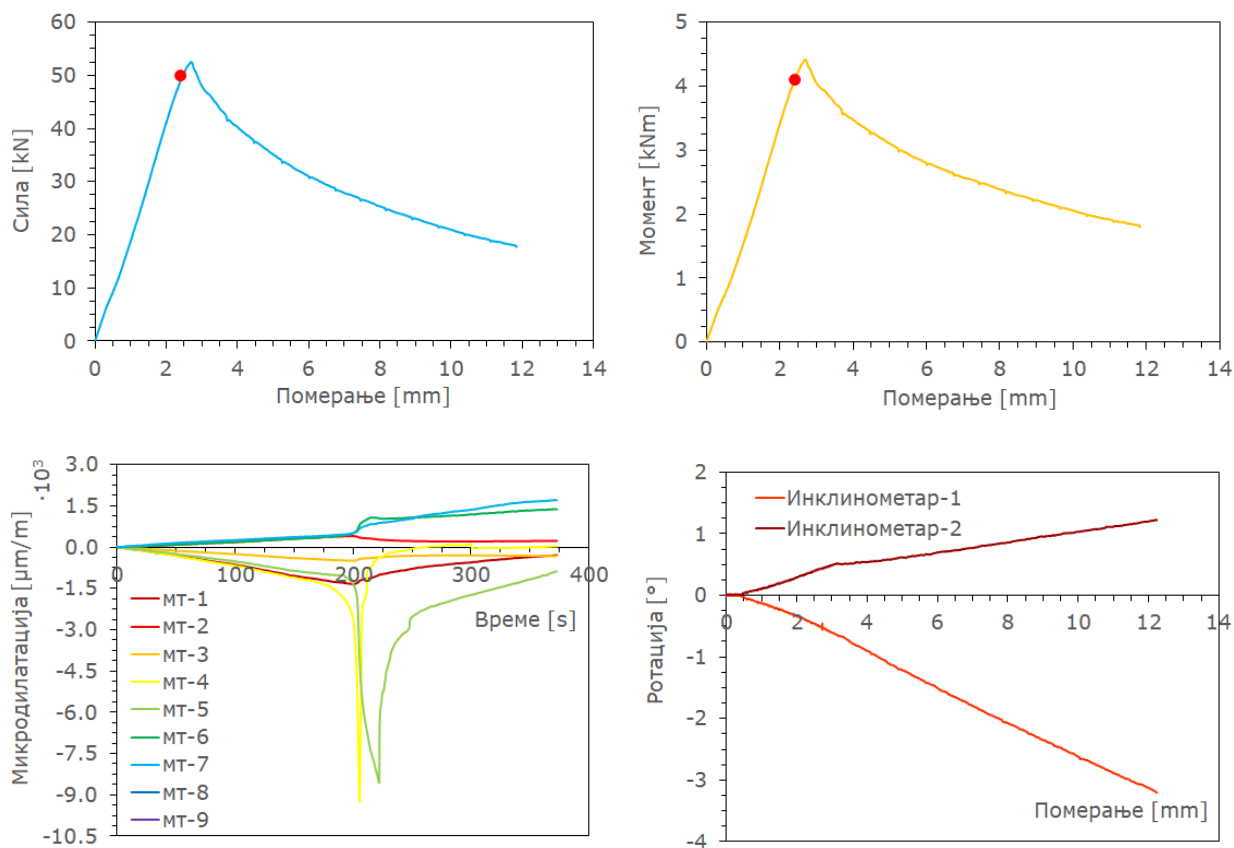
Слика 9.124. Испитивање узорка C150-2-e40-2



Слика 9.125. Резултати испитивања узорка C150-2-e80-1



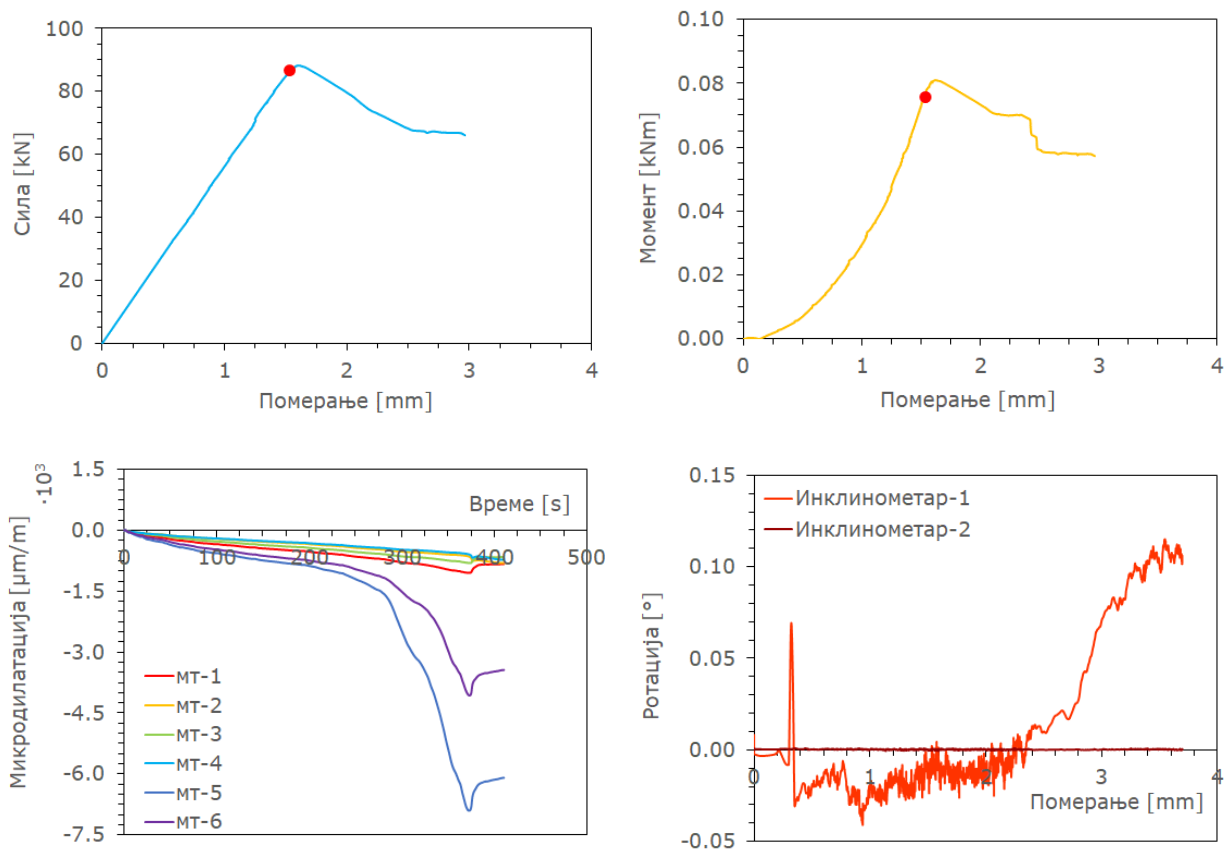
Слика 9.126. Испитивање узорка C150-2-e80-1



Слика 9.127. Резултати испитивања узорка C150-2-e80-2



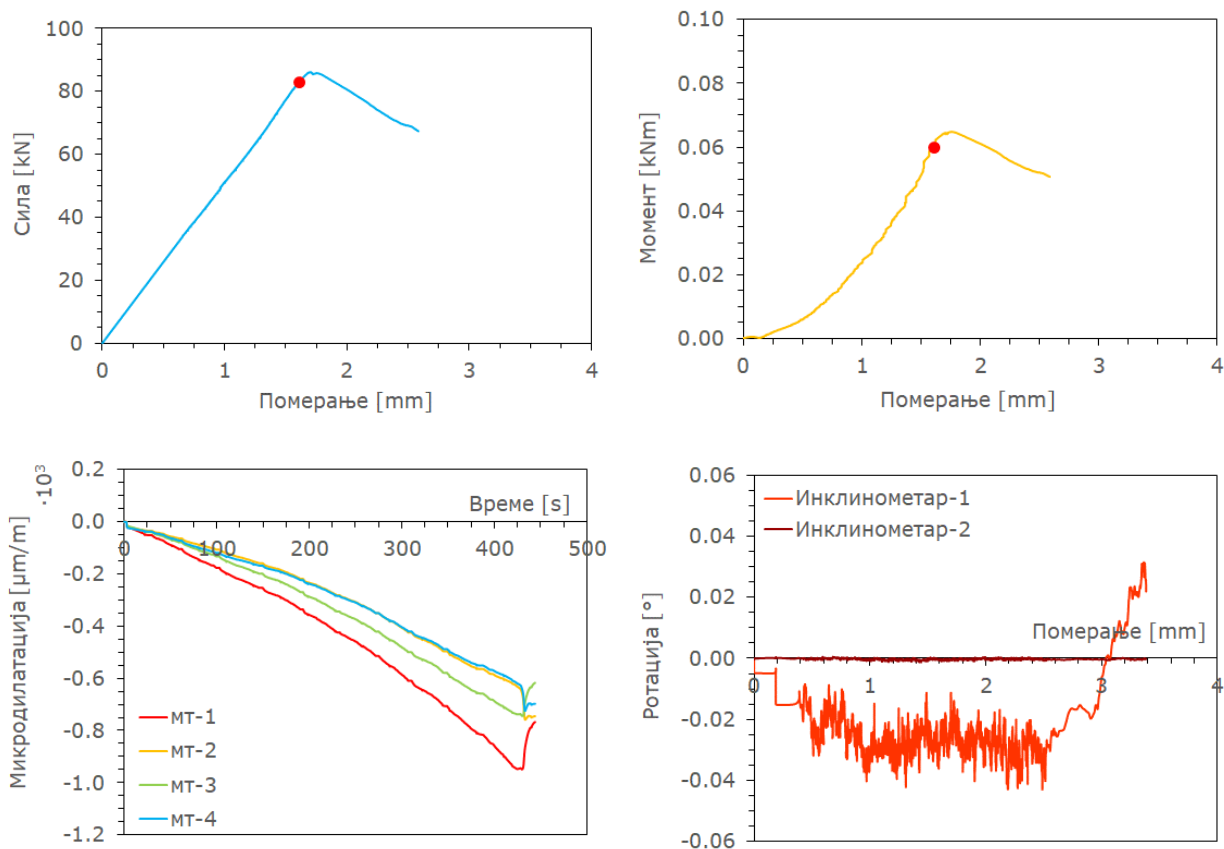
Слика 9.128. Испитивање узорка C150-2-e80-2



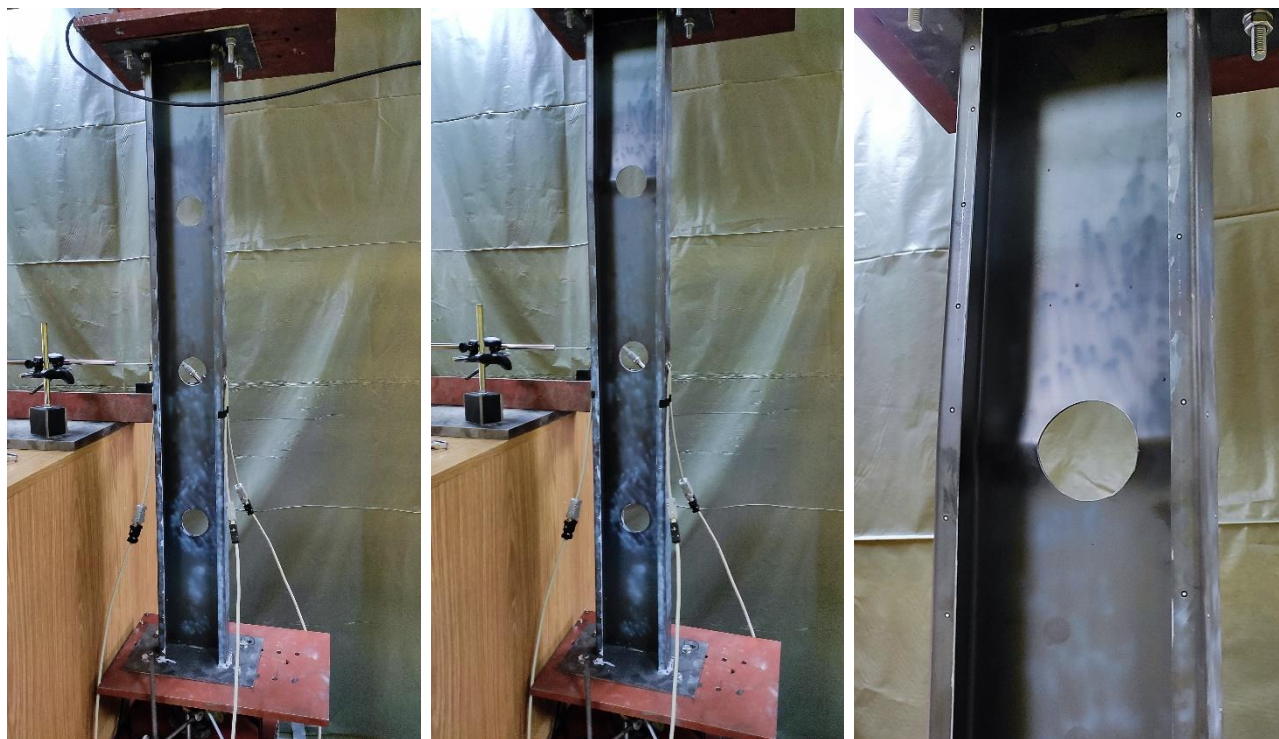
Слика 9.129. Резултати испитивања узорка C150-3-e00-1



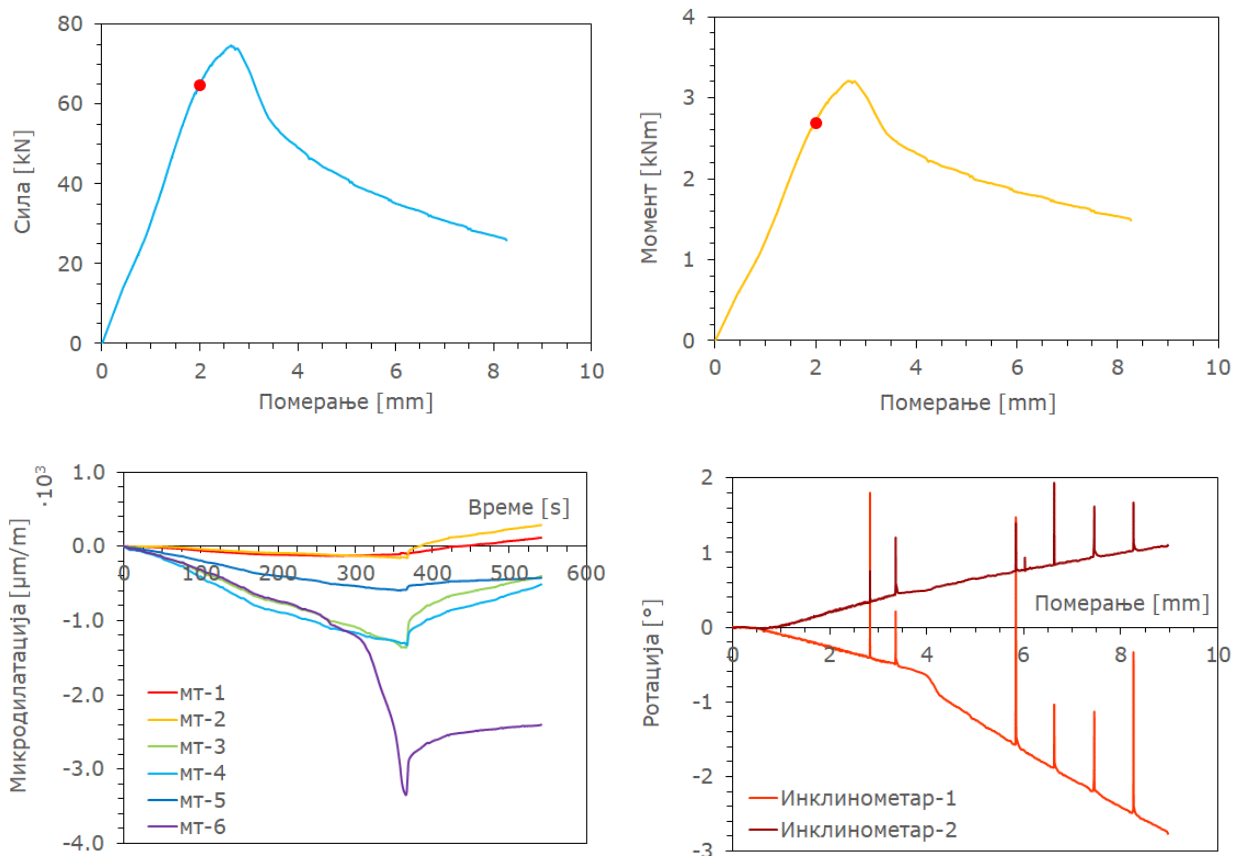
Слика 9.130. Испитивање узорка C150-3-e00-1



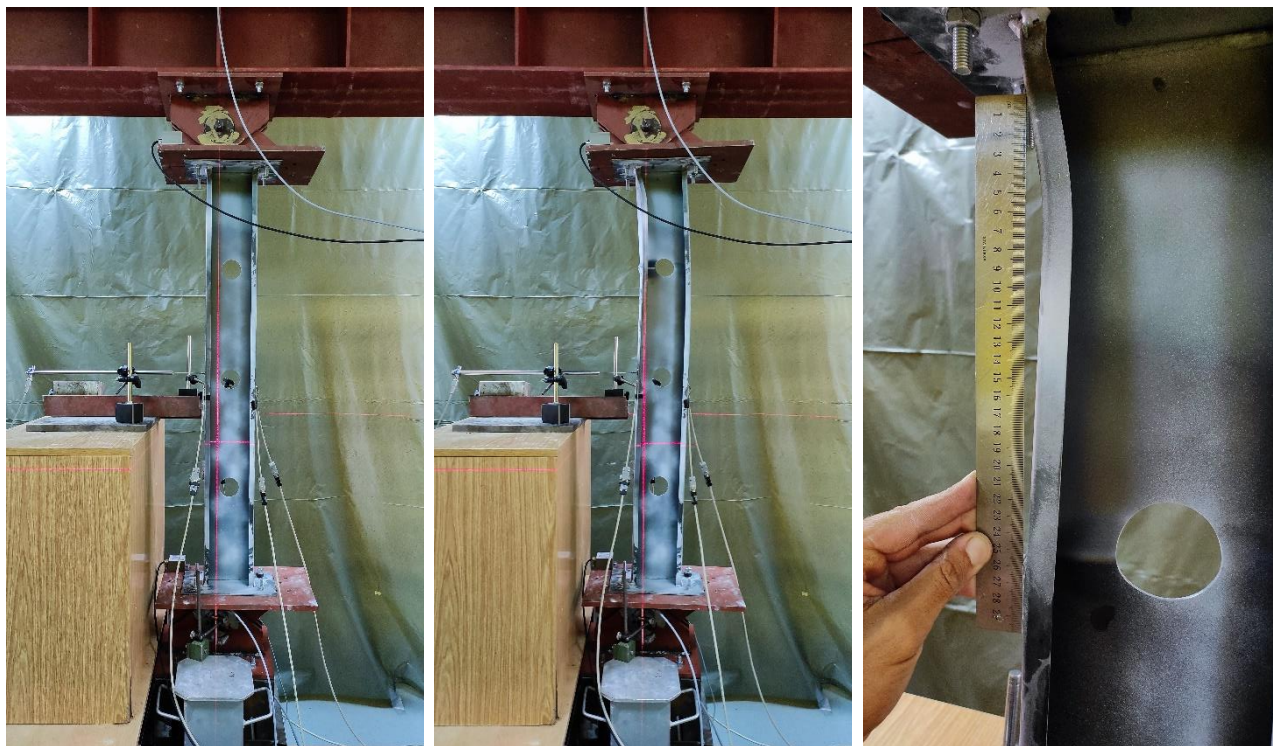
Слика 9.131. Резултати испитивања узорка C150-3-e00-2



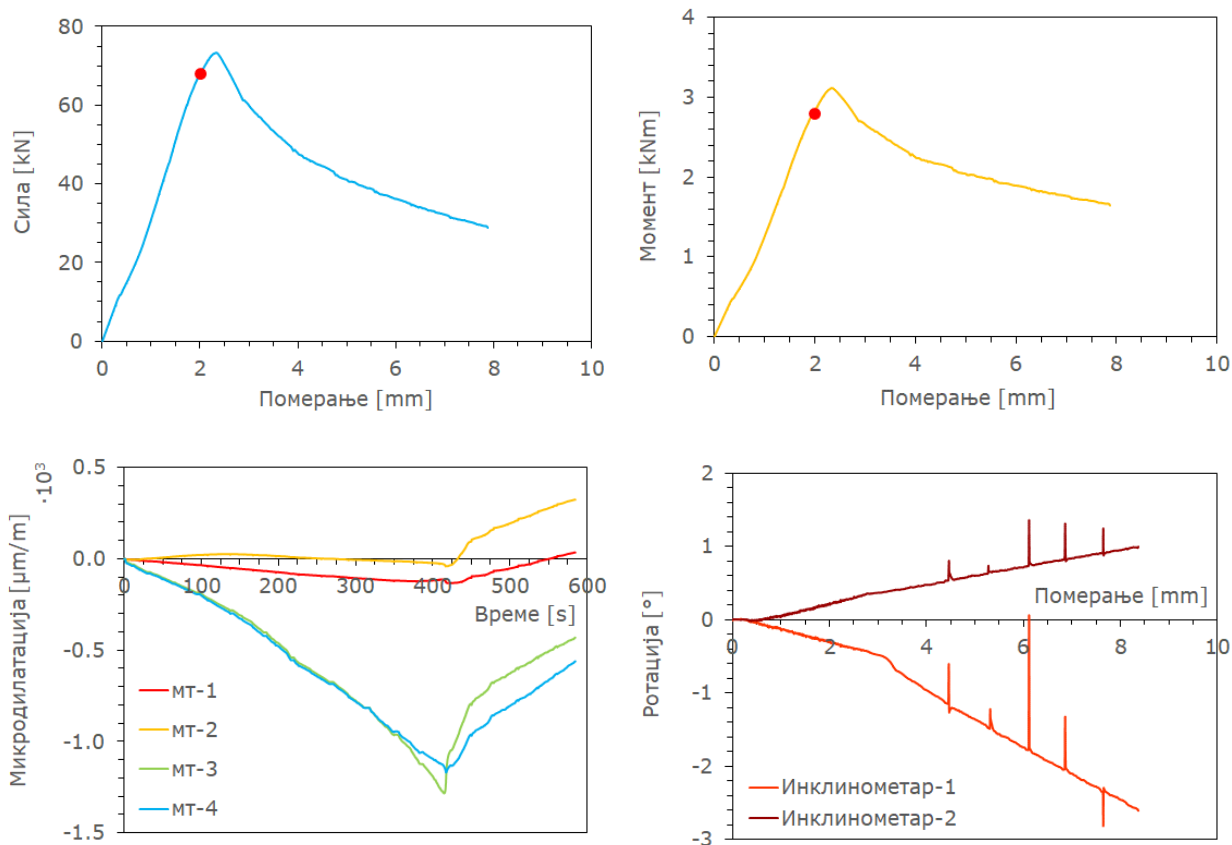
Слика 9.132. Испитивање узорка C150-3-e00-2



Слика 9.133. Резултати испитивања узорка C150-3-e40-1



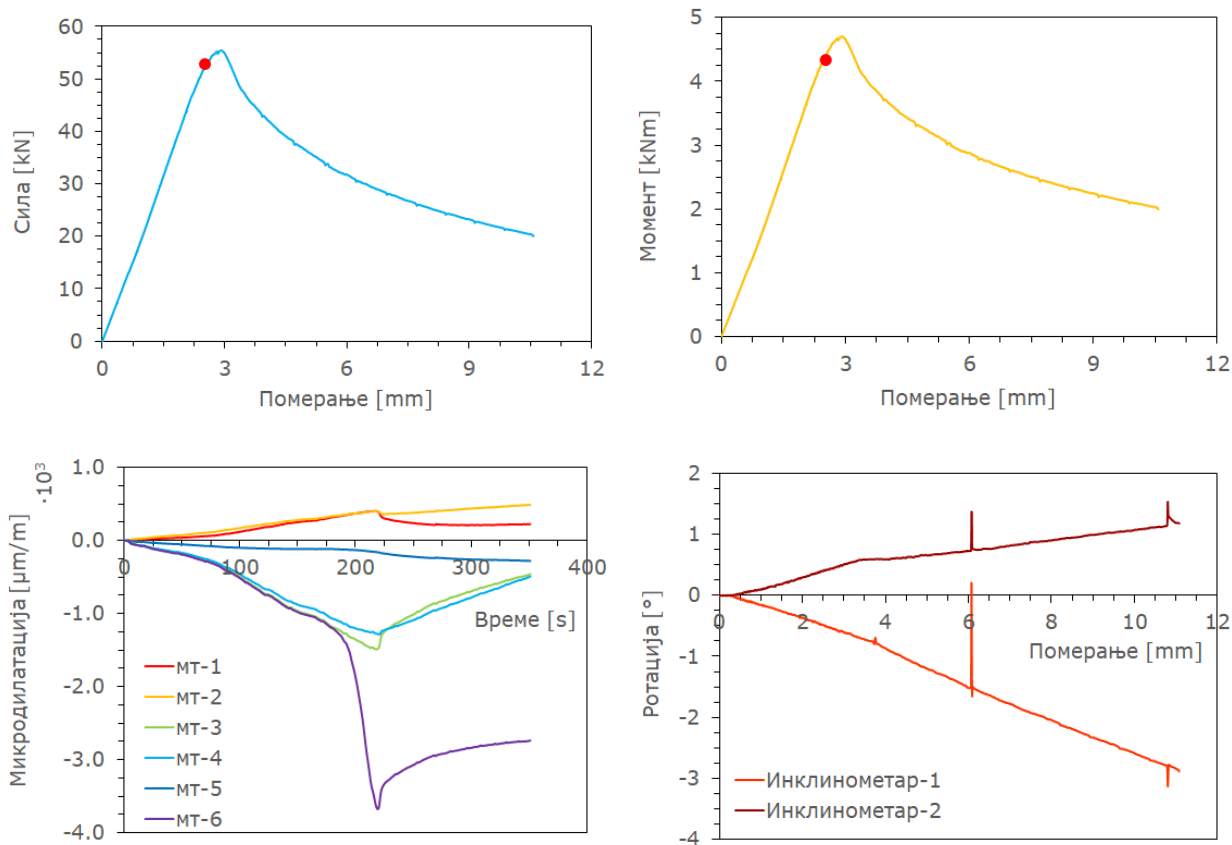
Слика 9.134. Испитивање узорка C150-3-e40-1



Слика 9.135. Резултати испитивања узорка C150-3-e40-2



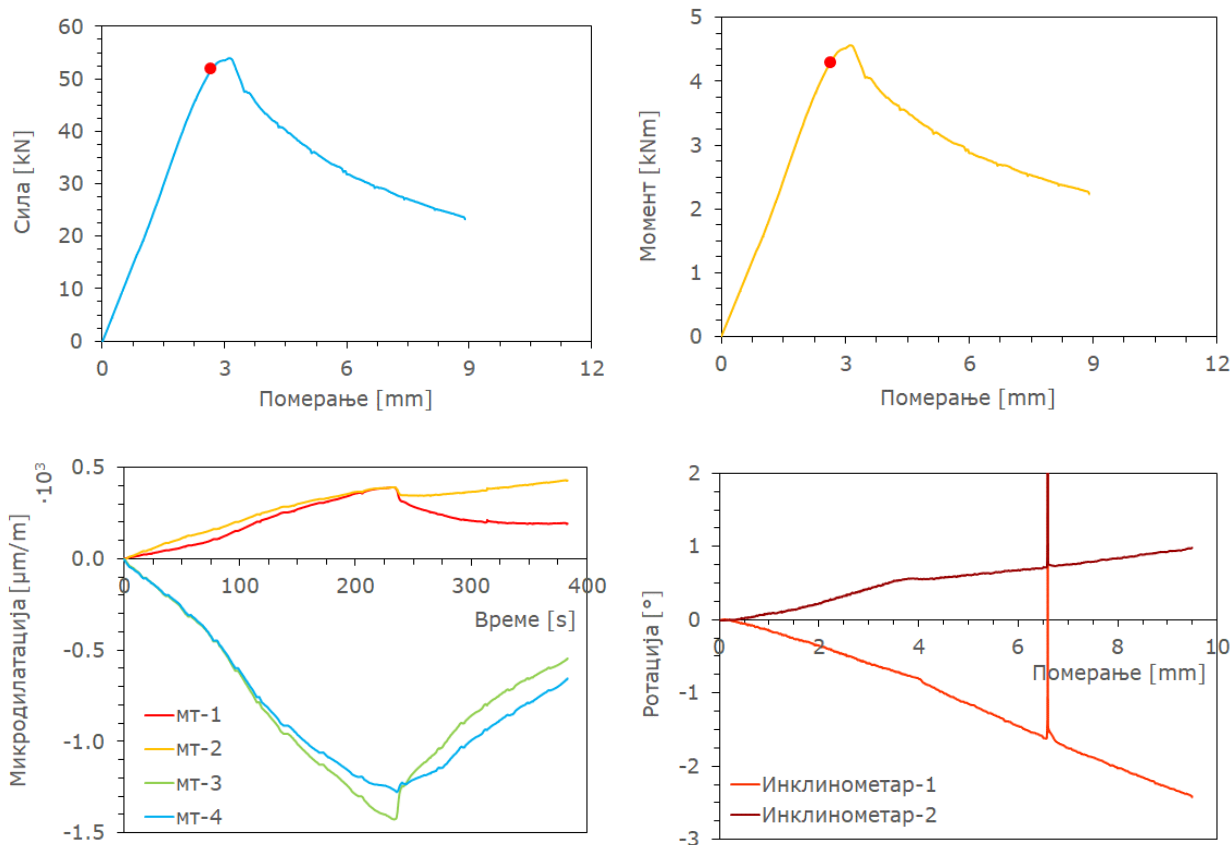
Слика 9.136. Испитивање узорка C150-3-e40-2



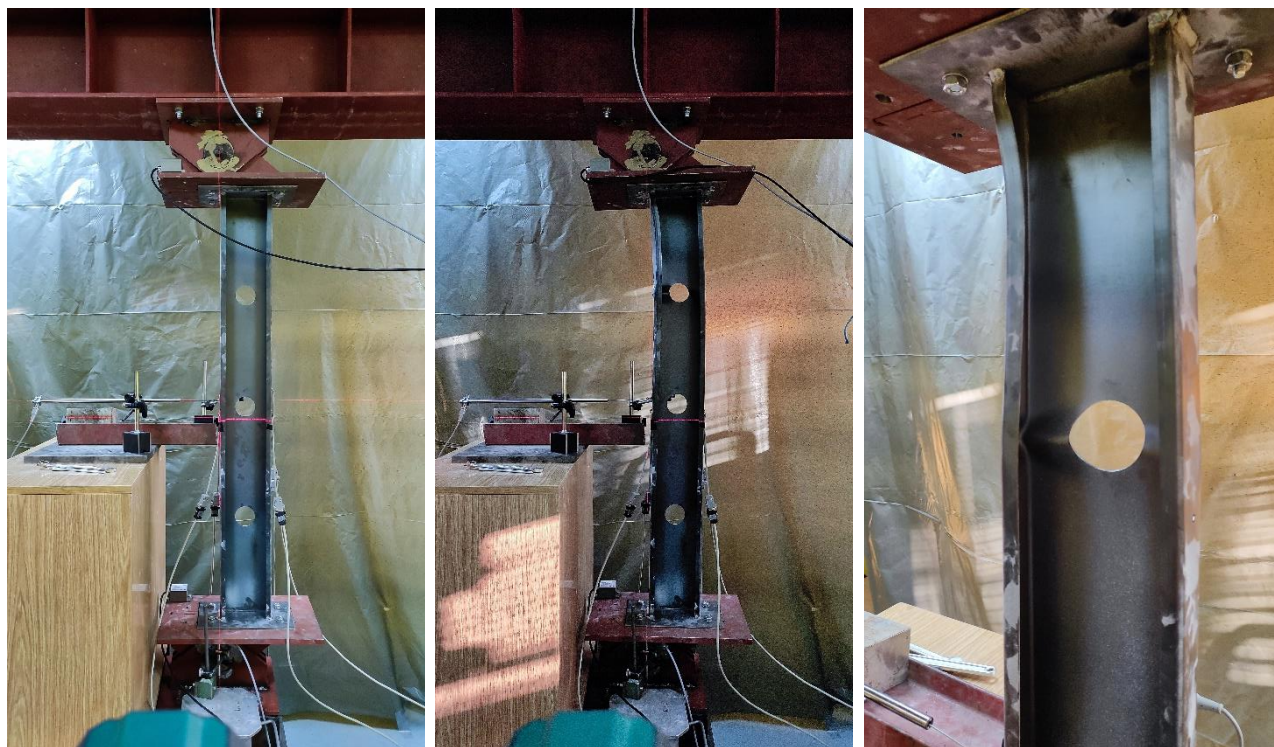
Слика 9.137. Резултати испитивања узорка C150-3-e80-1



Слика 9.138. Испитивање узорка C150-3-e80-1



Слика 9.139. Резултати испитивања узорка C150-3-e80-2



Слика 9.140. Испитивање узорка C150-3-e80-2

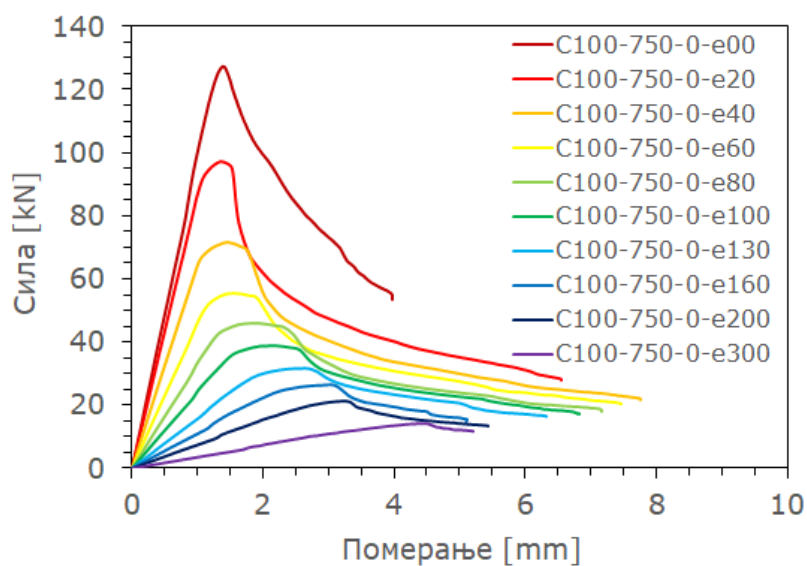
9.4. ПРИЛОГ Г: РЕЗУЛТАТИ ПАРАМЕТАРСКИХ АНАЛИЗА

У овом поглављу су детаљно приказани резултати параметарске анализе. Резултати су приказани у форми табела и графика. У табелама су дате вредности аксијалне силе притиска и момента савијања на границама пропорционалности, нормализоване вредности ових величина, као и збир одговарајућих вредности ових величина за критеријуме дефинисане једначинама (2.1) и (2.5). Ове вредности су дате за све вредности ексцентрицитета аксијалне силе, као и за дејство момента без силе притиска, које је у табели обележено словом r . На сликама су за све вредности ексцентрицитета аксијалне силе приказане криве зависности силе притиска и померања краја елемента у правцу његове осе.

9.4.1. ЕЛЕМЕНТИ C100

Табела 9.1. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C100-750-0

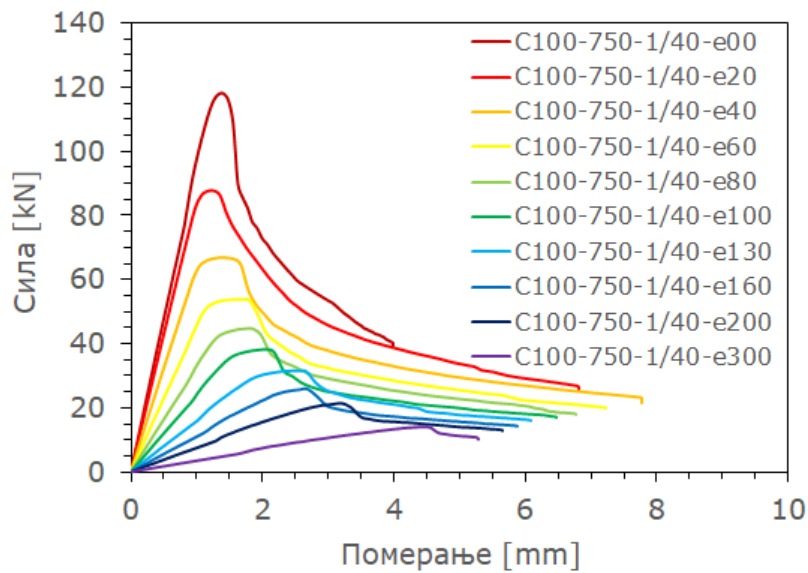
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	122.50	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	91.90	1.84	0.75	0.39	1.14	1.27
40	66.05	2.64	0.54	0.56	1.10	1.24
60	51.74	3.10	0.42	0.66	1.08	1.22
80	42.75	3.42	0.35	0.73	1.08	1.21
100	36.00	3.60	0.29	0.77	1.06	1.18
130	29.62	3.85	0.24	0.82	1.06	1.17
160	24.64	3.94	0.20	0.84	1.04	1.15
200	20.16	4.03	0.16	0.86	1.02	1.12
300	13.80	4.14	0.11	0.88	0.99	1.08
r	0.02	4.70	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.141. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C100-750-0

Табела 9.2. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C100-750-1/40

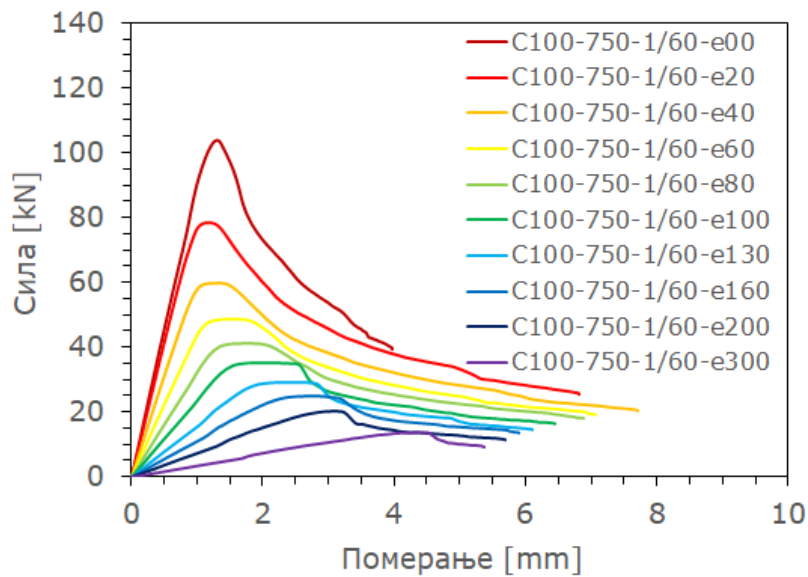
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	116.29	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	83.14	1.66	0.71	0.35	1.07	1.20
40	64.03	2.56	0.55	0.54	1.09	1.23
60	51.42	3.08	0.44	0.65	1.10	1.23
80	42.37	3.39	0.36	0.72	1.08	1.21
100	35.90	3.59	0.31	0.76	1.07	1.19
130	29.58	3.84	0.25	0.81	1.07	1.18
160	24.66	3.95	0.21	0.84	1.05	1.16
200	20.18	4.03	0.17	0.85	1.03	1.13
300	13.72	4.11	0.12	0.87	0.99	1.08
r	0.00	4.72	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.142. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C100-750-1/40

Табела 9.3. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C100-750-1/60

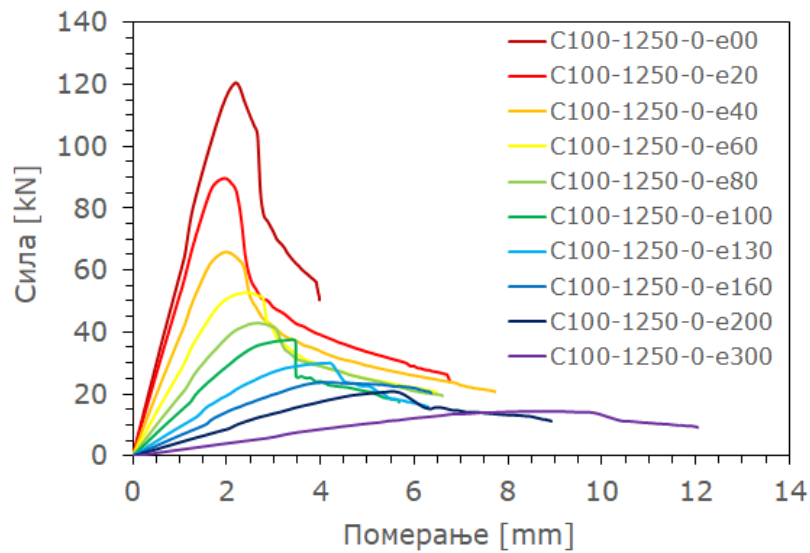
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	94.46	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	76.10	1.52	0.81	0.32	1.13	1.25
40	56.74	2.27	0.60	0.48	1.08	1.22
60	46.18	2.77	0.49	0.59	1.08	1.22
80	36.70	2.94	0.39	0.62	1.01	1.16
100	31.90	3.19	0.34	0.68	1.02	1.15
130	25.86	3.37	0.27	0.72	0.99	1.12
160	21.76	3.49	0.23	0.74	0.97	1.10
200	18.45	3.69	0.20	0.78	0.98	1.09
300	13.35	4.00	0.14	0.85	0.99	1.09
r	0.01	4.70	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.143. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C100-750-1/60

Табела 9.4. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C100-1250-0

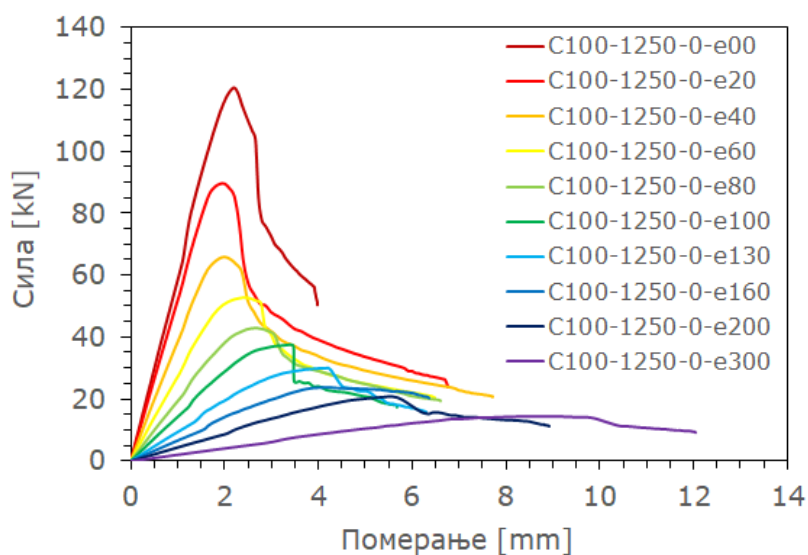
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	115.58	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	86.27	1.73	0.75	0.37	1.11	1.24
40	61.66	2.47	0.53	0.53	1.06	1.20
60	48.80	2.93	0.42	0.62	1.05	1.19
80	41.02	3.28	0.35	0.70	1.05	1.19
100	34.62	3.46	0.30	0.74	1.04	1.16
130	27.52	3.58	0.24	0.76	1.00	1.12
160	23.31	3.73	0.20	0.79	1.00	1.11
200	19.71	3.94	0.17	0.84	1.01	1.11
300	13.62	4.05	0.12	0.86	0.98	1.07
r	0.01	4.69	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.144. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C100-1250-0

Табела 9.5. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C100-1250-2/40

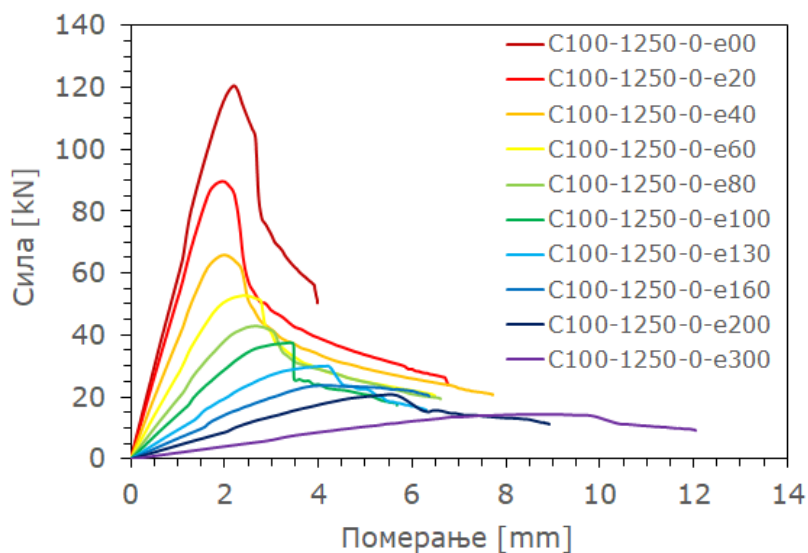
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	104.38	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	79.36	1.59	0.76	0.36	1.12	1.24
40	65.86	1.98	0.63	0.45	1.08	1.22
60	48.38	2.90	0.46	0.66	1.12	1.25
80	39.65	3.17	0.38	0.72	1.10	1.23
100	34.37	3.44	0.33	0.78	1.11	1.23
130	28.08	3.65	0.27	0.83	1.10	1.21
160	23.36	3.74	0.22	0.85	1.07	1.18
200	19.14	3.83	0.18	0.87	1.05	1.15
300	13.32	4.02	0.13	0.91	1.04	1.12
r	0.02	4.42	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.145. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C100-1250-2/40

Табела 9.6. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C100-1250-3/40

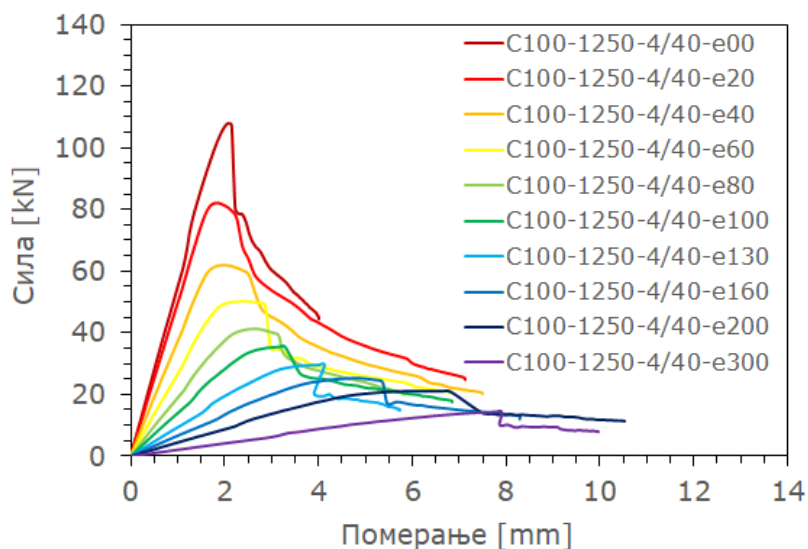
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	102.14	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	78.40	1.57	0.77	0.34	1.11	1.23
40	57.12	2.28	0.56	0.49	1.05	1.20
60	46.24	2.77	0.45	0.60	1.05	1.19
80	38.08	3.05	0.37	0.66	1.03	1.17
100	32.42	3.24	0.32	0.70	1.02	1.15
130	26.78	3.48	0.26	0.75	1.02	1.14
160	22.78	3.64	0.22	0.79	1.01	1.13
200	19.52	3.90	0.19	0.84	1.04	1.14
300	13.68	4.10	0.13	0.89	1.02	1.11
r	0.00	4.62	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.146. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C100-1250-3/40

Табела 9.7. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C100-1250-4/40

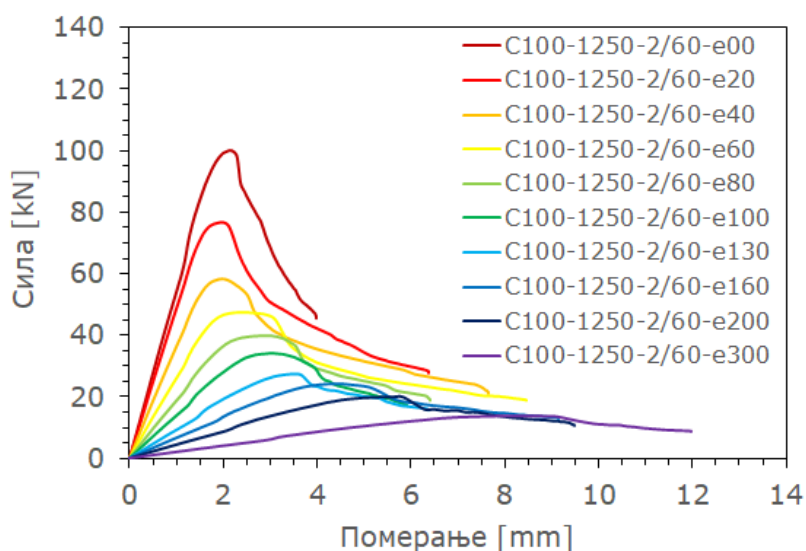
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	101.82	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	78.08	1.56	0.77	0.34	1.11	1.23
40	59.74	2.39	0.59	0.52	1.11	1.25
60	48.10	2.88	0.47	0.63	1.10	1.24
80	39.46	3.16	0.39	0.69	1.08	1.21
100	33.98	3.39	0.33	0.74	1.07	1.20
130	28.02	3.64	0.28	0.79	1.07	1.19
160	23.84	3.81	0.23	0.83	1.06	1.17
200	19.87	3.97	0.20	0.86	1.06	1.16
300	13.62	4.09	0.13	0.89	1.02	1.11
r	0.01	4.59	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.147. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C100-1250-4/40

Табела 9.8. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C100-1250-2/60

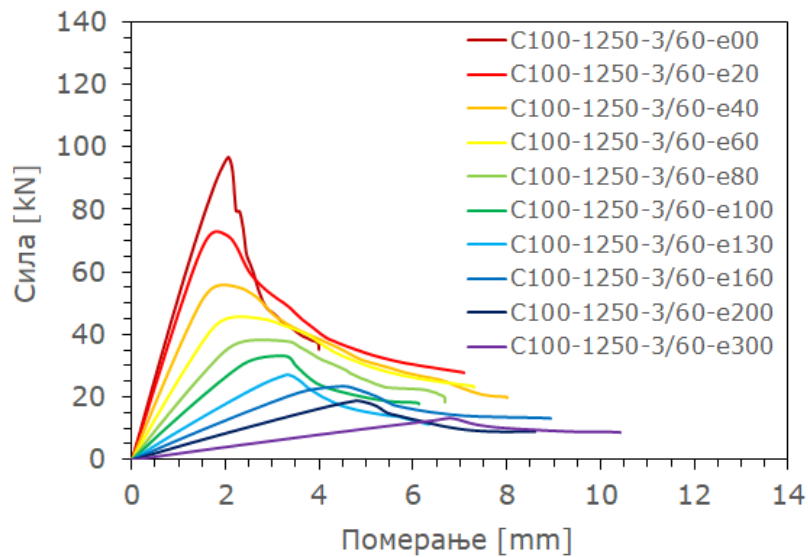
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	96.00	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	73.02	1.46	0.76	0.33	1.09	1.21
40	54.50	2.18	0.57	0.49	1.05	1.20
60	44.58	2.68	0.46	0.60	1.06	1.20
80	37.22	2.98	0.39	0.67	1.05	1.19
100	32.53	3.25	0.34	0.73	1.07	1.20
130	26.22	3.41	0.27	0.76	1.04	1.16
160	22.38	3.58	0.23	0.80	1.03	1.15
200	18.54	3.72	0.19	0.83	1.03	1.13
300	12.85	3.84	0.13	0.86	0.99	1.09
r	0.02	4.47	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.148. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C100-1250-2/60

Табела 9.9. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C100-1250-3/60

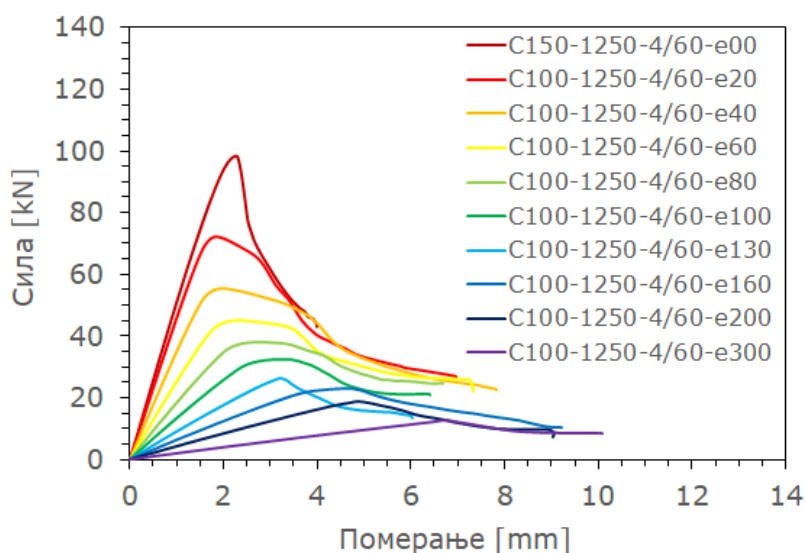
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	93.57	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	70.27	1.41	0.75	0.31	1.06	1.18
40	52.61	2.10	0.56	0.46	1.02	1.17
60	42.82	2.57	0.46	0.56	1.02	1.16
80	35.62	2.85	0.38	0.62	1.00	1.14
100	30.35	3.04	0.32	0.66	0.98	1.12
130	25.92	3.37	0.28	0.73	1.01	1.14
160	22.22	3.56	0.24	0.77	1.01	1.13
200	19.02	3.80	0.20	0.83	1.03	1.14
300	13.09	3.93	0.14	0.85	0.99	1.09
r	0.00	4.60	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.149. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C100-1250-3/60

Табела 9.10. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C100-1250-4/60

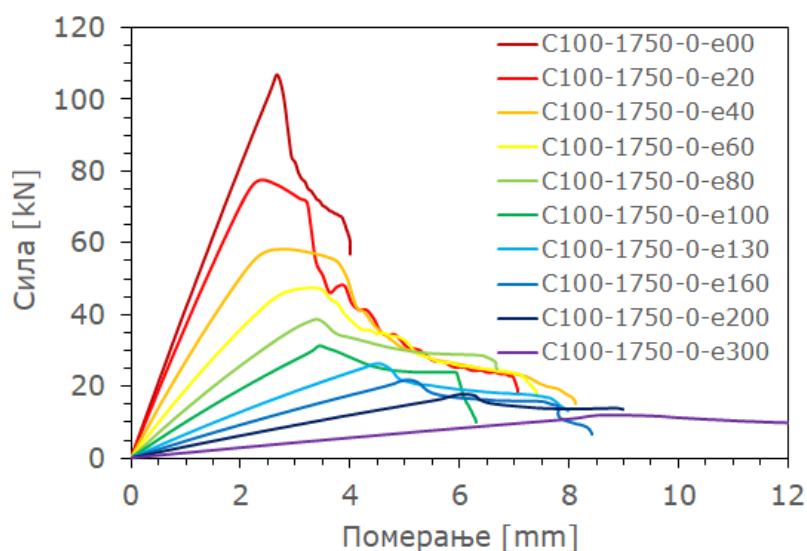
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	93.89	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	69.31	1.39	0.74	0.30	1.04	1.17
40	52.06	2.08	0.55	0.45	1.01	1.16
60	42.43	2.55	0.45	0.56	1.01	1.15
80	35.39	2.83	0.38	0.62	1.00	1.14
100	31.01	3.10	0.33	0.68	1.01	1.14
130	25.79	3.35	0.27	0.73	1.01	1.13
160	22.08	3.53	0.24	0.77	1.01	1.13
200	18.22	3.65	0.19	0.80	0.99	1.10
300	12.83	3.85	0.14	0.84	0.98	1.07
r	0.00	4.58	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.150. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C100-1250-4/60

Табела 9.11. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C100-1750-0

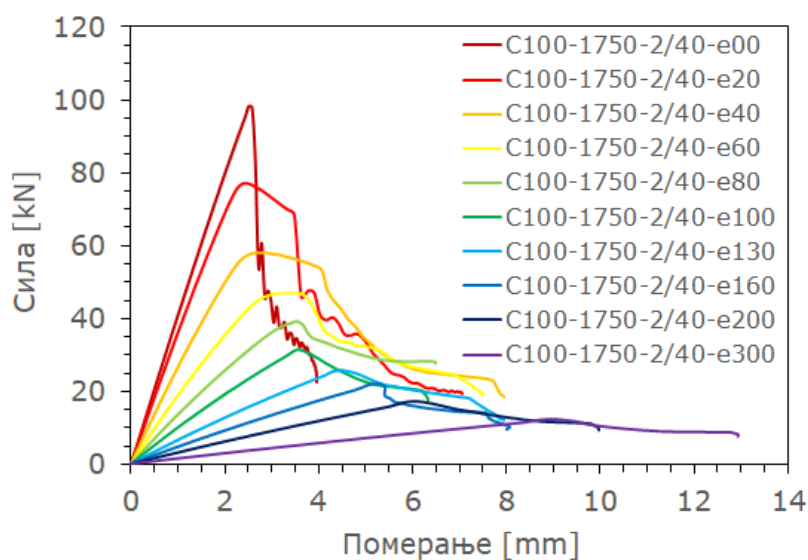
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{max}}$	$\frac{M}{M_{max}}$	$\frac{N}{N_{max}} + \frac{M}{M_{max}}$	$\left(\frac{N}{N_{max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{max}}\right)^{0.8}$
0	101.25	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	76.42	1.52	0.75	0.37	1.13	1.25
40	55.17	2.54	0.54	0.62	1.16	1.29
60	45.15	2.71	0.45	0.66	1.10	1.24
80	36.86	2.95	0.36	0.72	1.08	1.21
100	30.19	3.02	0.30	0.73	1.03	1.16
130	24.11	3.13	0.24	0.76	1.00	1.12
160	20.54	3.28	0.20	0.80	1.00	1.11
200	17.06	3.40	0.17	0.83	1.00	1.10
300	12.14	3.63	0.12	0.88	1.00	1.09
r	0.09	4.11	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.151. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C100-1750-0

Табела 9.12. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C100-1750-2/40

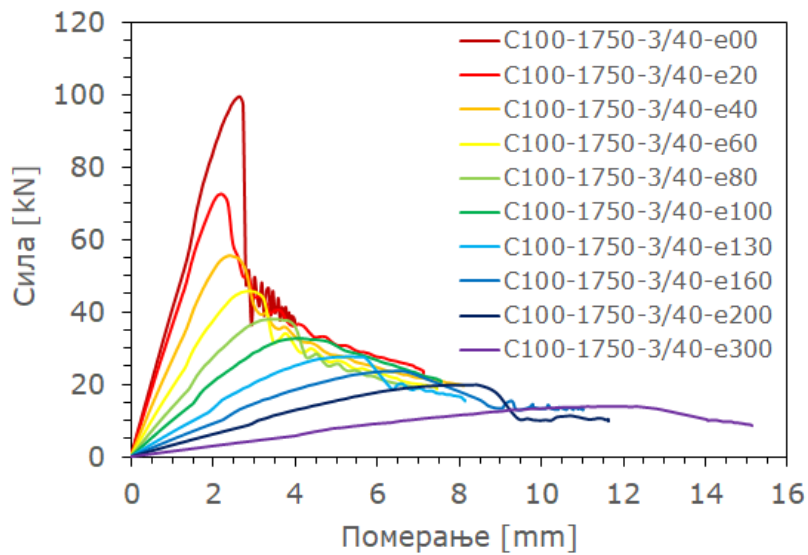
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	98.37	0.02	1.00	0.00	1.00	1.01
20	75.52	1.51	0.77	0.36	1.12	1.25
40	56.48	2.26	0.57	0.53	1.11	1.25
60	44.86	2.69	0.46	0.63	1.09	1.23
80	37.50	3.00	0.38	0.71	1.09	1.22
100	30.80	3.07	0.31	0.72	1.04	1.17
130	25.62	3.32	0.26	0.78	1.04	1.16
160	21.76	3.49	0.22	0.82	1.04	1.15
200	17.30	3.47	0.18	0.82	1.00	1.10
300	12.25	3.69	0.12	0.87	0.99	1.08
r	0.04	4.24	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.152. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C100-1750-2/40

Табела 9.13. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C100-1750-3/40

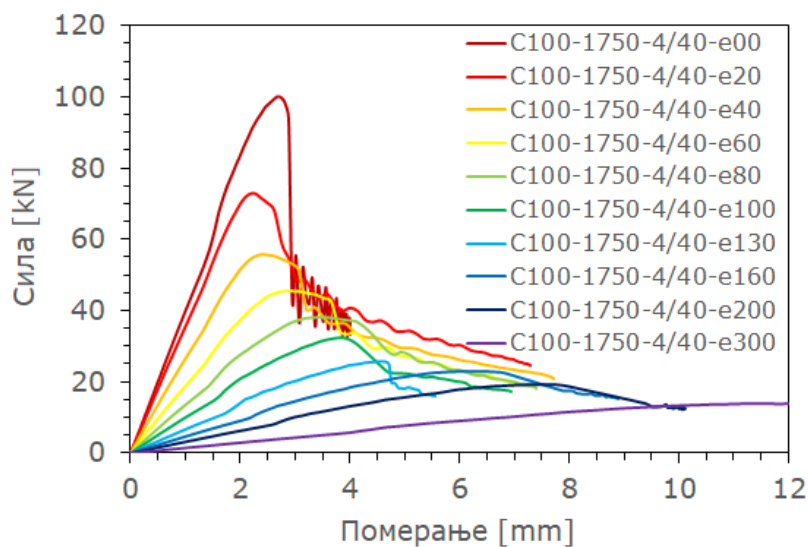
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{max}}$	$\frac{M}{M_{max}}$	$\frac{N}{N_{max}} + \frac{M}{M_{max}}$	$\left(\frac{N}{N_{max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{max}}\right)^{0.8}$
0	93.38	0.01	1.00	0.00	1.00	1.01
20	70.59	1.41	0.76	0.32	1.08	1.20
40	54.94	2.20	0.59	0.50	1.09	1.23
60	44.54	2.67	0.48	0.61	1.08	1.22
80	36.67	2.93	0.39	0.67	1.06	1.20
100	31.50	3.16	0.34	0.72	1.06	1.19
130	26.58	3.45	0.28	0.79	1.07	1.19
160	21.54	3.44	0.23	0.78	1.01	1.13
200	18.35	3.67	0.20	0.83	1.03	1.14
300	12.92	3.82	0.14	0.87	1.01	1.10
r	0.02	4.40	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.153. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C100-1750-3/40

Табела 9.14. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C100-1750-4/40

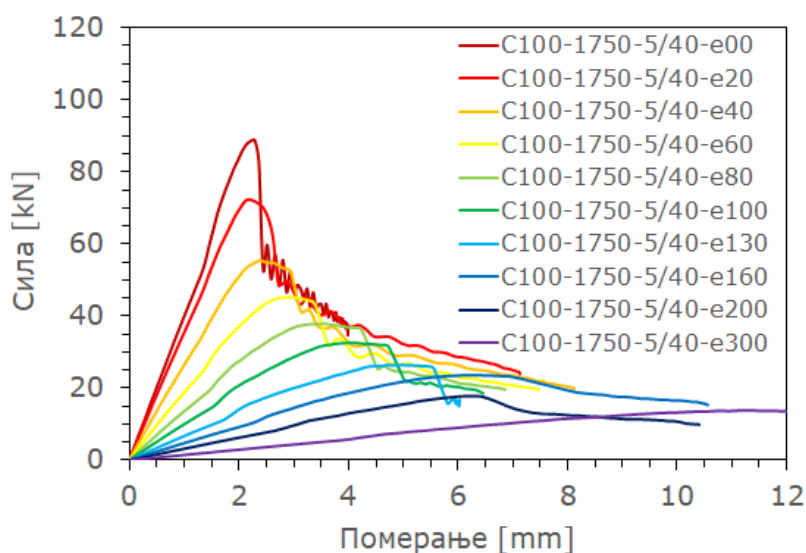
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{max}}$	$\frac{M}{M_{max}}$	$\frac{N}{N_{max}} + \frac{M}{M_{max}}$	$\left(\frac{N}{N_{max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{max}}\right)^{0.8}$
0	93.38	0.01	1.00	0.00	1.00	1.01
20	72.51	1.44	0.78	0.33	1.11	1.23
40	53.50	2.14	0.57	0.49	1.06	1.21
60	41.89	2.52	0.45	0.58	1.03	1.17
80	36.64	2.93	0.39	0.67	1.06	1.20
100	31.42	3.14	0.34	0.72	1.06	1.19
130	24.85	3.24	0.27	0.74	1.01	1.14
160	21.65	3.47	0.23	0.80	1.03	1.14
200	17.84	3.57	0.19	0.82	1.01	1.12
300	12.75	3.82	0.14	0.88	1.01	1.10
r	0.03	4.36	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.154. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C100-1750-4/40

Табела 9.15. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C100-1750-5/40

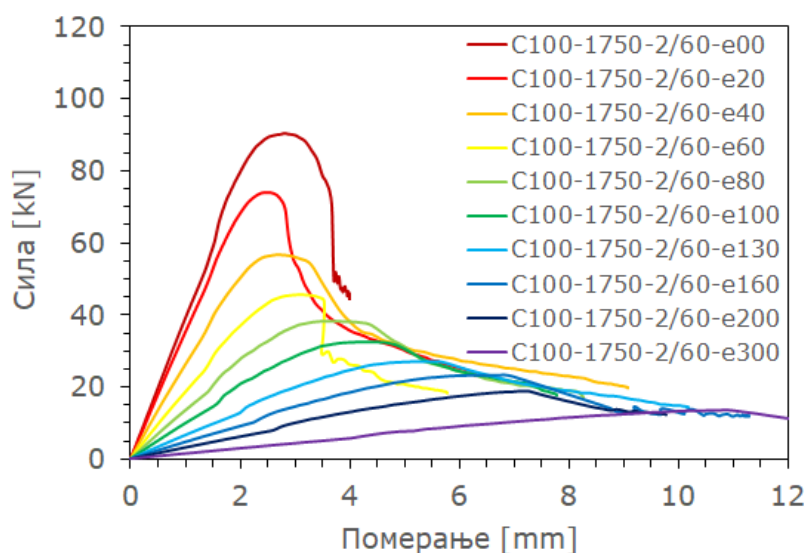
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	87.55	0.01	1.00	0.00	1.00	1.01
20	70.08	1.41	0.80	0.33	1.13	1.24
40	54.50	2.18	0.62	0.51	1.13	1.27
60	43.14	2.58	0.49	0.60	1.09	1.23
80	35.36	2.84	0.40	0.66	1.06	1.20
100	30.83	3.08	0.35	0.72	1.07	1.20
130	25.12	3.27	0.29	0.76	1.05	1.17
160	21.10	3.37	0.24	0.78	1.02	1.14
200	17.25	3.46	0.20	0.80	1.00	1.11
300	13.10	3.93	0.15	0.91	1.06	1.15
r	0.01	4.31	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.155. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C100-1750-5/40

Табела 9.16. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C100-1750-2/60

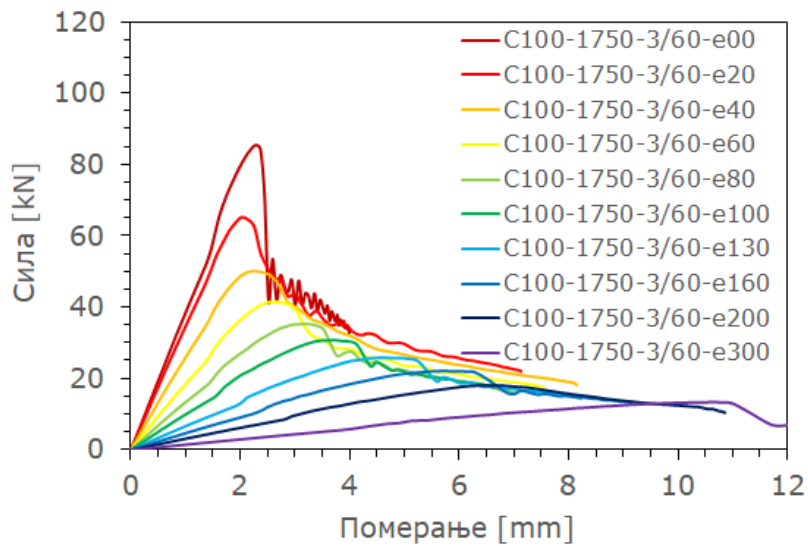
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	85.25	0.02	1.00	0.00	1.00	1.01
20	68.80	1.38	0.81	0.33	1.14	1.25
40	54.46	2.17	0.64	0.52	1.16	1.29
60	42.88	2.58	0.50	0.62	1.12	1.26
80	35.58	2.84	0.42	0.68	1.10	1.23
100	31.46	3.12	0.37	0.75	1.12	1.25
130	26.00	3.37	0.30	0.81	1.11	1.23
160	22.29	3.56	0.26	0.86	1.12	1.23
200	18.69	3.75	0.22	0.90	1.12	1.22
300	12.56	3.76	0.15	0.90	1.05	1.14
r	0.03	4.16	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.156. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C100-1750-2/60

Табела 9.17. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C100-1750-3/60

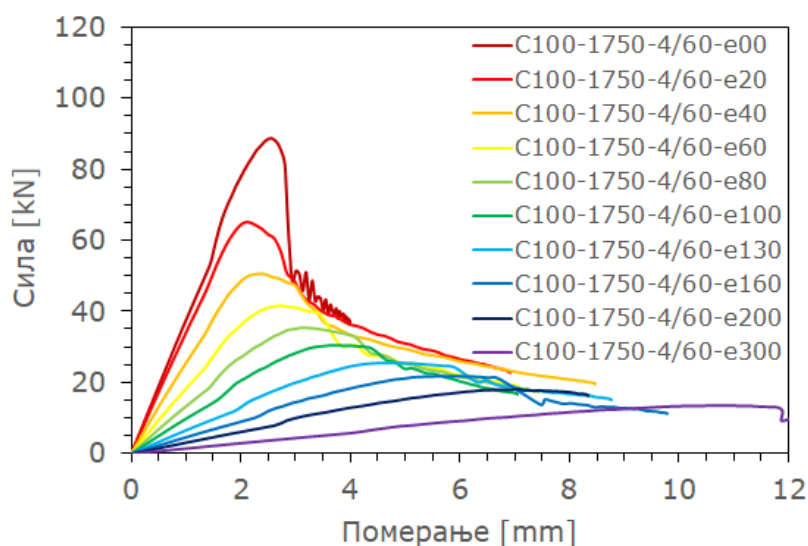
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{max}}$	$\frac{M}{M_{max}}$	$\frac{N}{N_{max}} + \frac{M}{M_{max}}$	$\left(\frac{N}{N_{max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{max}}\right)^{0.8}$
0	84.54	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	63.36	1.27	0.75	0.28	1.03	1.16
40	46.82	1.87	0.55	0.42	0.97	1.12
60	37.86	2.27	0.45	0.50	0.95	1.10
80	33.98	2.71	0.40	0.60	1.00	1.15
100	29.07	2.91	0.34	0.65	0.99	1.13
130	23.46	3.06	0.28	0.68	0.96	1.09
160	20.83	3.34	0.25	0.74	0.99	1.11
200	17.17	3.44	0.20	0.76	0.97	1.09
300	12.18	3.66	0.14	0.81	0.96	1.06
r	0.03	4.51	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.157. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C100-1750-3/60

Табела 9.18. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C100-1750-4/60

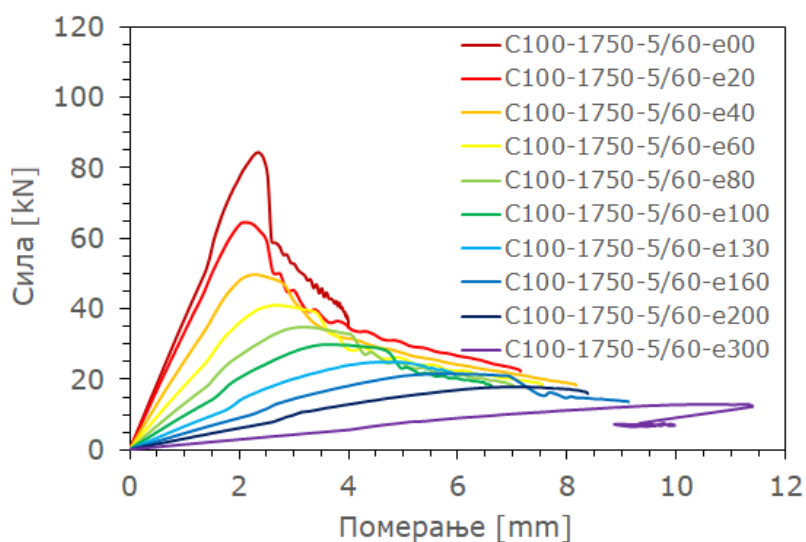
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	81.86	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	62.72	1.25	0.77	0.28	1.05	1.17
40	49.92	1.99	0.61	0.45	1.06	1.20
60	40.90	2.45	0.50	0.55	1.05	1.19
80	33.54	2.69	0.41	0.60	1.01	1.16
100	29.57	2.95	0.36	0.66	1.02	1.16
130	24.96	3.24	0.30	0.73	1.03	1.16
160	21.18	3.41	0.26	0.76	1.02	1.15
200	17.58	3.52	0.21	0.79	1.01	1.12
300	12.14	3.66	0.15	0.82	0.97	1.07
r	0.06	4.46	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.158. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C100-1750-4/60

Табела 9.19. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C100-1750-5/60

e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	79.10	0.01	1.00	0.00	1.00	1.01
20	62.21	1.24	0.79	0.28	1.06	1.18
40	46.34	1.86	0.59	0.41	1.00	1.15
60	38.69	2.33	0.49	0.52	1.01	1.16
80	33.50	2.69	0.42	0.60	1.02	1.17
100	28.13	2.81	0.36	0.63	0.98	1.13
130	23.97	3.11	0.30	0.69	1.00	1.13
160	21.01	3.36	0.27	0.75	1.02	1.14
200	17.49	3.50	0.22	0.78	1.00	1.12
300	12.28	3.70	0.16	0.82	0.98	1.08
r	0.00	4.48	0.00	1.00	1.00	1.00

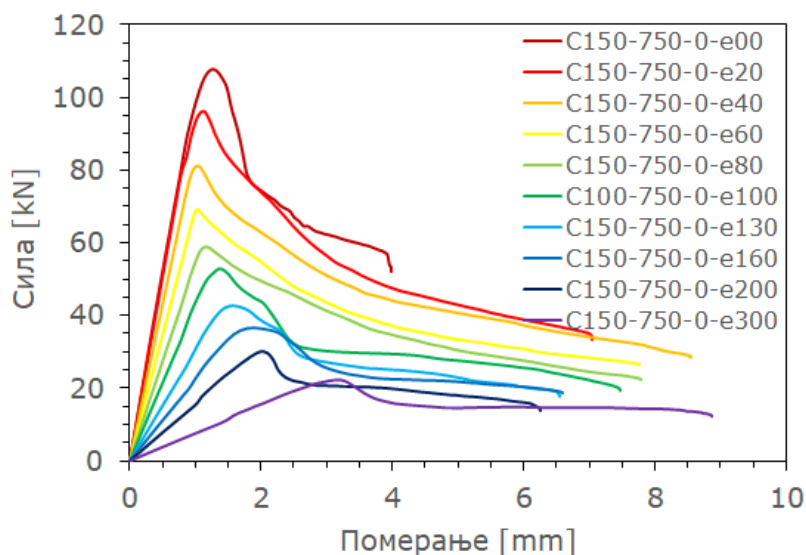


Слика 9.159. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C100-1750-5/60

9.4.2. ЕЛЕМЕНТИ C150

Табела 9.20. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C150-750-0

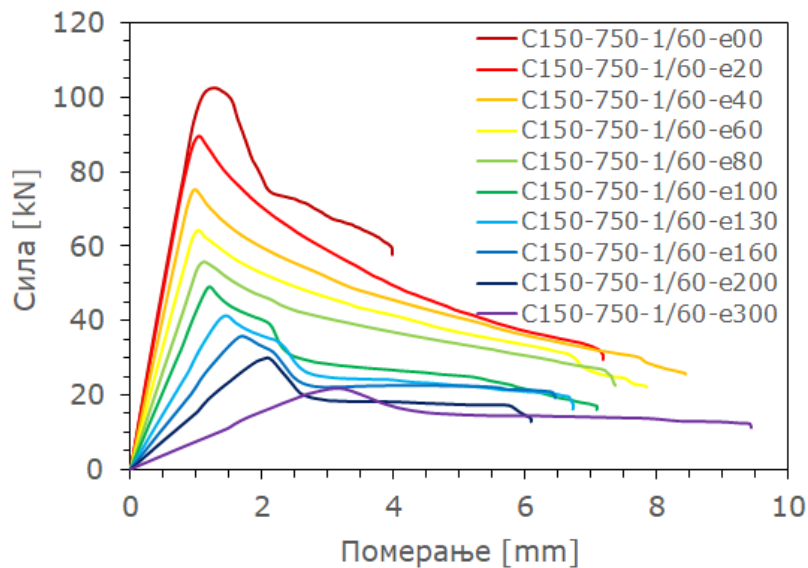
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	105.02	0.01	1.00	0.00	1.00	1.00
20	90.62	1.81	0.86	0.25	1.11	1.21
40	80.06	3.21	0.76	0.43	1.20	1.32
60	68.99	4.14	0.66	0.56	1.22	1.34
80	55.01	4.40	0.52	0.60	1.12	1.26
100	50.24	5.03	0.48	0.68	1.16	1.29
130	39.07	5.09	0.37	0.69	1.06	1.19
160	34.91	5.59	0.33	0.76	1.09	1.21
200	30.03	6.01	0.29	0.81	1.10	1.21
300	21.55	6.47	0.21	0.87	1.08	1.18
r	0.05	7.39	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.160. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-750-0

Табела 9.21. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C150-750-1/60

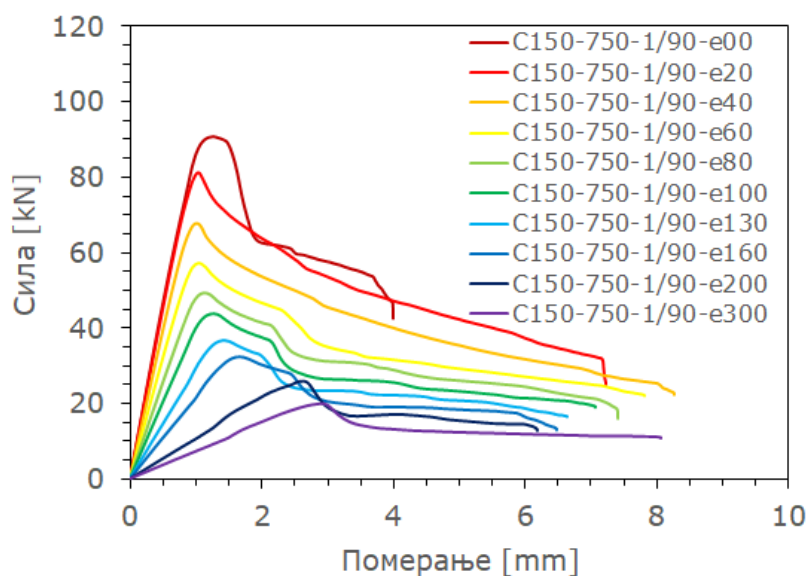
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{max}}$	$\frac{M}{M_{max}}$	$\frac{N}{N_{max}} + \frac{M}{M_{max}}$	$\left(\frac{N}{N_{max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{max}}\right)^{0.8}$
0	96.13	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	81.79	1.64	0.85	0.22	1.07	1.18
40	75.26	3.01	0.78	0.41	1.19	1.31
60	64.42	3.86	0.67	0.52	1.19	1.32
80	55.65	4.46	0.58	0.60	1.18	1.31
100	46.82	4.68	0.49	0.63	1.12	1.25
130	40.61	5.28	0.42	0.71	1.13	1.26
160	35.68	5.71	0.37	0.77	1.14	1.26
200	29.81	5.96	0.31	0.80	1.11	1.23
300	21.36	6.41	0.22	0.86	1.09	1.19
r	0.01	7.42	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.161. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-750-1/60

Табела 9.22. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C150-750-1/90

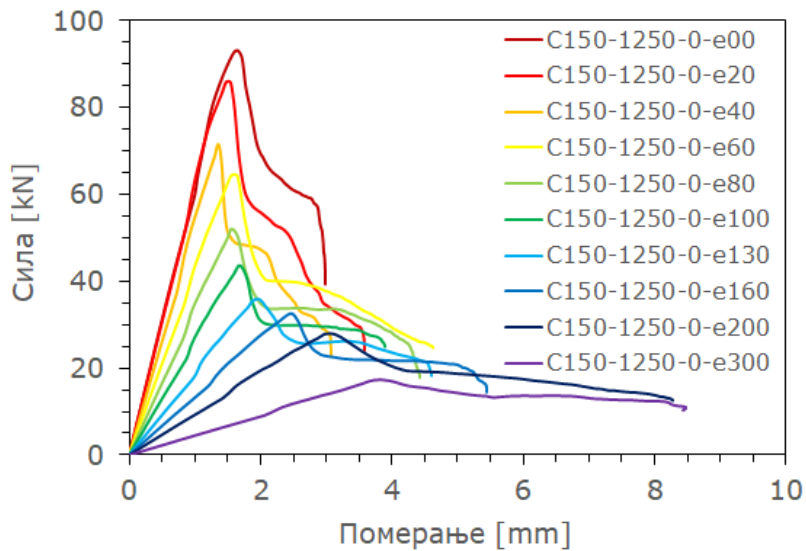
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	89.98	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	79.04	1.58	0.88	0.22	1.10	1.20
40	67.33	2.69	0.75	0.37	1.12	1.24
60	56.06	3.36	0.62	0.46	1.09	1.22
80	48.70	3.90	0.54	0.54	1.08	1.22
100	42.98	4.29	0.48	0.59	1.07	1.21
130	36.26	4.72	0.40	0.65	1.05	1.19
160	31.54	5.05	0.35	0.69	1.05	1.18
200	22.94	5.53	0.25	0.76	1.02	1.14
300	19.55	5.86	0.22	0.81	1.02	1.14
r	0.01	7.27	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.162. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-750-1/90

Табела 9.23. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C150-1250-0

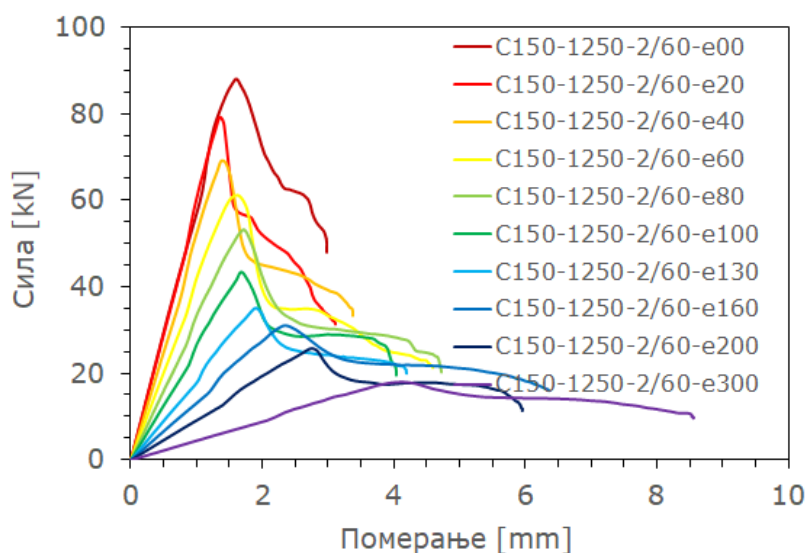
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{max}}$	$\frac{M}{M_{max}}$	$\frac{N}{N_{max}} + \frac{M}{M_{max}}$	$\left(\frac{N}{N_{max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{max}}\right)^{0.8}$
0	89.60	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	83.01	1.66	0.93	0.29	1.21	1.31
40	68.61	2.75	0.77	0.48	1.24	1.36
60	59.07	3.55	0.66	0.62	1.28	1.40
80	52.06	4.15	0.58	0.72	1.30	1.42
100	43.62	4.37	0.49	0.76	1.25	1.36
130	35.52	4.62	0.40	0.80	1.20	1.32
160	29.55	4.72	0.33	0.82	1.15	1.27
200	25.87	5.16	0.29	0.90	1.19	1.29
300	17.15	5.16	0.19	0.90	1.09	1.18
r	0.01	5.75	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.163. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1250-0

Табела 9.24. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C150-1250-2/60

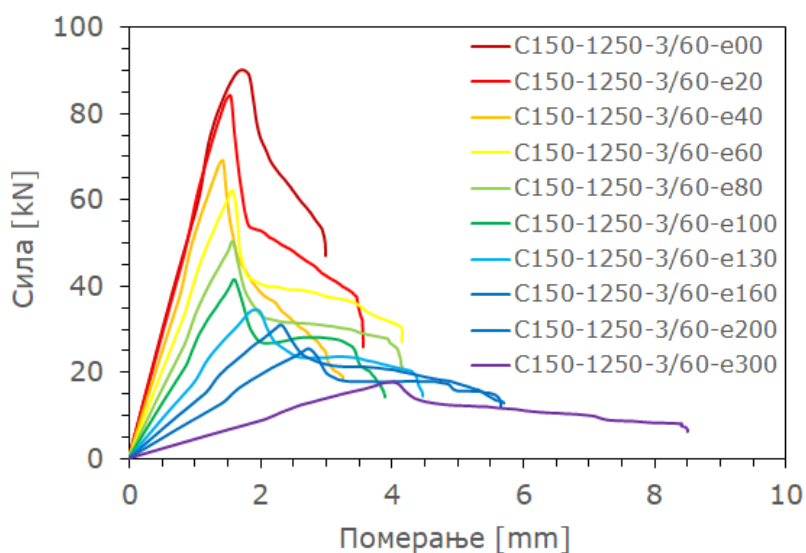
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	85.70	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	76.35	1.53	0.89	0.28	1.17	1.27
40	64.03	2.56	0.75	0.47	1.21	1.33
60	57.73	3.47	0.67	0.63	1.30	1.42
80	48.77	3.90	0.57	0.71	1.28	1.40
100	41.70	4.16	0.49	0.76	1.24	1.36
130	33.98	4.41	0.40	0.80	1.20	1.32
160	29.10	4.66	0.34	0.85	1.19	1.30
200	23.90	4.78	0.28	0.87	1.15	1.25
300	17.17	5.15	0.20	0.94	1.14	1.22
r	0.06	5.51	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.164. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1250-2/60

Табела 9.25. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C150-1250-3/60

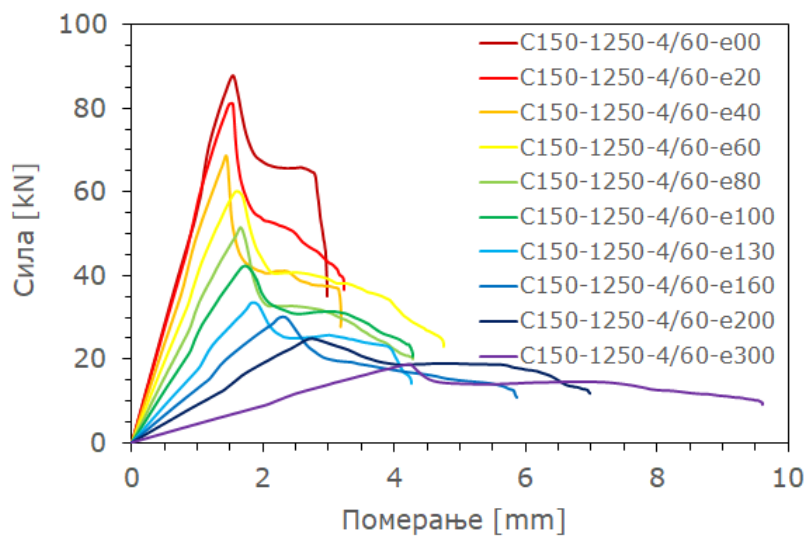
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	85.70	0.01	1.00	0.00	1.00	1.01
20	77.06	1.54	0.90	0.27	1.17	1.27
40	65.54	2.62	0.76	0.46	1.22	1.34
60	57.18	3.43	0.67	0.59	1.26	1.38
80	48.13	3.85	0.56	0.67	1.23	1.35
100	39.87	3.97	0.47	0.69	1.16	1.29
130	32.27	4.20	0.38	0.73	1.11	1.23
160	29.01	4.64	0.34	0.81	1.14	1.26
200	23.73	4.76	0.28	0.83	1.10	1.22
300	16.98	5.09	0.20	0.88	1.08	1.18
r	0.11	5.76	0.00	1.00	1.00	1.01



Слика 9.165. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1250-3/60

Табела 9.26. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C150-1250-4/60

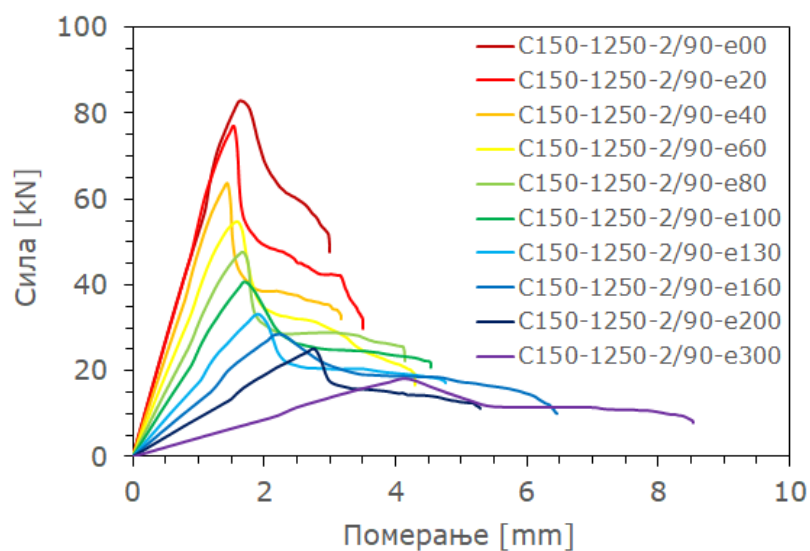
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	83.97	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	75.97	1.52	0.90	0.26	1.17	1.27
40	66.50	2.67	0.79	0.46	1.26	1.37
60	58.46	3.51	0.70	0.61	1.31	1.42
80	47.62	3.80	0.57	0.66	1.23	1.35
100	41.98	4.21	0.50	0.73	1.23	1.35
130	32.06	4.17	0.38	0.73	1.11	1.24
160	28.53	4.56	0.34	0.79	1.13	1.25
200	23.54	4.71	0.28	0.82	1.10	1.21
300	16.34	4.90	0.19	0.85	1.05	1.15
r	0.00	5.74	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.166. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1250-4/60

Табела 9.27. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C150-1250-2/90

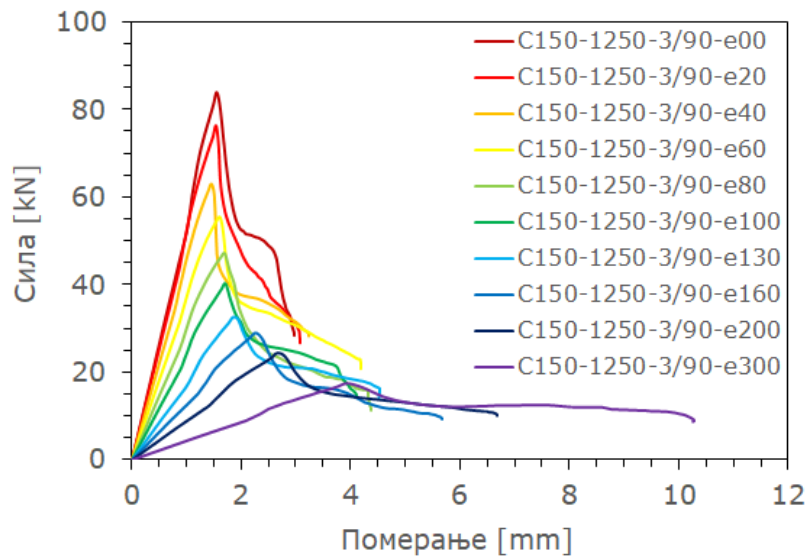
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	82.69	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	75.33	1.51	0.91	0.27	1.19	1.28
40	62.50	2.50	0.76	0.46	1.21	1.33
60	54.30	3.26	0.66	0.59	1.25	1.37
80	45.82	3.67	0.55	0.67	1.22	1.35
100	39.68	3.97	0.48	0.72	1.20	1.33
130	32.62	4.23	0.39	0.77	1.17	1.29
160	28.38	4.54	0.34	0.83	1.17	1.29
200	23.31	4.66	0.28	0.85	1.13	1.24
300	16.31	4.88	0.20	0.89	1.09	1.18
r	0.03	5.48	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.167. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1250-2/90

Табела 9.28. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C150-1250-3/90

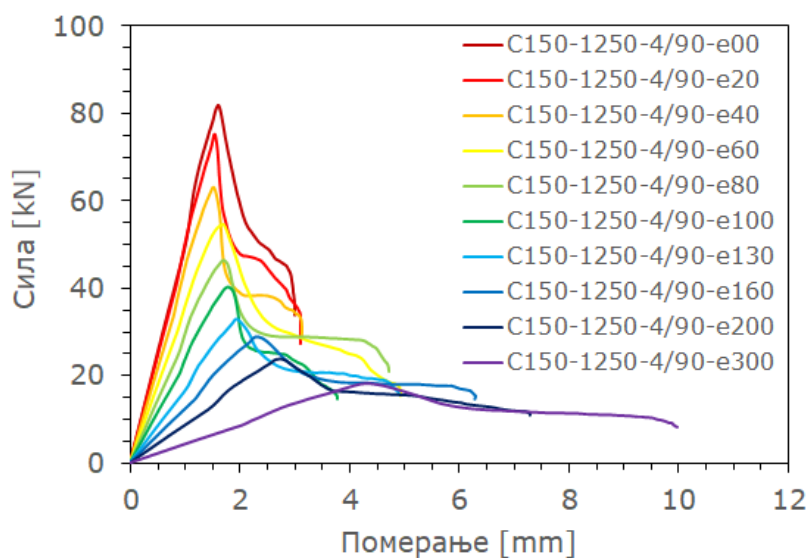
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	83.84	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	73.66	1.48	0.88	0.27	1.15	1.25
40	61.38	2.45	0.73	0.45	1.18	1.31
60	52.19	3.13	0.62	0.57	1.20	1.33
80	44.90	3.59	0.54	0.66	1.19	1.32
100	38.91	3.89	0.46	0.71	1.18	1.30
130	32.53	4.23	0.39	0.77	1.16	1.28
160	27.90	4.46	0.33	0.82	1.15	1.27
200	23.10	4.63	0.28	0.85	1.12	1.23
300	16.06	4.82	0.19	0.88	1.07	1.17
r	0.02	5.46	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.168. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1250-3/90

Табела 9.29. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C150-1250-4/90

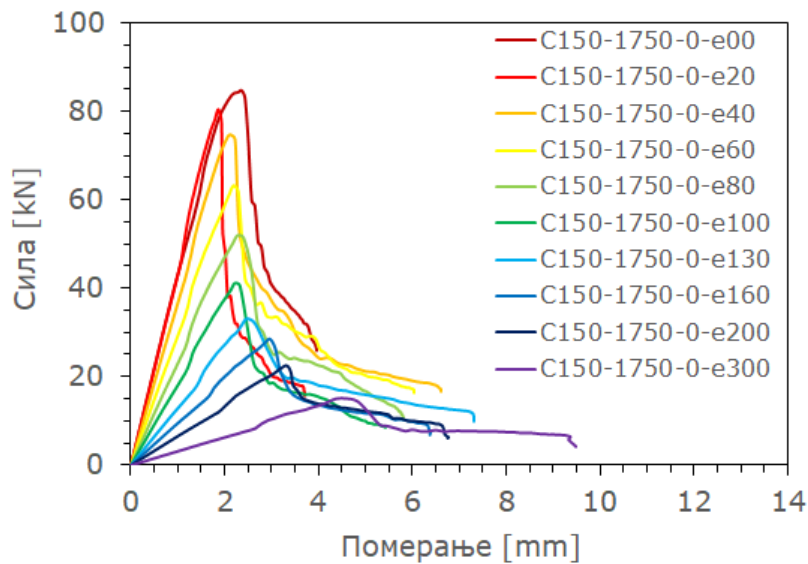
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	80.64	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	72.58	1.44	0.90	0.27	1.17	1.27
40	61.63	2.47	0.76	0.46	1.22	1.34
60	53.06	3.19	0.66	0.59	1.25	1.37
80	44.38	3.55	0.55	0.66	1.21	1.34
100	38.62	3.86	0.48	0.72	1.20	1.32
130	32.93	4.29	0.41	0.80	1.21	1.32
160	27.58	4.42	0.34	0.82	1.17	1.28
200	22.96	4.60	0.28	0.86	1.14	1.25
300	16.58	4.98	0.21	0.93	1.13	1.22
r	0.00	5.37	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.169. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1250-4/90

Табела 9.30. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C150-1750-0

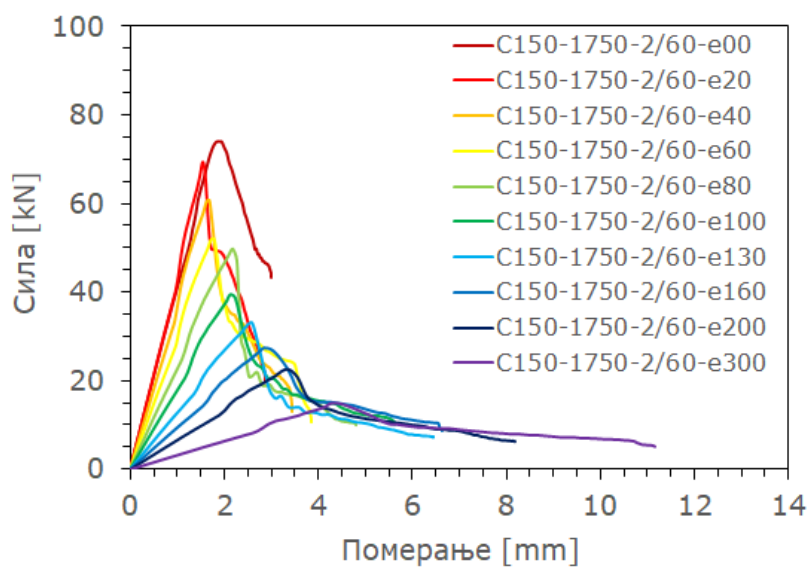
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{max}}$	$\frac{M}{M_{max}}$	$\frac{N}{N_{max}} + \frac{M}{M_{max}}$	$\left(\frac{N}{N_{max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{max}}\right)^{0.8}$
0	83.39	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	78.14	1.57	0.94	0.30	1.24	1.33
40	72.64	2.90	0.87	0.55	1.42	1.52
60	58.18	3.49	0.70	0.66	1.36	1.47
80	48.32	3.87	0.58	0.74	1.32	1.43
100	41.28	4.13	0.50	0.78	1.28	1.39
130	33.15	4.31	0.40	0.82	1.22	1.33
160	27.57	4.43	0.33	0.84	1.17	1.28
200	22.61	4.55	0.27	0.87	1.14	1.24
300	15.14	4.52	0.18	0.86	1.04	1.14
r	0.06	5.26	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.170. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1750-0

Табела 9.31. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C150-1750-2/60

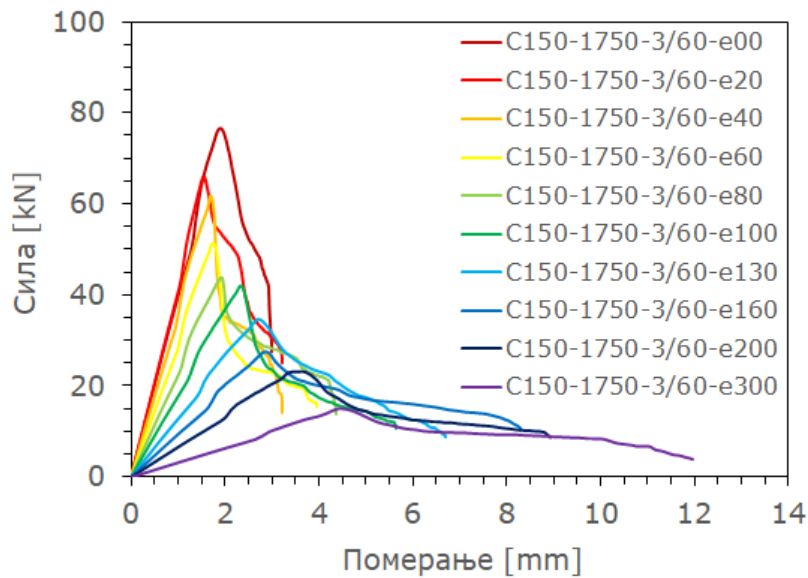
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	73.22	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	66.30	1.33	0.91	0.27	1.17	1.27
40	60.64	2.42	0.83	0.48	1.31	1.42
60	51.71	3.11	0.71	0.62	1.33	1.44
80	46.59	3.72	0.64	0.75	1.38	1.49
100	39.55	3.96	0.54	0.79	1.33	1.44
130	33.12	4.30	0.45	0.86	1.31	1.42
160	26.51	4.25	0.36	0.85	1.21	1.32
200	22.00	4.40	0.30	0.88	1.18	1.29
300	14.82	4.42	0.20	0.88	1.09	1.19
r	0.07	4.99	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.171. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1750-2/60

Табела 9.32. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C150-1750-3/60

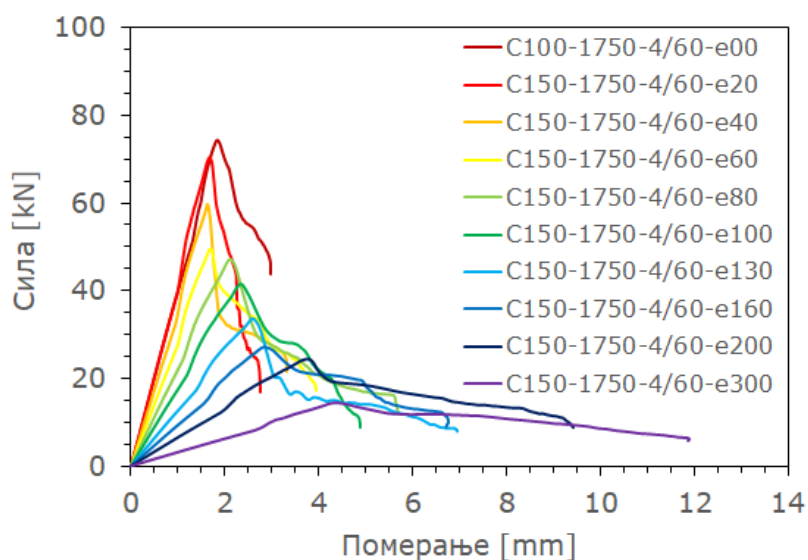
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	76.03	0.02	1.00	0.00	1.00	1.01
20	66.11	1.31	0.87	0.26	1.13	1.23
40	59.17	2.36	0.78	0.47	1.24	1.36
60	51.01	3.07	0.67	0.61	1.28	1.40
80	43.46	3.48	0.57	0.69	1.26	1.38
100	38.98	3.89	0.51	0.77	1.28	1.40
130	32.18	4.18	0.42	0.83	1.25	1.36
160	27.46	4.41	0.36	0.87	1.23	1.34
200	21.52	4.31	0.28	0.85	1.13	1.24
300	14.61	4.37	0.19	0.86	1.05	1.16
r	0.18	5.07	0.00	1.00	1.00	1.01



Слика 9.172. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1750-3/60

Табела 9.33. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C150-1750-4/60

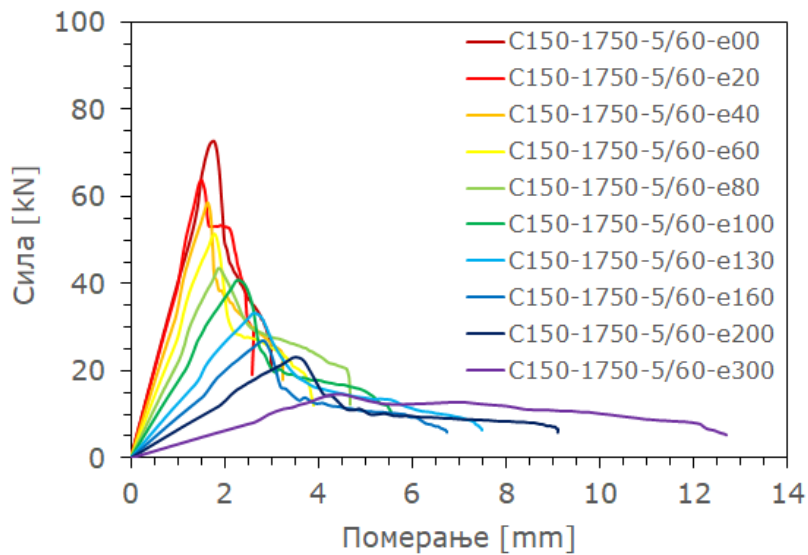
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	74.30	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	67.01	1.35	0.90	0.27	1.18	1.28
40	57.66	2.29	0.78	0.47	1.24	1.36
60	49.31	2.97	0.66	0.61	1.27	1.39
80	44.10	3.53	0.59	0.72	1.31	1.43
100	38.82	3.88	0.52	0.79	1.31	1.42
130	32.69	4.25	0.44	0.87	1.31	1.41
160	27.10	4.31	0.36	0.88	1.24	1.35
200	23.39	4.70	0.31	0.96	1.27	1.36
300	14.54	4.38	0.20	0.89	1.09	1.19
r	0.07	4.90	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.173. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1750-4/60

Табела 9.34. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C150-1750-5/60

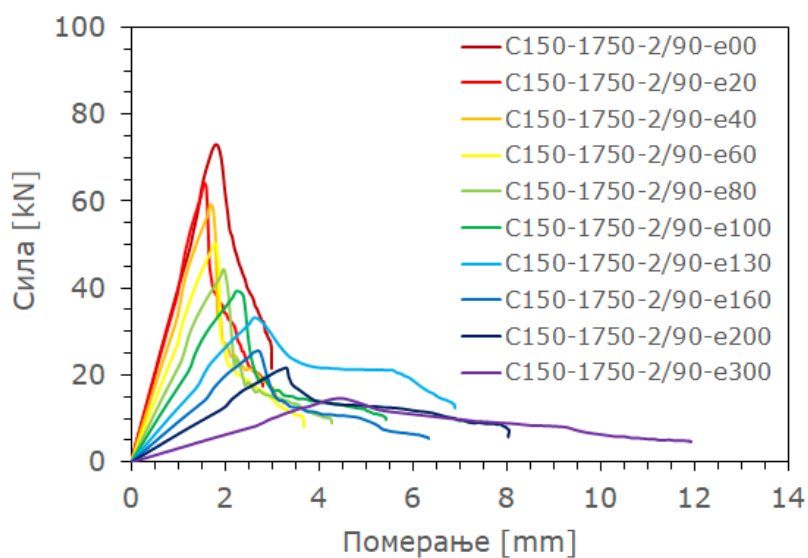
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	71.62	0.01	1.00	0.00	1.00	1.01
20	63.94	1.27	0.89	0.27	1.16	1.26
40	56.86	2.27	0.79	0.48	1.27	1.38
60	47.01	2.82	0.66	0.59	1.25	1.37
80	42.24	3.39	0.59	0.71	1.30	1.42
100	38.88	3.88	0.54	0.81	1.36	1.46
130	32.21	4.18	0.45	0.88	1.33	1.43
160	26.48	4.24	0.37	0.89	1.26	1.36
200	22.48	4.51	0.31	0.94	1.26	1.35
300	14.66	4.40	0.20	0.92	1.13	1.22
r	0.05	4.78	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.174. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1750-5/60

Табела 9.35. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C150-1750-2/90

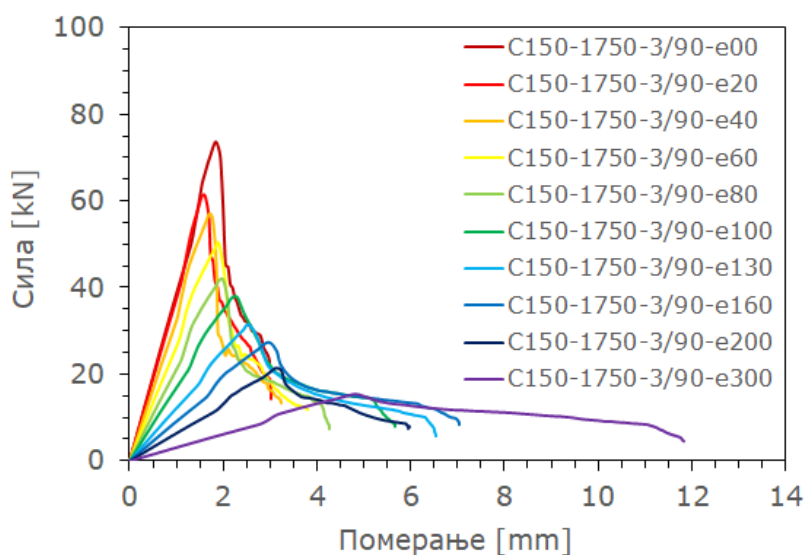
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	72.90	0.01	1.00	0.00	1.00	1.01
20	64.35	1.27	0.88	0.25	1.14	1.24
40	59.26	2.38	0.81	0.47	1.28	1.40
60	49.34	2.96	0.68	0.59	1.26	1.38
80	44.16	3.53	0.61	0.70	1.31	1.42
100	37.95	3.80	0.52	0.75	1.28	1.39
130	31.68	4.11	0.43	0.82	1.25	1.36
160	25.36	4.05	0.35	0.80	1.15	1.27
200	21.50	4.31	0.29	0.85	1.15	1.26
300	14.33	4.31	0.20	0.85	1.05	1.15
r	0.09	5.04	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.175. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1750-2/90

Табела 9.36. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C150-1750-3/90

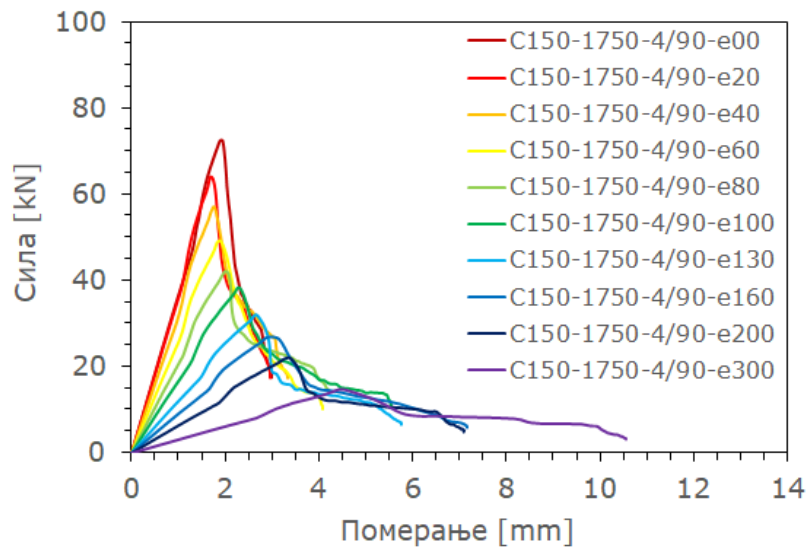
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	73.47	0.02	1.00	0.00	1.00	1.01
20	61.34	1.23	0.83	0.25	1.08	1.19
40	53.66	2.14	0.73	0.43	1.16	1.28
60	49.12	2.95	0.67	0.59	1.26	1.38
80	41.63	3.33	0.57	0.66	1.23	1.36
100	37.44	3.73	0.51	0.74	1.25	1.37
130	30.22	3.93	0.41	0.78	1.20	1.31
160	26.93	4.30	0.37	0.86	1.22	1.33
200	21.34	4.24	0.29	0.85	1.14	1.25
300	15.19	4.56	0.21	0.91	1.12	1.21
r	0.01	5.01	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.176. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1750-3/90

Табела 9.37. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C150-1750-4/90

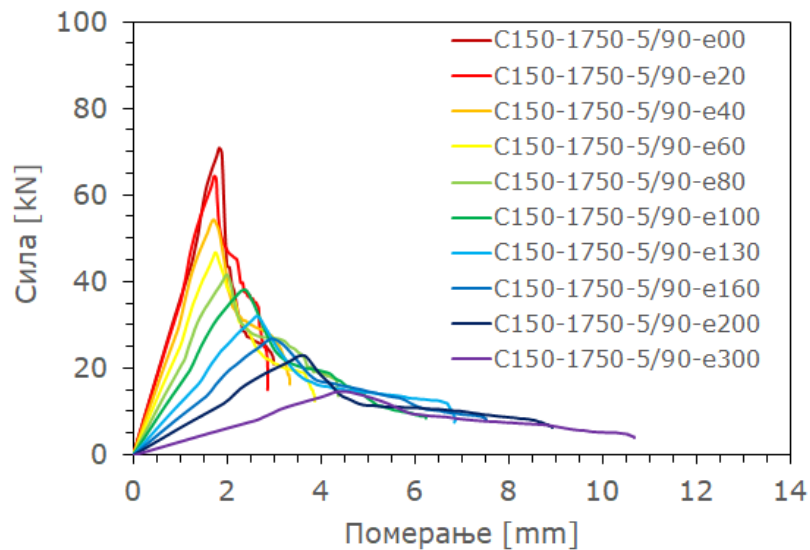
e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	70.91	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	61.44	1.22	0.87	0.26	1.13	1.23
40	56.06	2.24	0.79	0.48	1.27	1.38
60	48.80	2.92	0.69	0.62	1.31	1.43
80	41.02	3.28	0.58	0.70	1.28	1.40
100	36.77	3.67	0.52	0.78	1.30	1.41
130	30.82	4.01	0.43	0.86	1.29	1.40
160	25.42	4.07	0.36	0.87	1.23	1.33
200	20.83	4.16	0.29	0.89	1.18	1.28
300	14.29	4.27	0.20	0.91	1.11	1.21
r	0.02	4.68	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.177. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1750-4/90

Табела 9.38. Карактеристични резултати параметарске анализе за елементе C150-1750-5/90

e [mm]	N_p [kN]	M_p [kNm]	$\frac{N}{N_{\max}}$	$\frac{M}{M_{\max}}$	$\frac{N}{N_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}}$	$\left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M}{M_{\max}}\right)^{0.8}$
0	68.93	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
20	60.26	1.21	0.87	0.24	1.12	1.22
40	53.34	2.14	0.77	0.43	1.20	1.32
60	45.34	2.71	0.66	0.54	1.20	1.33
80	40.64	3.24	0.59	0.65	1.24	1.36
100	36.61	3.66	0.53	0.73	1.26	1.38
130	29.89	3.89	0.43	0.78	1.21	1.33
160	25.57	4.08	0.37	0.82	1.19	1.30
200	21.82	4.36	0.32	0.87	1.19	1.30
300	14.31	4.29	0.21	0.86	1.07	1.17
r	0.05	4.99	0.00	1.00	1.00	1.00



Слика 9.178. Дијаграм зависности силе притиска и аксијалног скраћења за елементе C150-1750-5/90

9.5. ПРИЛОГ Д: ОДРЕЂИВАЊЕ НОСИВОСТИ ПОПРЕЧНОГ ПРЕСЕКА ЕЛЕМЕНТА ПРЕМА SRPS EN 1993-1-3

9.5.1. ЕЛЕМЕНТИ С100 БЕЗ ОТВОРА У РЕБРУ

	e00	e40	e80
Номинална ширина равне стране ивичног укрућења $b_{p,c}$:		18.1 mm	
Номинална ширина фланше b_p :		56.2 mm	
Номинална ширина (висина) ребра h_w :		96.3 mm	
Одређивање ефективне ширине равне стране ивичног укрућења			
Однос нормалних напона на ивицама равног дела лима ψ :	1.0	0.797	0.736
Коефицијент избочавања k_σ :	0.430	0.508	0.537
Релативна виткост $\bar{\lambda}_p$:	0.487	0.447	0.435
Коефицијент редукције ρ :	1.0	1.0	1.0
Ефективна ширина ивичног укрућења C_{eff} :	18.1 mm	18.1 mm	18.10 mm
Одређивање ефективне ширине фланше			
Однос нормалних напона на ивицама равног дела лима ψ :	0.885	1.0	1.0
Коефицијент избочавања k_σ :	4.237	4.0	4.0
Релативна виткост $\bar{\lambda}_p$:	0.481	0.495	0.495
Коефицијент редукције ρ :	1.0	1.0	1.0
Ефективна ширина фланше $b_{e1} = b_{e2}$:	28.1 mm	28.1 mm	28.1 mm
Одређивање ефективне површине ивичног укрућења са припадајућим делом фланше			
Укупна бруто површина A_s :	92.48 mm ²	92.48 mm ²	92.48 mm ²
Момент инерције ефективне површине ивичног укрућења I_s :	3192.28 mm ⁴	3192.28 mm ⁴	3192.28 mm ⁴
Хоризонтално растојање од споја ребро-фланша до тежишта ефективне површине ивичног укрућења (горња фланша) b_1 :	48.11 mm	48.11 mm	48.11 mm

Хоризонтално растојање од споја ребро-фланша до тежишта ефективне површине ивичног укрућења (доња фланша) b_1 :	48.11 mm	48.11 mm	48.11 mm
Крутост замењујуће опруге K :	1.036 N/mm	1.036 N/mm	1.036 N/mm
Еластични критични напон ивичног укрућења $\sigma_{cr,s}$:	569.94 N/mm ²	569.94 N/mm ²	569.94 N/mm ²
Релативна виткост $\bar{\lambda}_d$:	0.642	0.642	0.642
Коефицијент редукције за дисторзионо извијање χ_d :	1.0	1.0	1.0
Редукована ефективна површина попречног пресека ивичног укрућења $A_{s,red}$:	92.48 mm ²	92.48 mm ²	92.48 mm ²
Одређивање ефективне површине ребра			
Однос нормалних напона на ивицама равног дела лима ψ :	1.0	-0.080	-0.418
Коефицијент избочавања k_σ :	4.0	8.374	12.15
Релативна виткост $\bar{\lambda}_p$:	0.847	0.586	0.486
Коефицијент редукције ρ :	0.875	1.0	1.0
Ефективна ширина ребра b_{eff} :	84.2 mm	96.2 mm	96.2 mm
Укупна бруто површина A_s :	192.48 mm ²	192.48 mm ²	192.48 mm ²
Редукована ефективна површина попречног пресека ребра $A_{s,red}$:	168.20 mm ²	192.48 mm ²	192.48 mm ²
Одређивање отпорности попречног пресека на притисак			
Укупна ефективна површина попречног пресека A_{eff} :	468.5 mm ²	493.64 mm ²	493.64 mm ²
Отпорност попречног пресека на притисак $N_{c,Rd}$:	110.10 kN	116.01 kN	116.01 kN
Одређивање отпорности попречног пресека на савијање			
Пластични отпорни момент попречног пресека W_{pl} :	18664.50 mm ³	18664.50 mm ³	18664.50 mm ³
Еластични отпорни момент попречног пресека W_{el} :	16197.38 mm ³	16197.38 mm ³	16197.38 mm ³

Отпорни момент ефективног поперчног пресека W_{eff} :	16191.42 mm ³	16197.38 mm ³	16197.38 mm ³
Отпорност поперчног пресека на савијање $M_{c,Rd}$:	3.80 kNm	4.42 kNm	4.42 kNm

9.5.2. ЕЛЕМЕНТИ С100 СА ОТВОРОМ У РЕБРУ

	e00	e40	e80
Номинална ширина равне стране ивичног укрућења $b_{p,c}$:		18.1 mm	
Номинална ширина фланше b_p :		56.2 mm	
Номинална ширина (висина) ребра h_w :		96.3 mm	
Одређивање ефективне ширине равне стране ивичног укрућења			
Однос нормалних напона на ивицама равног дела лима ψ :	1.0	0.797	0.736
Коефицијент избочавања k_σ :	0.430	0.508	0.537
Релативна виткост $\bar{\lambda}_p$:	0.487	0.447	0.435
Коефицијент редукције ρ :	1.0	1.0	1.0
Ефективна ширина ивичног укрућења c_{eff} :	18.1 mm	18.1 mm	18.10 mm
Одређивање ефективне ширине фланше			
Однос нормалних напона на ивицама равног дела лима ψ :	0.885	1.0	1.0
Коефицијент избочавања k_σ :	4.237	4.0	4.0
Релативна виткост $\bar{\lambda}_p$:	0.481	0.495	0.495
Коефицијент редукције ρ :	1.0	1.0	1.0
Ефективна ширина фланше $b_{e1} = b_{e2}$:	28.1 mm	28.1 mm	28.1 mm
Одређивање ефективне површине ивичног укрућења са припадајућим делом фланше			
Укупна бруто површина A_s :	92.48 mm ²	92.48 mm ²	92.48 mm ²
Момент инерције ефективне површине ивичног укрућења I_s :	3192.28 mm ⁴	3192.28 mm ⁴	3192.28 mm ⁴
Хоризонтално растојање од споја ребро-фланша до тежишта ефективне површине ивичног укрућења (горња фланша) b_I :	48.11 mm	48.11 mm	48.11 mm
Хоризонтално растојање од споја ребро-фланша до тежишта	48.11 mm	48.11 mm	48.11 mm

ефективне површине ивичног укрућења (доња фланша) b_1 :			
Крутост замењујуће опруге K :	1.036 N/mm	1.036 N/mm	1.036 N/mm
Еластични критични напон ивичног укрућења $\sigma_{cr,s}$:	569.94 N/mm ²	569.94 N/mm ²	569.94 N/mm ²
Релативна виткост $\bar{\lambda}_d$:	0.642	0.642	0.642
Коефицијент редукције за дисторзионо извијање χ_d :	1.0	1.0	1.0
Редукована ефективна површина попречног пресека ивичног укрућења $A_{s,red}$:	92.48 mm ²	92.48 mm ²	92.48 mm ²
Одређивање ефективне површине ребра			
Однос нормалних напона на ивицама равног дела лима ψ :	1.0	-0.098	-0.418
Коефицијент избочавања k_σ :	4.0	8.52	12.15
Релативна виткост $\bar{\lambda}_p$:	0.847	0.580	0.486
Коефицијент редукције ρ :	0.874	1.0	1.0
Ефективна ширина ребра b_{eff} :	34.8 mm	34.8 mm	34.8 mm
Редукована ефективна површина попречног пресека ребра $A_{s,red}$:	69.64 mm ²	69.64 mm ²	69.64 mm ²
Одређивање отпорности попречног пресека на притисак			
Укупна ефективна површина попречног пресека A_{eff} :	373.70 mm ²	373.70 mm ²	373.70 mm ²
Отпорност попречног пресека на притисак $N_{c,Rd}$:	87.82 kN	87.82 kN	87.82 kN
Одређивање отпорности попречног пресека на савијање			
Пластични отпорни момент попречног пресека W_{pl} :	17035.70 mm ³	17035.70 mm ³	17035.70 mm ³
Еластични отпорни момент попречног пресека W_{el} :	15477.38 mm ³	15477.38 mm ³	15477.38 mm ³
Отпорни момент ефективног попречног пресека W_{eff} :	15477.38 mm ³	15477.38 mm ³	15477.38 mm ³
Отпорност попречног пресека на савијање $M_{c,Rd}$:	3.26 kNm	4.02 kNm	4.02 kNm

9.5.3. ЕЛЕМЕНТИ С150 БЕЗ ОТВОРА У РЕБРУ

	e00	e40	e80
Номинална ширина равне стране ивичног укрућења $b_{p,c}$:		13.1 mm	
Номинална ширина фланше b_p :		46.2 mm	
Номинална ширина (висина) ребра h_w :		146.2 mm	
Одређивање ефективне ширине равне стране ивичног укрућења			
Однос нормалних напона на ивицама равног дела лима ψ :	1.0	0.913	0.886
Коефицијент избочавања k_σ :	0.430	0.461	0.471
Релативна виткост $\bar{\lambda}_p$:	0.352	0.340	0.336
Коефицијент редукције ρ :	1.0	1.0	1.0
Ефективна ширина ивичног укрућења c_{eff} :	13.1 mm	13.1 mm	13.1 mm
Одређивање ефективне ширине фланше			
Однос нормалних напона на ивицама равног дела лима ψ :	0.634	0.909	1.0
Коефицијент избочавања k_σ :	4.869	4.186	4.0
Релативна виткост $\bar{\lambda}_p$:	0.369	0.398	0.407
Коефицијент редукције ρ :	1.0	1.0	1.0
Ефективна ширина фланше $b_{e1} = b_{e2}$:	23.1 mm	23.1 mm	23.1 mm
Одређивање ефективне површине ивичног укрућења са припадајућим делом фланше			
Укупна бруто површина A_s :	73.48 mm ²	73.48 mm ²	73.48 mm ²
Момент инерције ефективне површине ивичног укрућења I_s :	1387.82 mm ⁴	1387.82 mm ⁴	1387.82 mm ⁴
Хоризонтално растојање од споја ребро-фланша до тежишта ефективне површине ивичног укрућења (горња фланша) b_I :	37.71 mm	37.71 mm	37.71 mm
Хоризонтално растојање од споја ребро-фланша до тежишта	37.71 mm	37.71 mm	37.71 mm

ефективне површине ивичног укрућења (доња фланша) b_1 :			
Крутост замењујуће опруге K :	1.263 N/mm	1.263 N/mm	1.263 N/mm
Еластични критични напон ивичног укрућења $\sigma_{cr,s}$:	522.11 N/mm ²	522.11 N/mm ²	522.11 N/mm ²
Релативна виткост $\bar{\lambda}_d$:	0.671	0.671	0.671
Коефицијент редукције за дисторзионо извијање χ_d :	0.985	0.985	0.985
Редукована ефективна површина попречног пресека ивичног укрућења $A_{s,red}$:	72.37 mm ²	72.37 mm ²	72.37 mm ²
Одређивање ефективне површине ребра			
Однос нормалних напона на ивицама равног дела лима ψ :	1.0	0.125	-0.272
Коефицијент избочавања k_σ :	4.0	6.979	10.243
Релативна виткост $\bar{\lambda}_p$:	1.287	0.975	0.804
Коефицијент редукције ρ :	0.651	0.865	1.0
Ефективна ширина ребра b_{eff} :	95.2 mm	125.4 mm	146.2 mm
Редукована ефективна површина попречног пресека ребра $A_{s,red}$:	190.4 mm ²	250.8 mm ²	292.48 mm ²
Одређивање отпорности попречног пресека на притисак			
Укупна ефективна површина попречног пресека A_{eff} :	409.97 mm ²	492.00 mm ²	533.63 mm ²
Отпорност попречног пресека на притисак $N_{c,Rd}$:	96.34 kN	115.62 kN	125.40 kN
Одређивање отпорности попречног пресека на савијање			
Пластични отпорни момент попречног пресека W_{pl} :	28146.80 mm ³	28146.80 mm ³	28146.80 mm ³
Еластични отпорни момент попречног пресека W_{el} :	23825.11 mm ³	23825.11 mm ³	23825.11 mm ³
Отпорни момент ефективног попречног пресека W_{eff} :	22895.77 mm ³	23241.08 mm ³	23825.11 mm ³
Отпорност попречног пресека на савијање $M_{c,Rd}$:	5.38 kNm	5.46 kNm	5.66 kNm

9.5.4. ЕЛЕМЕНТИ С150 СА ОТВОРОМ У РЕБРУ

	e00	e40	e80
Номинална ширина равне стране ивичног укрућења $b_{p,c}$:		13.1 mm	
Номинална ширина фланше b_p :		46.2 mm	
Номинална ширина (висина) ребра h_w :		146.2 mm	
Одређивање ефективне ширине равне стране ивичног укрућења			
Однос нормалних напона на ивицама равног дела лима ψ :	1.0	0.913	0.886
Коефицијент избочавања k_σ :	0.430	0.461	0.471
Релативна виткост $\bar{\lambda}_p$:	0.352	0.340	0.336
Коефицијент редукције ρ :	1.0	1.0	1.0
Ефективна ширина ивичног укрућења c_{eff} :	13.1 mm	13.1 mm	13.1 mm
Одређивање ефективне ширине фланше			
Однос нормалних напона на ивицама равног дела лима ψ :	0.634	0.909	1.0
Коефицијент избочавања k_σ :	4.869	4.186	4.0
Релативна виткост $\bar{\lambda}_p$:	0.369	0.398	0.407
Коефицијент редукције ρ :	1.0	1.0	1.0
Ефективна ширина фланше $b_{e1} = b_{e2}$:	23.1 mm	23.1 mm	23.1 mm
Одређивање ефективне површине ивичног укрућења са припадајућим делом фланше			
Укупна бруто површина A_s :	73.48 mm ²	73.48 mm ²	73.48 mm ²
Момент инерције ефективне површине ивичног укрућења I_s :	1387.82 mm ⁴	1387.82 mm ⁴	1387.82 mm ⁴
Хоризонтално растојање од споја ребро-фланша до тежишта ефективне површине ивичног укрућења (горња фланша) b_I :	37.71 mm	37.71 mm	37.71 mm
Хоризонтално растојање од споја ребро-фланша до тежишта	37.71 mm	37.71 mm	37.71 mm

ефективне површине ивичног укрућења (доња фланша) b_1 :			
Крутост замењујуће опруге K :	1.263 N/mm	1.263 N/mm	1.263 N/mm
Еластични критични напон ивичног укрућења $\sigma_{cr,s}$:	522.11 N/mm ²	522.11 N/mm ²	522.11 N/mm ²
Релативна виткост $\bar{\lambda}_d$:	0.671	0.671	0.671
Коефицијент редукције за дисторзионо извијање χ_d :	0.985	0.985	0.985
Редукована ефективна површина попречног пресека ивичног укрућења $A_{s,red}$:	72.37 mm ²	72.37 mm ²	72.37 mm ²
Одређивање ефективне површине ребра			
Однос нормалних напона на ивицама равног дела лима ψ :	1.0	0.056	-0.283
Коефицијент избочавања k_σ :	4.0	7.41	10.37
Релативна виткост $\bar{\lambda}_p$:	1.287	0.946	0.799
Коефицијент редукције ρ :	0.644	0.870	1.0
Ефективна ширина ребра b_{eff} :	86.2 mm	86.2 mm	86.2 mm
Укупна бруто површина A_s :	292.48 mm ²	292.48 mm ²	292.48 mm ²
Редукована ефективна површина попречног пресека ребра $A_{s,red}$:	172.48 mm ²	172.48 mm ²	172.48 mm ²
Одређивање отпорности попречног пресека на притисак			
Укупна ефективна површина попречног пресека A_{eff} :	391.97 mm ²	391.97 mm ²	391.97 mm ²
Отпорност попречног пресека на притисак $N_{c,Rd}$:	92.11 kN	92.11 kN	92.11 kN
Одређивање отпорности попречног пресека на савијање			
Пластични отпорни момент попречног пресека W_{pl} :	26841.90 mm ³	26841.90 mm ³	26841.90 mm ³
Еластични отпорни момент попречног пресека W_{el} :	23795.20 mm ³	23795.20 mm ³	23795.20 mm ³
Отпорни момент ефективног попречног пресека W_{eff} :	23350.00 mm ³	22895.77 mm ³	22895.77 mm ³

Отпорност попречног пресека на
савијање $M_{c,Rd}$:

2.71 kNm

4.90 kNm

5.60 kNm

СПИСАК ПУБЛИКАЦИЈА

На основу истраживачког рада у оквиру ове докторске дисертације, објављени су следећи научни радови:

Рад у истакнутом међународном часопису (M22)

- **Živaljević V.**, Jovanović Đ., Kovačević D., Džolev I.: „The influence of web holes on the behaviour of cold-formed steel members: A review“, Buildings, Vol. 12, No. 8, (2022), pp. 1-33, DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12081091>, ISSN: 2075-5309

Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33)

- **Živaljević V.**, Džolev I., Blagojević M., Rašeta A., Rajić N.: „Strain measurement of flat and corner coupons using digital image correlation“, 16th International Congress Proceedings 2022, Association of Structural Engineers of Serbia, September 28-30, Arandjelovac, (2022), pp. 218-225, ISBN 978-86-7518-217-6
- Rajić N., Rašeta A., Džolev I., **Živaljević V.**: „Buckling resistance assessment of stainless steel welded I-section columns in fire using ABAQUS“, The 19th International symposium of MASE, MASE – Macedonian Association of Structural Engineers, April 27-30, Ohrid, (2022), pp. 608 – 617, ISBN: 978-608-4510-47-5
- **Živaljević V.**, Blagojević M., Jovanović Đ., Kovačević D.: „Geometry control of the cold-formed steel members using the optical 3D measuring system“, The 8th international conference “Civil Engineering – Science and Practice“, Faculty of Civil Engineering, University of Montenegro, March 8–12, Kolašin, (2022), pp. 333-340, ISBN: 978-86-82707-35-6
- **Živaljević V.**, Jovanović Đ., Kovačević D.: „Numerical investigation of CFS beam-columns with slotted web holes“, The 15th international and scientific conference iNDiS, Department of Civil Engineering and Geodesy, Faculty of Technical Sciences Novi Sad, November 24–26, Novi Sad, (2021), pp. 819-827, ISBN: 978-86-6022-253-6
- **Živaljević V.**, Jovanović Đ., Kovačević D., Lađinović Đ. (2021), “Numerical investigation of CFS beam-columns with and without perforations“, 2020 Symposium of the Association of Structural Engineers of Serbia, May 13-15, Arandjelovac, (2021), pp. 394-403, ISBN: 978-86-7518-212-2
- **Živaljević V.**, Jovanović Đ., Kovačević D.: „Evaluation of the instability behavior of the eccentrically compressed thin-walled steel column“, The 18th International symposium of MASE, MASE – Macedonian Association of Structural Engineers, October 2-5, Ohrid, (2019), pp. 1191 – 1200, ISBN: 978-608-4510-36-9

- **Živaljević V.**, Jovanović Đ., Vukobratović V.: „Evaluation of the instability behavior of the laterally displaced thin-walled steel frame”, The 18th International symposium of MASE, MASE – Macedonian Association of Structural Engineers, October 2-5, Ohrid, (2019), pp. 1201 – 1208, ISBN: 978-608-4510-36-9
- Kovačević D., **Živaljević V.**: „Special finite elements in modeling of structural joints and connections”, The 17th International symposium of MASE, MASE – Macedonian Association of Structural Engineers, October 4-7, Ohrid, (2017), pp. 873-880, ISBN: 978-608-4510-32-1
- Kovačević D., **Živaljević V.**: „Some aspects of FEM modeling in structural test by load”, The 8th PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology, Faculty of Technical Sciences Novi Sad, June 8-10, Novi Sad, (2017), T3-1.4, pp. 1-4, ISBN: 978-86-7892-933-5
- **Živaljević V.**, Kovačević D.: „FEM modeling of the test frame for test by load of structural elements”, 2016 Symposium of the Association of Structural Engineers of Serbia, September 15-17, Zlatibor, (2016), pp. 369-376, ISBN: 978-86-7892-839-0
- **Živaljević V.**, Kovačević D.: „Testframe – Laboratory frame for load test of structural elements”, The 13th international and scientific conference iNDiS, Department of Civil Engineering and Geodesy, Faculty of Technical Sciences Novi Sad, November 25–27, Novi Sad, (2015), pp. 35-42, ISBN: 978-86-7892-750-8

БИОГРАФИЈА

Владимир Живаљевић је рођен 27.08.1991. године у Новом Саду, где је завршио основну школу и природно-математички смер гимназије. Основне студије грађевинарства на Факултету техничких наука у Новом Саду уписао је 2010. године, а дипломирао је 2014. године са просечном оценом током студија 9,20 и са темом дипломског рада „Пројекат конструкције спортске хале“. Исте године уписао је мастер академске студије, које је завршио 2015. године са просечном оценом 9,11 и темом мастер рада „Testframe – Лабораторијски оквир за испитивање конструкцијских елемената пробним оптерећењем“.

Од децембра 2015. до јуна 2016. године је обављао стручну праксу у пројектном бироу у Дубаију (УАЕ), где је учествовао у изради пројеката за Саудијску Арабију, Кувајт, Бахреин, Катар и УАЕ.

Докторске академске студије уписао је 2016. године на Факултету техничких наука, а у звање асистент-мастер за ужу научну област Теорија конструкција изабран је 2017. године. На Департману за грађевинарство и геодезију ангажован је на извођењу вежби из предмета Основи рачунарства, Теорија површинских носача, Стабилност и динамика конструкција, Испитивање конструкција, МКЕ моделирање у анализи конструкција, Мостови, БИМ у грађевинарству. На основним академским студијама Архитектуре изводи вежбе из предмета Конструкцијски системи, док на мастер академским студијама Вибро-акустичног инжењерства у оквиру УНС изводи вежбе из предмета Структурална динамика.

Као аутор и коаутор објавио је 27 научних радова, публикованих у националним и међународним часописима, и на научним конференцијама. Члан је Друштва грађевинских конструктера Србије.

Служи се енглеским и немачким језиком.

Овај Образац чини саставни део докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта који се брани на Универзитету у Новом Саду. Попуњен Образац укорицити иза текста докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта.

План третмана података

Назив пројекта/истраживања
Понашање ексцентрично притиснутих хладно-обликованих челичних елемената са отворима у ребру
Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање
Факултет техничких наука у Новом Саду, Универзитет у Новом Саду
Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање
Истраживање се реализује у оквиру израде докторске дисертације под називом „Понашање ексцентрично притиснутих хладно-обликованих челичних елемената са отворима у ребру”, у оквиру докторских академских студија на Факултету техничких наука у Новом Саду, Универзитета у Новом Саду.
1. Опис података
1.1 Врста студије <i>Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају</i> Докторска дисертација
1.2 Врсте података а) квантитативни б) квалитативни
1.3. Начин прикупљања података а) анкете, упитници, тестови б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи в) генотипови: навести врсту _____ г) административни подаци: навести врсту _____ д) узорци ткива: навести врсту _____ ђ) снимци, фотографије: навести врсту _____ е) текст, навести врсту <u>Литературни извори</u> _____ ж) мапа, навести врсту _____

з) остало: описати Лабораторијска експериментална испитивања

1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

- a) Excel фајл, датотека .xlsx
- b) SPSS фајл, датотека _____
- c) PDF фајл, датотека .pdf
- d) Текст фајл, датотека .docx
- e) JPG фајл, датотека .jpg, .png
- f) Остало, датотека _____

1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

- a) број варијабли осам
- b) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.) велик број

1.3.3. Поновљена мерења

- a) да
- b) не**

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

- a) временски размак између поновљених мера је _____
- b) варијабле које се више пута мере односе се на _____
- v) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као _____

Напомене: _____

Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?

- a) Да**
- b) Не

Ако је одговор не, образложити _____

2. Прикупљање података

2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

- a) експеримент, навести тип Експериментално испитивање хладно-обликованих елемената на дејство ексцентричног притиска
- b) корелационо истраживање, навести тип _____
- ц) анализа текста, навести тип _____
- д) остало, навести шта _____

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

Хидраулични цилиндар капацитета 25t са ручном пумпом максималног радног притиска од 700 bar, давач силе укупног капацитета 200 kN, индуктивни давачи померања са ходом од 50 mm и 100 mm, инклинометри опсега мерења нагиба $\pm 30^\circ$, осмоканални аквизициони уређаји капацитета од 40000 записа у секунди по каналу

2.2 Квалитет података и стандарди

2.2.1. Третман недостајућих података

а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да **Не**

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

- а) Колики је број недостајућих података? _____
- б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да **Не**
- в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података

2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

У овом раду подаци су резултат различитих експерименталних истраживања. Квалитет података је контролисан анализом и поређењем резултата измерених при експерименталном испитивању и оних добијених развијеним нумеричким моделима.

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

Контрола уноса података је подразумевала физичку проверу, што је био задатак докторанда. Анализа уноса података је такође била задатак докторанда, али је праћена и усмеравана од стране ментора рада.

3. Третман података и пратећа документација

3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у **Репозиторијуму докторских дисертација на Универзитету у Новом Саду.**

3.1.2. URL адреса <https://cris.uns.ac.rs/searchDissertations.jsf>

3.1.3. DOI _____

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

- а) **Да**
- б) Да, али после ембарга који ће трајати до _____
- в) **Не**

Ако је одговор не, навести разлог _____

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

3.2 Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен? _____

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.

3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму? _____

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? Да Не

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? Да Не

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?

Да Не

Образложити

4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити података о личности (https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? Да Не

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? Да **Не**

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

- а) Подаци нису у отвореном приступу
- б) Подаци су анонимизирани
- ц) Остало, навести шта

5. Доступност података

5.1. Подаци ће бити

а) јавно доступни

б) доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области

ц) затворени

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:

5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.

6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима
