



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ  
ГРАЂЕВИНСКО – АРХИТЕКТОНСКИ ФАКУЛТЕТ



**Марко Б. Милошевић**

**ИСТРАЖИВАЊЕ УТИЦАЈА ОШТЕЋЕЊА И  
ПОУЗДАНОСТ ДИРЕКТНО ЗАВАРЕНИХ  
ВЕЗА ЕЛЕМЕНАТА РЕШЕТКАСТИХ  
НОСАЧА ОД ШУПЉИХ ЧЕЛИЧНИХ  
ПРОФИЛА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ниш, 2023.



UNIVERSITY OF NIŠ  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
AND ARCHITECTURE



**Marko B. Milošević**

**RESEARCH OF DAMAGE INFLUENCE AND  
RELIABILITY OF THE DIRECTLY WELDED  
CONNECTION ELEMENTS OF TRUSSES  
MADE OF STEEL HOLLOW SECTIONS**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2023.

## Подаци о докторској дисертацији

Ментор:	Др Драгослав Стојић, редовни професор Универзитет у Нишу Грађевинско – архитектонски факултет
Наслов:	Истраживање утицаја оштећења и поузданост директно заварених веза елемената решеткастих носача од шупљих челичних профила
Резиме:	Оштећење челичних профила има утицај на вршење функције челичних конструкција, што може довести до оштећења других конструктивних и неконструктивних делова објекта, угрозити функционисање и безбедност конструкције. Познавање процеса и механизма оштећења челичних конструкција су од значаја за трајност челичних конструкција. У овом раду презентована је нумеричка и експериментална анализа понашања веза типа „Y“ код раванских решеткастих носача оптерећених на дејство аксијалне силе, са посебним освртом на утицај оштећења, као и анализа поузданости директно заварених веза са оштећењем.
Научна област:	Грађевинарство
Научна дисциплина:	Металне конструкције
Кључне речи:	Челичне везе, експериментална анализа, нумеричка анализа, решеткасти носачи, RHS и SHS профили, оштећења, поузданост
УДК:	624.014.27(043.3)
CERIF класификација:	T 220 Грађевинарство, хидраулика, приобална технологија, механика тла
Тип лиценце Креативне заједнице:	CC BY-NC-ND

## Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor: PhD Dragoslav Stojić, professor  
University of Niš  
Faculty of Civil Engineering and Architecture

Title: Research of damage influence and reliability of the directly welded connection elements of trusses made of steel hollow sections

Abstract: Damage of steel profiles affects the performance of steel constructions, which may lead to the damage of other structural and non-structural parts of the building and compromise the functioning and safety of the structure. Knowledge of the steel structure damage processes and mechanisms is important for the durability of steel structures. This paper presents the numerical and experimental analyses of type “Y” joint behavior of truss beams in plane loaded by an axial force, with a special accent on the damage effects, as well as reliability analysis of the directly welded connections with damage.

Scientific Field: Civil Engineering

Scientific Discipline: Metal Constructions

Key Words: Steel joints, experimental analysis, numerical analysis, truss beams, RHS and SHS sections, damage, reliability

UDC: 624.014.27(043.3)

CERIF Classification: T 220 Civil engineering, hydraulic engineering, offshore technology, soil mechanics

Creative Commons License Type: CC BY-NC-ND



# SADRŽAJ

<b>1. OPŠTE</b> .....	<b>8</b>
1.1. UVOD.....	8
1.2. TEORIJSKA ISTRAŽIVANJA.....	9
1.3. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA.....	10
1.4. TEHNIČKA REGULATIVA.....	12
<b>2. ŠUPLJI ČELIČNI PROFILI</b> .....	<b>13</b>
<b>3. REŠETKASTI NOSAČI</b> .....	<b>19</b>
3.1. OPŠTE.....	19
3.2. PRORAČUN ELEMENATA REŠETKASTIH NOSAČA.....	26
3.2.1. Granično stanje nosivosti.....	26
3.2.1.1. <i>Nosivost poprečnih preseka</i> .....	27
3.2.1.2. <i>Nosivost poprečnog preseka na čisto zatezanje</i> .....	28
3.2.1.3. <i>Nosivost poprečnog preseka na čist pritisak</i> .....	29
3.2.1.4. <i>Nosivost elemenata</i> .....	30
3.2.1.5. <i>Nosivost elementa na izvijanje</i> .....	31
3.2.2. Granično stanje upotrebljivosti.....	34
3.3. VEZE ELEMENATA KOD REŠETKASTIH NOSAČA.....	37
3.3.1. Direktno zavarene veze između elemenata rešetkastog nosača od šupljih profila pravougaonog poprečnog preseka.....	44
3.3.2. Oblici loma direktno zavarenih veza od šupljih profila pravougaonog i kvadratnog poprečnog preseka.....	45
3.3.3. Jednačine za određivanje proračunske nosivosti zavarenih veza između elemenata rešetkastog nosača od šupljih profila pravougaonog preseka.....	50
<b>4. OŠTEĆENJA ZAVARENIH VEZA ELEMENATA OD ŠUPLJIH ČELIČNIH PROFILA BEZ ČVORNOG LIMA</b> .....	<b>56</b>
4.1. OBLICI OŠTEĆENJA ČELIČNIH KONSTRUKCIJA.....	56

4.1.1.	Oštećenja čeličnih konstrukcija .....	58
4.1.1.1.	<i>Mehanička oštećenja čeličnih konstrukcija</i> .....	59
4.1.2.	Hemijska oštećenja .....	63
4.1.3.	Biološka oštećenja .....	64
4.1.4.	Korozija.....	65
4.1.5.	Požar .....	73
4.2.	UPOTREBNI VEK KONSTRUKCIJE .....	74
<b>5.</b>	<b>NOSIVOST DIREKTNO ZAVARENIH VEZA OD ČELIČNIH RHS.....</b>	<b>76</b>
5.1.	ANALIZA NOSIVOSTI Y VEZE DIREKTNO ZAVARENIH ELEMENATA IZRAĐENIH OD RHS SA OŠTEĆENJEM.....	77
5.2.	PRORAČUNSKA NOSIVOST NEOŠTEĆENE DIREKTNO ZAVARENE Y VEZE OD RHS .....	79
5.3.	GRANIČNA NOSIVOST DIREKTNO ZAVARENE Y VEZE OD RHS PRIMENOM NUMERIČKE ANALIZE	84
5.3.1.	Ulazni podaci za numeričku analizu .....	84
5.3.2.	Numerička analiza .....	87
<b>6.</b>	<b>EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE GRANIČNE NOSIVOSTI DIREKTNO ZAVARENE Y VEZE OD RHS SA OŠTEĆENJEM .....</b>	<b>104</b>
6.1.	ULAZNI PODACI EKSPERIMENTALNE ANALIZE .....	104
6.2.	ISPITIVANJE DIREKTNO ZAVARENIH Y VEZA OD ŠUPLJIH PROFILA KVADRATNOG POPREČNOG PRESEKA SA OŠTEĆENJEM .....	105
6.3.	REZULTATI ISPITIVANJA GRANIČNE NOSIVOSTI DIREKTNO ZAVARENIH VEZA IZRAĐENIH OD RHS SA OŠTEĆENJEM.....	111
6.4.	NAPONI I DEFORMACIJE U OSNOVNOM MATERIJALU DIREKTNO ZAVARENIH VEZA OD RHS SA OŠTEĆENJEM .....	123
6.5.	UPOREDNA ANALIZA REZULTATA PONAŠANJA DIREKTNO ZAVARENIH Y VEZA OD RHS SA OŠTEĆENJEM, DOBIJENIH NUMERIČKIM I EKSPERIMENTALNIM PUTEM .....	127
<b>7.</b>	<b>POUZDANOST DIREKTNO ZAVARENIH VEZA OD RHS SA OŠTEĆENJEM</b>	<b>130</b>
7.1.	TRAJNOST ČELIČNIH KONSTRUKCIJA .....	130
7.2.	UTICAJ KOROZIJE NA TRAJNOST ČELIČNIH KONSTRUKCIJA.....	131

7.3.	FUNKCIJA POUZDANOSTI I FUNKCIJA OTKAZA .....	133
7.4.	PONAŠANJE KONSTRUKCIJE TOKOM ŽIVOTNOG VEKA .....	142
7.5.	INDEKS OŠTEĆENJA .....	143
<b>8.</b>	<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>151</b>
8.1.	ORIGINALNI NAUČNI DOPRINOS.....	154
8.2.	MOGUĆI PRAVCI BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA .....	154
	<b>LITERATURA.....</b>	<b>156</b>
	POPIS SLIKA .....	164
	POPIS TABELA .....	170
	BIOGRAFIJA AUTORA.....	171
	IZJAVA O AUTORSTVU .....	172
	IZJAVA O ISTOVETNOSTI ŠTAMPANOG I ELEKTRONSKOG OBLIKA DOKTORSKE DISERTACIJE .....	173
	IZJAVA O KORIŠĆENJU .....	174

# 1. OPŠTE

## 1.1. UVOD

Oštećenje čeličnih profila ima značajan uticaj na normalno funkcionisanje čeličnih konstrukcija, može dovesti do oštećenja drugih konstruktivnih i nekonstruktivnih delova objekta, ugroziti funkcionisanje konstrukcije, a u krajnjem slučaju i bezbednost konstrukcije. Poznavanje procesa i mehanizama oštećenja čeličnih konstrukcija, kao i njihovih uzroka i efekata, od bitnog su značaja za trajnost čeličnih konstrukcija.

Rešetkasti nosači od šupljih čeličnih profila imaju veliku primenu u građevinarstvu, kako u zgradarstvu, tako i u mostogradnji. Najčešću primenu imaju kao krovni nosači, rožnjače, podvlake, podni nosači, kranski nosači itd., kod industrijskih hala, sportskih objekata, kongresnih dvorana, izložbenih paviljona i drugih objekata visokogradnje. Razlog tome su prednosti koje se ogledaju u: većoj nosivosti, malom aerodinamičnom koeficijentu, brzom i lakom montaži, mogućnošću korišćenja unutrašnjeg prostora (za instalacije i vodove), jeftinijoj antikorozivnoj zaštiti, ekonomičnosti i velikom potencijalu konstruktivnog i arhitektonskog oblikovanja. Treba spomenuti i nedostatke u koje spadaju: dodatna obrada (posebno kod rešetkastih nosača od elemenata šupljih kružnih poprečnih preseka) i viša jedinična cena u odnosu na vruće valjane profile.

Prednosti korišćenja kvadratnih i pravougaonih šupljih profila za veze rešetkastih nosača sa direktno zavarenim elementima u odnosu na kružne cevi je nesumnjiva i ogleda se u vidu obiljkovnih i konstruktivnih prednosti (ravno neprofilisano sečenje), jednostavnost, mogućnost izvođenja ukrućenja, podložnih i obostranih obraznih limova.

Veza elemenata rešetkastog nosača, u opštem slučaju, može biti direktna ili indirektna. Direktna veza se ogleda u direktno zavarenim elementima ispunje za pojasni elementa, a te veze mogu biti neojačane ili ojačane. Indirektna veza je tip veze kod koje su pojasni štapovi i štapovi ispunje međusobno povezani preko čvornog lima, bilo zakivcima, zavrtnjevima ili zavarivanjem. Prenos sila kod direktne veze je (kako mu i samo ime kaže) direktan sa jednog elementa na drugi, dok je kod indirektno veze taj prenos duži, jer se sila najpre prenosi sa jednog elementa na čvorni lim, a

zatim sa čvornog lima na drugi element. Svakako prednost treba dati direktnoj vezi, kada je to opravdano, jer je, statistički gledano, mogućnost greške dvostruko manja, a ne treba zanemariti ni lokalno savijanje flanše poprečnog preseka pojasa na mestu veze, usled uvođenja sile preko čvornog lima.

## 1.2. TEORIJSKA ISTRAŽIVANJA

Prva istraživanja veza elemenata rešetkastih nosača od šupljih profila kružnog poprečnog preseka izveo je Jamm 1951 [49], a zatim su sledili radovi naučnika iz Evrope [96], [9], [86], [99], [57], [20], [72], [74], [21], Japana [89] i SAD-a [7], [61], [62], [59].

Poseban doprinos istraživanju direktno zavarenih elemenata nosača od šupljih profila dala je grupa istraživača sa Delft University of Technology, Netherlands; Kumamoto University, Japan; University of Toronto, Canada i drugih, čija se istraživanja odvijaju od osamdesetih godina dvadesetog veka. Za to vreme nova saznanja, bazirana na konceptu graničnih stanja, definisala su jednačine i pravila za proračun i projektovanje aksijalno opterećenih K, N, T, Y, X i KT veza rešetkastih nosača sa pojasevima od šupljih profila, kao i valjanih I i H profila.

U našoj zemlji objavljen je mali broj radova na ovu temu. Jedan od radova koji se ističe je publikacija D. Buđevca [11], u kome su sagledavanja prednosti rešetkastih nosača od kvadratnih i pravougaonih cevi bez čvornih limova. Autor je dao preporuke kojih se treba pridržavati pri konstruisanju veza, a ogledaju su u odnosu debljine zida ( $t$ ) prema širini cevi ( $B$ ) na sledeći način:

- $t/B \geq 1:33$  za čelik S235 (Č.0361);
- $t/B \geq 1:25$  za čelik S355 (Č.0561);

Prilikom direktnog povezivanja različitih šupljih profila treba se držati odnosa  $b/B > 0,4$ , što za posledicu ima dijagonale i vertikale sa velikom širinom stranica ( $b$ ) a malom debljinom zidova i pojasne štapove sa manjim širinama stranica a većom debljinom zidova. Cilj ove preporuke je ostvarivanje veće kontaktne površine veze, čemu i inače treba težiti, a koji se postiže približavanjem odnosu  $b/B \approx 1$ .

Značajan doprinos ovoj temi dala je i D. J. Dobrić [18]. U ovom radu dat je detaljan prikaz svih pravila za određivanje proračunske granične nosivosti veza prema Evrokodu 3 (EC3), kako kod ravanskih, tako i kod prostornih rešetkastih nosača, opterećenih na dejstvo aksijalne sile i/ili momenta savijanja. Ove formulacije su grafički ilustrovane i praćene su adekvatnim numeričkim primerima, što je posebno značajno za brzo određivanje nosivosti u početnim fazama projektovanja.

### **1.3. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA**

Eksperimentalna istraživanja iz oblasti ponašanja direktno zavarenih veza elemenata rešetkastih nosača od šupljih čeličnih profila pravougaonog i kvadratnog poprečnog preseka analizirana su u radu [108]. Autor je u svojoj doktorskoj disertaciji primenom analitičkih i numeričkih postupaka, kao i eksperimentalnom potvrdom rezultata, primenjenim na modele veza tipa „T“ i „Y“ došao do relevantnih rezultata, na osnovu kojih je izveo zaključke o uticaju različitih parametara na ponašanje ovih tipova veza, kao što su geometrijske karakteristike elemenata, kvalitet osnovnog materijala, konfiguracija veze i nivo opterećenja u pojasnim nosačima.

Isti autor se, zajedno sa saradnicima, bavio istraživanjem problema „Y“ veza direktno zavarenih pravougaonih profila u radovima [106] i [107].

Doprinos ponašanju „T“ veza direktno zavarenih šupljih pravougaonih profila dao je i Marsel Garifullin sa grupom autora [34], [32], [33], [31], [10].

Grupa autora u radu [34] su razvili model konačnih elemenata za analizu T spojeva od šupljih profila pravougaonog poprečnog preseka. Vršena je analiza različite gustine mreže i oblika konačnog elementa, gde se došlo do zaključka da su za početnu analizu po debljini elementa dovoljna dva kvadratna čvrsta (solid) konačna elementa, međutim, kada se razmatra ponašanje zgloba u celoj fazi potrebno je progustiti mrežu po debljini, što značajno povećava vreme izračunavanja. Svoje zaključke su potvrdili i nizom eksperimentalnih testova.

Grupa autora, predvođena Garifullin-om, u radu [32] su analizirali način procene rotacione krutosti zavarenih T spojeva od šupljih profila pravougaonog poprečnog preseka. Zaključili su da početni

pristup određivanja značajno potcenjuje veličinu rotacione krutosti, na osnovu eksperimentalnih rezultata. Svojim istraživanjem došli su do predloga funkcije za određivanje rotacione krutosti veze u zavisnosti od intenziteta napona u pojasnom štapu.

Rad [33] prikazuje komponentalnu metodu za T veze od šupljih profila. Predlaže se nova komponenta koja će uzeti u obzir šavove, a sa ciljem eliminisanja dodatne provere proračunske nosivosti veze. Na jednostavnim primerima su potvrdili svoje pretpostavke sa eksperimentalnim podacima.

U radu [31] analizirana je komponentalna metoda određivanja aksijalne krutosti T veza od šupljih profila pravougaonog poprečnog preseka koja je upoređena sa eksperimentalnim rezultatima, gde se došlo do zaključka da postojeći izrazi za određivanje krutosti individualnih elemenata dovode do nepreciznih rezultata, posebno u kompjuterskoj analizi. Predložena je nova jednačina određivanja krutosti elemenata, koju su autori potvrdili eksperimentalno.

Grupa autora u radu [10] je istraživala uticaj ugaonih šavova na ponašanje T veza od šupljih profila pravougaonog poprečnog preseka, gde su došli do zaključka da ugaoni varovi znatno poboljšavaju otpornost i krutost T veza. Predložili pristup kojim se uzima u obzir efekat ugaonih varova povećanjem poprečnog preseka u zoni veze. Ova grupa autora se u svojim istraživanjima bavila i određivanjem principa optimalnog modeliranja „T“ veza direktno zavarenih RHS profila primenom metode konačnih elemenata, određivanjem aksijalne i rotacione krutosti, uticaju ugaonih šavova na ponašanje veza i dr.

U radu [104] je numerički analizirano ponašanje različitih oblika „Y“ veza od CHS i RHS profila. Zahvaljujući sprovedenim istraživanjima primenom metode konačnih elemenata, autori su izveli jednačine za određivanje faktora koncentracije napona. Druga grupa autora je, primenom nelinearne analize metodom konačnih elemenata prilikom određivanja kapacitet nosivosti „Y“ veza [95], došla do zaključaka da promena geometrijskih parametara veze ima veliki uticaj na ponašanje veza. Poseban značaj su dali modeliranju šavova, odnosno gustini mreže konačnih elemenata u blizini šavova, koji se zbog svoje prirodne funkcije nalaze na mestu skokovite promene toka sile i mestima koncentracije napona. Autori su dali i preporuke za formiranje mreže konačnih elemenata u zoni šavova. U radu [55] autori su razmatrali različite načine generisanja mreže konačnih elemenata, a sve sa ciljem ostvarivanja kvalitetnih rezultata sa manjim troškovima proračuna.

Njihovo mišljenje je da je ipak potrebno pažljivo podešavanje mreže konačnih elemenata čiji je cilj ostvarivanje kvalitetnih rezultata proračuna [54], [6], [90].

Publikovana su i istraživanja koja su za cilj imala određivanje uticaja karakteristika materijala [67]. S obzirom da istraživači često koriste pojednostavljen dijagram napon – dilatacija (bilinearni dijagram), autori su u svom radu prezentovali ograničenja za takav pristup.

## 1.4. TEHNIČKA REGULATIVA

Istraživanja širom sveta do 90-tih godina u oblasti čeličnih konstrukcija doprinela su tome da su se novi principi za projektovanje veza implementirali u tehničke propise većeg broja zemalja: Kanade (ACNOR/CSA), Japana (AIJ), SAD (AWS), Velike Britanije (BS), Nemačke (DIN) i Francuske (NF). Nedugo zatim, Komisija Evropske zajednice pokrenula je rad na objedinjenim Evropskim standardima za građevinarstvo, koji su dobili naziv Evrokodovi za konstrukcije, da bi 1992. godine bio objavljen standard za proračun čeličnih konstrukcija Evrokod 3 i evropski predstandard ENV 1993-1-1. U Aneksu K Evrokoda 3 data su pravila i principi za proračun veza elemenata od šupljih profila kod rešetkastih nosača. Zbog obima i značaja novijoj verziji Evropskog standarda za proračun čeličnih konstrukcija EN 1993-1-1:2005 (objavljen maja 2005. godine) dodat je poseban deo EN 1993-1-8:2005 pod naslovom „Proračun veza“ (Design of Joints). U sedmom poglavlju ovog standarda, pored ravanskih veza između elemenata od šupljih profila kružnog i pravougaonog preseka, obrađene su i veze elemenata od šupljih profila sa pojasevima od valjanih profila I i U preseka koji su izloženi dejstvu aksijalnog opterećenja i momenata savijanja, kao i prostorne veze pri statičkom opterećenju. U domaćim tehničkim propisima i regulativi konstruisanje i dimenzionisanje direktno zavarenih veza elemenata rešetkastih nosača od šupljih čeličnih profila nije tretirano do uvođenja Evrokoda. Takođe, nema ni mnogo objavljenih radova iz ove oblasti u našoj zemlji.

Trenutno se u Srbiji za metalne konstrukcije koristi Pravilnik za građevinske konstrukcije [70] sa standardima SRPS EN 1993-1-1:2012 [80] i SRPS EN 1993-1-8:2012 [83], a u pripremi je verzija SRPS EN 1993-1-1:2020 i SRPS EN 1993-1-8:2020.



## 2. ŠUPLJI ČELIČNI PROFILI

Početak proizvodnje i primene šupljih profila kao elementa za građevinske konstrukcije je relativno novijeg datuma. U 18. veku krenulo se sa razvojem metoda za proizvodnju bešavnih i zavarenih šupljih profila kružnog preseka [14]. Prvi patent za proizvodnju bešavnih cevi registrovali su braća Mannesmann 1886. godine primenom serije valjaka [45]. Tridesetih godina prošlog veka Fretz Moon je razvio kontinualni proces zavarivanja koji je omogućio brži razvoj zavarenih cevi [100]. U periodu nakon Drugog svetskog rata značajno se usavršio proces zavarivanja koji je omogućio lakše zavarivanje šupljih profila. 1952. godine Stewarts&Lloyds su započeli proizvodnju šupljih čeličnih profila pravougaonog i kvadratnog poprečnog preseka.

Šuplji profili kružnog poprečnog preseka mogu da se proizvode bez šavova (bešavno) ili sa šavovima. Bešavne cevi izrađuju se u dve faze, od kojih se u prvoj fazi vrši probijanja ingota, dok se u drugoj fazi vrši izduženje u gotov kružni presek. Nakon toga, cev prolazi kroz presu pomoću koje dobija konačan oblik [22]. Cevi sa šavovima se izrađuju tako što se prvo čelični lim (ploča) zagreva i savija u kružni oblik, a odmah zatim zavari po dužini.

Šuplji profili pravougaonog poprečnog preseka se proizvode deformisanjem kružnih cevi (bešavnih ili sa šavom) kroz sistem valjaka (slika 1). Ovaj proces može se izvoditi u vrućem ili hladnom stanju.



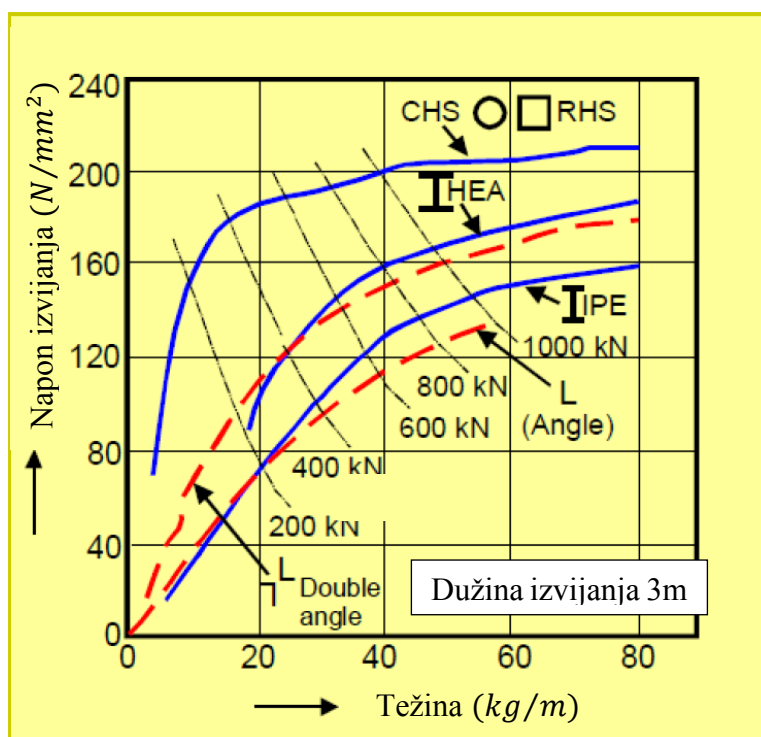
*Slika 1 - Proizvodnja šupljih profila pravougaonog poprečnog preseka [22]*

Šuplji profili koji se najčešće koriste u građevinarstvu su:

- šuplji profili kružnog poprečnog preseka – CHS (Circular Hollow Sections);
- šuplji profili pravougaonog poprečnog preseka – RHS (Rectangular Hollow Sections);
- šuplji profili kvadratnog poprečnog preseka – SHS (Square Hollow Sections).

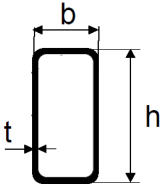
Prednosti primene šupljih profila u odnosu na otvorene profile je sledeća:

- *nosivost* – ujednačenost geometrijskih karakteristika oko obe glavne centralne ose inercije, posebno kod CHS i SHS, ima za posledicu veću nosivost na dejstvo aksijalne sile pritiska, nosivost na savijanje oko obe glavne centralne ose, koso savijanje, torziju, izvijanje (slika 2) i bočno-torziono izvijanje (tabela 1). Elementi konstrukcije su uglavnom lakši kada su izrađeni od CHS ili RHS profila, pa su samim tim i ekonomičniji. To se posebno odnosi na rešetkaste nosače, čiji su elementi primarno aksijalno opterećeni, a šuplji profili predstavljaju najefikasniji oblik poprečnog preseka za prijem aksijalnih sila. Zbog toga rešetkasti nosači od šupljih profila imaju često manji broj elemenata ispunne od nosača sa ispunom od klasičnih valjanih profila;

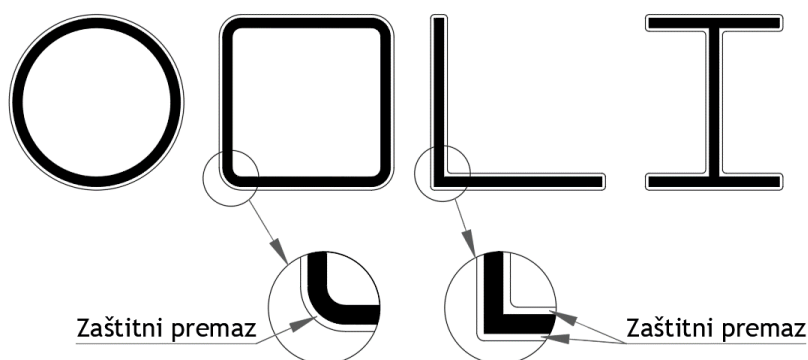


Slika 2 - Uporedni dijagram težine šupljih i otvorenih preseka opterećenih na fleksiono izvijanje u odnosu na silu pritiska [97]

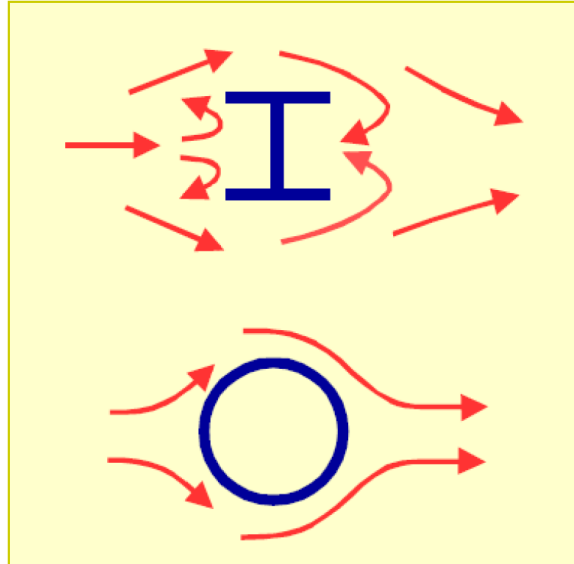
Tabela 1 - Dozvoljeni odnosi između raspona i visine da bi se izbeglo bočno izvijanje prema SRPS EN 1993-1-1 [75]

	$\frac{b-t}{h-t}$	$\frac{L}{h-t} \leq$			
		S235	S275	S355	S460
	0,5	73,7	63,0	48,8	37,7
	0,6	93,1	79,5	61,6	47,5
	0,7	112,5	96,2	74,5	57,5
	0,8	132,0	112,8	87,4	67,4
	0,9	151,3	129,3	100,2	77,3
	1,0	170,6	145,8	112,9	87,2

- *ekonomičnost* – pored manje potrošnje čelika usled veće nosivosti, značajno je spomenuti manji obim čeličnih profila, a samim tim i manja površina za nanošenje premaza protiv korozije i zaštite od požara (za 20 – 50% manje površina za zaštitu u odnosu na I profile sličnih geometrijskih karakteristika). CHS i RHS profili koji su zatvoreni na svojim krajevima imaju samo 4 površina za obradu, za razliku od I profila koji imaju 8 površina za obradu. ;
- *oblik* – zbog nedostatka oštih uglova i ivica lakše je nanošenje premaza koji su samim tim i dugotrajniji (slika 3) [91]. Zatvoreni aerodinamični oblik proizvodi manji otpor vazduha i talasa, što je posebno značajno kod mostova, antenskih stubova, dalekovoda, otvorenih konstrukcija, tornjeva, jarbola, platformi i sl. (slika 4);



Slika 3 – Poređenje ujednačenosti debljine sloja zaštitnog premaza kod otvorenih i šupljih profila [19]



Slika 4 - Otpornost strujanju fluida različitih oblika poprečnih preseka [97]

- *estetika* – raznovrsnost arhitektonskog oblikovanja čistijih linija, kompleksnije geometrije;
- *unutrašnji prostor* – prazan prostor unutar šupljih profila može da se iskoristi na nekoliko načina. Ispunjavanje unutrašnjeg prostora šupljih profila betonom omogućava povećavanje nosivosti, kao i otpornost na dejstvo požara. Primeri u svetu nam pokazuju da unutrašnji prostor šupljih profila može da se iskoristi i za sprovođenje instalacija grejanja i hlađenja, električnih instalacija. Postoji mogućnost i postavljanja kablova za prethodno naprezanje unutar šupljih profila;
- *montaža* – transport, montaža i podizanje su lakši zbog oblika i male težine;

Šuplji profili pravougaonog i kvadratnog poprečnog preseka nastali su kasnije (pedesetih godina dvadesetog veka) u odnosu na šuplje profile kružnog poprečnog preseka kao potreba za prevazilaženje nedostataka koje CHS imaju.

Neke od prednosti šupljih profila pravougaonog i kvadratnog poprečnog preseka u odnosu na šuplje profile kružnog poprečnog preseka su:

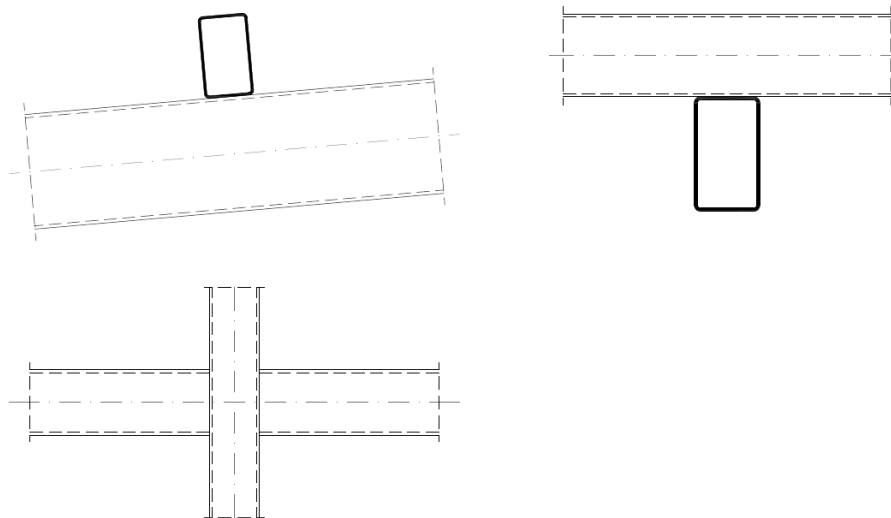
- znatno jeftinije veze zbog lakše obrade krajeva. Krajevi elemenata kod kružnih šupljih profila zahtevaju posebnu obradu (osim u slučajevima kada su štapovi ispunje značajno manjeg poprečnog preseka u odnosu na pojasne štapove), profilisane rezove koji se izvode na automatskim CNC mašinama (slika 5). Ukoliko automatizovana oprema nije dostupna, poluautomatizovana i manuelna oprema se mora koristiti, što značajno poskupljuje

proizvodni proces. Za razliku od CHS profila, obrada krajeva elemenata od šupljih profila pravougaonog i kvadratnog poprečnog preseka (RHS i SHS) je znatno jednostavnija i jeftinija, rezovi su ravni, u najvećem broju slučajeva jednostruki. Za izvođače koji ne poseduju odgovarajuću opremu, profilisano sečenje krajeva cevastih profila je bilo nemoguće;



*Slika 5 - Obrada krajeva CHS profila [41]*

- RHS ili SHS profili omogućavaju veću kontaktnu površinu elementata na koje se oslanja rožnjača, ploča, panel, lim ili neki drugi površinski element (3);



*Slika 6 – Oslanjanje rožnjače na gornji pojas rešetkastog nosača od RHS*

- mogućnost jednostavnog ojačanja veza primenom lima na nožici, obraznih limova, razdelnim limom i dr.;

Prednosti šupljih profila kružnog poprečnog preseka u odnosu na šuplje profile pravougaonog i kvadratnog poprečnog preseka su:

- efikasniji oblik poprečnog preseka u smislu nosivosti;
- minimalni otpor strujanju fluida (vazduh i vodu);
- izgled bez ivica po obimu preseka;

S obzirom da u praktičnoj primeni prevladavaju ekonomski razlozi, najčešća je primena šupljih elemenata pravougaonog i kvadratnog poprečnog preseka.



### 3. REŠETKASTI NOSAČI

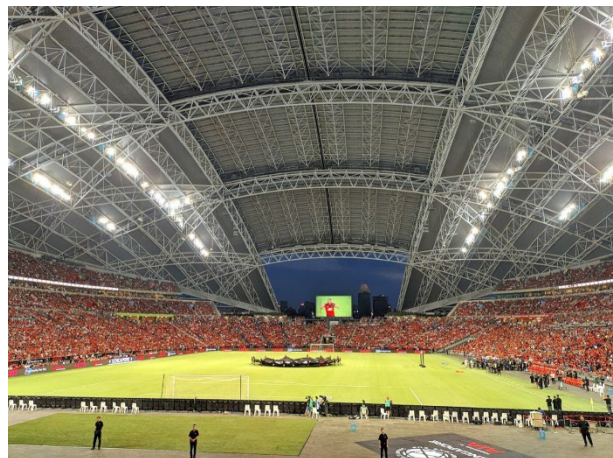
#### 3.1. OPŠTE

Prve preporuke za izradu rešetkastih nosača od šupljih profila kružnog poprečnog preseka objavljene su 1951. godine [49]. Narednih godina, publikovani su radovi iz ove oblasti autora iz Evrope [96], [9], [99], [57], [72], [22], SAD-a [7], [62], [59] i Japana [89]. Prva teorijska i eksperimentalna istraživanja iz oblasti veza elemenata šupljih profila pravougaonog poprečnog preseka rađena su u Evropi šezdesetih godina 20. veka.

Primena rešetkastih nosača u građevinarstvu je česta, kako u zgradarstvu, tako i u mostogradnji. U zgradarstvu se koriste rešetkasti nosači kao krovni nosači, podni nosači, podvlake, rožnjače, kranski nosači, spregovi i ukrućenja, dok se u mostogradnji koriste za glavne nosače, poprečne nosače, ukrućenja i razne vrste spregova. Ponekad su rešetkasti nosači prvi izbor za premošćavanje velikih raspona kod stambenih i poslovnih zgrada (slika 7), industrijskih hala, sportskih dvorana (slika 8), kongresnih dvorana i mostova (slika 9). Slobodnijim izborom formi rešetkastih nosača, može se postići atraktivan izgled koji može biti deo eksterijera ili enterijera objekta.



*Slika 7 - Poslovna zgrada, Minhen, Nemačka [39]*



*Slika 8 – Nacionalni stadion, Singapur [44]*



*Slika 9 – Ikitsuki most, Japan [42]*

Razlog za čestu primenu rešetkastih nosača je:

- visok stepen iskorišćenosti materijala (elementi su izloženi samo dejstvu aksijalnih sila);
- manja težina u odnosu na pune nosače;
- mogućnost premošćavanja velikih raspona;
- jednostavno prilagođavanje projektnim uslovima (npr. trougaone krovne rešetke sa nagibom gornjeg pojasa);
- jednostavno oblikovanje međusobnih veza;
- mogućnost provođenja instalacija između štapova ispune.

Nedostatak je komplikovanija izrada u odnosu na pune nosače, a samim tim i veća cena po kg osnovnog materijala.

Rešetkasti nosači su nosači sastavljeni od elemenata međusobno zglobno spojenih u krajnjim tačkama koji formiraju stabilnu trougaonu strukturu. Kako su pojasni elementi i elementi ispune zglobno vezani, naprezanje elemenata je aksijalno (ako se zanemari moment savijanja od sopstvene težine) i konstantnog intenziteta, što omogućava visok stepen iskorišćenja preseka. Da bi rešetkasti nosači iskoristili svoje prednosti i potencijal, treba ispuniti sledeća pravila:

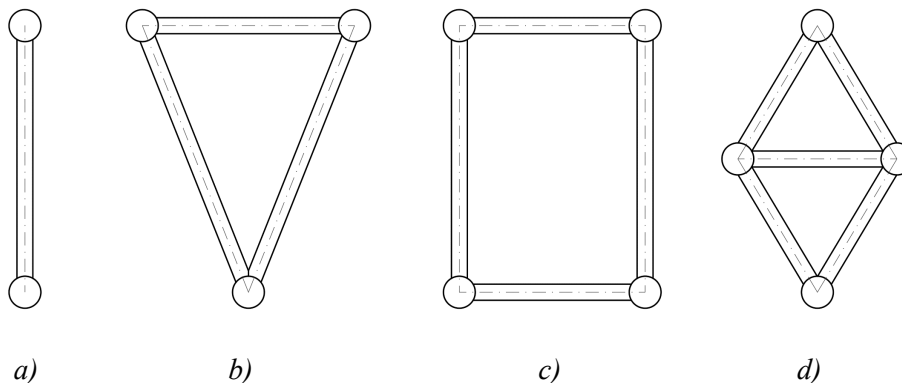
- *opterećenje treba da deluje u čvorovima rešetke* – time se izbegava lokalno savijanje pojasnih štapova, pa su svi štapovi rešetke izloženi samo dejstvu aksijalnih sila (pritisak ili zatezanje);



- *uglovi pod kojima se susište štapovi rešetkastih nosača treba da budu veći od 30° - ovaj razlog je praktične prirode, jer kod manjih uglova dobijaju se dugačke veze koje su nepristupačne i teške za izvođenje, a i veća je mogućnost grešaka u zavarivanju. Kod rešetkastih nosača čiji su štapovi ispunjeni samo dijagonalama, najpovoljniji je ugao od 60° između pojasnih štapova i dijagonala, dok kod rešetkastih nosača sa ispunjenom od vertikala i dijagonala, najpovoljniji je ugao od 45°;*
- *dužina pritisnutih nosača treba da je što manja – kod pritisnutih štapova merodavna je nosivost na fleksiono izvijanje, koja direktno zavisi od dužine elementa (dužine izvijanja);*
- *štapovi rešetkastih nosača treba da budu pravi između čvorova – kako bi se izbegla pojava momenata savijanja;*
- *montažne nastavke pojasnih štapova predvideti što bliže čvorovima, na mestu manje napregnutog štapa;*
- *preporuka je da se sistemske linije štapova seku u čvorovima rešetkastih nosača – kako bi se izbegli sekundarni momenti savijanja usled ekscentriciteta veze.*

S obzirom na raznolikost oblika rešetkastih nosača, podele se mogu izvršiti po nekoliko kriterijuma:

- prema prostornom obliku (slika 10):
  - *ravanski rešetkasti nosači – kod kojih sistemske linije svih štapova leže u jednoj ravni;*
  - *prostorni rešetkasti nosači – kod kojih sistemske linije štapova ne leže u jednoj ravni, već formiraju prostornu strukturu;*



Slika 10 – Ravanski (a) i prostorni (b, c i d) rešetkasti nosači

- prema broju pojaseva:
  - *dvopojasni*;
  - *višepojasni*;
- prema intenzitetu opterećenja:
  - *laki rešetkasti nosači* – koriste se u zgradarstvu za manja statička opterećenja;
  - *srednji rešetkasti nosači* – koriste se u zgradarstvu za opterećenja većeg intenziteta, većih raspona, za krovne i podne nosače, kranske staze...;
  - *teški rešetkasti nosači* – kod objekata velikih raspona i/ili velikih intenziteta opterećenja: krovovi stadiona, izložbenih, kongresnih i sportskih hala, mostova...;
- prema načinu oblikovanja čvorova:
  - sa čvornim limom;
  - bez čvornog lima;
- prema obliku rešetkastih nosača:
  - sa paralelnim pojasevima;
  - sa gornjim pojasom u nagibu;
  - sa paraboličnim pojasom ili pojasevima.

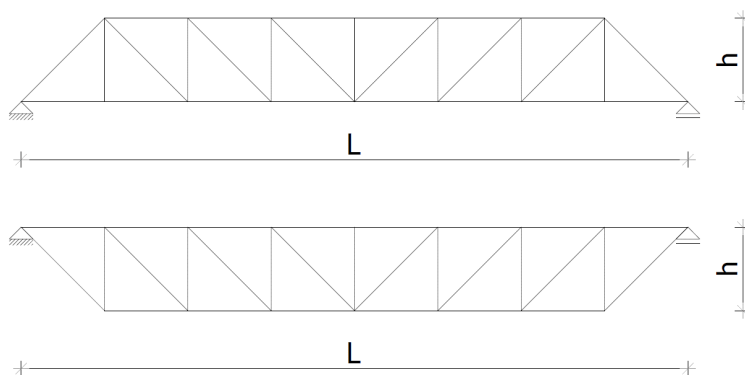
Pored rasporeda štapova ispune, osnovni parametri za oblikovanje rešetkastog nosača su raspon  $L$ , visina  $h$  i razmak između čvorova. Visina rešetke  $h$  se određuje u zavisnosti od veličine raspona  $L$ , intenziteta opterećenja i dozvoljenog ugiba. Povećanjem visine rešetke postiže se smanjenje intenziteta aksijalnih sila u štapovima, ali se istovremeno povećava dužina štapova ispune. Optimalan odnos  $L/h$  iznosi od 10 do 15 [19].

Iako pojasni štapovi čine najveći procenat rešetkastog nosača (oko 75% ukupne težine rešetkastog nosača [19]), treba posvetiti pažnju i rasporedu štapova ispune jer je veći procenat obrade upravo na štapovima ispune. Njihovim pravilnim odabirom mogu se ostvariti značajne uštede i u dimenzijama pojasnih štapova.

Osnovi oblici ispune rešetkastih nosača koji se najčešće koriste:

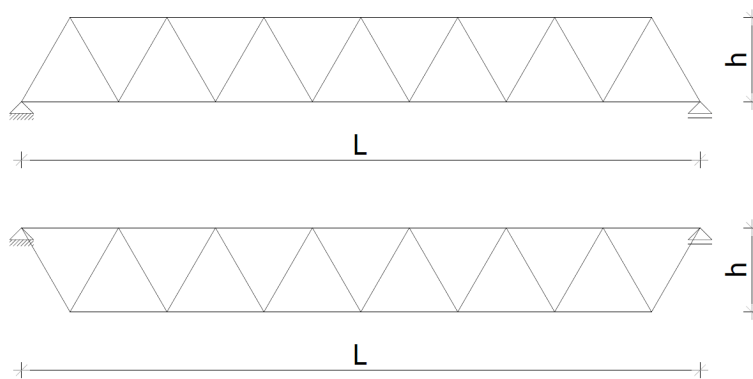
**Prat (Pratt)** – rešetkasti nosač čija se ispuna sastoji od dijagonala i vertikala (slika 11). Dijagonale su obično postavljene pod uglom od  $45^\circ$ . Koristi se kada spoljašnje opterećenje nema alternativno

dejstvo i tada je preporuka da dijagonale „padaju“ prema sredini. Na taj način su dijagonale zategnute, što je racionalnije rešenje u odnosu na slučaj kada su dijagonale pritisnute.



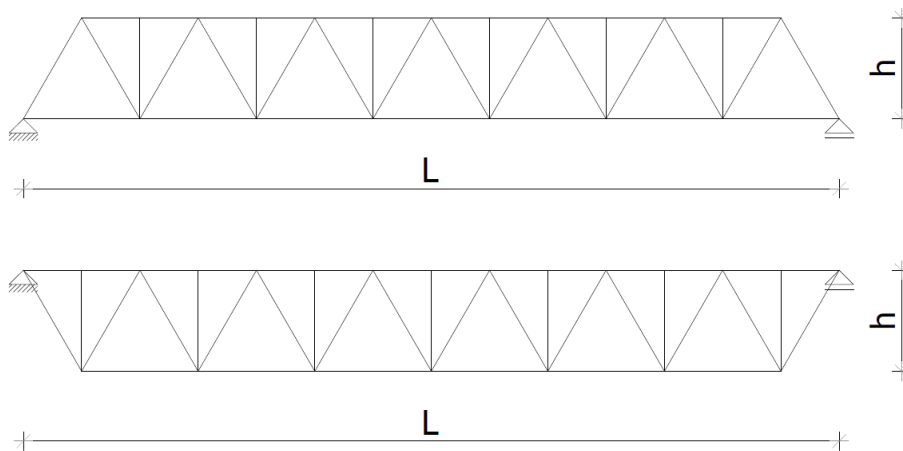
*Slika 11 - Pratt ispuna rešetkastog nosača*

**Woren (Warren)** – rešetkasti nosač samo sa dijagonalnom ispunom (slika 12). Dijagonale su pod uglom od  $40^{\circ}$ - $60^{\circ}$  u odnosu na pojasni štap. Manji ugao dijagonala može dovesti do manjeg broja štapova ispune. Štapovi ispune (dijagonale) su kratki i jednakih dužina, što omogućava upotrebu štapova manjih poprečnih preseka. Ovaj tip nosača ima jednak broj zategnutih i pritisnutih dijagonala. Preporuka je da se ovaj tip koristi kada ima alternativnog delovanja spoljašnjeg delovanja (npr. odižuće dejstvo vetra). Woren tip rešetkastog nosača ima najekonomičniji tip ispune, a istovremeno je povoljan i u estetskom smislu. Prednost se ogleda i u značajnom „otvorenom“ prostoru između pojasnih štapova koji se može iskoristiti za provođenje instalacija.



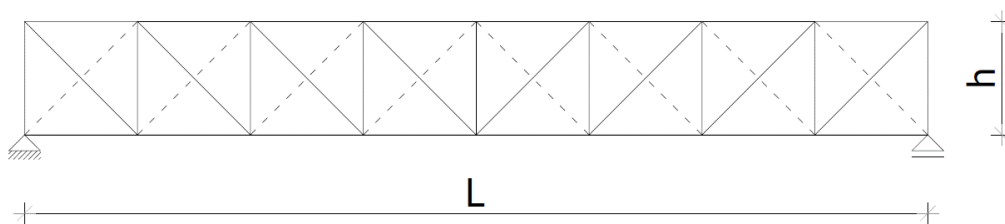
*Slika 12 - Warren ispuna rešetkastog nosača*

**Modifikovani Woren (Modified Warren)** (slika 13) – u odnosu na klasični Woren tip, modifikovani Woren tip ima dodatne vertikale u čvorovima. Ovaj tip ima veći broj štapova i veza, skuplji je za proizvodnju, ali je njegova prednost što smanjuje dužinu izvijanja pritisnutog pojasa, dok su čvorovi na pojasevima u kojima se unosi opterećenje su na manjem rastojanju.



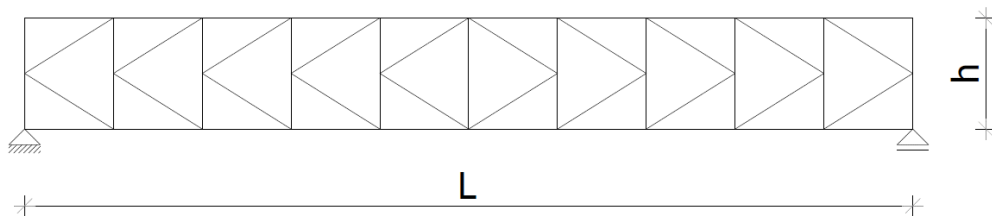
Slika 13 - Modifikovana Warren ispunjena rešetkastog nosača

**Hav (Howe)** – ovaj tip rešetkastog nosača sastoji se od ispunjene sa ukrštenim dijagonalama (slika 14). Koristi se za pretežno mirna opterećenja. Kod ovog tipa rešetkastog nosača dimenzionišu se samo zategnuti štapovi ispunjene, jer se smatra da se pritisnuti štapovi izvijaju pri malim silama pritiska i ne učestvuju u prenošenju sila. Ovaj tip je pogodan za korišćenje kada je nosač izložen alternativnom dejstvu opterećenja, pa se zbog toga veoma često koristi za spregove.



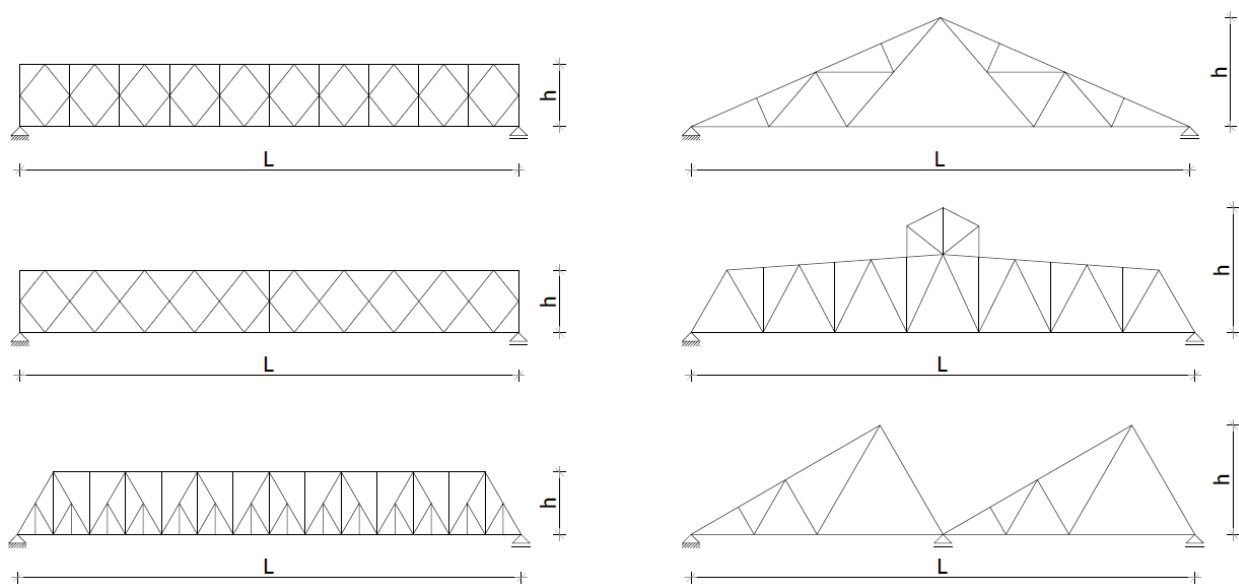
Slika 14 - Howe ispunjena rešetkastog nosača

**Nosači sa „K“ ispunom** – ovaj tip rešetkastog nosača odlikuje veliki broj štapova ispunjene i međusobnih veza (slika 15). Prednost ima kod visokih rešetkastih nosača jer su dužine izvijanja pritisnutih štapova ispunjene manje nego kod drugih tipova ispunjene.



Slika 15 - „K“ ispuna rešetkastog nosača

Postoje i drugi oblici ispunjene rešetkastih nosača koji predstavljaju modifikaciju prethodnih (slika 16).



Slika 16 - Različiti načini ispunjene rešetkastih nosača

Preporuke za racionalan dizajn rešetkaste konstrukcije:

- smanjivanje broja čvorova, kao i broja i dužina pritisnutih štapova ispunjene pravilnim izborom dispozicije štapova ispunjene;
- projektovanje optimalnog tipa veze koja je jednostavna za izvođenje – direktna zavarena veza štapova ispunjene za pojasni štap sa razmakom (jedan rez štapa ispunjene);
- korišćenje optimalnih dimenzija ( $h$ ,  $d$ ,  $t$ ) šupljeg profila pravougaonog ili kvadratnog poprečnog preseka.

## 3.2. PRORAČUN ELEMENATA REŠETKASTIH NOSAČA

Evrokod 0 [79] propisuje da konstrukcija mora da bude proračunata i izvedena, na takav način, da ona, tokom svog predviđenog životnog veka, sa odgovarajućim stepenima pouzdanosti i ekonomično, može da prihvati sva dejstva i uticaje za koje je verovatno da mogu da nastanu u toku izvođenja i eksploatacije, kao i da ostane podobna za predviđenu namenu. Konstrukcija mora da bude proračunata tako da poseduje adekvatnu nosivost, upotrebljivost, kao i trajnost.

Projektanti mogu zadovoljiti navedene zahteve na različite načine, ali metode koje propisuje Evrokod se zasnivaju na principima proračuna prema graničnim stanjima. Granična stanja su stanja izvan kojih konstrukcija više ne zadovoljava projektom predviđene zahteve. Evrokodom su definisana dva granična stanja:

- granično stanje nosivosti (GSN) i
- granično stanje upotrebljivosti (GSU).

### 3.2.1. GRANIČNO STANJE NOSIVOSTI

Granična stanja nosivosti vezana su za rušenje ili druge oblike otkazivanja konstrukcije. Obuhvataju sigurnost konstrukcije, njenih delova i ljudi.

Pri određivanju uticaja u elementima rešetkastih nosača [108], čija je ispuna realizovana dijagonalama i vertikalama, koristi se proračunski model prema teoriji elastičnosti, zasnovan na sledećim pretpostavkama:

- elementi nosača su na svojim krajevima idealno zglobno oslonjeni;
- spoljašnje opterećenje deluje u čvorovima rešetkastog nosača;
- ose elemenata su prave i centrisane.

Primenom ovakvog proračunskog modela znatno se pojednostavljuje postupak proračuna, jer su elementi izloženi samo dejstvu aksijalnih sila. Sa druge strane, svako odstupanje od njega, kao što je postojanje ekscentriciteta veza ili postojanje opterećenja koje deluje van čvorova rešetkastih

nosača, izazivaju pojavu dodatnih, sekundarnih uticaja, koji se moraju uzeti u obzir prilikom proračuna.

### 3.2.1.1. NOSIVOST POPREČNIH PRESEKA

Kontrola nosivosti poprečnih preseka je obavezna za sve vrste naprezanja elemenata čeličnih konstrukcija. Ona je čak i jedina kontrola za slučaj čistog zatezanja i savijanja bez uticaja bočno-torzionog izvijanja, kao i u slučaju primene sofisticiranijih proračunskih metoda prema kojima se direktno u globalnoj analizi po teoriji II reda uzimaju u obzir i lokalne i globalne imperfekcije. Da bi uslov nosivosti (otpornosti) poprečnog preseka bio zadovoljen, potrebno je da u svim poprečnim presecima elemenata konstrukcije bude zadovoljen sledeći uslov:

$$E_d \leq R_d \quad (1)$$

gde su:

- $E_d$  – proračunske vrednosti učinka dejstava za merodavne kombinacije i proračunske situacije, i
- $R_d$  – proračunske vrednosti nosivosti (otpornosti).

Pri proračunu nosivosti poprečnih preseka važe sledeće pretpostavke [2]:

- Bernulijeva hipoteza ravnih preseka: ravni preseki i nakon deformacije ostaju ravni;
- važe uslovi ravnoteže između učinka dejstava i napona, za ukupan poprečni presek;
- za čelik se usvaja bi-linearni dijagram napona i dilatacije, sa granicom razvlačenja  $f_y$  kao maksimalnim normalnim naponom.

Ukoliko su ispoštovane gore navedene pretpostavke za proračunski model prema teoriji elastičnosti rešetkastih konstrukcija i nosivosti poprečnih preseka, kod rešetkastih nosača se srećemo sa sledećim kontrolama nosivosti poprečnih preseka:

- čisto zatezanje;
- čist pritisak.

### 3.2.1.2. NOSIVOST POPREČNOG PRESEKA NA ČISTO ZATEZANJE

Proračunska nosivost poprečnog preseka na čisto zatezanje je u funkciji površine poprečnog preseka i granice razvlačenja i ne zavisi od oblika poprečnog preseka. Stoga, izbor poprečnog preseka nema uticaja u pogledu potrošnje materijala. Nosivost poprečnog preseka na zatezanje  $N_{t,Rd}$  se izračunava prema sledećem izrazu [80]:

$$N_{t,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2)$$

gde su:

- $A$  – bruto površina poprečnog preseka;
- $f_y$  – granica razvlačenja čelika;
- $\gamma_{M0}$  – parcijalni koeficijent za nosivost poprečnih preseka.

Kada je element povezan zavrtnjevima, poprečni presek je oslabljen rupama, pa se u tom slučaju koristi dopunski izraz za nosivost poprečnog preseka na zatezanje  $N_{u,Rd}$  u kome figuriše neto površina poprečnog preseka:

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (3)$$

gde su:

- $A_{net}$  – neto površina poprečnog preseka;
- $f_u$  – čvrstoća na zatezanje čelika;
- $\gamma_{M2}$  – parcijalni koeficijent za nosivost preseka na lom zatezanjem.



### 3.2.1.3. NOSIVOST POPREČNOG PRESEKA NA ČIST PRITISAK

Izrazi za nosivost poprečnog preseka na pritisak zavisi od klase poprečnog preseka [80]:

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{za poprečne preseke klase 1, 2 i 3;} \quad (4)$$


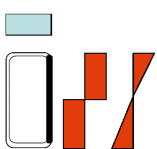

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{za poprečne preseke klase 4;} \quad (5)$$

gde su:

- $A$  – bruto površina poprečnog preseka;
- $A_{eff}$  – efektivna površina poprečnog preseka;
- $f_y$  – granica razvlačenja čelika;
- $\gamma_{M0}$  – parcijalni koeficijent za nosivost poprečnih preseka.

Izraz za nosivost poprečnih preseka klase 1, 2 i 3 (tabela 2) na pritisak je, pored granice razvlačenja čelika i parcijalnog koeficijenta, u funkciji bruto površine poprečnog preseka, za razliku od izraza nosivost poprečnog preseka klase 4 na pritisak koji je u funkciji efektivne površine poprečnog preseka. Dodatna poteškoća koja se javlja kod nesimetričnih poprečnih preseka klase 4 je pojava momenta savijanja, kao uzrok ekscentričnosti, odnosno nepoklapanja težišta bruto i efektivnog poprečnog preseka. Takvi preseki su istovremeno izloženi pritisku i savijanju, pa shodno tome treba sprovesti kontrole nosivosti na pritisak, nosivosti na savijanje i interakciju nosivosti na pritisak i savijanje.

Tabela 2 - Uslovi za klasifikaciju poprečnih preseka

			Klasa	1				2				3			
				$f_{yd} (N/mm^2)$				$f_{yd} (N/mm^2)$				$f_{yd} (N/mm^2)$			
Poprečni presek	Vrsta naprezanja	Deo preseka	$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yd}}}$	235	275	355	460	235	275	355	460	235	275	355	460
RHS	Pritisak	Nožica		$\frac{b - 3 \cdot t}{t} \leq 33 \cdot \varepsilon$				$\frac{b - 3 \cdot t}{t} \leq 38 \cdot \varepsilon$				$\frac{b - 3 \cdot t}{t} \leq 42 \cdot \varepsilon$			
				33,0	30,5	26,8	23,6	38,0	35,1	30,9	27,2	42,0	38,8	34,2	30,0
RHS	Savijanje	Rebro		$\frac{h - 3 \cdot t}{t} \leq 72 \cdot \varepsilon$				$\frac{h - 3 \cdot t}{t} \leq 83 \cdot \varepsilon$				$\frac{h - 3 \cdot t}{t} \leq 124 \cdot \varepsilon$			
				72,0	66,6	58,6	51,8	83,0	76,7	67,5	59,3	124,0	114,6	100,9	88,6
CHS	Pritisak i savijanje			$\frac{d}{t} \leq k \cdot \varepsilon^2$											
				$k = 50$				$k = 70$				$k = 90$			
				50,0	42,7	33,1	25,5	70,0	59,8	46,3	35,8	90,0	76,9	59,6	46,0

### 3.2.1.4. NOSIVOST ELEMENATA

U opštem slučaju, pored kontrole nosivosti poprečnih preseka neophodno je da se izvrše i kontrole nosivosti, tj. stabilnosti elemenata (štapa, nosača), odnosno da se odredi njihova nosivost na određen vid izvijanja. U zavisnosti od načina naprezanja, razlikuju se sledeći problemi stabilnosti linijskih elemenata u čeličnim konstrukcijama:

- izvijanje – centrično pritisnuti elementi jednodelnog ili višedelnog poprečnog preseka;
- bočno-torziono izvijanje – elementi opterećeni na savijanje;
- izvijanje ekscentrično pritisnutih elemenata – elementi koji su istovremeno opterećeni aksijalnom silom pritiska i momentom savijanja, sa ili bez uticaja bočnog-torzionog izvijanja.

### 3.2.1.5. NOSIVOST ELEMENTA NA IZVIJANJE

Izvijanje je problem stabilnosti koji se javlja kod centrično pritisnutih elemenata. Usled centrične sile pritiska dolazi do deformacije elementa upravno na njegovu podužnu osu i do gubitka stabilnosti i pre dostizanja granice razvlačenja u poprečnom preseku. Problemi stabilnosti u čeličnim konstrukcijama se javljaju jer elementi u realnim konstrukcijama ne ispunjavaju sve uvedene pretpostavke Ojlerove teorije linearnog elastičnog izvijanja, kako u pogledu svojstava materijala, tako i u pogledu početne geometrije. Sva odstupanja (nesavršenosti, imperfekcije) značajno umanjuju nosivost aksijalno pritisnutog elementa na izvijanje. Najznačajnije nesavršenosti (imperfekcije) u čeličnim konstrukcijama su:

- postojanje sopstvenih (rezidualnih ili zaostalih) napona;
- promena modula elastičnosti i granice razvlačenja duž elementa i po visini poprečnog preseka;
- geometrijske imperfekcije elemenata;
- ekscentričnost delovanja opterećenja.

Čelik je elasto-plastičan materijal tako da pretpostavka o linearnoj vezi napona i dilatacije važi samo u domenu elastičnog ponašanja. Pri proizvodnji vrućevaljanih profila ili elemenata u zavarenoj izradi nastaju sopstveni ili zaostali naponi. Realni elementi čeličnih konstrukcija nemaju idealnu geometriju, već su proizvedeni sa izvesnim geometrijskim imperfekcijama, kao što su imperfekcije zakrivljenja, odnosno odstupanja ose elementa od idealno prave linije i sl.

U zavisnosti od oblika poprečnog preseka elementa izvijanje može biti:

- fleksiono izvijanje ili izvijanje savijanjem koje je dominantan vid izvijanja za većinu uobičajenih poprečnih preseka kao što su standardni vruće valjani I ili H profili i zavareni preseki, šuplji profili kružnog i pravougaonog preseka i zavareni nosači;
- torziono izvijanje ili izvijanje uvijanjem, koje se javlja kod krstastih centralno simetričnih otvorenih poprečnih preseka, koji imaju veliku nosivost na savijanje oko obe glavne centralne ose inercije ali malu torzionu krutost pa su osetljivi na torziono izvijanje;

- torziono-fleksiono izvijanje je kombinacija prethodna dva vida izvijanja i karakterističan je za monosimetrične otvorene poprečne preseke kod kojih se težište i centar smicanja ne poklapaju i posebno je izražen kod hladno oblikovanih profila.

Kod elementa rešetkastog nosača izrađenog od šupljih čeličnih profila kod kojih su ispoštovane spomenute pretpostavke, potrebno je izvršiti kontrolu nosivosti na fleksiono izvijanje prema sledećem izrazu [80]:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (6)$$

gde su:

- $N_{Ed}$  – proračunska vrednost sile pritiska;
- $N_{b,Rd}$  – proračunska nosivost pritisnutog elementa na izvijanje.

Proračunska nosivost na fleksiono izvijanje se određuje, u zavisnosti od klase poprečnog preseka, na sledeći način:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{za poprečne preseke klase 1, 2 i 3;} \quad (7)$$

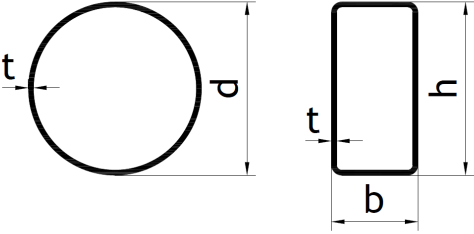
$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{za poprečne preseke klase 4.} \quad (8)$$

gde su:

- $\chi$  – koeficijent redukcije fleksionog izvijanja;
- $A$  – bruto površina poprečnog preseka;
- $A_{eff}$  – efektivna površina poprečnog preseka;
- $f_y$  – granica razvlačenja čelika;
- $\gamma_{M1}$  – parcijalni koeficijent za nosivost elemenata usled njegove nestabilnosti.

Koeficijent redukcije  $\chi$  se sračunava prema SRPS EN 1993-1-1, deo 6.3.2.1 za odgovarajuću krivu izvijanja [80]. U postupku za sračunavanje koeficijenta  $\chi$  figurišu: moduo elastičnosti čelika ( $E$ ), momenti inercije poprečnog preseka ( $I_y, I_z$ ), dužina izvijanja elementa ( $L_{cr,y}, L_{cr,z}$ ), bruto ( $A$  - 1., 2. i 3. klasa) ili efektivna ( $A_{eff}$  - 4. klasa) površina poprečnog preseka, granica razvlačenja čelika ( $f_y$ ) i kriva izvijanja ( $a_0, a, c$ ) (tabela 3).

Tabela 3 - Evropske krive izvijanja prema vrsti poprečnog preseka

Poprečni presek	Proces proizvodnje	Kriva izvijanja
	vruće valjani $420 \text{ N/mm}^2 < f_y < 460 \text{ N/mm}^2$	a <sub>0</sub>
	vruće valjani $f_y < 420 \text{ N/mm}^2$	a
	hladno oblikovani	c

Dužina izvijanja elementa se određuje prema izrazu:

$$L_{cr} = k \cdot L \quad (9)$$

gde su:

- $k$  – koeficijent dužine izvijanja i
- $L$  – sistemska dužina izvijanja.

Za elemente rešetkastih nosača od šupljih čeličnih profila, prema preporukama Međunarodnog komiteta za izučavanje i studije konstrukcija od šupljih profila – CIDECT, a koje su rezultat opsežnih istraživanja, dužine izvijanja mogu da se odrede na sledeći način [63], [97], [108]:

- pojasni element:
  - izvijanje u ravni nosača:  $L_{cr} = 0,9 \cdot L$ , gde je  $L$  sistemska dužina pojasa između susednih čvorova;
  - izvijanje van ravni nosača:  $L_{cr} = 0,9 \cdot L$ , gde je  $L$  sistemska dužina pojasa između tačaka bočnog pridržanja;
- element ispune:
  - izvijanje u ravni i izvan ravni nosača:  $L_{cr} = 0,75 \cdot L$ , gde je  $L$  sistemska dužina elementa ispune;
  - u opštem slučaju može se primeniti i precizniji proračun pod sledećim uslovom kada je  $\beta = b_1/b_0 < 0,6$ , tada je  $0,5 \leq L_{cr}/L < 0,75$ , odnosno  $L_{cr}/L = 2,6 \cdot \sqrt[4]{\frac{b_1^2}{L \cdot b_0}}$ . ( $b_1$  je širina elementa ispune,  $b_0$  je širina pojasnog elementa (slika 20)).

### 3.2.2. GRANIČNO STANJE UPOTREBLJIVOSTI

Granična stanja upotrebljivosti odgovaraju stanjima izvan kojih zahtevi za upotrebu konstrukcije ili konstrukcijskog elementa više nisu zadovoljeni [105]. Ocena graničnog stanja upotrebljivosti bazira se na deformacijama koje utiču na: izgled konstrukcije, udobnost korisnika, funkcionisanje konstrukcije ili koje izazivaju oštećenja nenosivih delova ili završnih delova konstrukcije. Nije retkost da granična stanja upotrebljivosti budu merodavna za dimenzionisanje rešetkastih nosača. Granična stanja upotrebljivosti proveravaju se za eksploatacione uticaje dobijene na osnovu odgovarajućih kombinacija opterećenja (karakteristične, česte, kvazi-stalne) sa parcijalnim koeficijentima čije su vrednosti 1,0 i koeficijentata za kombinovanje  $\psi_i$ . Kod graničnih stanja upotrebljivosti rešetkastih nosača, potrebno je proveriti ugibe, vibracije i zamor.

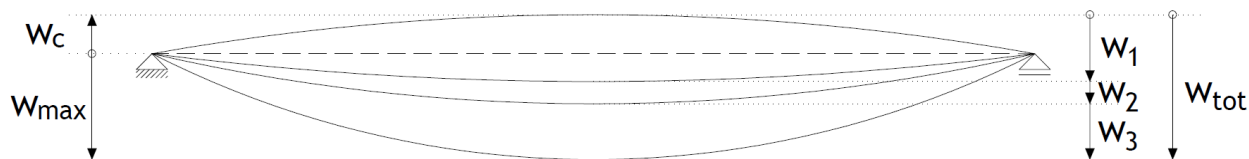
Ukupni i maksimalni ugib rešetkastih nosača treba da se odredi na osnovu sledećih izraza [79]:

$$w_{tot} = w_1 + w_2 + w_3 \quad (10)$$

$$w_{max} = w_1 + w_2 + w_3 - w_c = w_{tot} - w_c \quad (11)$$

gde su (slika 17):

- $w_c$  – nadvišenje nosača, ukoliko je predviđeno;
- $w_1$  – početni ugib;
- $w_2$  – priraštaj ugiba usled dugotrajnog uticaja stalnih dejstava (skupljanje i tečenje betona). Ovaj ugib je kod čeličnih konstrukcija  $w_2 = 0$ , ali ga treba uzeti kod spregnutih konstrukcija čelik – beton;
- $w_3$  – ugib usled promenljivog opterećenja (tabela 4);
- $w_{tot}$  – ukupan ugib;
- $w_{max}$  – maksimalan ugib, uzimajući u obzir i nadvišenje (tabela 4).



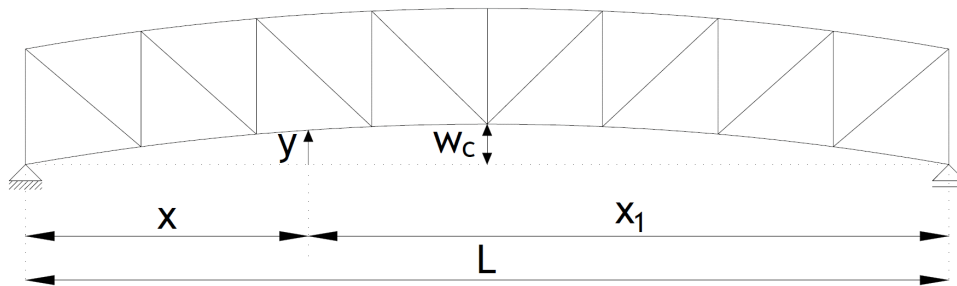
Slika 17 - Veličina ugiba nosača [2]

Tabela 4 – Preporučene vrednosti dopuštenih ugiba prema SRPS EN 1993-1-1/NA

Vrsta elementa	Dopušteni ugibi	
	$w_{max}$	$w_3$
Rožnjače i fasadne rigle	L/200	-
Krovni nosači	L/250	L/300
Međuspratne konstrukcije u zgradama*	L/300	L/400
Međuspratne konstrukcije u industrijskim objektima	L/250	L/300
Međuspratne konstrukcije koje nose krte nekonstruktivne elemente	-	L/500
Međuspratne konstrukcije koje nose stubove (ako deformacija nije uzeta u obzir pri globalnoj analizi)	L/400	L/500
* Kriterijumi u pogledu vibracija iz SRPS EN 1993-1-1, 7.2.3 (1)B takođe treba da budu ispunjeni.		
<b>Napomena:</b>		
Za konzolne nosače L je dvostruka dužina konzole ili prepusta.		

Za veće raspone, rešetkasti nosači se izrađuju sa nadvišenjem, čija je vrednost obično jednaka ugibu od stalnog opterećenja i dela korisnog opterećenja [66]. Vrednost nadvišenja (slika 18) može se odrediti prema paraboličnoj funkciji:

$$y = 4 \cdot x \cdot x_1 \cdot f / L^2 \quad (12)$$



Slika 18 - Nadvišenje nosača

U ovakvim slučajevima rešetkasti nosači se prave sa odgovarajućim dužinama dijagonala koje će pratiti oblik rešetkastog nosača.

Vibracije, kao posledica različitih izvora, mogu dovesti do toga da funkcionalnost objekta ili njegovog dela bude u velikoj meri ugrožena [58]. Vibracije mogu biti izazvane ljudskim kretanjem, sinhronizovanim kretanjem ljudi, radom mašinske opreme, dejstvom vetra (kod vitkih objekata), saobraćajnog opterećenja (kod pešačkih i železničkih mostova). U verziji predstandarda ENV 1993-1-1 [30] bili su propisani kriterijumi za ograničenje sopstvenih frekvencija međuspratnih konstrukcija u zgradarstvu, koje su glasili:

- za stambene i poslovne zgrade:

$$n_e > 3 \text{ Hz ili } w_{tot} = w_1 + w_3 < 28 \text{ mm}$$

- za gimnastičke i plesne dvorane:

$$n_e > 5 \text{ Hz ili } w_{tot} = w_1 + w_3 < 10 \text{ mm}$$

Aktuelna verzija Evrokoda ne propisuje precizne kriterijume za zadovoljenje graničnih stanja upotrebljivosti u zgradarstvu usled vibracija.

Zamor materijala predstavlja pojavu loma opterećenog elementa, iako nije prekoračena statička nosivost materijala. Ova pojava se javlja kod elemenata koji su izloženi dejstvu cikličnog opterećenja, kao što su vetar, talasi, vibracije i dr. Zamor materijala je zabeležen kod konstrukcijskih elemenata mostova, dizalica, kranova, tornjeva, dimnjaka, jarbola, platformi i dr. Ova vrsta fenomena je značajna u pogledu sigurnosti i trajnosti objekata. Zbog toga, treba posvetiti pažnju prilikom projektovanja objekata izloženih dejstvu cikličnog opterećenja.



### 3.3. VEZE ELEMENATA KOD REŠETKASTIH NOSAČA

Veza elemenata kod rešetkastih nosača, u opštem slučaju, može biti direktna ili indirektna. Direktna veza se ogleda u direktno zavarenim elementima ispunje za pojasni elementa, a te veze mogu biti neojačane ili ojačane. Indirektna veza je tip veze kod koje su pojasni štapovi i štapovi ispunje međusobno povezani preko čvornog lima, bilo zakivcima, zavrtnjevima ili zavarivanjem. Prenos sila kod direktne veze je (kako mu i samo ime kaže) direktan sa jednog elementa na drugi, dok je kod indirektno veze taj prenos duži, jer se sila najpre prenosi sa jednog elementa na čvorni lim, a zatim sa čvornog lima na drugi element. Svakako prednost treba dati direktnoj vezi jer je, statistički gledano, mogućnost greške dvostruko manja, a ne treba zanemariti ni lokalno savijanje flanše poprečnog preseka pojasa na mestu veze, usled uvođenja sile preko čvornog lima. Takođe, ove veze su najpovoljnije u kontekstu cene koštanja, efikasnosti zaštite i održavanja.

Projektovanje elemenata rešetke samo na osnovu sila u štapovima može uzrokovati nepoželjne efekte u vezama. Zbog toga, prilikom projektovanja rešetkastih nosača važno je od samog početka uzeti u razmatranje ponašanje veza. Detaljan proračun veza nije neophodan, ali je poželjno da se odabir elemenata rešetkastog nosača izvrši tako da veze elemenata imaju odgovarajuću nosivost, a da su istovremeno ekonomski racionalne.

Autori [63] su, nakon opsežnih istraživanja, dali preporuke za izradu ekonomičnih direktno zavarenih veza od šupljih profila:

- treba težiti za većom debljinom pojasnih štapova, osim kod veza sa potpunim preklopom. Deblji zidovi pojasnih štapova efikasnije se suprotstavljaju silama iz štapova ispunje, otpornost veze raste dok odnos širina kroz debljinu opada. Međutim, za pojasne štapove izložene aksijalnom pritisku više odgovaraju poprečni preseki sa većom širinom i tanjim zidovima. Zbog toga, izbor poprečnog preseka pritisnutog pojasnog štapa predstavljaće kompromis između efikasnije otpornosti veze ili efikasnijoj otpornosti na fleksiono izvijanje;
- za štapove ispunje treba birati poprečne preseke sa tanjim zidovima, jer efikasnost veze raste sa porastom odnosa širine pojasnog štapa i širine štapa ispunje. Prilog tome, tanjim zidovima štapova ispunje potrebna je manja debljina šavova;

- treba izbegavati da štapovi ispune i pojasni štapovi budu iste širine, jer je u tom slučaju komplikovanije izvođenje zavarene veze. Poželjno je da širina štapova ispune budu manja od širine pojasnog štapa da omogući da štap ispune i ugaoni šav „legnu“ na ravan deo flanše pojasnog štapa;
- veze izvoditi sa razmakom (+ $g$ ), zbog jednostavnije pripreme;
- kada se veze izvode sa preklomom, minimum 25% širine štapa ispune treba biti preklapljen, dok je idealno da dužina preklopa bude 50%;
- ugao između štapova ispune i pojasnih štapova treba biti veći od 30°. U suprotnom, veze su komplikovanije za izradu i nepouzdanе.

Standard koji obrađuje veze elemenata rešetkastih nosača od šupljih čeličnih profila je SRPS EN 1993-1-8, deo 7. [83]. Ovo poglavlje daje detaljna pravila za određivanje statičke proračunske nosivosti ravanskih i prostornih veza kod rešetkastih konstrukcija koje su obrazovane od šupljih profila kružnih, kvadratnih i pravougaonih preseka, kao i ravanskih veza kod rešetkastih konstrukcija koje su formirane kombinacijom elemenata šupljih i otvorenih poprečnih preseka.

Prema preporukama SRPS EN 1993-1-8 [83] pri projektovanju ovakvih veza moraju biti ispunjeni sledeći uslovi:

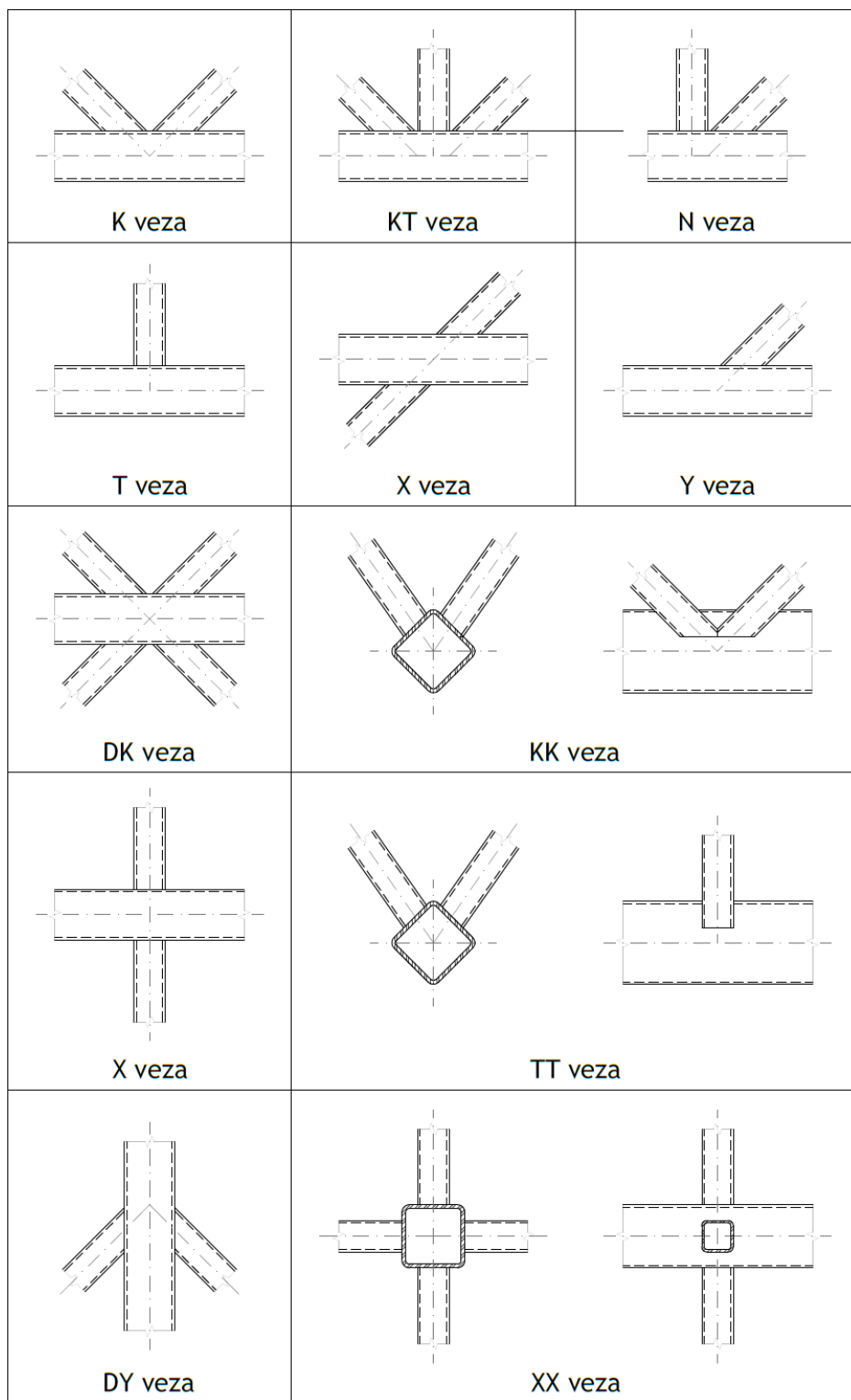
- dimenzije šupljih profila treba da zadovoljavaju zahteve za toplo oblikovane šuplje profile prema EN 10210 [24], [26] i hladno oblikovane šuplje profile prema EN 10219 [27], [25];
- kod vruće valjanih i hladno oblikovanih šupljih profila nominalna granica razvlačenja finalnog proizvoda ne treba da prelazi 46 kN/cm<sup>2</sup>. Kod proizvoda sa nominalnom granicom razvlačenja većom od 35,5 kN/cm<sup>2</sup>, statička proračunska nosivost veze treba da se redukuje koeficijentom 0,9;
- nominalna debljina zida šupljeg profila ne treba da bude manja od 2,5 mm;
- nominalna debljina zida šupljeg profila pojasnog elementa ne treba da bude veća od 25 mm, osim ako nisu preduzete posebne mere kojima se osigurava da će svojstva materijala biti odgovarajuća po čitavoj debljini;
- mora biti ispunjen uslov da pritisnuti elementi veze ispunjavaju zahteve za klasu 1 ili klasu 2 za slučaj čistog savijanja, koji su dati u EN 1993-1-1 [80];
- uglovi  $\theta_i$  između pojaseva i elemenata ispune, kao i između susednih štapova ispune treba da zadovolje uslov  $\theta_i \geq 30^\circ$ ;

- krajevi elemenata koji se susište u vezi treba da budu pripremljeni na takav način da ne dođe do promene oblika poprečnog preseka;
- kod veza sa razmakom, razmak između elemenata ispune ne treba da bude manji od  $t_1 + t_2$  kako bi se obezbedio odgovarajući prostor za formiranje šavova;
- kod veza sa preklapom, preklap treba da bude dovoljno veliki da bi se obezbedila odgovarajuća međusobna veza elemenata ispune za prenošenje smicanja sa jednog na drugi element ispune. U svim slučajevima preklap treba da bude minimum 25%;
- kada su preklapljeni elementi ispune od čelika različitog kvaliteta i/ili imaju različite debljine zidova, element koji ima manju vrednost proizvoda  $t_i \cdot f_{y_i}$  treba da preklopi drugi element;
- kada elementi ispune koji se preklapaju imaju različite širine, element sa manjom širinom treba da preklopi element sa većom širinom.

Forme rešetkastih nosača uslovljavaju tip veze koji će se koristiti. Na slici 19 dati su tipovi veza rešetkastih nosača od šupljih profila. Karakteristike osnovnih tipova veza su:

- kada silu iz štapa ispune koja deluje na pojasni štاپ preuzima pojasni štاپ smicanjem i/ili momentom savijanja, veza se klasifikuje kao T veza odnosno štاپ ispune je upravan na pojasni štاپ ili Y veza (štاپ ispune je pod uglom  $\theta \neq 90^\circ$ );
- kada najveći deo sile iz štapa ispune ka pojasnom štapu preuzima drugi štاپ ispune u istom čvoru, veza se klasifikuje kao K veza, a kada je jedan od dva štapa u vezi pod uglom  $\theta = 90^\circ$  u odnosu na pojasni štاپ, veza se klasifikuje kao N veza;
- kada silu iz štapa ispune koja deluje na pojasni štاپ preuzima štاپ ispune sa suprotne strane u odnosu na pojasni štاپ, takva veza se klasifikuje kao X veza.

Ostali tipovi veza (slika 19) predstavljaju kombinacija osnovnih veza.



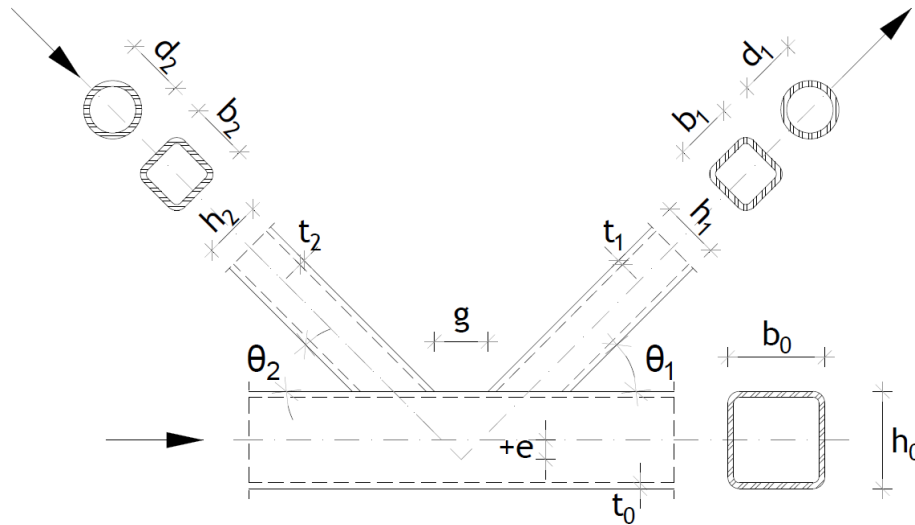
Slika 19 - Tipovi veza rešetkastih nosača od šupljih profila

Teorije graničnih stanja su osnov za definisanje jednačina i preporuka kojima se određuje nosivost veze [3], [13], [4]. Neophodno je ispuniti uslov svih mogućih stanja:

- granično stanje nosivosti;
- granično stanje deformacija;
- vizuelna pojava prslina.

U SRPS EN 1993-1-8 definisana je konvencija o označavanju dimenzija poprečnih preseka:

- $b_0$  – širina poprečnog preseka pojasnog štapa;
- $b_1, b_2$  – širina poprečnog preseka štapa ispune;
- $h_0$  – visina poprečnog preseka pojasnog štapa;
- $h_1, h_2$  – visina poprečnog preseka štapa ispune;
- $t_0$  – debljina zida poprečnog preseka pojasnog štapa;
- $t_1, t_2$  – debljina zida poprečnog preseka štapa ispune;
- $d_1, d_2$  – spoljašnji prečnik poprečnog preseka štapa ispune;
- $\theta_1, \theta_2$  – ugao između štapova ispune i pojasnih štapova;
- $g$  – razmak između elemenata ispune kod K ili N veze (slika 20). Razmak  $g$  se meri između krajeva susednih elemenata ispune, duž spojne površine pojasnog elementa. Negativna vrednost veličine  $g$  definiše se kao preklap  $q$  ( $q = -g$ );
- $e$  – ekscentricitet veze, koji je posledica formiranja razmaka između susednih elemenata ispune ili formiranja preklopa. Razlog za formiranje ekscentriciteta leži u želji za pojednostavljenjem pripreme elemenata (ravno sečenje krajeva štapova ispune) i povećanja nosivosti veze. Međutim, preporuka je da se veza formira na taj način da ne postoji ekscentricitet ( $e = 0$ ), odnosno da se sistemne linije štapova ispune seku na sistemnoj liniji pojasnog štapa. Ekscentricitet je pozitivan ( $+e$ ) kada se sistemne linije elemenata ispune seku sa spoljne strane (rešetkastog nosača) sistemne linije pojasnog štapa, a negativan je ( $-e$ ) kada se sistemne linije elemenata ispune seku sa unutrašnje strane (rešetkastog nosača) sistemne linije pojasnog štapa (slika 20).



Slika 20 - Konvencija o označavanju dimenzija poprečnih preseka po SRPS EN 1993-1-8

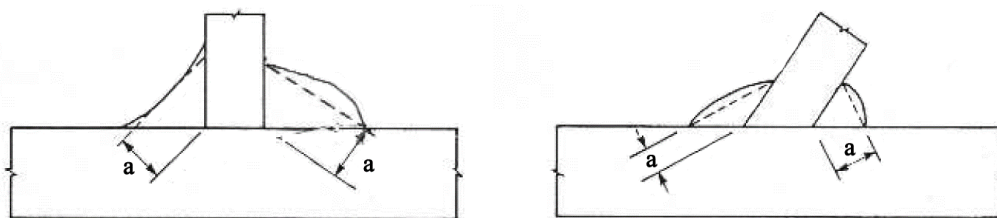
Sa ekonomske tačke gledišta, najpovoljnije je projektovati veze sa razmakom, kod kojih su pojasni štapovi izrađeni od RHS, a štapovi ispune prvenstveno od RHS i CHS. Nešto skuplji oblik veze je veza RHS elemenata sa punim preklopom, zbog pojave različitih uglova sečenja štapova ispune. Od ove veze skuplja je veza elemenata od CHS sa razmakom, jer ovaj tip veze skoro uvek zahteva profilisano sečenje kružnih profila, osim u slučajevima kada je prečnik pojasnog elementa veći od tri prečnika elementa ispune kada se može primeniti ravno sečenje krajeva elementa. Veza elemenata od RHS sa delimičnim preklopom je sledeća u gradaciji cene izrade, zbog neophodnosti sečenja u dve ravni elementa ispune. Sledi veza elemenata od CHS profila sa punim preklopom. Kao najskuplji vid konstruisanja veze javlja se veza elemenata od CHS profila sa delimičnim preklopom.

Kako bi se izbegli lomovi veza na delu šavova, preporučljivo je da se projektuju šavovi koji imaju veću nosivost od štapova ispune, kad god je to moguće. U tu svrhu autori [97] preporučuju prvenstveno upotrebu sučeonih šavova sa punim provarom ili ugaone šavove.

SRPS EN 1993-1-8 [83] propisuje da „šavovi koji spajaju elemente ispune sa pojasevima treba da budu projektovani tako da imaju dovoljnu nosivost, da uzmu u obzir neuniformnu raspodelu napona i dovoljan kapacitet deformacije, kao i preraspodelu momenata savijanja“. Preporuka je da se šavovi izvode po celom obimu štapa ispune rešetkastog nosača od šupljeg profila, sa izuzetkom veza sa delimičnim preklopom za koji važe nešto drugačiji uslovi. Minimalna debljina zidova

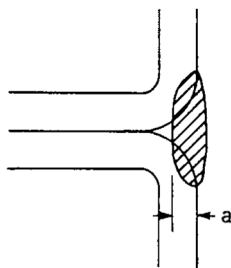
šupljih profila koji se zavaruju iznosi 2,5 mm. Ukoliko projektним uslovima nije drugačije definisano, šavovi se izvode kvaliteta C u skladu sa odgovarajućim standardom [28].

Zavarivanje elemenata rešetkastog nosača može se izvršiti ugaonim ili sučeonim šavovima sa punim ili delimičnim provarom. Koji tip šava će se izvršiti zavisi od ugla  $\theta_i$  između elemenata ispune i pojasnih elemenata, dok minimalna debljina šava zavisi od debljine tanjeg zida elementa u vezi. Uobičajeno je da se primenjuju ugaoni šavovi. Uslov za primenu ugaonih šavova je da ugao  $\theta_i$  u granicama  $60^\circ < \theta_i < 120^\circ$ . Ukoliko je ugao  $\theta_i < 60^\circ$ , takve šavove posmatramo kao sučeoone šavove sa delimičnim provarom. Za uglove  $\theta_i > 120^\circ$  potrebno je nosivost šavova odrediti ispitivanjem u skladu sa SRPS EN 1990 [79], aneks D, što komplikuje i poskupljuje ukupnu cenu. Minimalna debljina ugaonog šava  $a$  iznosi 3 mm (slika 21).



Slika 21 - Debljina ugaonog šava [108]

Poseban slučaj predstavlja zavarivanje elemenata rešetkastog nosača kada su štapovi ispune iste širine kao pojasni štapovi. U tom slučaju primenjuju se užljebljeni šavovi (slika 22).



Slika 22 - Debljina užljebljenih šavova kod šupljih profila pravougaonog poprečnog preseka [83]

### **3.3.1. DIREKTNO ZAVARENE VEZE IZMEĐU ELEMENATA REŠETKASTOG NOSAČA OD ŠUPLJIH PROFILA PRAVOUGAONOG POPREČNOG PRESEKA**

Veze direktno zavarenih elemenata rešetkastih nosača od šupljih profila, za razliku od tradicionalnih veza ostvarenih posredstvom čvornih limova, zahtevaju drugačiji pristup prilikom konstruisanja i dimenzionisanja. Specifičnost veza elemenata rešetkastih nosača od šupljih profila, izvedenih direktnim zavarivanjem bez čvornih limova, ogleda se u polju napona i lokalnih deformacija na mestu veze, koja su nelinearna i veoma složena. Zbog toga se ne može samo na osnovu analitičkih postavki utvrditi analiza ponašanja pri graničnom stanju nosivosti i graničnom stanju upotrebljivosti. Da bi se odredili optimalni proračunski modeli i adekvatne teorijske osnove kojima se utvrđuje realno ponašanje ovakvih veza, sproveden je veliki broj eksperimentalnih i numeričkih istraživanja u poslednjih tridesetak godina. Ova istraživanja su, pored ravanskih rešetkastih nosača, obuhvatila i veze elemenata prostornih rešetki izloženih, kako dejstvu aksijalnog opterećenja, tako i dejstvu momenata savijanja. Rezultati istraživanja iz ove oblasti, koji se zasnivaju na teoriji graničnih stanja, pokazuju da ponašanje ovakvih veza ne zavise samo od kvaliteta osnovnog materijala, geometrijskih karakteristika elemenata veze, oblika i intenziteta opterećenja u pojasnim štapovima nosača, već i od konstrukcije veze, odnosno njenog oblika. Izvedene jednačine kojima se određuje nosivost datih veza za svaki od potencijalnih oblika loma date su u funkciji maksimalne nosivosti elemenata ispune usled dejstva aksijalne sile i/ili momenta savijanja. Drugim rečima, proračunske vrednosti aksijalnih sila i/ili momenta savijanja u elementima ispune, pri graničnom stanju nosivosti ne treba da prekorače odgovarajuće proračunske nosivosti veza. Definisana su i ograničenja u vidu odnosa geometrijskih karakteristika elemenata veze, odnosno oblasti važenja. Time se ispunjavaju uslovi graničnog stanja upotrebljivosti, a ogledaju se u vidu ograničenja lokalnih deformacija na mestu veze, kao i sprečavanja redukcije kapaciteta rotacije i/ili deformacije. Unutar definisanih opsega važenja eksperimentalno su dokazane sve jednačine nosivosti veze. U slučajevima prekoračenja nosivosti veze, a kada istovremeno nije moguće promeniti definisane poprečne preseke elemenata rešetkastog nosača (prilikom rekonstrukcija i sanacija), neophodno je izvršiti ojačanje veze u zavisnosti od oblika loma.



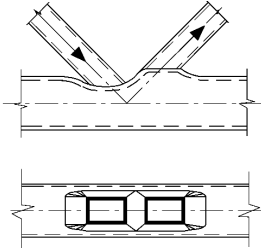
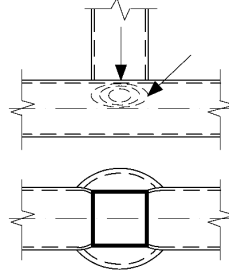
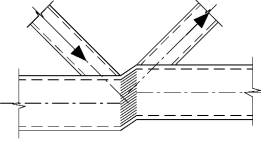
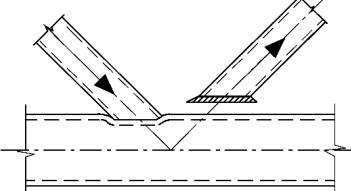
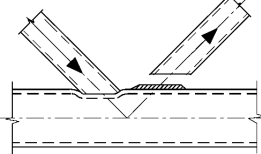
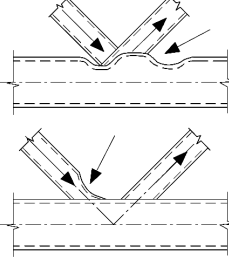
### 3.3.2. OBLICI LOMA DIREKTNO ZAVARENIH VEZA OD ŠUPLJIH PROFILA PRAVOUGAONOG I KVADRATNOG POPREČNOG PRESEKA

Proračunske nosivosti veza međusobno spojenih šupljih profila pravougaonog i kvadratnog poprečnog preseka treba da se zasnivaju na sledećim oblicima loma (tabela 5) [83]:

- a) lom plastifikacijom površine pojasa ili njegovog čitavog poprečnog preseka (*chord face failure or chord plastification*) plastični lom površine pojasa ili plastični lom poprečnog preseka pojasa;
- b) lom bočnih zidova pojasa ili lom rebra pojasa (*chord side wall failure or chord web failure*) usled plastifikacije, gnječenja ili nestabilnosti (ulubljenje ili izbočavanje bočnih zidova pojasa ili rebra pojasa) ispod pritisnutog elementa ispune;
- c) lom smicanjem pojasa (*chord shear failure*);
- d) lom usled kidanja (proboja) smicanjem (*punching shear failure*) zida šupljeg profila pojasa (pojava prsline koja dovodi do odvajanja elementa ispune od pojasa);
- e) lom elementa ispune (*brace failure*) sa redukovanom efektivnom širinom (prsline u šavovima ili u elementima ispune);
- f) lom izbočavanjem (*local buckling failure*) elemenata ispune ili šupljeg profila pojasnog elementa na mestu veze.

Ovi oblici loma prvi put su definisani od strane Wardenier-a i Stark-a [98]. Autori su eksperimentalnim putem dokazali da oblik loma zavisi od tipa veze, dimenzija poprečnih preseka elemenata u vezi i geometrijskih parametara veza.

Tabela 5 - Oblici loma kod veza između elemenata ispune i pojaseva od šupljih profila pravougaonog poprečnog preseka (RHS) [83]

	Oblik loma	Aksijalno opterećenje
a)	Lom plastifikacijom površine pojasa ili njegovog čitavog poprečnog preseka, plastični lom površine pojasa ili plastični lom poprečnog preseka pojasa	
b)	Lom bočnih zidova pojasa ili lom rebra pojasa usled plastifikacije, gnječenja ili nestabilnosti ispod pritisnutog elementa ispune	
c)	Lom smicanjem pojasa	
d)	Lom usled kidanja (proboja) smicanjem zida šupljeg profila pojasa (pojava prsline koja dovodi do odvajanja elementa ispune od pojasa)	
e)	Lom elementa ispune sa redukovanom efektivnom širinom (prsline u šavovima ili u elementima ispune)	
f)	Lom izbočavanjem elemenata ispune ili šupljeg profila pojasnog elementa na mestu veze	

Geometrijski parametri veze, čije vrednosti utiču na oblik loma i figurišu u izrazima za određivanje proračunske nosivosti veze, su definisani u Evrokodu 3 [83] na sledeći način:

- $\beta$  – odnos srednjeg prečnika ( $d_1$ ) ili širine elementa ispune ( $b_1$ ) i pojasnog elementa ( $d_0$  ili  $b_0$ ):

- za T, Y i X veze:

$$\beta = \frac{d_1}{d_0} \quad \text{ili} \quad \beta = \frac{d_1}{b_0} \quad \text{ili} \quad \beta = \frac{b_1}{b_0} \quad (13)$$

- za K i N veze:

$$\beta = \frac{d_1 + d_2}{2d_0} \quad \text{ili} \quad \beta = \frac{d_1 + d_2}{2b_0} \quad \text{ili} \quad \beta = \frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4b_0} \quad (14)$$

- za KT veze:

$$\beta = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3d_0} \quad \text{ili} \quad \beta = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3b_0} \quad \text{ili} \quad \beta = \frac{b_1 + b_2 + b_3 + h_1 + h_2 + h_3}{6b_0}$$

$$\beta = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3d_0} \quad \text{ili} \quad \beta = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3b_0} \quad \text{ili} \quad \beta = \frac{b_1 + b_2 + b_3 + h_1 + h_2 + h_3}{6b_0} \quad (15)$$

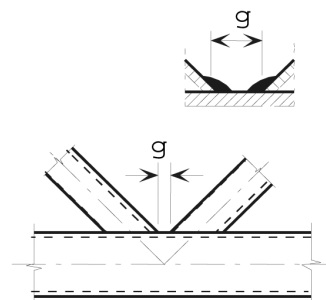
- $\gamma$  – odnos širine ( $b_0$ ) ili prečnika pojasa ( $d_0$ ) i dvostruke debljine zida njegovog poprečnog preseka ( $t_0$  ili  $t_f$ ):

$$\gamma = \frac{d_0}{2t_0} \quad \text{ili} \quad \gamma = \frac{b_0}{2t_0} \quad \text{ili} \quad \gamma = \frac{b_0}{2t_f} \quad (16)$$

- $\eta$  – odnos visine elementa ispune  $h_i$  i prečnika  $d_0$  ili širine  $b_0$  pojasnog elementa:

$$\eta = \frac{h_i}{d_0} \quad \text{ili} \quad \eta = \frac{h_i}{b_0} \quad (17)$$

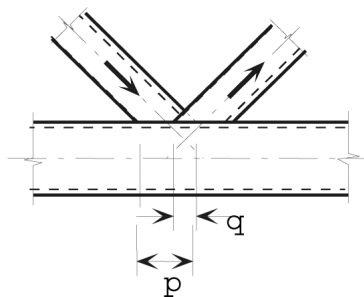
- $g$  – razmak (slika 23);



Slika 23 - Razmak veze [83]

- $\lambda_{ov}$  – preklop (slika 24):

$$\lambda_{ov} = (q/p) \cdot 100\%$$



Slika 24 - Preklop veze [83]

- $\tau$  – odnos debljine zidova poprečnog preseka elementa ispune ( $t_1$ ) i pojasa ( $t_0$ ):

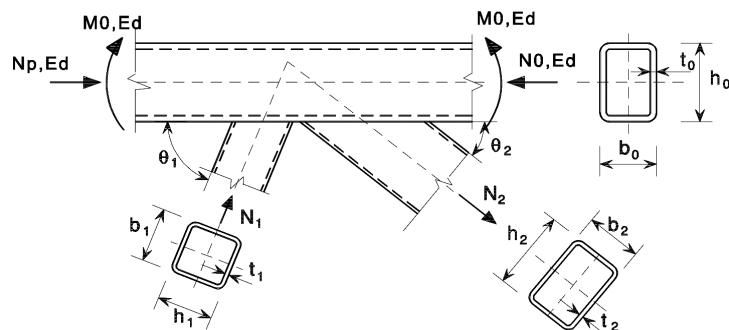
$$\tau = \frac{t_1}{t_0} \quad (18)$$

- $\theta_i$  – ugao nagiba elementa ispune u odnosu na pojasni element;
- $n$  – funkcija maksimalnog normalnog napona u pojasnom elementu na mestu veze:

$$n = \frac{N_0}{A_0 \cdot f_{y0}} + \frac{M_0}{W_0 \cdot f_{y0}} \quad (19)$$

- $n_p$  – funkcija napona u pojasnom elementu koji isključuje napone usled komponenta aksijalnih sila u elementima ispune na mestu veze, a koje su paralelne sa osom pojasa:

$$n_p = \frac{N_{0,p}}{A_0 \cdot f_{y0}} + \frac{M_0}{W_0 \cdot f_{y0}} \quad (20)$$



Slika 25 - Definicija oznaka u vezi [83]

U gornjim izrazima oznake imaju sledeća značenja (slika 25):

- $N_0$  – aksijalna sila većeg intenziteta u pojasnom elementu na mestu veze;
- $N_{0p}$  – aksijalna sila manjeg intenziteta u pojasnom elementu na mestu veze;
- $M_0$  – moment savijanja u pojasnom elementu na mestu veze;
- $A_0$  – površina poprečnog preseka pojasnog elementa;
- $W_0$  – moment inercije poprečnog preseka pojasnog elementa;
- $f_{y0}$  – granica razvlačenja čeličnog materijala pojasnog elementa.

U opštem slučaju, lom plastifikacijom površine pojasa ili njegovog čitavog poprečnog preseka (a) je najčešći oblik loma kod veza sa razmakom (+g) kod kojih koeficijent  $\beta$  ima malu do srednju vrednost [63]. Imajući u vidu da su veze šupljih profila polukrute (deformabilne, relativno fleksibilne) [109], deformacija površine pojasnog štapa koji je u kontaktu sa ispunom je neretko merodavna pri određivanju nosivosti veze. Za srednje vrednosti koeficijenta  $\beta = 0,6 \div 0,8$  ova vrsta loma se uglavnom javlja zajedno sa lomom usled kidanja smicanjem zida šupljeg profila pojasa (d). Za istu vrednost koeficijenta  $\beta = 0,6 \div 0,8$  lom (a) se javlja zajedno sa lomom elementa ispune sa redukovanom efektivnom širinom (e) kod elemenata sa tanjim zidovima elemenata ispune.

Lom izbočavanjem elementa ispune ili šupljeg profila pojasnog elementa na mestu veze (f) je najčešći oblik loma kod veza sa preklopom.

Lom smicanjem pojasa (c) se obično javlja kod veza sa razmakom (+g) kod kojih koeficijent  $\beta$  ima visoku vrednost ( $\beta \approx 1,0$ ) ili kod kojih je visina poprečnog preseka pojasnog štapa manja od širine poprečnog preseka pojasnog štapa  $h_0 < b_0$ .

Lom bočnih zidova pojasa ili lom rebra pojasa usled plastifikacije, gnječenja ili nestabilnosti ispod pritisanog elementa ispune (b) i lom izbočavanjem elemenata ispune ili šupljeg profila pojasnog elementa na mestu veze (f) se događa kod visokih odnosa širine (ili visine) i debljine zida poprečnog preseka ( $b_0/t_0$  ili  $h_0/t_0$ ).

### 3.3.3. JEDNAČINE ZA ODREĐIVANJE PRORAČUNSKE NOSIVOSTI ZAVARENIH VEZA IZMEĐU ELEMENATA REŠETKASTOG NOSAČA OD ŠUPLJIH PROFILA PRAVOUGAONOG PRESEKA

Neke od jednačina za određivanje proračunske nosivosti zavarenih veza između elemenata rešetkastog nosača od šupljih profila pravougaonog poprečnog preseka su dobijene teorijskim putem i/ili eksperimentalno.

Ukoliko je veza elemenata ispune izložena samo dejstvu aksijalne sile, proračunska vrednost aksijalne sile u elementu veze  $N_{i,Ed}$  ne treba da pređe proračunsku vrednost nosivosti zavarene veze na aksijalnu silu  $N_{i,Rd}$  elementa veze [83]:

$$N_{i,Ed} < N_{i,Rd} \quad (21)$$

Spojevi elemenata ispune koji su opterećeni kombinovanim dejstvom aksijalne sile i momenta savijanja treba da ispune sledeći uslov:

$$\frac{N_{i,Ed}}{N_{i,Rd}} + \frac{M_{ip,i,Ed}}{M_{ip,i,Rd}} + \frac{M_{op,i,Ed}}{M_{op,i,Rd}} \leq 1,0 \quad (22)$$

gde su:

- $M_{ip,i,Ed}$  – proračunska vrednost momenta u ravni;
- $M_{ip,i,Rd}$  – proračunska nosivost na savijanje u ravni;
- $M_{op,i,Ed}$  – proračunska vrednost momenta izvan ravni;
- $M_{op,i,Rd}$  – proračunska nosivost na savijanja izvan ravni.

Iako je glavni kriterijum otpornosti veze proračunska nosivost, preporuke i područja važenja ovih izraza su definisana tako da se obezbedi i ispunjenje graničnog stanja upotrebljivosti<sup>1</sup>. Pored toga, jednačine za određivanje proračunske nosivosti su i eksperimentalno dokazane unutar opsega važenja (tabele 6 i 7).

Tabela 6 - Opseg važenja za zavarene veze između elemenata ispune od CHS i RHS profila i pojasnih elemenata od RHS profila

Tip veze	Parametri veze ( $i = 1$ ili $2$ , $j =$ preklapljeni element ispune)					
	$b_i / b_0$ ili $d_i / b_0$	$b_i / t_i$ i $h_i / t_i$ ili $d_i / t_i$		$h_0 / b_0$	$b_0 / t_0$	Razmak ili preklap $b_i / b_j$
		Pritisak	Zatezanje	i $h_i / b_i$	I $h_0 / t_0$	
<b>T, Y i X veze</b>	$b_i / b_0 \geq 0,25$	$\frac{b_i}{t_i} \leq 35$ i $\frac{h_i}{t_i} \leq 35$ i			$\leq 35$ i Klasa 1 ili 2	-
<b>K i N veze sa razmakom</b>	$b_i / b_0 \geq 0,35$ I $\geq 0,1 + 0,01 b_0 / t_0$	Klasa 1 ili 2	$\frac{b_i}{t_i} \leq 35$ i $\frac{h_i}{t_i} \leq 35$	$\geq 0,5$ ali $\leq 2$	$\leq 35$ i Klasa 1 ili 2	$\frac{g}{b_0} \geq 0,5(1 - \beta)$ ali $\leq 1,5(1 - \beta)$ <sup>1)</sup> i kao minimum $g \geq t_1 + t_2$
<b>K i N veze sa preklpom</b>	$b_i / b_0 \geq 0,25$	Klasa 1			Klasa 1 ili 2	$25\% \leq \lambda_{ov} \leq \lambda_{ov,lim}$ <sup>2)</sup> i $\frac{b_i}{b_j} \leq 0,75$
<b>Elementi ispune kružnog preseka</b>	$d_i / b_0 \geq 0,4$ ali $\leq 0,8$	Klasa 1	$\frac{d_i}{t_i} \leq 50$	Kao gore, ali sa $d_i$ koje zamenjuje $b_i$ i $d_j$ koje zamenjuje $b_j$ .		

1) Ako je  $\frac{g}{b_0} > 1,5(1 - \beta)$  i  $g > t_1 + t_2$ , vezu treba tretirati kao dve odvojene T i Y veze.  
2)  $\lambda_{ov,lim} = 60\%$  kada je skriveni preklapljeni deo elementa ispune nezavaren i  $\lambda_{ov,lim} = 80\%$  kada je skriveni preklapljeni deo elementa ispune zavaren. U slučaju kada preklap prekoračuje vrednost  $\lambda_{ov,lim}$  ili je element ispune pravougaonog poprečnog preseka sa  $h_i < b_i$  i/ili  $h_j < b_j$ , spoj između elemenata ispune i pojasa treba da se proveriti na smicanje

<sup>1</sup> ugibi, horizontalna pomeranja, obrtanje preseka i vibracije

Tabela 7 - Dodatni uslovi za određivanje proračunske nosivosti zavarenih veza između elemenata od šupljih profila kvadratnog ili kružnog poprečnog preseka pri dejstvu aksijalne sile

Tip elementa ispune	Tip veze	Parametri veze	
Šuplji profili kvadratnog poprečnog preseka	T, Y ili X	$b_i / b_0 \leq 0,85$	$b_0 / t_0 \geq 10$
	K ili N sa razmakom	$0,6 \leq \frac{b_1 + b_2}{2b_1} \leq 1,3$	$b_0 / t_0 \geq 15$
Šuplji profili kružnog poprečnog preseka	T, Y ili X		$b_0 / t_0 \geq 10$
	K ili N sa razmakom	$0,6 \leq \frac{d_1 + d_2}{2d_1} \leq 1,3$	$b_0 / t_0 \geq 15$

U narednim tabelama dati su izrazi za proračun nosivosti zavarenih veza između elemenata:

- od šupljih profila kvadratnog ili kružnog poprečnog preseka pri dejstvu aksijalne sile (tabela 8);
- ispune od RHS ili CHS profila i pojaseva od RHS profila pri dejstvu aksijalne sile – T, X i Y veze (tabela 9);
- ispune od RHS ili CHS profila i pojaseva od RHS profila pri dejstvu aksijalne sile – K i N veze (tabela 10),

čiji je oblik definisan u SRPS EN 1993-1-8 deo 7.5 [83].



Tabela 8 - Proračunske nosivosti zavarenih veza između elemenata od šupljih profila kvadratnog ili kružnog poprečnog preseka pri dejstvu aksijalne sile

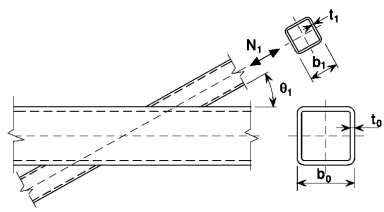
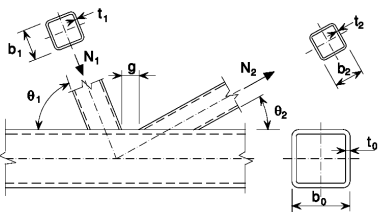
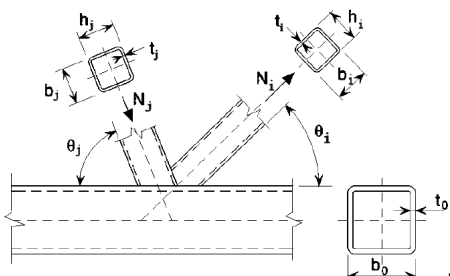
Tip veze	Proračunska nosivost ( $i = 1$ ili $2, j =$ preklapljeni štap)
<b>T, Y i X veza</b>	Lom plastifikacijom površine pojasa $\beta \leq 0,85$
	$N_{1,Rd} = \frac{k_n f_{y0} t_0^2}{(1 - \beta) \sin \theta_1} \left( \frac{2\beta}{\sin \theta_1} + 4(1 - \beta)^{0,5} \right) / \gamma_{M5}$
<b>K i N veze sa razmakom</b>	Lom plastifikacijom površine pojasa $\beta \leq 1,0$
	$N_{i,Rd} = \frac{8,9 \gamma^{0,5} k_n f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_i} \left( \frac{b_1 + b_2}{2b_0} \right) / \gamma_{M5}$
<b>K i N veze sa preklapom *)</b>	Lom elementa ispune $25\% \leq \lambda_{ov} < 50\%$
Element $i$ ili element $j$ mogu biti zategnuti ili pritisnuti, ali jedan treba da bude zategnut a drugi pritisnut.	$N_{i,Rd} = f_{yi} t_i \left( b_{eff} + b_{e,ov} + 2h_i \frac{\lambda_{ov}}{50} - 4t_i \right) / \gamma_{M5}$
	Lom elementa ispune $50\% \leq \lambda_{ov} < 80\%$
	$N_{i,Rd} = f_{yi} t_i \left( b_{eff} + b_{e,ov} + 2h_i - 4t_i \right) / \gamma_{M5}$
	Lom elementa ispune $\lambda_{ov} \geq 80\%$
	$N_{i,Rd} = f_{yi} t_i \left( b_i + b_{e,ov} + 2h_i - 4t_i \right) / \gamma_{M5}$
Parametri $b_{eff}$ , $b_{e,ov}$ i $k_n$	
$b_{eff} = \frac{10}{b_0 / t_0} \frac{f_{y0} t_0}{f_{yi} t_i} b_i \text{ ali } b_{eff} \leq b_i$	Za $n > 0$ (pritisak): $k_n = 1,3 - \frac{0,4n}{\beta} \text{ ali } k_n \leq 1,0$
$b_{e,ov} = \frac{10}{b_j / t_j} \frac{f_{yj} t_j}{f_{yi} t_i} b_i \text{ ali } b_{e,ov} \leq b_i$	Za $n \leq 0$ (zatezanje): $k_n = 1,0$
Kod elemenata ispune kružnog poprečnog preseka treba pomnožiti gornje vrednosti sa $\pi/4$ , zameniti $b_1$ i $h_1$ sa $d_1$ i zameniti $b_2$ i $h_2$ sa $d_2$ .	
*) Potrebno je kontrolisati samo preklapni element ispune $i$ . Treba uzeti da je efikasnost preklapljenog elementa ispune $j$ (tj. proračunska nosivost veze podeljena sa proračunskom plastičnom nosivošću elementa ispune) jednaka efikasnosti preklapnog elementa ispune.	

Tabela 9 - Proračunske nosivosti zavarenih T, X i Y veza između elemenata ispune od RHS ili CHS profila i pojaseva od RHS profila pri dejstvu aksijalne sile

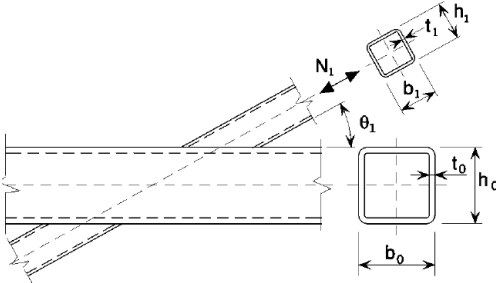
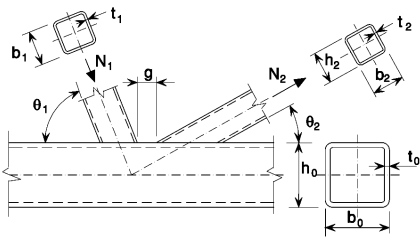
Tip veze	Proračunska nosivost ( $i = 1$ )
	Lom plastifikacijom površine pojasa $\beta \leq 0,85$
	$N_{1,Rd} = \frac{k_n f_{y0} t_0^2}{(1 - \beta) \sin \theta_1} \left( \frac{2\eta}{\sin \theta_1} + 4(1 - \beta)^{0,5} \right) / \gamma_{M5}$
	Lom izvočavanjem bočnih zidova pojasa <sup>1)</sup> $\beta = 1,0$ <sup>2)</sup>
	$N_{1,Rd} = \frac{f_b t_0}{\sin \theta_1} \left( \frac{2h_1}{\sin \theta_1} + 10t_0 \right) / \gamma_{M5}$
	Lom elemenata ispune $\beta \geq 0,85$
	$N_{1,Rd} = f_{yi} t_1 (2h_1 - 4t_1 + 2b_{eff}) / \gamma_{M5}$
<p>1) Kod X veza sa <math>\theta &lt; 90^\circ</math> koristiti manju od ove vrednosti i proračunske nosivosti na smicanje bočnih zidova pojasa.</p> <p>2) Za <math>0,85 \leq \beta \leq 1,0</math> koristiti linearnu interpolaciju između vrednosti za lom plastifikacijom površine pojasa kada je <math>\beta=0,85</math> i merodavne vrednosti za lom bočnih zidova pojasa <math>\beta=1,0</math> (izbočavanje bočnih zidova pojasa ili smicanje pojasa).</p>	<p>Lom usled kidanja smicanjem <math>0,85 \leq \beta \leq (1 - 1/\gamma)</math></p> $N_{1,Rd} = \frac{f_{y0} t_0}{\sqrt{3} \sin \theta_1} \left( \frac{2h_1}{\sin \theta_1} + 2b_{e,p} \right) / \gamma_{M5}$
<p>Kod elemenata ispune kružnog poprečnog preseka treba pomnožiti gornje vrednosti sa <math>\pi/4</math>, zameniti <math>b_1</math> i <math>h_1</math> sa <math>d_1</math> i zameniti <math>b_2</math> i <math>h_2</math> sa <math>d_2</math>.</p>	
<p>Za zatezanje:  <math>f_b = f_{y0}</math></p> <p>Za pritisak:  <math>f_b = \chi f_{y0}</math> (T i Y veze)  <math>f_b = 0,8\chi f_{y0} \sin \theta_i</math> (X veze)</p> <p>gde je <math>\chi</math> koeficijent redukcije za fleksiono izvijanje dobijen prema EN 1993-1-1, uzimajući relevantnu krivu izvijanja i relativnu vitkost prema:</p> $\bar{\lambda} = 3,46 \frac{\left( \frac{h_0}{t_0} - 2 \right) \sqrt{\frac{1}{\sin \theta_1}}}{\pi \sqrt{\frac{E}{f_{y0}}}}$	$b_{eff} = \frac{10}{b_0 / t_0} \frac{f_{y0} t_0}{f_{yi} t_i} b_i \text{ ali } b_{eff} \leq b_i$ $b_{e,p} = \frac{10}{b_0 / t_0} b_i \text{ ali } b_{e,p} \leq b_i$ <p>Za <math>n &gt; 0</math> (pritisak):  <math>k_n = 1,3 - \frac{0,4n}{\beta}</math> ali <math>k_n \leq 1,0</math></p> <p>Za <math>n \leq 0</math> (zatezanje):  <math>k_n = 1,0</math></p>

Tabela 10 - Proračunske nosivosti zavarenih K i N veza između elemenata ispune od RHS ili CHS profila i pojaseva od RHS profila pri dejstvu aksijalne sile

Tip veze	Proračunska nosivost ( $i = 1$ ili $2$ )
<p><b>K i N veze sa razmakom</b></p> 	Lom plastifikacijom površine pojasa
	$N_{i,Rd} = \frac{8,9k_n f_{y0} t_0^2 \sqrt{\gamma}}{\sin \theta_i} \left( \frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4b_0} \right) / \gamma_{M5}$
	Lom smicanjem pojasa
	$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} A_v}{\sqrt{3} \sin \theta_i} / \gamma_{M5}$
	$N_{0,Rd} = \left[ (A_o - A_v) f_{y0} + A_v f_{y0} \sqrt{1 - (V_{Ed} / V_{pl,Rd})^2} \right] / \gamma_{M5}$
	Lom elemenata ispune
	$N_{i,Rd} = f_{yi} t_i (2h_i - 4t_i + b_i + b_{eff}) / \gamma_{M5}$
Lom usled kidanja smicanjem $\beta \leq (1 - 1/\gamma)$	
$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} t_0}{\sqrt{3} \sin \theta_i} \left( \frac{2h_i}{\sin \theta_i} + b_i + b_{e,p} \right) / \gamma_{M5}$	
<b>K i N veze sa preklopom</b>	Kao u tabeli 8
Kod elemenata ispune kružnog poprečnog preseka treba pomnožiti gornje vrednosti sa $\pi/4$ , zameniti $b_1$ i $h_1$ sa $d_1$ i zameniti $b_2$ i $h_2$ sa $d_2$ , osim u slučaju loma smicanjem pojasa.	
$A_v = (2h_o + \alpha b_o) t_o$ <p>Za elemente ispune kvadratnog ili pravougaonog poprečnog preseka:</p> $\alpha = \sqrt{1 + \frac{4g^2}{3t_o^2}}$ <p>gde je <math>g</math> vrednost razmaka.</p> <p>Za elemente ispune kružnog poprečnog preseka:</p> $\alpha = 0$	$b_{eff} = \frac{10}{b_0 / t_0} \frac{f_{y0} t_0}{f_{yi} t_i} b_i \text{ ali } b_{eff} \leq b_i$
	$b_{e,p} = \frac{10}{b_0 / t_0} b_i \text{ ali } b_{e,p} \leq b_i$
	Za $n > 0$ (pritisak):
	$k_n = 1,3 - \frac{0,4n}{\beta} \text{ ali } k_n \leq 1,0$
	Za $n \leq 0$ (zatezanje):
	$k_n = 1,0$

## **4. OŠTEĆENJA ZAVARENIH VEZA ELEMENATA OD ŠUPLJIH ČELIČNIH PROFILA BEZ ČVORNOG LIMA**

Predmet proučavanja u ovom radu jeste numerička i eksperimentalna analiza ponašanja veza pri graničnom stanju nosivosti i graničnom stanju upotrebljivosti za veze tipa „Y“ kod ravanskih rešetkastih nosača opterećenih na dejstvo aksijalne sile pri statičkom opterećenju, sa posebnim osvrtom na uticaj oštećenja. Analizirana je veza između šupljih profila pravougaonog poprečnog preseka (RHS – Rectangular Hollow Section), odnosno veza između pojasnih elemenata od šupljih profila pravougaonog ili kvadratnog poprečnog preseka i elemenata ispune pravougaonog ili kvadratnog poprečnog preseka.

### **4.1. OBLICI OŠTEĆENJA ČELIČNIH KONSTRUKCIJA**

Oštećenja čelika mogu se javiti u različitim oblicima. Neke vrste oštećenja utiču na mehaničke osobine čelika (čvrstoća, duktilnost, žilavost, tvrdoća, elastičnost i dr.), što može dovesti do oštećenja drugih konstruktivnih i nekonstruktivnih delova objekta, ugroziti funkciju konstrukcije, a u krajnjem slučaju i bezbednost konstrukcije. Poznavanje procesa i mehanizama oštećenja čeličnih konstrukcija, kao i njihovih uzroka i efekata, od bitnog su značaja za trajnost čeličnih konstrukcija [77].

Oštećenja u čeličnim konstrukcijama se mogu javiti iz različitih razloga [103], [46], [71], [73], [94], koji mogu biti posledica strukturalnih imperfekcija materijala, ljudskih grešaka [1] ili incidentnih pojava [99]. Najčešći uzroci oštećenja čeličnih konstrukcija su [71]:

- greške u projektovanju, strukturalni nedostaci - neadekvatna projektna rešenja koja se javljaju kao posledica nedovoljnog znanja i stručnosti projektanta, izvođača i investitora, neodgovarajući materijali;
- propusti u toku građenja – nepoštovanje važećih standarda i propisa, odstupanje od projekta, greške u radionici, greške na montaži, neodgovarajuća antikorozivna zaštita, nagib stubova, ekscentričnost čvorova;

- geometrijske imperfekcije - netačne dimenzije poprečnih preseka, zakrivljenost elemenata, rezidualni naponi;
- materijalne imperfekcije - netačan hemijski sastav čelika i niže mehaničke karakteristike od propisanih;
- neredovan pregled objekta ili potpuno odsustvo pregleda – posebno se ogleda kod mostovskih konstrukcija. Praksa razvijenijih zemalja je postojanje specijalizovane službe koja vrši redovne preglede objekata i detektuje inicijalna oštećenja, što dovodi do pravovremenih radova na sanaciji, čime se smanjuju troškovi održavanja i produžava životni vek konstrukcije;
- neodržavanje i nepostojanje fondova za troškove redovnog održavanja objekata, što u nekim zemljama iznosi 1,5-2% investicione vrednosti objekata;
- neodgovarajuća ili oštećena antikorozivna i protivpožarna zaštita;
- izmena intenziteta stalnog ili korisnog opterećenja – nanošenje dodatnog stalnog opterećenja, promena namene objekta, povećanje intenziteta saobraćaja, veće osovinsko opterećenje vozila;
- dotrajnost kolovoznih konstrukcija kod mostova;
- oštećenja armirano betonskih kolovoznih ploča spregutih mostova;
- mehanička oštećenja konstrukcije objekta usled prekoračenja projektovanog opterećenja neodgovarajućeg korišćenja, udara, eksplozija, udara vetra, zemljotresa.

Karakteristična oštećenja čeličnih konstrukcija, koja su posledica gore navedenih razloga, data su na slici 26 [78]:



Slika 26 - Karakteristična oštećenja čeličnih konstrukcija [78]

#### 4.1.1. OŠTEĆENJA ČELIČNIH KONSTRUKCIJA

Generalno, konstrukcije od čelika zahtevaju veću pažnju i u fazi projektovanja i u fazi izgradnje u poređenju sa konstrukcijama od drugih materijala. Jedna od osnovnih podela oštećenja čeličnih konstrukcija je na:

- mehanička oštećenja;
- biološka oštećenja;
- hemijska oštećenja;
- korozija;
- požar.

### 4.1.1.1. MEHANIČKA OŠTEĆENJA ČELIČNIH KONSTRUKCIJA

Postoje pet osnovnih mehaničkih oštećenja čeličnih konstrukcija:

- plastična deformacija;
- krti lom;
- izvijanje/izbočavanje;
- zamor;
- puzanje;
- lamelarno cepanje.

#### Plastična deformacija

Plastična deformacija (slika 27) je način duktilnog loma koja se javlja pri prekoračenju granice elastičnosti, kada elementi prolaze kroz plastičnu (trajnu) deformaciju pre nego što dostignu krajnju zateznu čvrstoću čelika [68]. Ovo dovodi do vidljivih deformacija zbog sposobnosti čelika da se isteže ili savija. Pre nego što se dostigne iscrpljenje preseka, može doći da apsorbirane velike količine unutrašnjih uticaja. Plastična deformacija je često nepravilnog izgleda, sa smaknutim i/ili istanjenim delovima poprečnog preseka. Izgled boja ili drugih vrsta premaza na površini čelika može ukazivati na plastičnu deformaciju. Zbog svoje krhke prirode, pukotine boja ili premaza mogu se pojaviti u linijama upravno na pravac lokalnog glavnog napona, ukoliko čelična konstrukcija doživi neelastičnu deformaciju.



*Slika 27 - Plastični lom koji pokazuje lokalno stanjivanje i nepravilnu površinu loma [43]*

## Krti lom

Krti lom (slika 28) se može javiti pri nivoima naprezanja ispod granice tečenja ili čak ispod projektovanih dozvoljenih nivoa naprezanja [68]. U većini slučajeva, javlja se sa minimalnim ili bez ikakvih deformacija, a samim tim, sa minimalnim ili bez ikakvog upozorenja. Krti lomovi mogu dovesti do značajnog oštećenja konstrukcije, rušenja objekta i ozbiljnih povreda. Krti lom se najčešće odlikuje ravnim površinama loma bez plastične deformacije. Pored toga, površine krtog loma imaju strukturu u obliku slova „V“, na osnovu koje mogu da se odrede mesta početka loma i pravci širenja loma. Krti lom nastaje usled koncentracije napona, na mestima kao što su rupe za zavrtnjeve ili pozicije grešaka u varovima. Mogu se pojaviti u vezama, gde je deformacija ograničena usled same geometrije veze. U opštem slučaju, deblji čelični elementi (delovi preseka, limovi) su skloniji krtim lomovima od tanjih elemenata, zbog same tehnologije proizvodnje debljih elemenata (na primer, razlika u hlađenju mesta na površini i dubini preseka). Na pojavu krtog loma utiču i niske temperature i visoki intenziteti opterećenja. Rizik od pojave krtog loma pri niskoj temperaturi može se smanjiti izborom odgovarajuće vrste čelika.



*Slika 28 - Krti lom [38]*

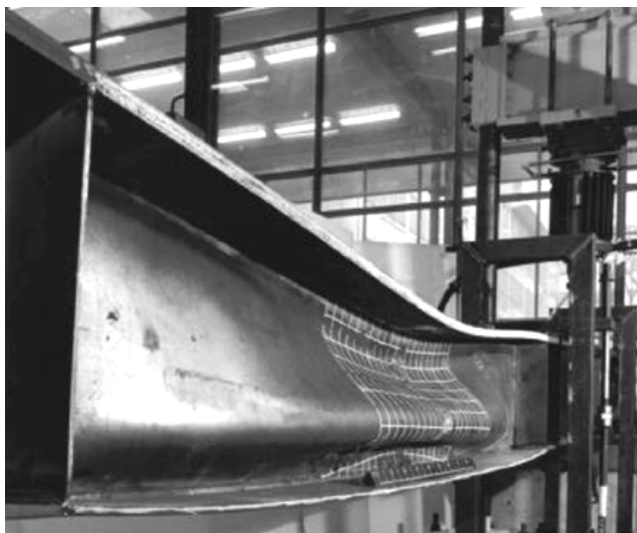


## Izvijanje/izbočavanje

Izvijanje/izbočavanje je oblik oštećenja konstrukcije koji prvenstveno zavisi od geometrije poprečnih preseka konstrukcije. Razlozi koji dovode do ove vrste oštećenja mogu biti velika dužina izvijanja, nedostatak bočnog pridržanja, oblik poprečnog preseka, visok intenzitet opterećenja i drugo. Izvijanje/izbočavanje je jedini vid oštećenja koji se javlja kod vitkih elemenata opterećenih silom pritiska. Izvijanje (slika 29) se javlja kod dugih i vitkih elemenata kao što su dugi stubovi, dok se izbočavanje (slika 30) javlja kod ploča sa velikim odnosom širina/debljina.



Slika 29 – Izvijanje [36]



Slika 30 – Izbočavanje [93]

## Zamor

Veliki broj konstruktivnih elemenata je izložen cikličnom opterećenju različitog intenziteta, najčešće ispod maksimalne nosivosti. Nastanak i širenje pukotina u materijalu usled cikličnog opterećenja se naziva zamor. Zamor se najčešće javlja kod dinamički opterećenih konstrukcija od strane vetra, vozila ili procesa proizvodnje, kao što su tornjevi, stubovi, mostovi i drugi. Čelični elementi mogu doživeti kolaps i pri relativno niskim naponima zatezanja nakon velikog broja ciklusa opterećenja. Ovakva ciklična opterećenja stvaraju mikroskopska plastična oštećenja na mestima koncentracije napona (rupe za zavrtnjeve, vrhovi varova i dr.). Nakon određenog broja ciklusa stvara se prslina koja se pri narednim ciklusima opterećenja širi kroz strukturu čelika. Rast prsline će se nastaviti sve dok se efektivni poprečni presek ne smanji na nivo na kome će doći do loma elementa (slika 31). Otkazivanje usled zamora se obično karakteriše ravnom površinom

loma. Većina lomova usled zamora se javlja na zavarenim spojevima. Čelik, kao materijal, ima definisan prag zamora za naprezanje. Ukoliko ciklični naponi ostanu ispod tog praga, elementi će biti otporni na zamor. Zbog toga se zamor čeličnih konstrukcija može eliminisati pravilnim projektovanjem i kvalitetnom proizvodnjom čelika.



*Slika 31 - Lom usled zamora [40]*

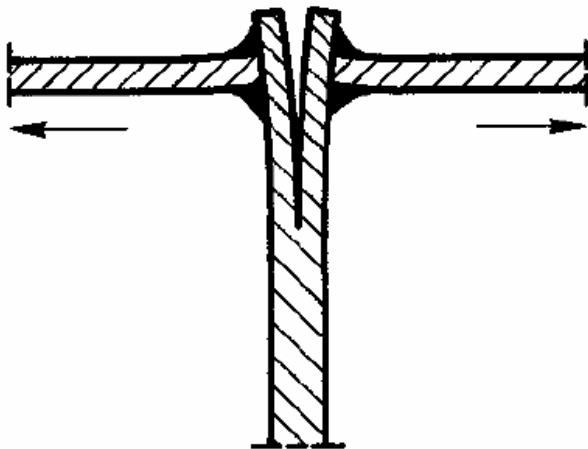
### **Puzanje**

Čelik se polako neelastično deformiše pod opterećenjem na visokim temperaturama, čak iako je napon znatno ispod granice tečenja. Ovo nagomilavanje oštećenja je poznato kao puzanje i u funkciji je vremena, temperature i opterećenja. Puzanje je neuobičajeno u klasičnim čeličnim konstrukcijama, osim u slučaju dugotrajnih požara. Ovo oštećenje najčešće se javlja kod elemenata koji su izloženi konstantnom temperaturnom opterećenju, kao što su cevi za obradu, cevi za kotlove, lopatice turbina i dr.

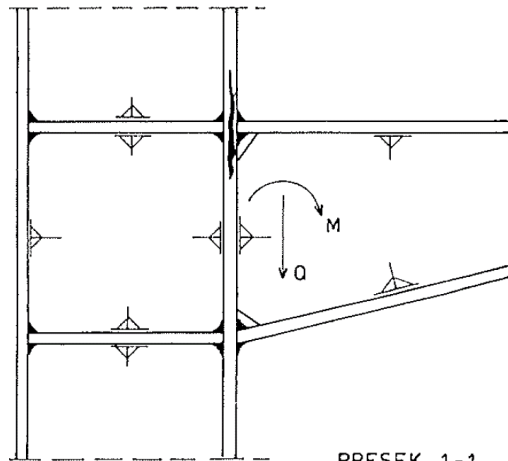
### **Lamelarno cepanje**

Lamelarno cepanje se najčešće javlja kod čeličnih elemenata većih debljina i posledica je zaostalih malih šupljina ili nemetalnih čestica koje se javljaju prilikom procesa valjanja ili vazdušnih mehura nastalih u procesu oplemenjivanja prodivavanjem u konvertorima [16]. Fenomen lamelarnog cepanja započinje stvaranjem prsline u unutrašnjosti strukture čelika kao rezultat naprezanja kroz

debljinu. Prsline mogu ostati potpuno ispod površine čelika ali se mogu javiti i na površini čelika u vidu pukotina. Ovo oštećenje se uglavnom javlja kod elemenata opterećenih upravno na pravac valjanja (slike 32 i 33). Načini da se predupredi lamelarno cepanje je kontrola debljih limova ultrazvučnim metodama, odgovarajuće projektovanje detalja, izbor osnovnog materijala. U suprotnom, ovo oštećenje može izazvati veliku štetu na objektu ako se blagovremeno ne uoči.



Slika 32 - Lamelarno cepanje



Slika 33 - Lamelarno cepanje kod veze konzole za stub [16]

#### 4.1.2. HEMIJSKA OŠTEĆENJA

Hemijska oštećenja (slika 34) nastaju usled dejstva soli na čeličnim površinama koje se izložene atmosferskim uticajima, kao i drugim supstancama nastalim ljudskom aktivnošću, kao što su ulje, grafiti, industrijske hemikalije i dr.



*Slika 34 - Hemijska oštećenja [77]*

### **4.1.3. BIOLOŠKA OŠTEĆENJA**

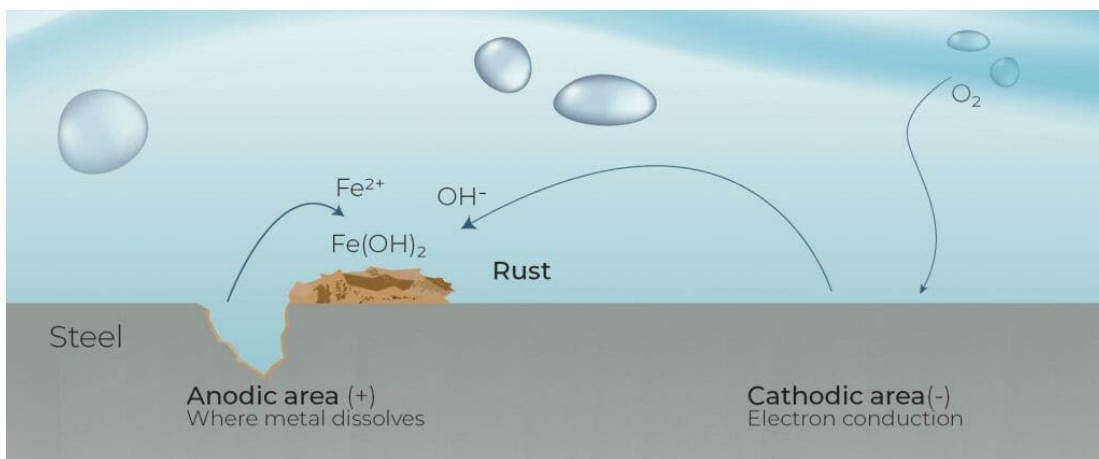
Biološka oštećenja nastaju od prisustva ljudskih ili životinjskih ostataka, bakterija i biljne vegetacije na površini čelika ili penetriraju kroz čelik. Ova vrsta oštećenja se često sreće kod neredovno održavanih mostova (slika 35). Prevencija oštećenja bioloških izvora je redovno održavanje i čišćenje.



*Slika 35 - Prodor vegetacije kroz šupljinu glavnog nosača mosta preko reke Mlave na putu za manastir Rukumija*

#### 4.1.4. KOROZIJA

Proces stvaranja korozije na čeliku nezaštićenom antikorozivnim premazom je veoma složen. Korozija predstavlja elektrohemijski proces koji se odvija u fazama (slika 36). Prva faza korozije se odvija na pozitivno naelektrisanjoj površini (anodi), gde joni gvožđa prelaze u rastvor. Elektroni se oslobađaju iz anode i kreću se kroz metalnu strukturu do susednih katodnih zona (negativno naelektrisanih zona) na površini, gde se u kombinaciji sa kiseonikom i vodom formiraju hidroksilne jone.



Slika 36 - Proces korozije [37]

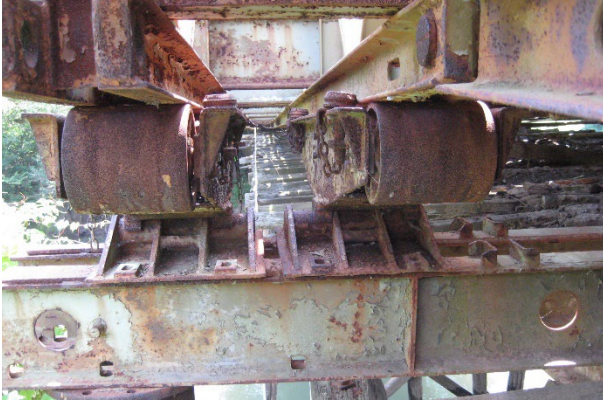
Na proces korozije utiču varijacije u strukturi čelika, kao što su prisustvo nečistoća zbog većeg broja ciklusa reciklaže čelika, neujednačeni unutrašnji naponi, izlaganje kiselinama, alkalijama, hemikalijama, rastvaračima i dr.

Postoji više vrsta korozija i svaka od njih ima različite strukturne efekte.

#### Rđa

Rđa (slike 37 i 38) je vrsta korozije čelika koja smanjuje njegove mehaničke karakteristike. Ova vrsta korozije ima veću propagaciju u prisustvu vlage, posebno ako vlaga sadrži hloride (soli) [17]. Rđa je stanje koje je uobičajeno u morskom, industrijskom i urbanom okruženju. Prilikom projektovanja veza, potrebno je elemente veze zaštititi od rđe.





*Slika 37 - Zardali oslonci na mostu preko reke  
Mlava na putu za manastir Rukumija*



*Slika 38 - Rđa*

### **Opšta - atmosferska korozija**

Opšta korozija (slike 39 i 40) se obično javlja kod običnog ili niskolegiranog čelika koji sadrži manje od 13% hroma zbog neutralne vode i vlažnog vazduha. Vodeni sloj omogućava da se na površini čelika razviju elektrolitičke reakcije, što dovodi do progresivne korozije. Brzina korozije se brzo povećava u prisustvu drugih zagađivača i povišenog nivoa vlažnosti.



*Slika 39 - Opšta korozija*



*Slika 40 - Opšta korozija na glavnom nosaču mosta preko reke Nišave na ulazu u nišku tvrđavu*

### **Galvanska korozija**

Ovaj tip korozije (42 i 41) nastaje kada se dodiruju različiti metali u prisustvu vlage, pri čemu manje plemeniti metal korodira.



*Slika 41 - Galvanska korozija na delovima mosta preko reke Mlave na putu za manastir Rukumija*



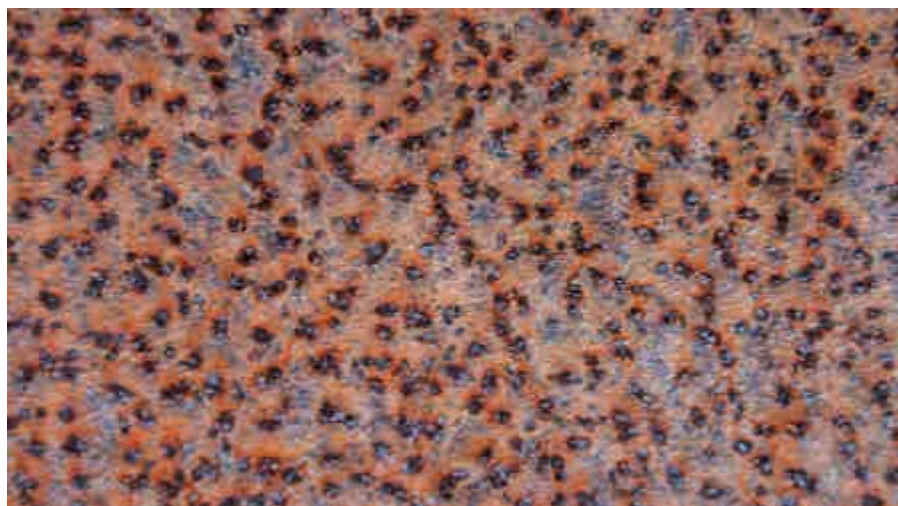
*Slika 42 - Galvanska korozija*



Sekundarni efekat galvanske korozije može dovesti do većeg oštećenja. Vodonik, kao nusproizvod galvanske korozije, može oslabiti mesta ojačanja i izazvati slom konstrukcije.

### **Tačkasta korozija**

Tačkasta korozija (slika 43) nastaje zbog anodnih (pozitivno naelektrisanih) zona koje formiraju korozionu jamu. Ova korozija se pojavljuje u mekom čeliku u kontaktu sa vodom ili tlom. Prisustvo vlage u izlaganje naizmeničnom sušenju i vlaženju pospešuje pojavu tačkaste korozije. Ovaj vid korozije se lako može preduprediti pravilno izvedenim detaljima koji omogućavaju brzo odvodnjavanje i slobodan protok vazduha koji suši površinu.



*Slika 43 - Tačkasta korozija*

### **Hemijska korozija**

Hemijska korozija (slika 44) je proces u kome se metali rastvaraju u kiselinama i kaustičnim rastvorima različite jačine, a kao posledica tendencije metala da reaguje sa kiseonikom i formira okside. Što je plemenitost metala manja, ova tendencija je jača. Jedna od kiselina koja izaziva ovu vrstu korozije je sumporna kiselina, koje nastaje kao rezultat emisije sumpor dioksida iz sagorevanja fosilnih goriva i nalazi se u većoj koncentraciji u urbanim i industrijskim sredinama. Na hemijsku koroziju utiču i azotni oksidi, hlor, hlorovodonik, mravlja kiselina, sirćetna kiselina



i druge koje se mogu naći u blizini industrijskih postrojenja. Hlorid i natrijum hlorid su česti izazivači korozije u priobalnim oblastima.



*Slika 44 - Hemijska korozija*

### **Korozija pukotina**

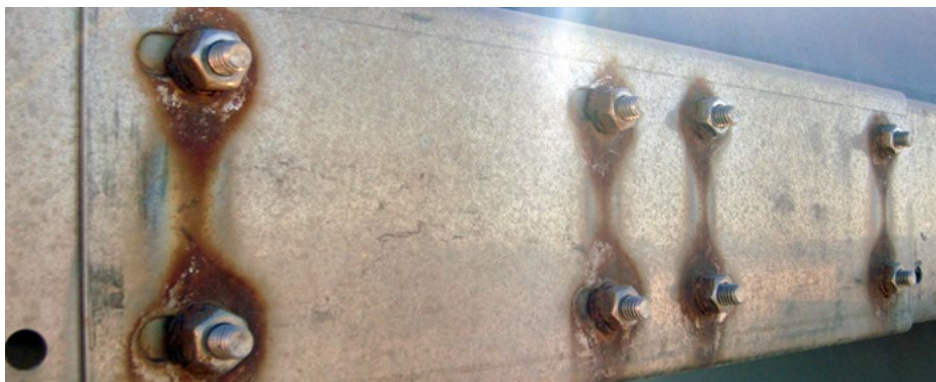
Kod korozije pukotina (slika 45) sadržaj kiseonika u vodi zarobljenoj u pukotini je manji od onog u vodi koja je izložena vazduhu. Zbog toga pukotina postaje anodna (pozitivno naelektrisana) u odnosu na metal u okolini i formiranje korozije započinje iz pukotine.



*Slika 45 - Korozija pukotina*

## **Biometalna korozija**

Kada se dva različita materijala (na primer gvožđe i aluminijum) spoje zajedno u elektrolit, električna struja prolazi između njih i dolazi do biometalne korozije (slika 46). Zahvaljujući tom fenomenu metali se mogu klasifikovati u zavisnosti od njihovog električnog potencijala i ta klasifikacije se zove galvanski niz.



*Slika 46 - Biometalna korozija*

## **Naponska korozija**

Naponska korozija (slike 47 i 48) nastaje pri delovanju napona zatezanja u materijalu u korozivnoj sredini. U zonama koncentracije napona javljaju se anodne (pozitivno naelektrisane) zone kod kojih započinje stvaranje korozije. Ova vrsta korozije nije uobičajena kod crnih metala, dok su neki nerđajući čelici tome podložni.



*Slika 47 - Naponska korozija na poprečnim nosačima mosta preko reke Nišave ispred niške tvrđave*



*Slika 48 - Naponska korozija*

### **Bakterijska korozija**

Bakterijska korozija (slika 49) je rezultat mikrobioloških aktivnosti i javlja se kod delova konstrukcije koji su u kontaktu sa zemljištem ili vodom. Ova vrsta korozije najčešće se javlja u cevovodima, ukopanim konstrukcijama i priobalnim objektima.



*Slika 49 - Bakterijska korozija*

Kako proces korozije napreduje, „proizvodi“ korozije imaju tendenciju da se skupljaju u određenim delovima metala. Ovi proizvodi korozije imaju drugačiji sastav elemenata od prvobitnog stanja. Novi slojevi korozije izloženi na površini dovode do promena u anodnoj i katodnoj oblasti, što dovodi do toga da prethodno nekorozivne površine metala mogu biti „napadnute“ korozijom. Ovo za posledicu ima ubrzavanje korozije čelične površine.

## **Efekti korozije**

Efekti korozije na čeličnim površinama su sledeći:

- **gubitak čvrstoće** – korozija smanjuje efektivni poprečni presek čeličnih elemenata, a samim tim i otpornost poprečnog preseka na različite vrste naprezanja;
- **zamor** – korozija ima efekat na ubrzanje širenja prslina koje se javljaju usled zamornog opterećenja;
- **smanjena čvrstoća veze** – kapacitet nosivosti kompozitnih elemenata, kao što su elementi od armiranog betona ili spregnuti elementi zavise od karakteristika veze beton – armatura, odnosno beton – čelik. Kada čelik korodira, proizvodi korozije se šire i ostavljaju sloj čelika lošeg kvaliteta preko površine armature ili čeličnog profila u kontaktu sa betonom. Zbog toga ovaj sloj ima slabu vezu sa okolnim betonom, a samim tim i smanjenu nosivost ukupnog preseka. Za slučaj preklopnih spojeva ili sidrenja, korozija rezultira smanjenom efektivnom dužinom sidrenja – smanjuje poprečni presek elemenata veze;
- **ograničena duktilnost** - korozija može značajno smanjiti duktilnost armirano betonskih elemenata, što ima veliki značaj pri seizmičkom proračunu. Korodirani elementi imaju manju duktilnost, što znači da je njihova plastična deformacija ograničena. Ovo utiče na seizmički odgovor konstrukcije.

Svi navedeni problemi mogu se sprečiti pravilno projektovanim rešenjima, a duži životni vek konstrukcije može se ostvariti redovnim održavanjem. Sistemi zaštitnih premaza su najčešći vid zaštite od korozije, a ujedno i najbolji i najefikasniji način prevencije korozije, stvarajući barijeru između metala i okoline. Međutim, na zaštitu koju pružaju zaštitni premazi mogu u velikoj meri uticati vrsta, debljina i prekidi zaštitnog premaza.



#### 4.1.5. POŽAR

Pojava požara u čeličnoj konstrukciji ili u njegovoj blizini stvara veoma neujednačenu raspodelu temperature, što rezultira smanjenjem mehaničkih karakteristika čelika, kao što su granica razvlačenja, čvrstoća na zatezanje, modul elastičnosti. Ove promene utiču na ugrožavanje funkcije (slika 50) ili kolaps delova konstrukcije, a ponekad i cele konstrukcije. Temperatura čelika u trenutku loma elementa se obično uzima kao kritična temperatura [81], u zavisnosti od tipa, veličine, konfiguracije, orijentacije i napreznja čeličnog elementa.



*Slika 50 - Izgled veze čeličnih elemenata nakon požara*

Mere zaštite čeličnih konstrukcija od požara mogu biti primarne i sekundarne. U primarne mere zaštite spadaju [11]:

- povoljno oblikovanje prostora objekta sa stanovišta požarne otpornosti;
- upotreba materijala sa manje izraženim požarnim osobinama;
- primena elemenata noseće konstrukcije sa povećanom požarnom otpornošću (međuspratne konstrukcije od profilisanih limova sa ispunom od betona, čelični stubovi sa betonskom ispunom ili oblogom, upotreba spoljnih stubova i dr.);
- podela objekata na posebne požarne sektore primenom požarnih zidova;
- obezbeđenje bezbednih puteva za evakuaciju;
- postavljanje otvora za odvod gasova i toplote;
- instaliranje uređaja za otkrivanje i gašenje požara (sprinkler sistemi).

U sekundarne mere zaštite spadaju protivpožarni izolacioni materijali i sistemi hlađenja vodom.

## 4.2. UPOTREBNI VEK KONSTRUKCIJE

Projektovani upotrebni vek konstrukcije je pretpostavljeni period vremena za koji će konstrukcija ili konstruktivni element vršiti svoju namenu, uz predviđeno održavanje, ali bez značajnijih popravki [47], [88]. Konstrukcija mora da bude proračunata i izvedena, na takav način, da ona, tokom svog predviđenog veka, sa odgovarajućim stepenima pouzdanosti i ekonomično, može da [79]:

- prihvati sva dejstva i uticaje, za koje je verovatno da mogu da nastanu, u toku izvođenja i eksploatacije, kao i
- ostane podobna za upotrebu, koja je zahtevana.

Prema evropskim propisima, konstrukcija mora ispuniti zahteve nosivosti, upotrebljivosti i trajnosti. U radovima objavljenih poslednjih godina [88] može se videti da to nije dovoljno, već se mora ispuniti i četvrti uslov koji se odnosi na interakciju konstrukcija - životna sredina. Mišljenje je da ovaj uslov treba biti u okviru kriterijuma kroz sve faze životnog ciklusa objekta. Ove kriterijume možemo podeliti na:

- globalno zagrevanje;
- zakiseljavanje;
- eutrofikacija;
- formiranje ozonskog omotača;
- smanjenje količine neobnovljivih resursa (kamen, pesak, gvožđe);
- smanjenje količine neobnovljivih izvora energije (nafta, ugalj);
- odlaganje otpada;
- buka, prašina, vibracije.

U zavisnosti od predviđenog upotrebno veka konstrukcije, Evrokod 0 predviđa klasifikaciju konstrukcija u jednu od 5 kategorija proračunskog eksploatacionog veka, a prema značaju konstrukcije ili njenih delova (tabela 11).

Tabela 11 - Indikativni proračunski vek konstrukcije [79]

Kategorija proračunskog eksploatacionog veka	Indikativni proračunski eksploatacioni vek (godina)	Primeri
1	10	Privremene konstrukcije <sup>1)</sup>
2	10 do 25	Zamenljivi delovi konstrukcije, na primer, kranski nosači, ležišta
3	15 do 30	Poljoprivredne i slične konstrukcije
4	50	Konstrukcije zgrada i druge jednostavne konstrukcije
5	100	Konstrukcije monumentalnih zgrada, mostovi, kao i konstrukcije drugih građevinskih objekata
<sup>1)</sup> Konstrukcije ili delovi konstrukcija, koji mogu da budu uklonjeni, sa izgledom da budu ponovo korišćeni, ne treba da budu razmatrani kao privremeni		

Da bi uslov trajnosti konstrukcije bio ispunjen na adekvatan način, u fazi projektovanja treba da budu razmotreni sledeći faktori [79]:

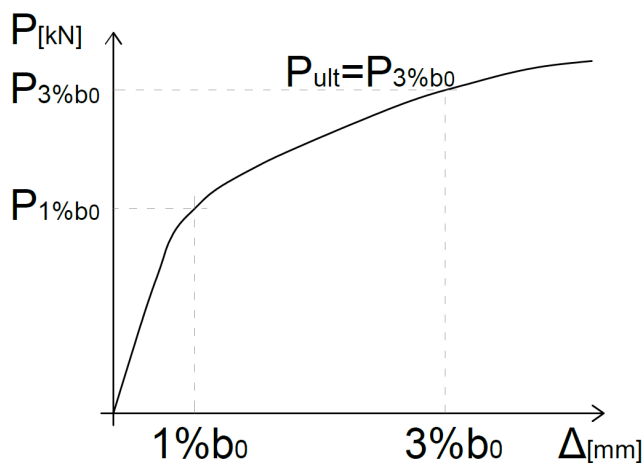
- predviđena upotreba konstrukcije;
- zahtevani proračunski kriterijumi;
- očekivani uslovi sredine;
- kvalitet materijala i proizvoda;
- svojstva tla;
- izbor konstrukcijskog sistema;
- oblik elemenata i konstruisanje detalja,
- kvalitet izvođenja;
- nivo kontrole pri izvođenju;
- zaštitne mere;
- održavanje tokom proračunskog upotrebnog veka objekta.

## 5. NOSIVOST DIREKTNO ZAVARENIH VEZA OD ČELIČNIH RHS

Kao što je već nadeveno u 3. poglavlju, teorije graničnih stanja su osnov za definisanje jednačina i preporuka kojima se određuje nosivost veza [3], [13], [4]. Neophodno je ispuniti uslov da su sva potencijalna stanja zadovoljena:

- granično stanje nosivosti;
- granično stanje deformacija;
- vizuelna pojava prslina.

Određen je kriterijum loma [56] zasnovan na graničnoj vrednosti deformacije, na osnovu brojnih numeričkih i eksperimentalnih istraživanja. Ovo je bitno iz razloga određivanja granične nosivosti veza od šupljih RHS ili CHS profila, kod kojih kriva napon-deformacija, odnosno moment-rotacija ne pokazuju jasnu vrednost granične sile. U preporukama Međunarodnog instituta za zavarivanje (IIW) i [56] definisana je granična vrednost deformacije u iznosu od 3% od širine ( $b_0$ ) / visine ( $h_0$ ) / prečnika ( $d_0$ ) kojoj odgovara granična nosivost veze [63], što je prikazano na slici 51 na dijagramu P- $\Delta$  (sila – deformacija). Ove preporuke usvojili su i drugi autori u svojim publikacijama [108],[97].



Slika 51 - Granična deformacija veze

Vrednosti ograničenja su definisane na način kako bi se u zoni veze izbegle prevelike deformacije i pojava prslina.

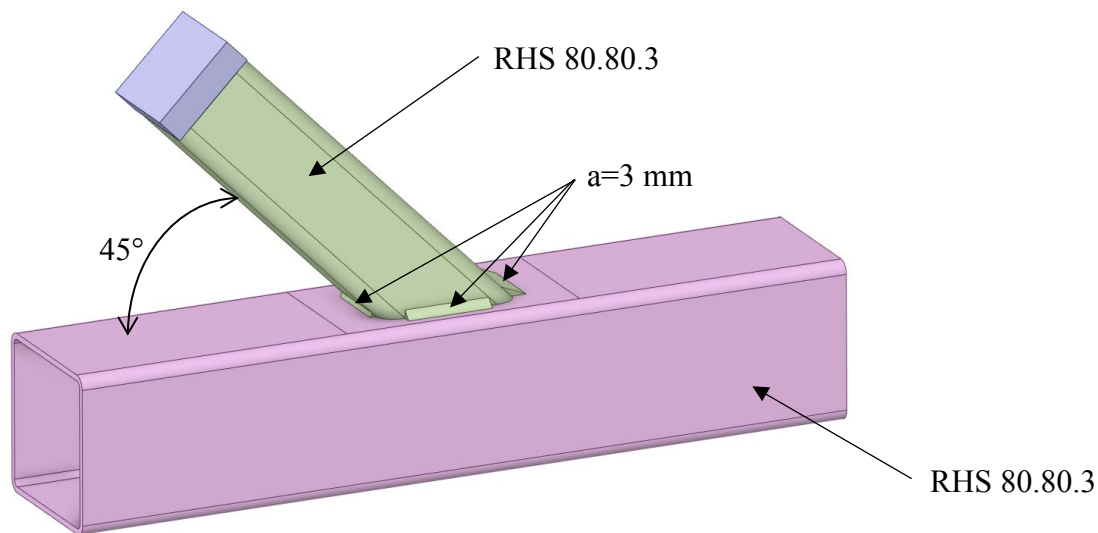


Zbog toga, granična nosivost veze predstavlja manju od dve vrednosti:

- maksimalna nosivost veze;
- nosivost veze pri deformaciji od  $3\% \cdot b_0/h_0/d_0$ .

## 5.1. ANALIZA NOSIVOSTI Y VEZE DIREKTNO ZAVARENIH ELEMENATA IZRAĐENIH OD RHS SA OŠTEĆENJEM

U radu je izvršeno istraživanje uticaja oštećenja pojasnog štapa na nosivost Y veze direktno zavarenih elemenata od šupljih profila kvadratnog poprečnog preseka na dejstvo aksijalne sile u štapu ispune. Za numeričko i eksperimentalno ispitivanje su izabrani hladno oblikovani profili izrađeni od čelika S235JR [69]. Pojasni štap je izrađen od profila RHS 80x80x3 [27], a dijagonala je izrađena od profila RHS 50x50x4 [27]. Dijagonala je postavljena pod uglom od  $45^\circ$  u odnosu na pojasni štap. Pojasni i dijagonalni element su zavareni ugonim šavom debljine 3 mm. Dužina pojasnog štapa je 400 mm, a dijagonale 200 mm. Na slici 52 prikazana je geometrija neoštećene veze.



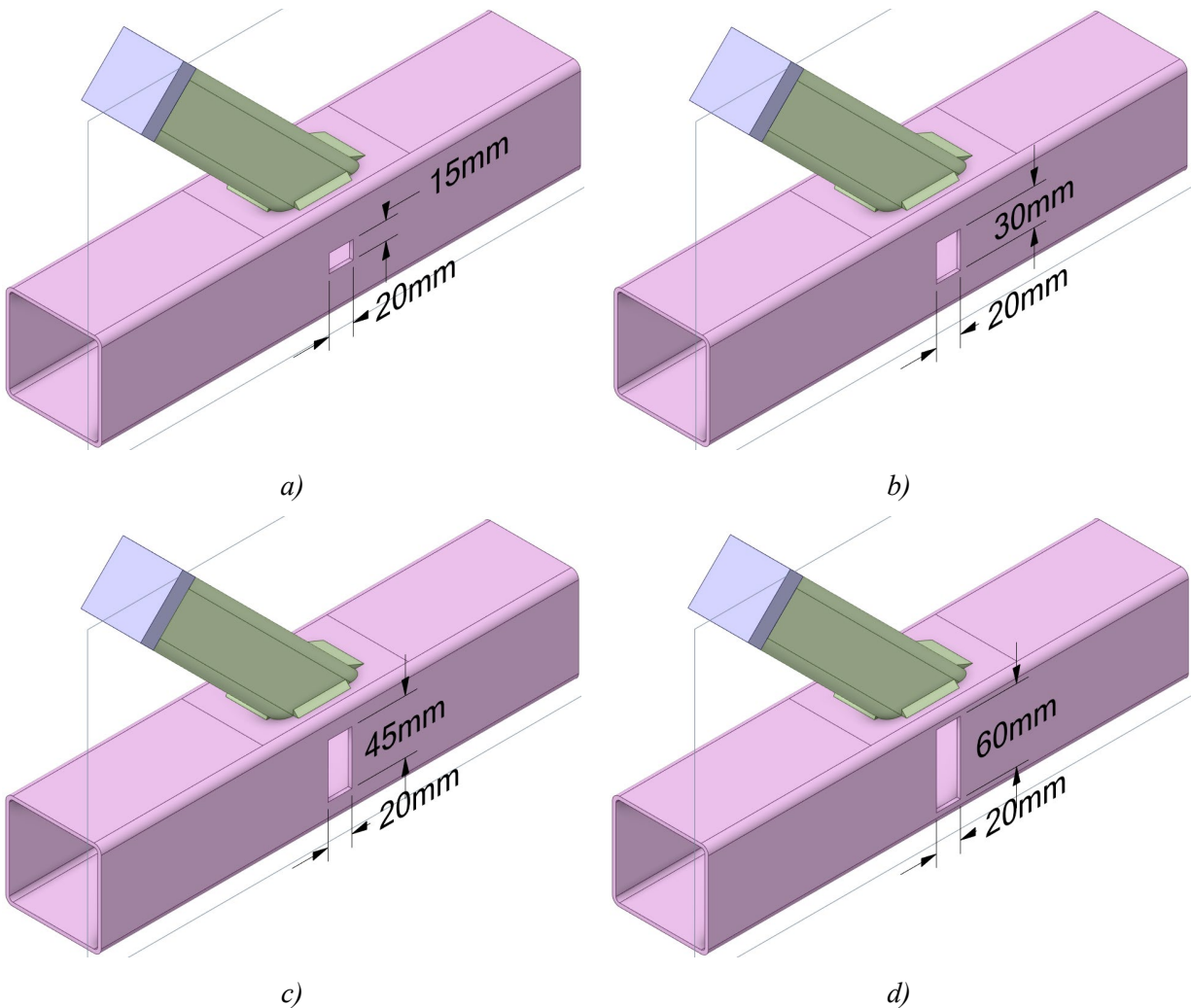
Slika 52 - Geometrija neoštećenog uzorka

Cilj istraživanja je u kojoj meri oštećenja i propagacija oštećenja u pojasnom štapu utiču na graničnu nosivost veze u odnosu na neoštećenu vezu.

U radu su analizirane nosivosti neoštećene veze i veze sa različitim procentom oštećenja (10%, 20%, 30%, 40%). Oštećenja su simulirana u vidu otvora („rupa“) na bočnim zidovima pojasnih štapova, a njihova veličina prikazana je u tabeli 12 (slika 53). Osnovna ideja ove analize bila je u kojoj meri propagacija oštećenja utiče na graničnu nosivost veze.

*Tabela 12 - Analizirani uzorci*

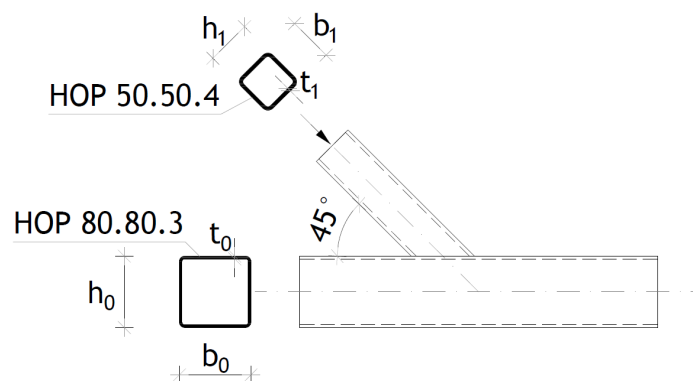
<b>Uzorak</b>	<b>Veličina oštećenja na oba bočna zida</b>	<b>Procenat oštećenja poprečnog preseka</b>
Bez oštećenja	-	0%
Oštećenje 1	15x20 mm	10%
Oštećenje 2	30x20 mm	20%
Oštećenje 3	45x20 mm	30%
Oštećenje 4	60x20 mm	40%



Slika 53 - Prikaz veličine i položaja oštećenja: a) oštećenje 1, b) oštećenje 2, c) oštećenje 3, d) oštećenje 4

## 5.2. PRORAČUNSKA NOSIVOST NEOŠTEĆENE DIREKTNO ZAVARENE Y VEZE OD RHS

U nastavku je izvršen proračun nosivosti neoštećene direktno zavarene Y veze od RHS profila, u skladu sa trenutno važećim tehničkim propisom – SRPS EN 1993-1-8:2012.



Slika 54 - Dispozicija veze

Geometrijske karakteristike poprečnih preseka (slika 54):

*Pojasni štap:*

RHS 80x80x3

Visina preseka:  $h_0 = 80 \text{ mm}$

Širina preseka:  $b_0 = 80 \text{ mm}$

Debljina zida:  $t_0 = 3 \text{ mm}$

Površina poprečnog preseka:  $A_0 = 9,01 \text{ cm}^2$

*Štap ispune:*

RHS 50x50x4

Visina preseka:  $h_1 = 50 \text{ mm}$

Širina preseka:  $b_1 = 50 \text{ mm}$

Debljina zida:  $t_1 = 4 \text{ mm}$

Površina poprečnog preseka:  $A_1 = 6,948 \text{ cm}^2$

Ugao između štapa ispune i pojasnog štapa:  $\theta_1 = 45^\circ$

Osnovni materijal:

S 235 JR

Granica razvlačenja:  $f_y = 235 \text{ MPa}$

Čvrstoća na zatezanje:  $f_u = 360 \text{ MPa}$

Modulo elastičnosti:  $E = 210\,000 \text{ MPa}$

Klasifikacija poprečnih preseka:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yd}}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1,0$$

*Pojasni štap:*

Flanša:

$$\frac{b_0 - 3 \cdot t_0}{t_0} = \frac{80 - 3 \cdot 3}{3} = 23,67 \leq 33 \cdot \varepsilon = 33$$

nožica je klase 1

Rebro:

$$\frac{h_0 - 3 \cdot t_0}{t_0} = \frac{80 - 3 \cdot 3}{3} = 23,67 \leq 33 \cdot \varepsilon = 33$$

rebro je klase 1

Poprečni presek pojasnog štapa je klase 1.

*Štap ispune:*

Flanša:

$$\frac{b_1 - 3 \cdot t_1}{t_1} = \frac{50 - 3 \cdot 4}{4} = 9,50 \leq 33 \cdot \varepsilon = 33$$

nožica je klase 1

Rebro:

$$\frac{h_1 - 3 \cdot t_1}{t_1} = \frac{50 - 3 \cdot 4}{4} = 9,50 \leq 33 \cdot \varepsilon = 33$$

rebro je klase 1

Poprečni presek štapa ispune je klase 1.

Uslovi veze:

$$\theta_1 = 45^\circ > 30^\circ \quad \rightarrow \quad \text{uslov ispunjen}$$

Parametri veze:

$$\beta = \frac{b_1}{b_0} = \frac{50}{80} = 0,625$$

$$\gamma = \frac{b_0}{2t_0} = \frac{80}{2 \cdot 3} = 13,33$$

$$\eta = \frac{h_1}{b_0} = \frac{50}{80} = 0,625$$

Opseg važenja:

$$\beta = \frac{b_1}{b_0} = \frac{50}{80} = 0,625 > 0,25 \quad \rightarrow \quad \text{uslov ispunjen}$$

$$\frac{b_1}{t_1} = \frac{50}{4} = 12,50 < 35 \quad \rightarrow \quad \text{uslov ispunjen}$$

$$\frac{h_1}{t_1} = \frac{50}{4} = 12,50 < 35 \quad \rightarrow \quad \text{uslov ispunjen}$$

Poprečni presek štapa ispune je klase 1  $\rightarrow$  uslov ispunjen

$$\frac{h_0}{b_0} = \frac{80}{80} = 1,0 \begin{cases} > 0,5 \\ < 2,0 \end{cases} \quad \rightarrow \quad \text{uslov ispunjen}$$

$$\frac{b_0}{t_0} = \frac{80}{3} = 26,67 < 35 \quad \rightarrow \quad \text{uslov ispunjen}$$

$$\frac{h_0}{t_0} = \frac{80}{3} = 26,67 < 35 \quad \rightarrow \quad \text{uslov ispunjen}$$

Poprečni presek pojasnog štapa je klase 1  $\rightarrow$  uslov ispunjen

Dodatni uslovi:

$$\frac{b_1}{b_0} = \frac{50}{80} = 0,625 < 0,85 \quad \rightarrow \quad \text{uslov ispunjen}$$

$$\frac{b_0}{t_0} = \frac{80}{3} = 26,67 > 10 \quad \rightarrow \quad \text{uslov ispunjen}$$

Proračunska nosivost veze

S obzirom na vrednost parametra veze  $\beta = 0,625$ , potrebno je izračunati proračunsku nosivost veze samo prema izrazu za lom plastifikacijom površine pojasa.

- Lom plastifikacijom površine pojasa

$$\beta = 0,625 < 0,85$$

$$N_{1,Rd} = \frac{k_n \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \left( \frac{2 \cdot \beta}{\sin \theta_1} + 4(1 - \beta)^{0,5} \right)}{\gamma_{M5}}$$

Pritisak -  $n > 0$

$$k_n = 1,3 - \frac{0,4 \cdot n}{\beta} = 1,0$$

$$N_{1,Rd} = \frac{1,0 \cdot 23,5 \cdot 0,3^2 \left( \frac{2 \cdot 0,625}{\sin 45^\circ} + 4(1 - 0,625)^{0,5} \right)}{1,0}$$

---

$$N_{1,Rd} = 33,64 \text{ kN}$$

Proračunska nosivost iznosi  $N_{Rd} = 33,64 \text{ kN}$ .

Proračunska nosivost veze uzimajući u obzir i uticaj šavova

$$\bar{\beta} = \frac{b_1 + 2 \cdot a \cdot \sqrt{2}}{b_0 - 2 \cdot t_0} = \frac{50 + 2 \cdot 3 \cdot \sqrt{2}}{80 - 2 \cdot 3} = 0,790$$

$$\bar{\eta} = \frac{h_1 + 2 \cdot a \cdot \sqrt{2}}{b_0 - 2 \cdot t_0} = \frac{50 + 2 \cdot 3 \cdot \sqrt{2}}{80 - 2 \cdot 3} = 0,790$$

- Lom plastifikacijom površine pojasa

$$\beta = 0,790 < 0,85$$

$$N_{1,Rd} = \frac{1,0 \cdot 23,5 \cdot 0,3^2}{(1 - 0,790) \sin 45^\circ} \left( \frac{2 \cdot 0,790}{\sin 45^\circ} + 4(1 - 0,790)^{0,5} \right) \cdot 1,0$$

$$N_{1,Rd} = 57,93 \text{ kN}$$

Proračunska nosivost veze uzimajući u obzir i uticaj šavova iznosi  $N_{Rd} = 57,93 \text{ kN}$ .

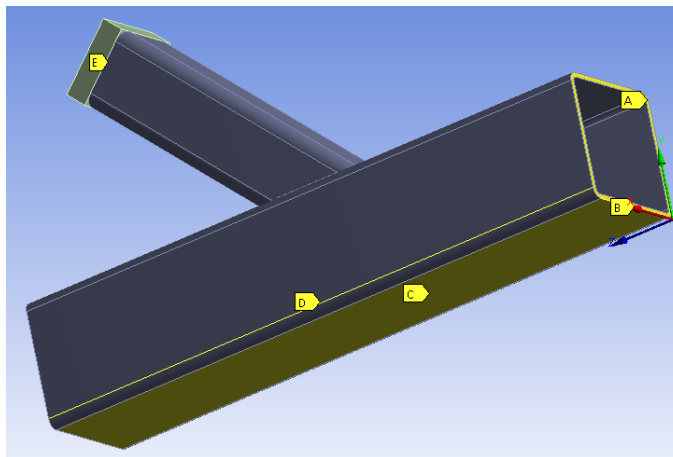
### **5.3. GRANIČNA NOSIVOST DIREKTNO ZAVARENE Y VEZE OD RHS PRIMENOM NUMERIČKE ANALIZE**

#### **5.3.1. ULAZNI PODACI ZA NUMERIČKU ANALIZU**

Numerička analiza izvršena je metodom konačnih elemenata (MKE). Simulacioni model je modeliran u softverskom paketu ANSYS [106], [5]. U analizi su obuhvaćene geometrijske i materijalne nelinearnosti. Veza je modelirana kao spoj 2 čvrsta tela (solid bodies). Pojasni štap i dijagonala su modelirani kao dva nezavisna tela. Ova dva elementa su povezana ugaonim šavovima debljine 3 mm. Zbog jednostavnosti, šavovi su modelirani samo na pravolinijskom delu kontakta između pojasnog elementa i elementa ispune, dok na kružnom delu nisu modelirani. Modelirano je još jedno čvrsto telo (solid body) koje se nalazi na slobodnom kraju dijagonalnog elementa. Ovo čvrsto telo ima ulogu da simulira sferni element preko koga se unosi sila u



dijagonalni element. Konturni uslovi (tabela 13 i slika 55) i kontaktni uslovi (između sferne ploče i dijagonalnog elementa, dijagonalnog elementa i šavova, šavova i pojasnog elementa) su modelirani tako da se na realističan način simuliraju uslovi pri eksperimentu. Materijal u modelu odgovara materijalu elemenata na kome je izvršeno eksperimentalno istraživanje.



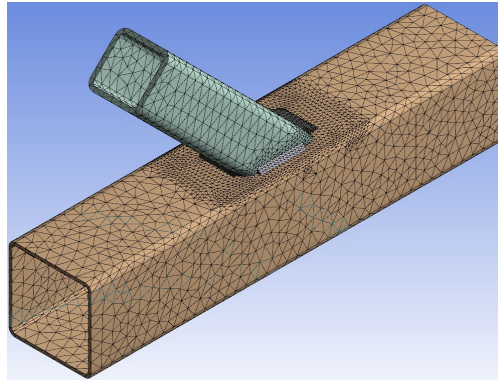
Slika 55 - Konturni uslovi

Tabela 13 - Konturni uslovi

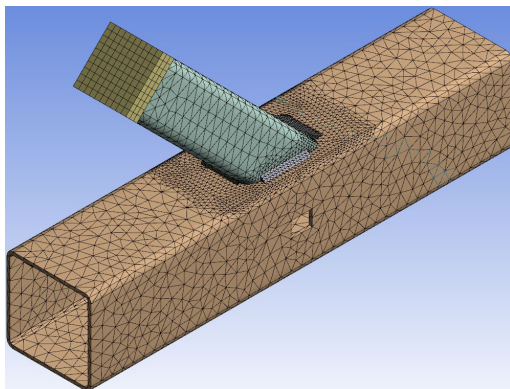
Pojašnjenje slike 55	Tip elementa	Sprečeno pomeranje
A	Površina	$Z=0$
B	Linija	$X=Y=Z=0$
C	Površina	$Y=0$
D	Linija (obe strane pojasnog štapa)	$X=0$
E	Čvor (sredina gornje površine čvrste ploče)	Opterećenje kao pomeranje čvora $Y=Z=6\text{mm}$

Mreža konačnih elemenata je modelirana pomoću generatora u samom programskom paketu. Na površinama veće koncentracije napona mreža konačnih elemenata je progušćena (konačni elementi su dva puta manji od konačnih elemenata na ostalim delovima modela) (slike 56 i 57). Mreža je formirana upotrebom SOLID187 elemenata, višeg 3-D reda elemenata sa 10 čvorova sa kvadratnim ponašanjem pomeranja, koji je pogodan za modeliranje mreža nepravilnog oblika. Istraživanja autora u radu [106] na neoštećenj Y vezi su pokazala da veličina elemenata mreže

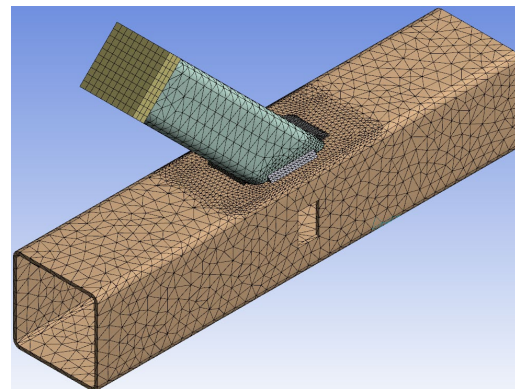
manja od 10 mm ne pokazuje značajno preciznije rezultate. Zbog toga je prilikom izrade modela neoštećene i oštećenih veza u ovom radu usvojena mreža sa elementima veličine 10 mm, odnosno 5 mm u zoni progušćenja (gornja nožica pojasnog elementa). Broj konačnih elemenata u modelu se kreće oko 45.000, dok se broj čvorova u modelu kreće oko 80.000.



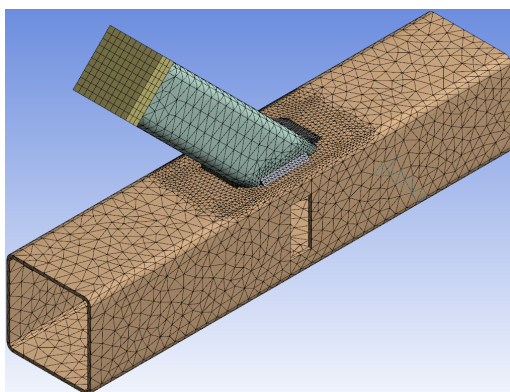
*Slika 56 - Mreža konačnih elemenata neoštećene veze*



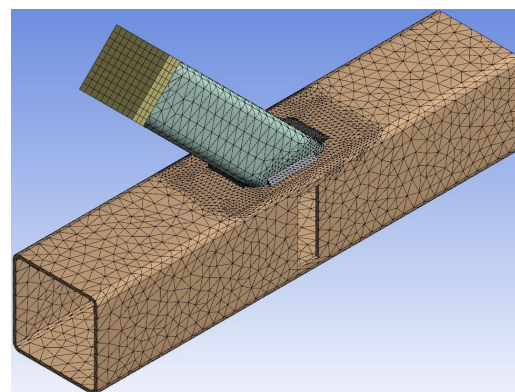
*a)*



*b)*



*c)*



*d)*

*Slika 57 - Mreže konačnih elemenata oštećenih veza: a) oštećenje 1, b) oštećenje 2, c) oštećenje 3, d) oštećenje 4*

Ulazni podaci:

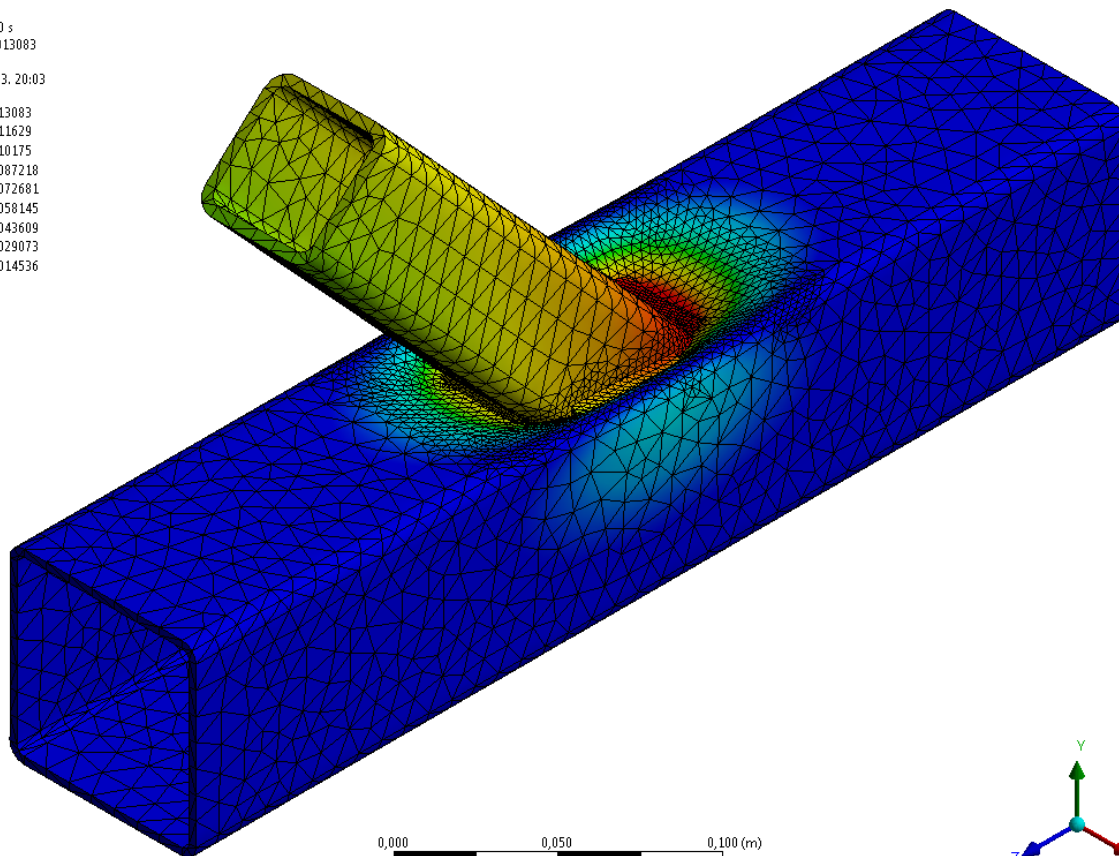
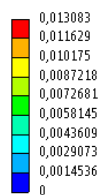
- osnovni materijal S235JR;
- granica razvlačenja:  $f_y = 235 \text{ MPa} = 23,5 \text{ kN/cm}^2$ ;
- čvrstoća na zatezanje:  $f_u = 360 \text{ MPa} = 36,0 \text{ kN/cm}^2$ ;
- moduo elastičnosti:  $E = 210\,000 \text{ MPa} = 21\,000 \text{ kN/cm}^2$ ;
- tangenti modul elastičnosti [108], [92], [15]:  $E_T = 0,08 \cdot E = 0,08 \cdot 210\,000 = 16\,800 \text{ MPa}$ ;
- Poisson-ov koeficijent:  $\nu = 0,30$ ;
- materijalni model veze: 3D, nelinearan;
- kriterijum tečenja: von Mises/Hill;
- zakon tečenja: asocijativni (Prandtl-Reuss jednačine);
- odnos napona i dilatacije: bilinearan;
- zakon ojačanja: klasično bilinearno kinematičko ojačanje.

### 5.3.2. NUMERIČKA ANALIZA

Na slikama 58, 59, 60, 61 i 62 prikazane su ukupne deformacije pri graničnoj nosivosti neoštećene veze i veze sa oštećenjima, dobijeni primenom MKE. Za prikaz napona na delu veze, izabran je ekvivalentni napon (von Mises-ov napon) pri graničnoj nosivosti neoštećene veze (slika 63) i veze sa oštećenjima (slike 64, 65, 66 i 67), dobijenom primenom MKE, zajedno sa legendom i numeričkim vrednostima.

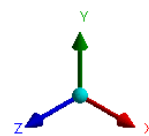
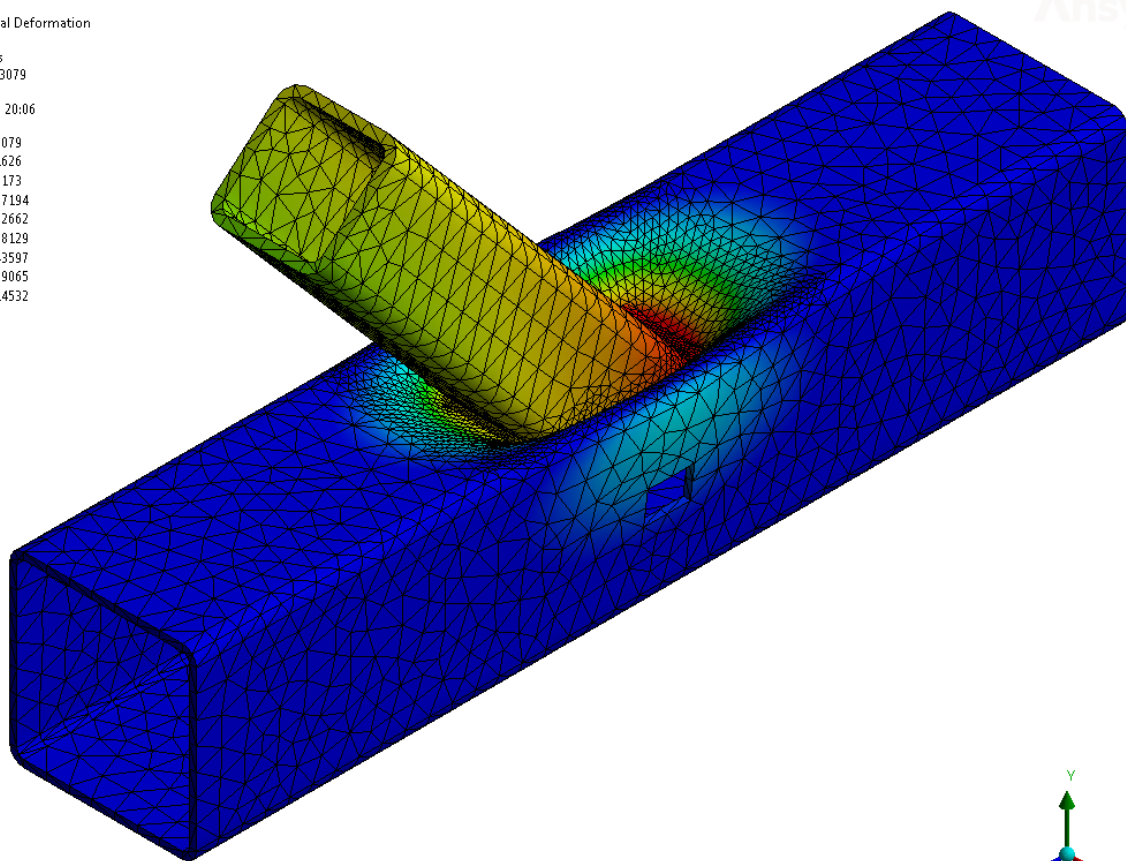
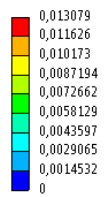
**A: Static Structural**  
Figure  
Type: Total Deformation  
Unit: m  
Time: 10 s  
Max: 0,013083  
Min: 0  
22.2.2023. 20:03

Anslys



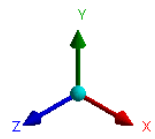
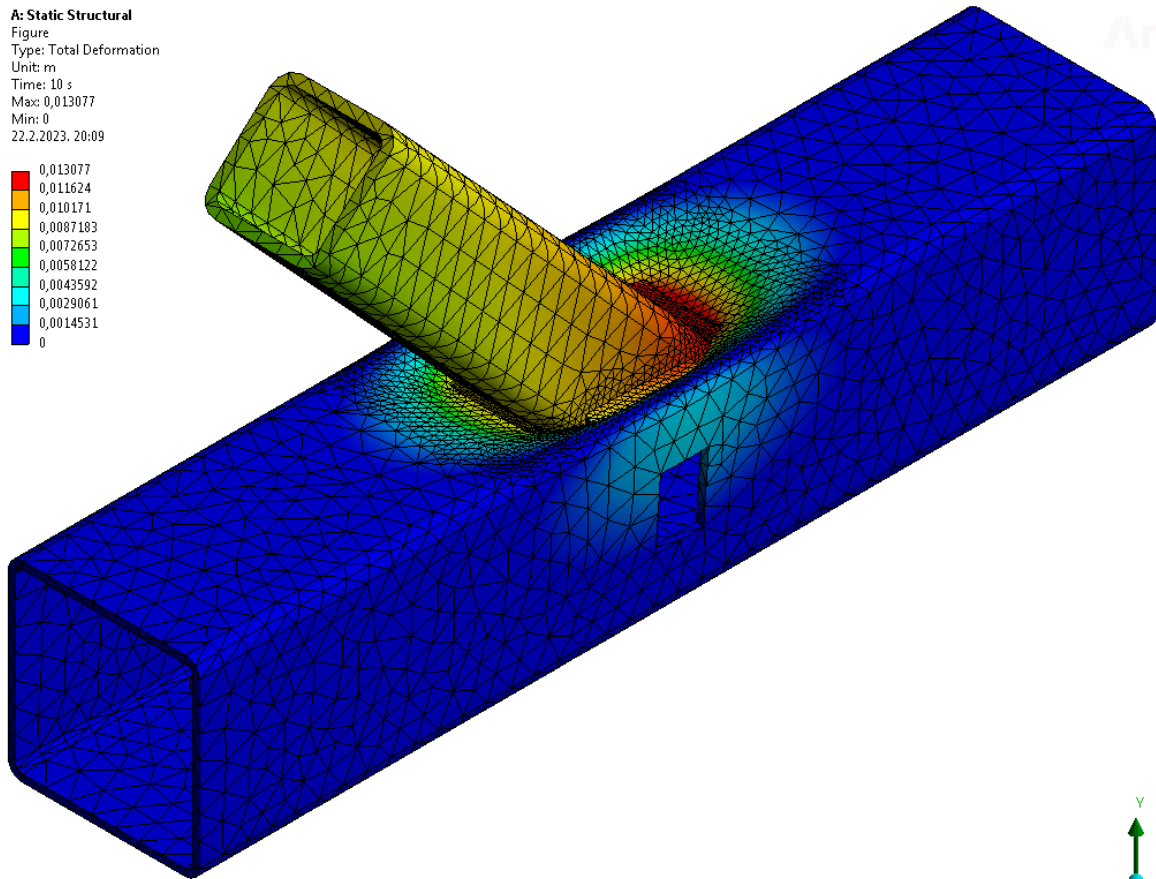
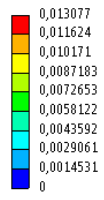
*Slika 58 - Ukupna deformacija za graničnu nosivost neoštećene veze*

**A: Static Structural**  
Figure  
Type: Total Deformation  
Unit: m  
Time: 10 s  
Max: 0,013079  
Min: 0  
22.2.2023. 20:06



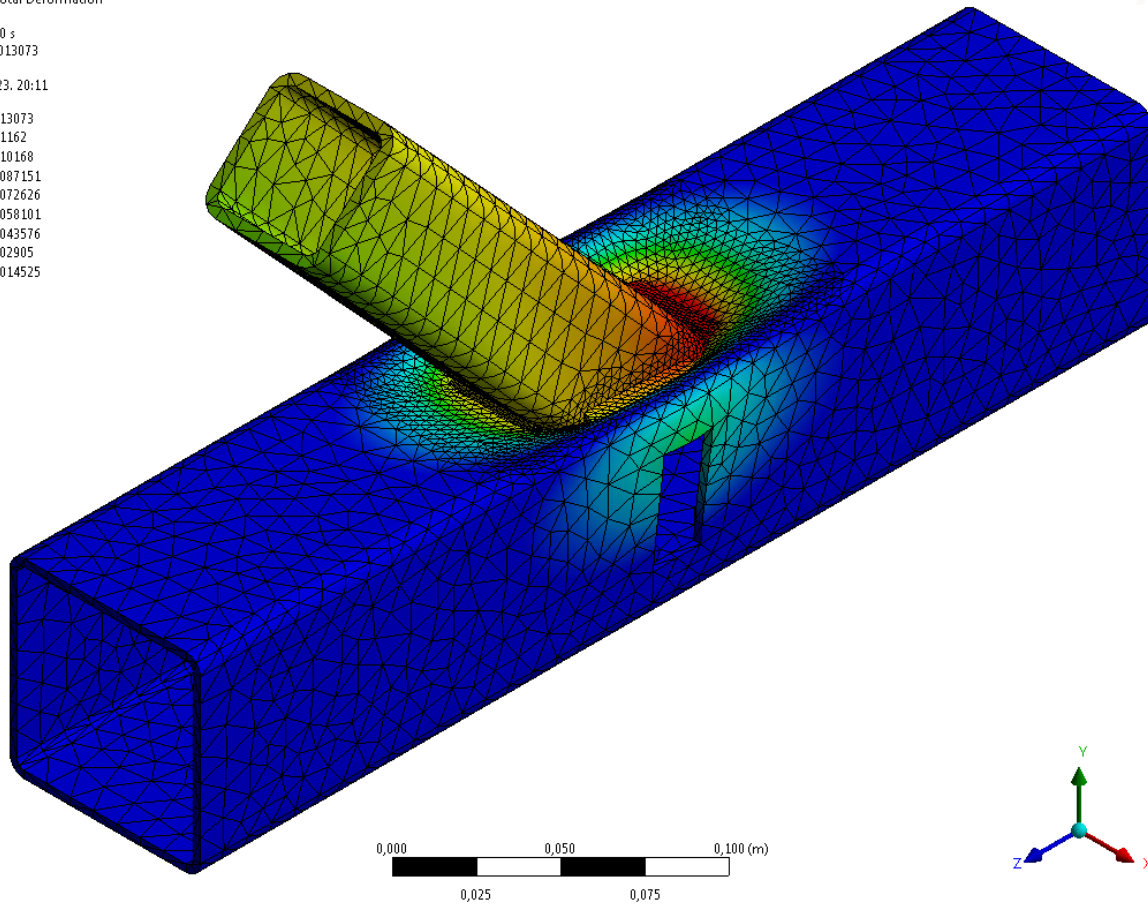
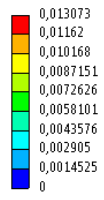
*Slika 59 - Ukupna deformacija za graničnu nosivost veze sa oštećenjem 1*

**A: Static Structural**  
Figure  
Type: Total Deformation  
Unit: m  
Time: 10 s  
Max: 0,013077  
Min: 0  
22.2.2023. 20:09



*Slika 60 - Ukupna deformacija za graničnu nosivost veze sa oštećenjem 2*

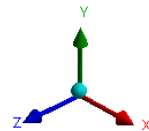
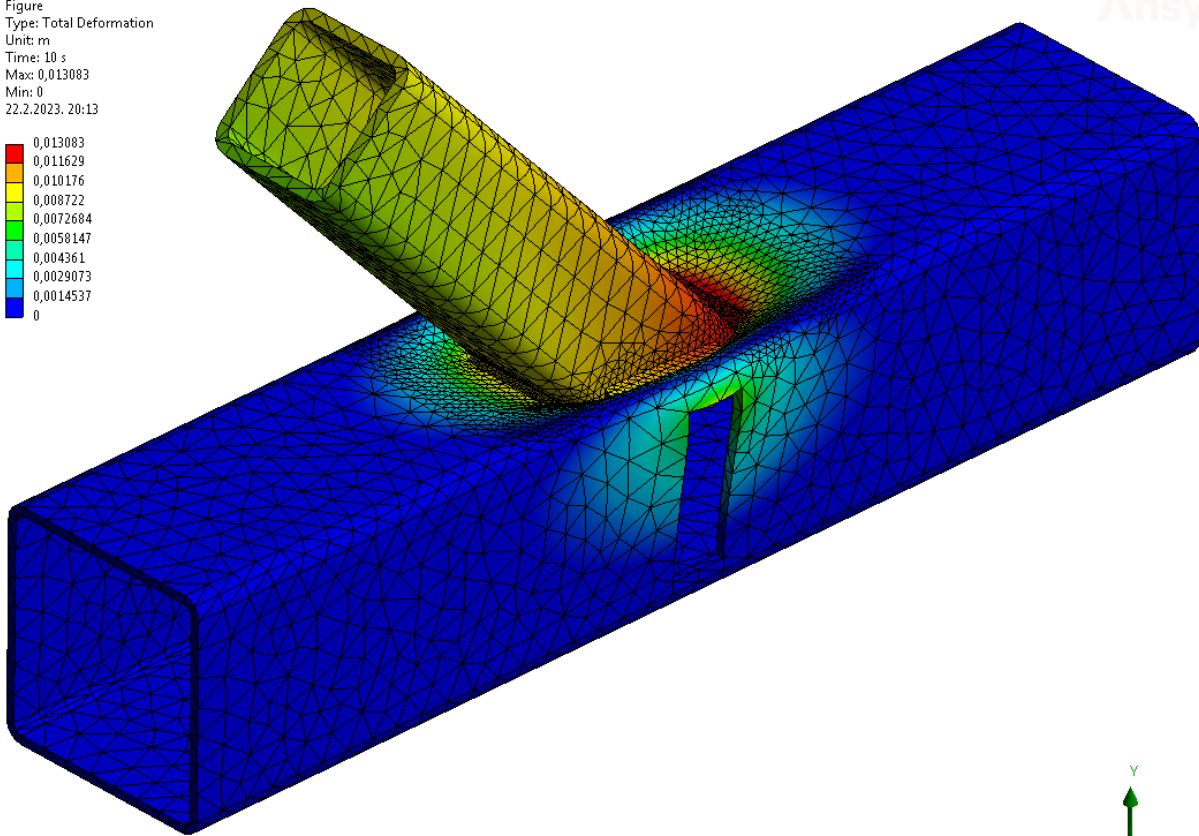
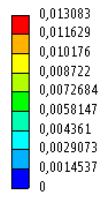
**A: Static Structural**  
Figure  
Type: Total Deformation  
Unit: m  
Time: 10 s  
Max: 0,013073  
Min: 0  
22.2.2023. 20:11



*Slika 61 - Ukupna deformacija za graničnu nosivost veze sa oštećenjem 3*



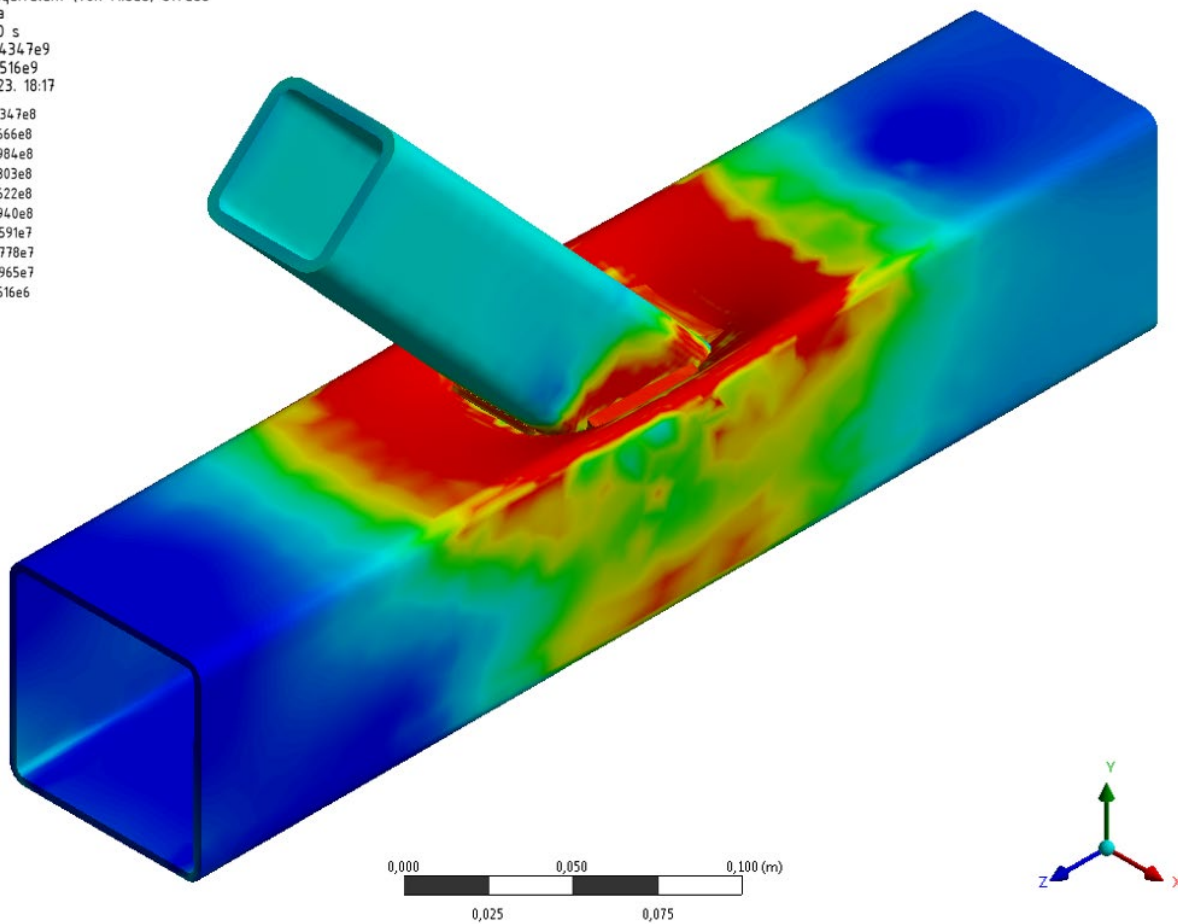
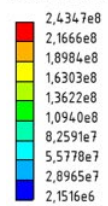
**A: Static Structural**  
Figure  
Type: Total Deformation  
Unit: m  
Time: 10 s  
Max: 0,013083  
Min: 0  
22.2.2023. 20:13



*Slika 62 - Ukupna deformacija za graničnu nosivost veze sa oštećenjem 4*

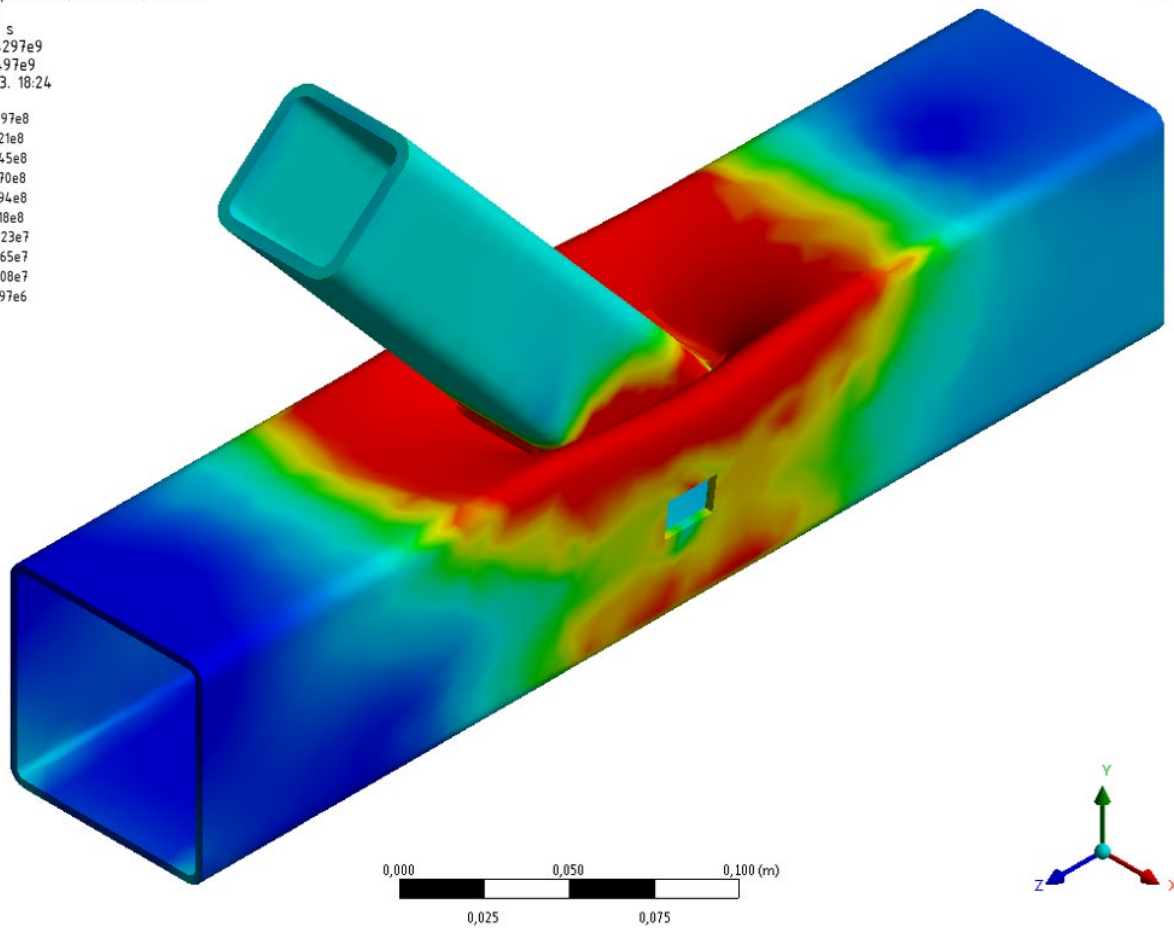
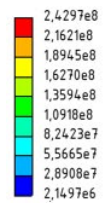


A: Static Structural  
Figure  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: Pa  
Time: 10 s  
Max: 2,4347e9  
Min: 2,1516e9  
22.2.2023. 18:17



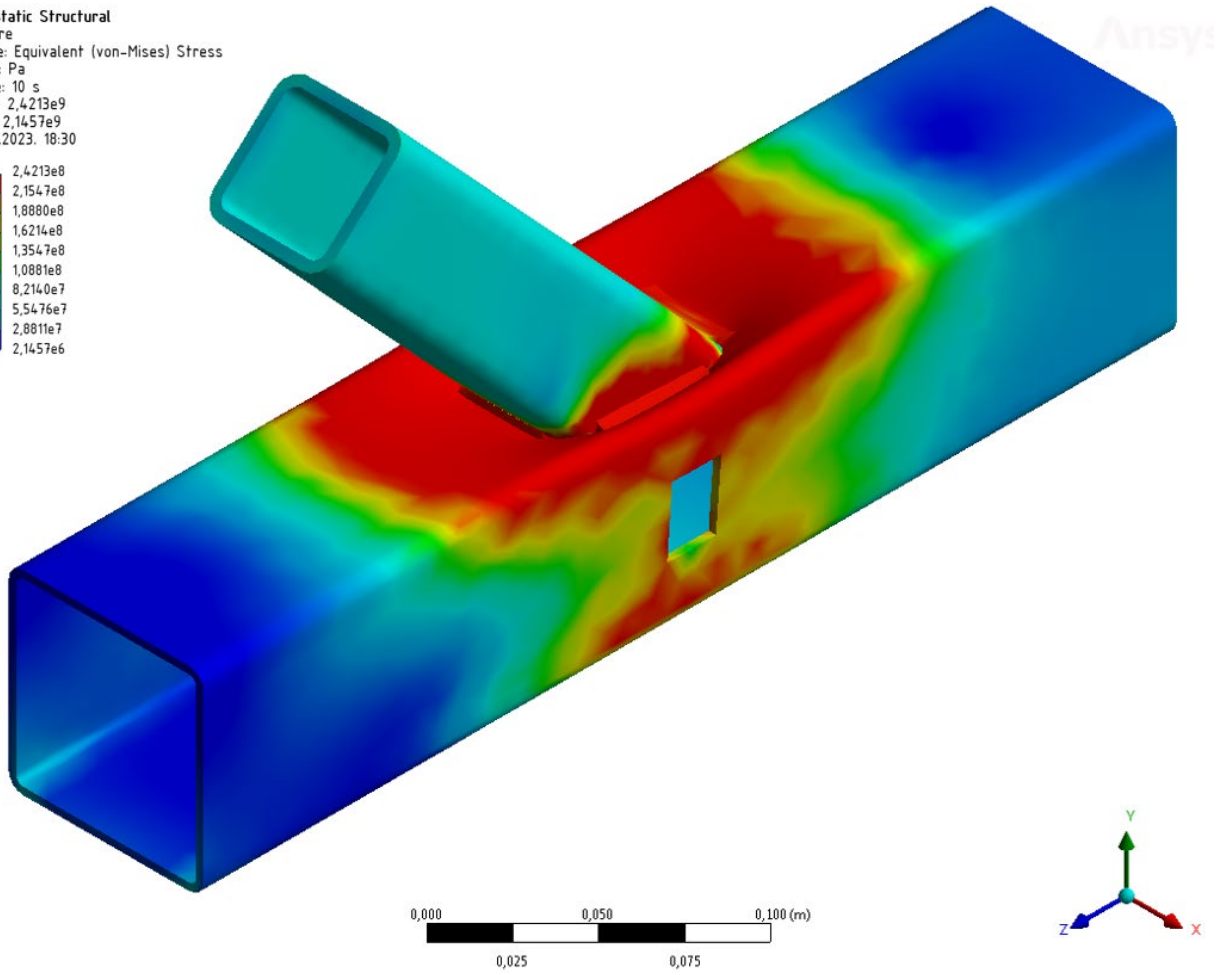
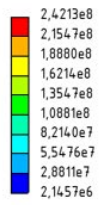
*Slika 63 - Ekvivalentni naponi u vezi za graničnu silu nosivosti neoštećene veze*

A: Static Structural  
Figure  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: Pa  
Time: 10 s  
Max: 2,4297e9  
Min: 2,1497e9  
22.2.2023. 18:24



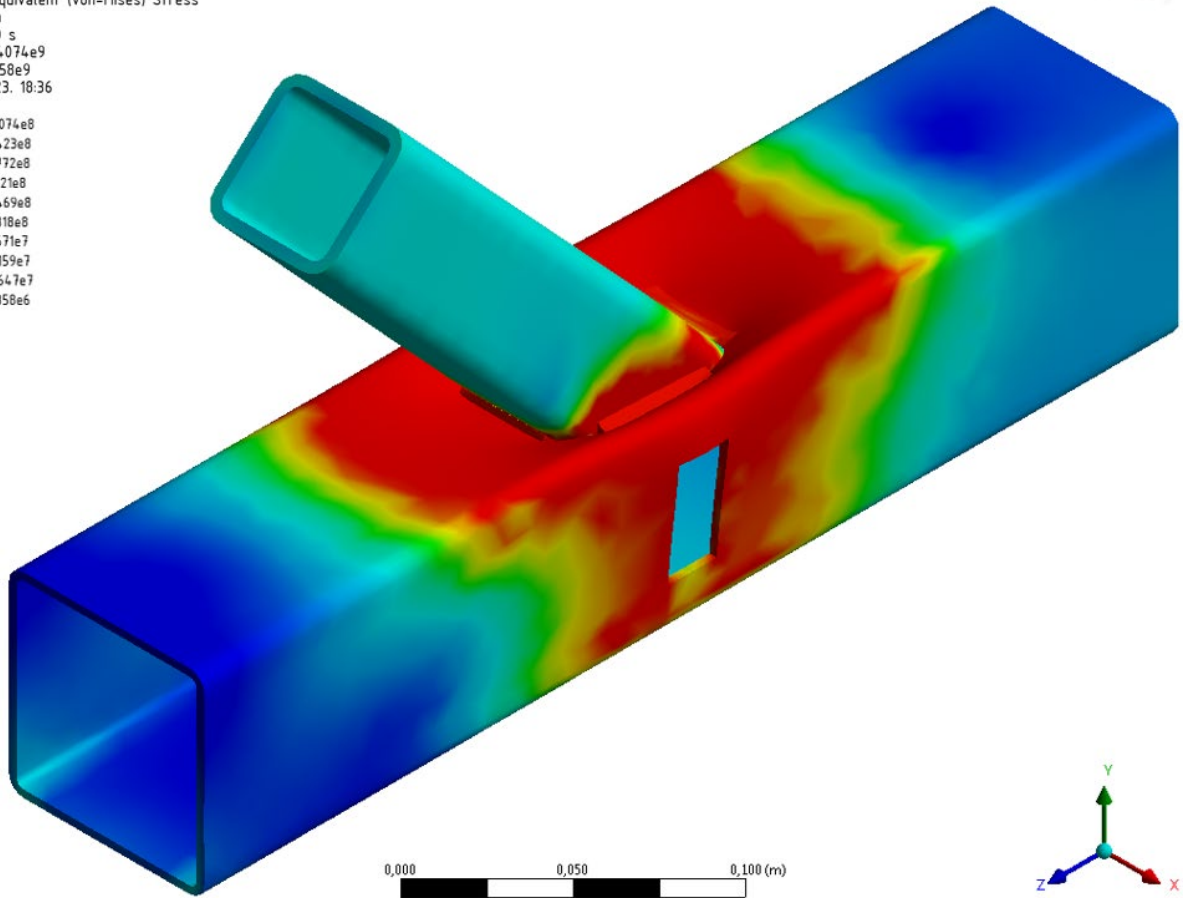
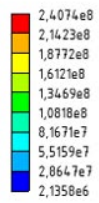
Slika 64 - Ekvivalentni naponi u vezi za graničnu silu nosivosti veze sa oštećenjem I

A: Static Structural  
Figure  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: Pa  
Time: 10 s  
Max: 2,4213e9  
Min: 2,1457e9  
22.2.2023. 18:30

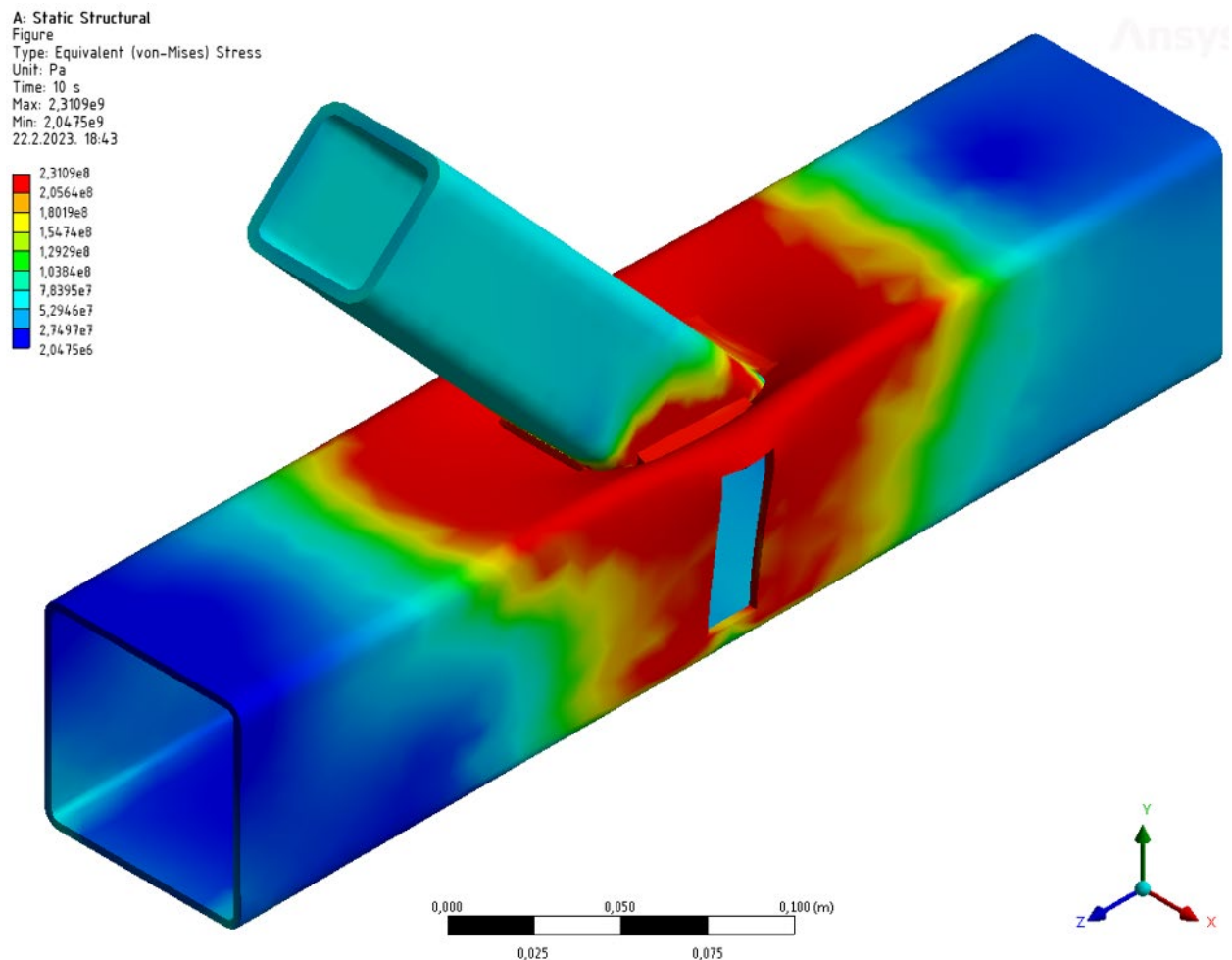


Slika 65 - Ekvivalentni naponi u vezi za graničnu silu nosivosti veze sa oštećenjem 2

A: Static Structural  
Figure  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: Pa  
Time: 10 s  
Max: 2,4074e9  
Min: 2,358e9  
22.2.2023. 18:36



Slika 66 - Ekvivalentni naponi u vezi za graničnu silu nosivosti veze sa oštećenjem 3

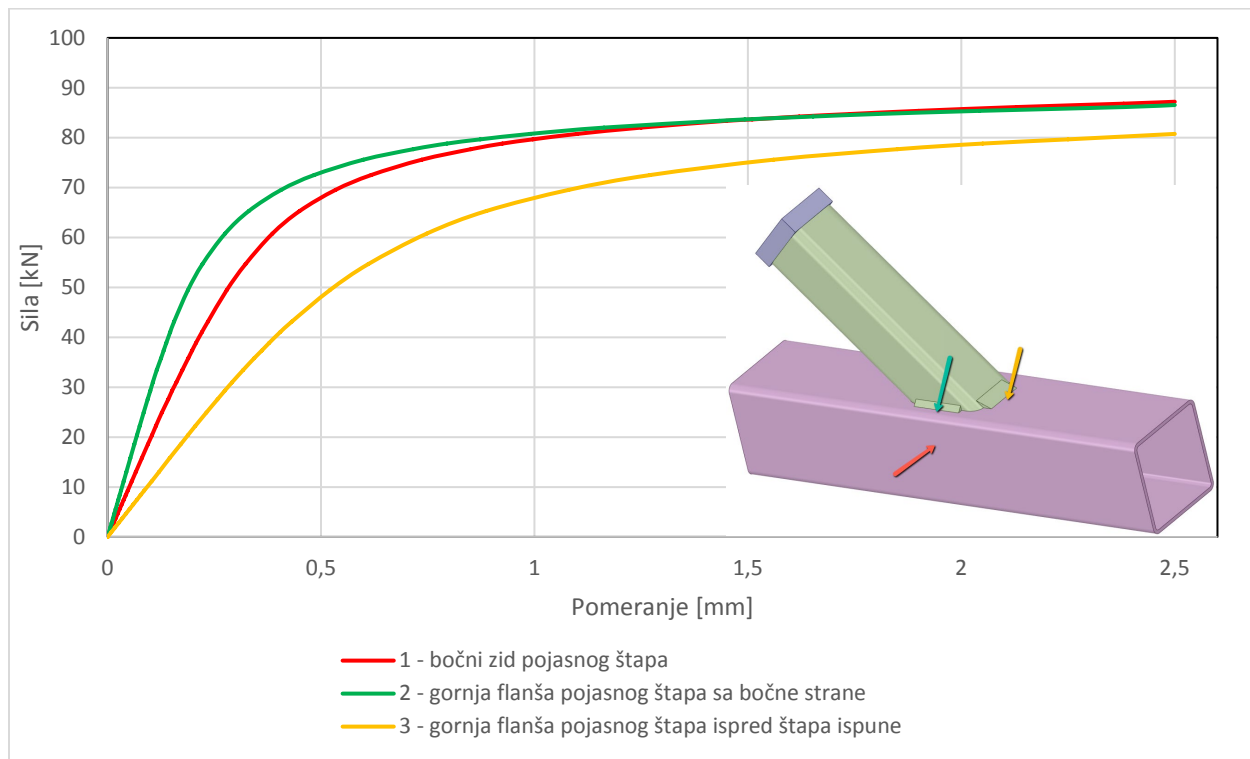


Slika 67 - Ekvivalentni naponi u vezi za graničnu silu nosivosti veze sa oštećenjem 4

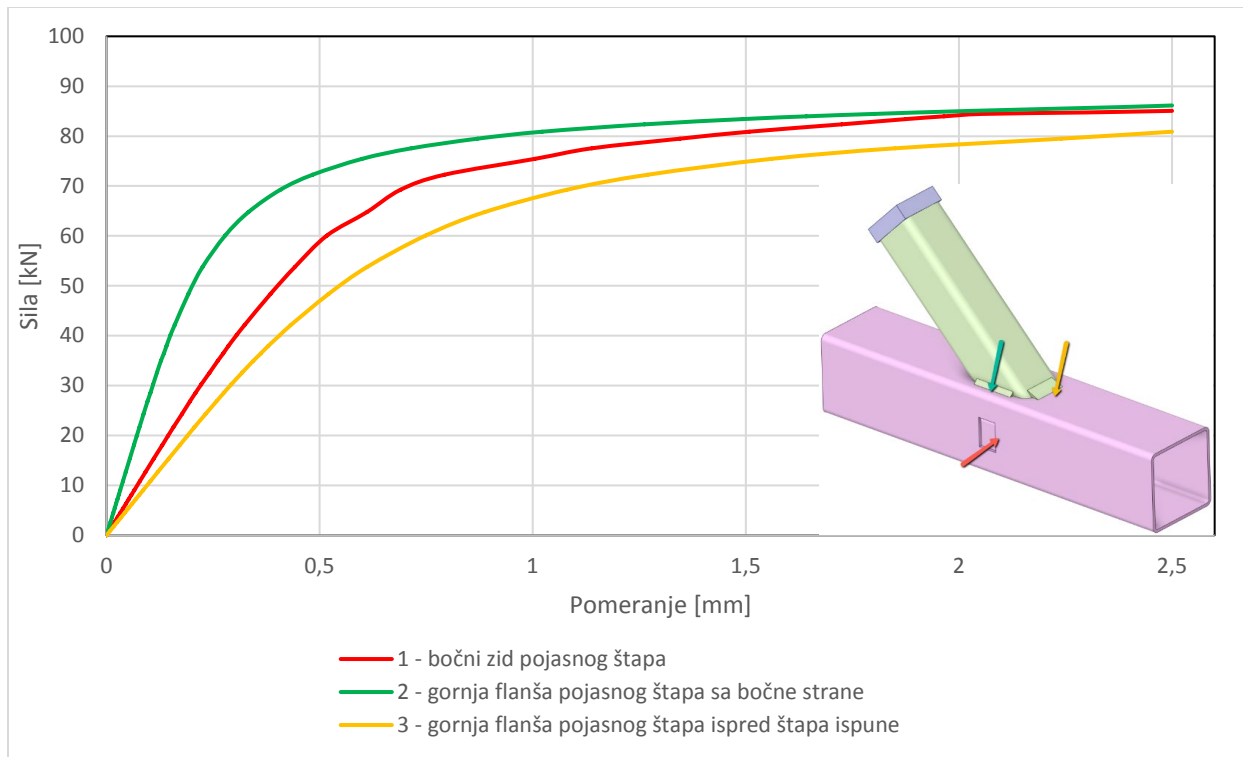
U osnovnom materijalu u zoni veze, maksimalna vrednost ekvivalentnog von Mises-ovog napona dostiže vrednost od cca 243 MPa. Iako maksimalne vrednosti ekvivalentnog napona neznatno prekoračuju granicu razvlačenja  $f_y$  i ulazi u plastičnu zonu, postoji znatna rezerva do dostizanja čvrstoće na zatezanje  $f_u$ . Na slikama 63 - 67 zapaža se koncentracija napona u zoni šavova i u gornjoj flanši pojasnog štapa u neposrednoj blizini šavova. Takođe se zapaža, sa pojavom i propagacijom oštećenja, povećanje vrednosti napona u bočnim zidovima pojasnog štapa, posebno

u zonama oko oštećenja. Iako je granična nosivost veze dostignuta po kriterijumu deformacije, postoji rezerva nosivosti po kriterijumu napona.

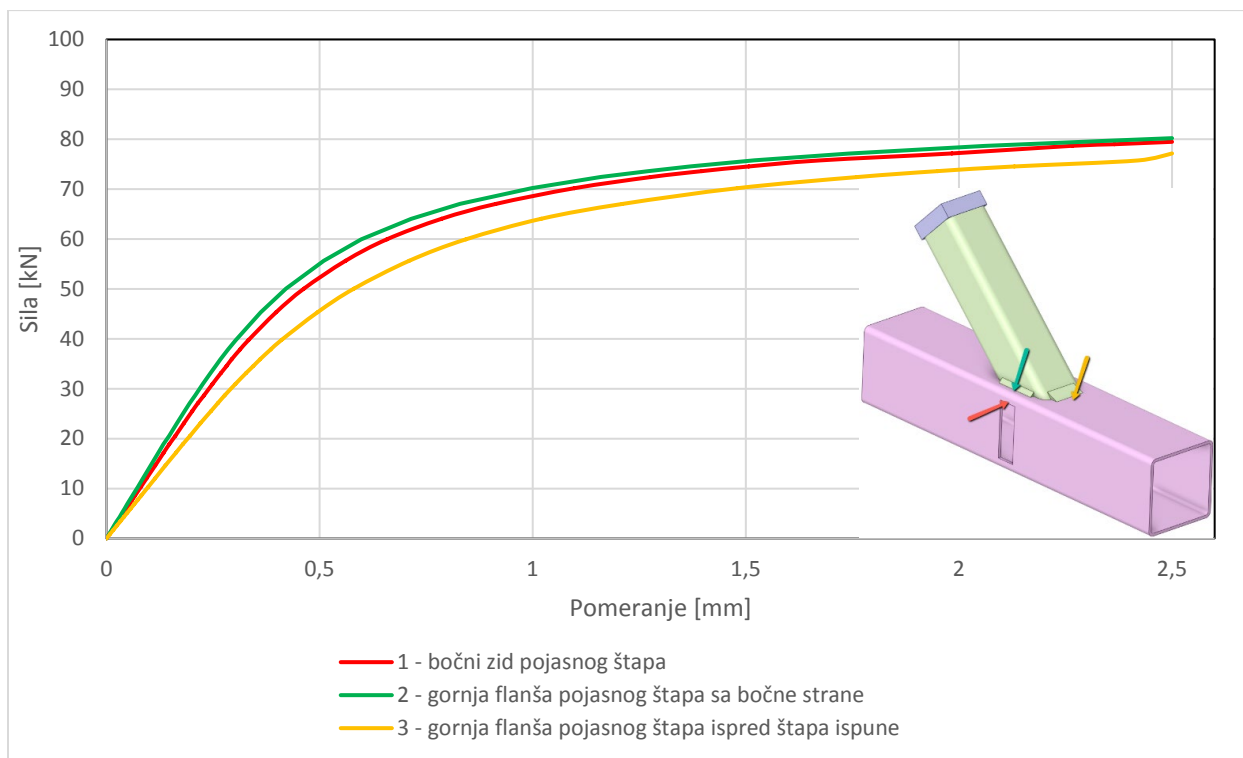
Na slikama 68, 69 i 70 prikazani su dijagrami pomeranja karakterističnih tačaka pri graničnoj nosivosti veze, za slučaj neoštećene veze (slika 68), veze sa oštećenjem 2 (slika 69) i veze sa oštećenjem 4 (slika 70), dobijeni primenom MKE.



Slika 68 - Dijagram pomeranja karakterističnih tačaka neoštećene veze primenom MKE



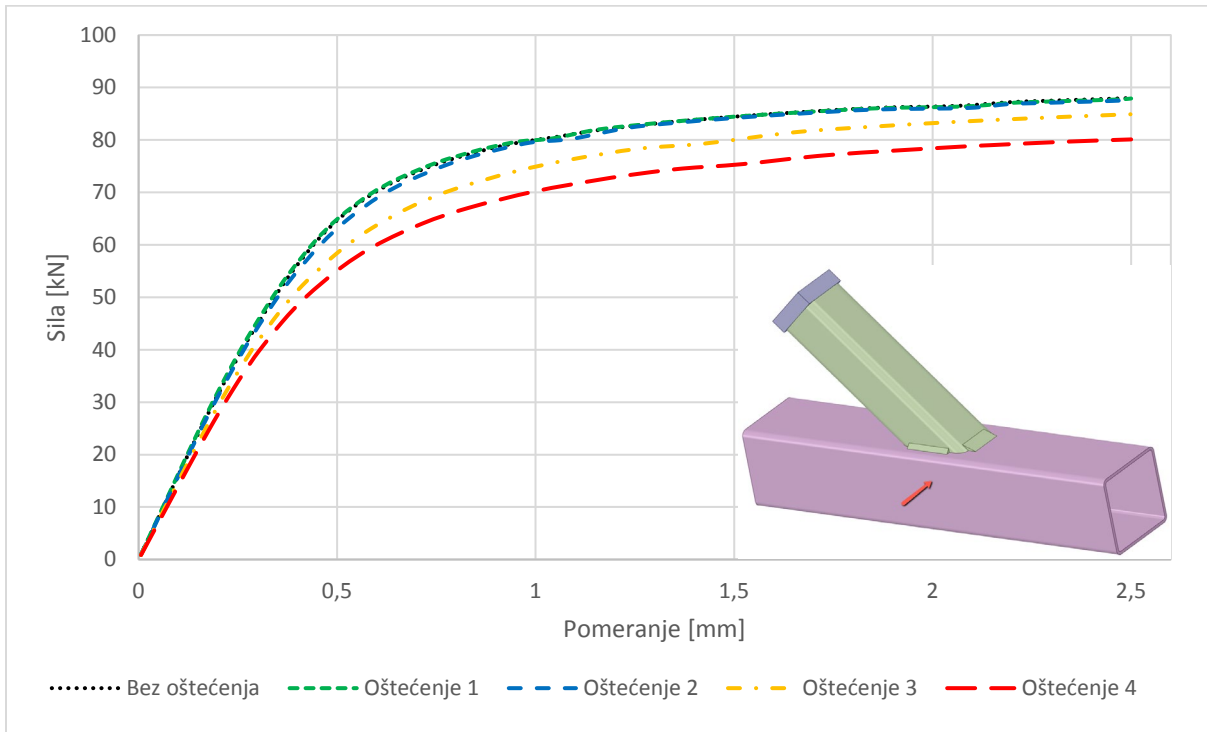
*Slika 69 - Dijagram pomeranja karakterističnih tačaka veze sa oštećenjem 2 primenom MKE*



*Slika 70 - Dijagram pomeranja karakterističnih tačaka veze sa oštećenjem 4 primenom MKE*

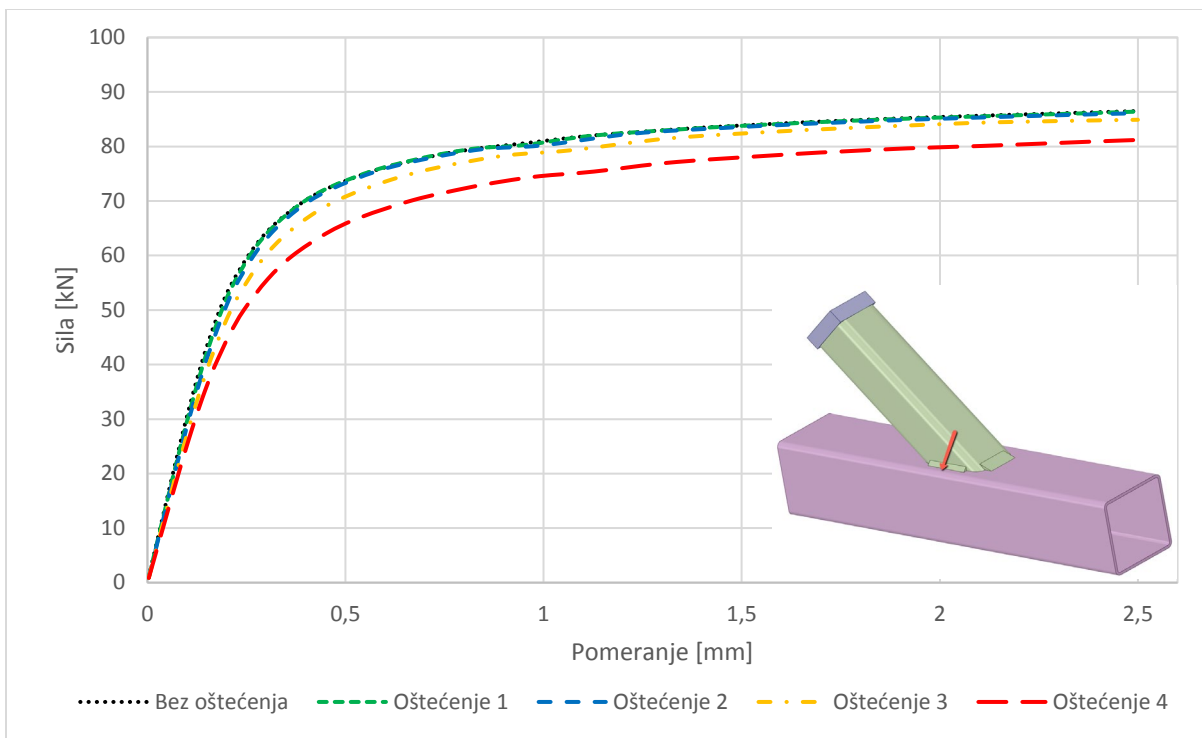
Na slikama 71, 72 i 73 prikazani su uporedni dijagrami pomeranja neoštećene veze i veze sa oštećenjima 1, 2, 3 i 4 u karakterističnim tačkama veze, dobijeni eksperimentalnim putem na sledećim pozicijama:

- bočni zid pojasnog štapa (slika 71);
- gornja flanša pojasnog štapa sa bočne strane štapa ispune (slika 72);
- gornja flanša pojasnog štapa ispred štapa ispune (slika 73).

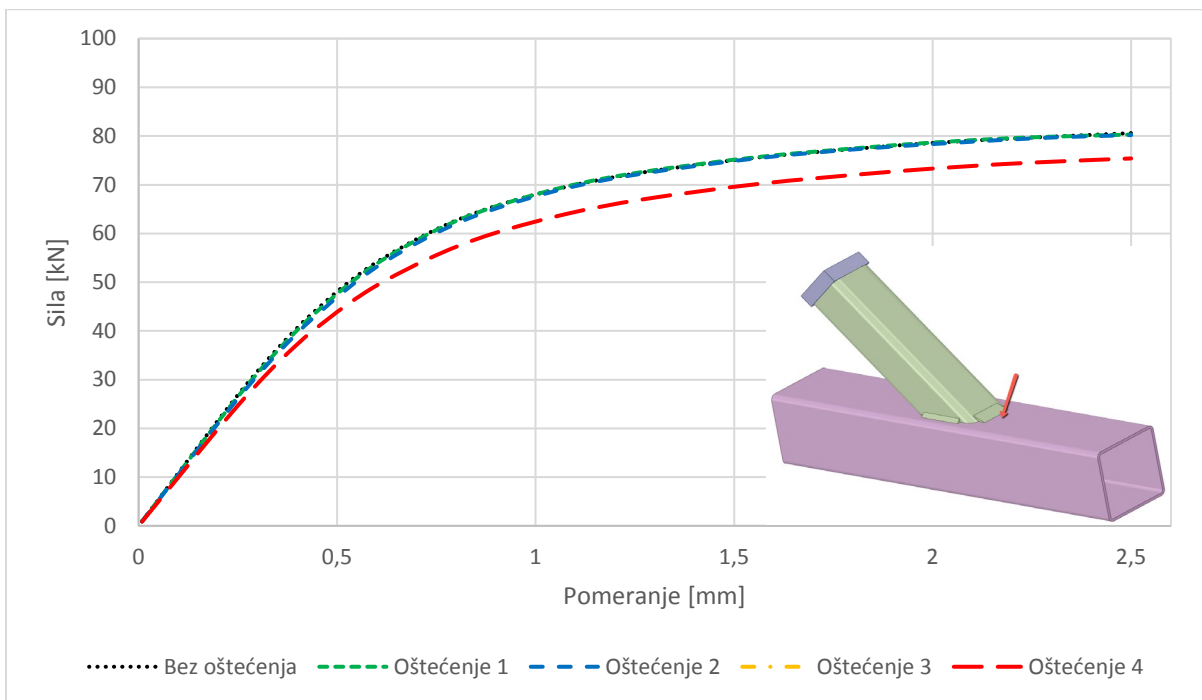


*Slika 71 - Uporedni dijagram pomeranja tačke na bočnom zidu pojasnog štapa primenom MKE*





Slika 72 - Dijagram pomeranja tačke na gornjoj flanši pojasnog štapa sa bočne strane štapa ispune primenom MKE

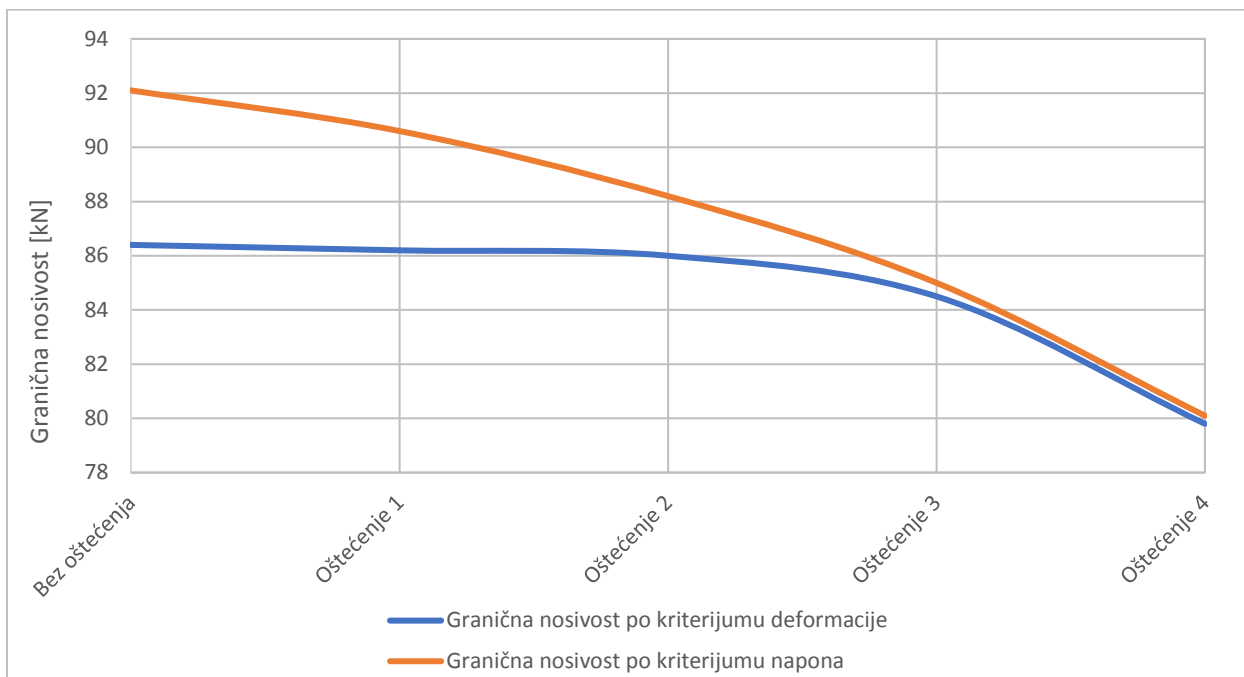


Slika 73 - Dijagram pomeranja tačke na gornjoj flanši pojasnog štapa ispred štapa ispune primenom MKE

Granične nosivosti direktno zavarenih Y veza od RHS dobijenih primenom nelinearne numeričke analize, po kriterijumu maksimalne deformacije (koja iznosi  $\Delta = 3\% \cdot b_0 = 2,4 \text{ mm}$ ), kriterijumu napona i konačne granične nosivosti, kao i nosivost po EC 3 uzimajući u obzir i uticaj šavova, prikazani su u tabeli 14 i na slici 74.

Tabela 14 - Granične nosivosti veza dobijene primenom MKE

Uzorak	Granična nosivost po kriterijumu deformacije	Granična nosivost po kriterijumu napona	Konačna granična nosivost	Nosivost po EC 3 uzimajući u obzir i uticaj šavova
Bez oštećenja	86,4 kN	92,1 kN	86,4 kN	57,93 kN
Oštećenje 1	86,2 kN	90,6 kN	86,2 kN	-
Oštećenje 2	86,0 kN	88,2 kN	86,0 kN	-
Oštećenje 3	84,5 kN	85,0 kN	84,5 kN	-
Oštećenje 4	79,8 kN	80,1 kN	79,8 kN	-



Slika 74 - Dijagram graničnih nosivosti veza u zavisnosti od stepena oštećenja veza primenom MKE

Kao što se i očekivalo, rezultati numeričke analize su pokazali da sa pojavom i daljom propagacijom oštećenja dolazi do pada granične nosivosti veze. Granična nosivost veze je, shodno preporukama IIW (Međunarodnog instituta za zavarivanje), određena pri deformaciji u iznosu od  $\Delta = 3\% \cdot b_0 = 2,4 \text{ mm}$ . Ova preporuka je rezultat eksperimentalnih ispitivanja koje se zasnivaju

na tome da prilikom kontrole nosivosti veze nije merodavno granično stanje upotrebljivosti, tj. do pojave prsline tokom eksploatacije konstrukcije neće doći. Rezultati pokazuju da se sa povećanjem procenta oštećenja iste vrednosti pomeranja karakterističnih tačaka događaju pri manjim intenzitetima aksijalnih sila, odnosno što je manji procenat oštećenja, manja su i pomeranja tačaka.

## 6. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE GRANIČNE NOSIVOSTI DIREKTNO ZAVARENE Y VEZE OD RHS SA OŠTEĆENJEM

Cilj ovog eksperimentalnog ispitivanja [85], [101], [50], [35] je određivanje granične nosivosti veza neposrednim merenjem po kriterijumu lokalnih deformacija.

### 6.1. ULAZNI PODACI EKSPERIMENTALNE ANALIZE

Eksperimentalno je ispitivano ukupno 9 uzoraka direktne Y veze od RHS, od kojih su 3 neoštećena uzorka (uzorci 1-1, 1-2 i 1-3), 3 uzorka sa oštećenjem 2 (uzorci 2-1, 2-2 i 2-3) i 3 uzorka sa oštećenjem 4 (3-1, 3-2 i 3-3). Oblik veze i dimenzije poprečnih preseka su identične uzorcima u numeričkoj analizi. Uzorci za ispitivanje (slika 75) [8] su napravljeni u radionici firme EUROMONT-PLUS<sup>2</sup>, koja se bavi izradom i montažom čeličnih konstrukcija.



Slika 75 - Geometrija neoštećenog uzorka [108]

<sup>2</sup> firma za proizvodnju, projektovanje i izvođenje čeličnih konstrukcija, hansemont@gmail.com

## 6.2. ISPITIVANJE DIREKTNO ZAVARENIH Y VEZA OD ŠUPLJIH PROFILA KVADRATNOG POPREČNOG PRESEKA SA OŠTEĆENJEM

Ispitivanje je izvršeno u akreditovanoj<sup>3</sup> Laboratoriji za ispitivanje Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu na hidrauličnoj presi nosivosti 100 t (slika 76).



*Slika 76 - Hidraulična presa nosivosti 100 t na univerzalnom ramu u Laboratoriji za Mehatroniku na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Nišu*

<sup>3</sup> Akreditaciono telo Srbije, akreditacioni broj 01-487 od 15.10.2019.

Probno opterećenje je nanošeno u skladu sa preporukama EN ISO 6892-1 [29] koje se odnose na brzinu unošenja sila:

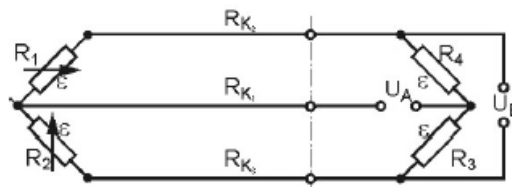
$$v_{min} = 6 \text{ MPa/s} < v < v_{max} = 60 \text{ MPa/s} \quad (23)$$

Za registrovanje i zapisivanje rezultata korišćena je sledeća merna oprema:

- merna ćelija pomeranja (hoda) WA 100, WA 50 i WA 20, sa maksimalnom vrednošću pomeranja od 100 mm, 50 mm i 20 mm, respektivno;
- merna ćelija sile Z4A 100 kN;
- merne trake LY 41 – 6 mm 700  $\Omega$  i LY 21 – 1,5 mm 120  $\Omega$ . Merne trake su lepljene dvokomponentnim lepkom X60;
- preklopnik za merne trake za pojedinačno statičko merenje napona u jednoj mernoj tački;
- pojačivač Quantum MX 840,
- softver Catman.

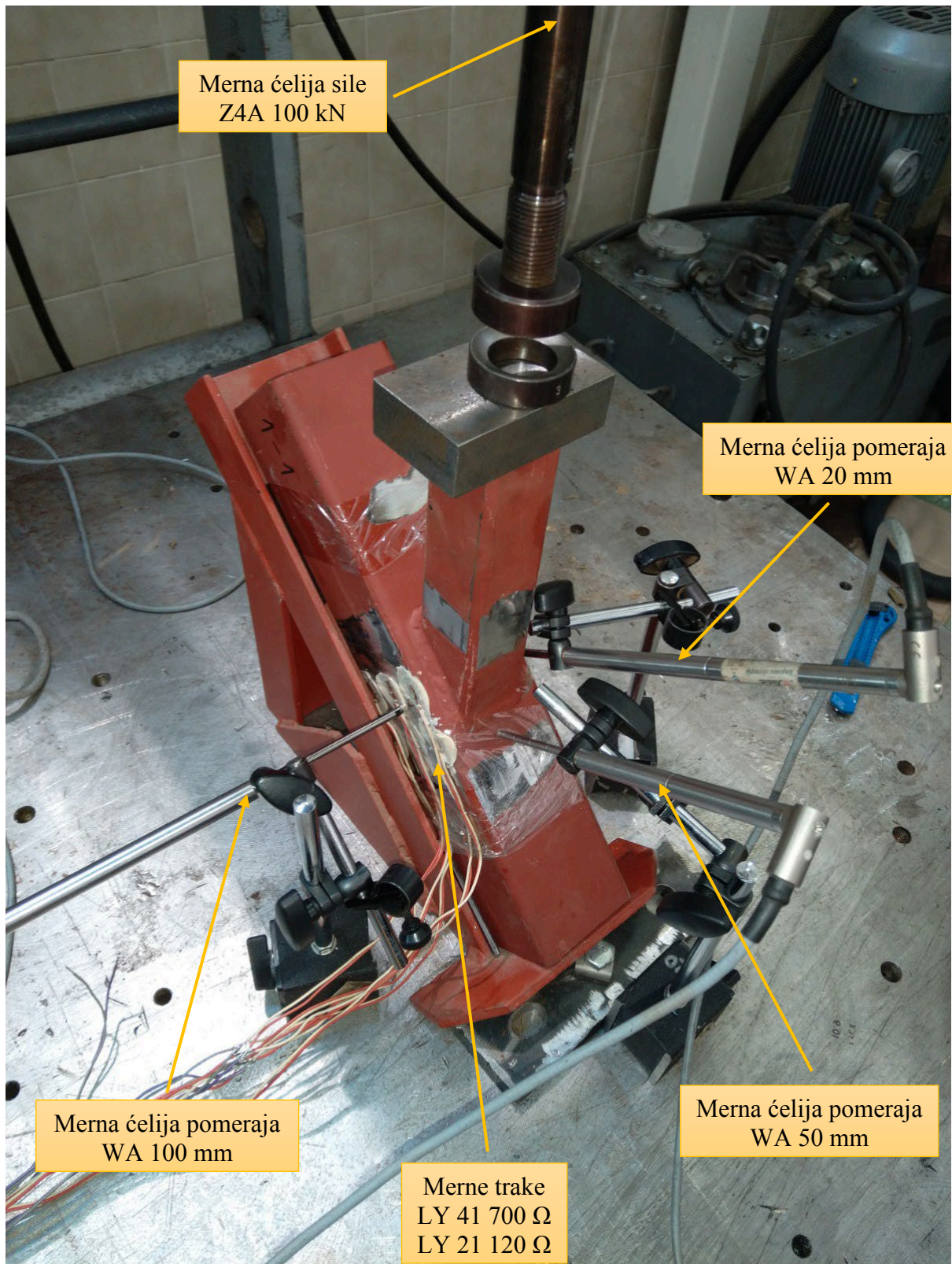
Sva korišćena oprema je proizvođača Hotinger Baldwin Messtechnik – HBM,

Merenje napona se vrši preko Wheatstonov-og mosta. Kako je za funkcionisanje mernog mosta potrebno sva četiri otpornika, a za eksperiment je korišćen jedan otpornik, prilikom merenja koristio se jedan otpornik R2 kao kompenzaciona merna traka, a preklopnikom se uključivala aktivna merna traka R1 koja se nalazi na mestu gde se meri naponsko stanje. Signali se dovode sa mernih ćelija puta i merne ćelije sile, kao i preklopnika direktno na pojačivač Quantum MX 840. Pošto je preklopnik običan prekidač koji povezuje aktivnu traku sa pojačivačem, bilo je potrebno sačekati izvesno vreme da se signal stabilizuje od prelaznih otpora kontakata. Na slikama 77 i 78 data je šema povezivanja uzorka sa mernim sistemom za merenje pomeranja, sile i dilatacije (napona) – polumost.



Slika 77 - Šema povezivanja uzorka sa mernim sistemom za merenje pomeranja, sile i dilatacije (napona)



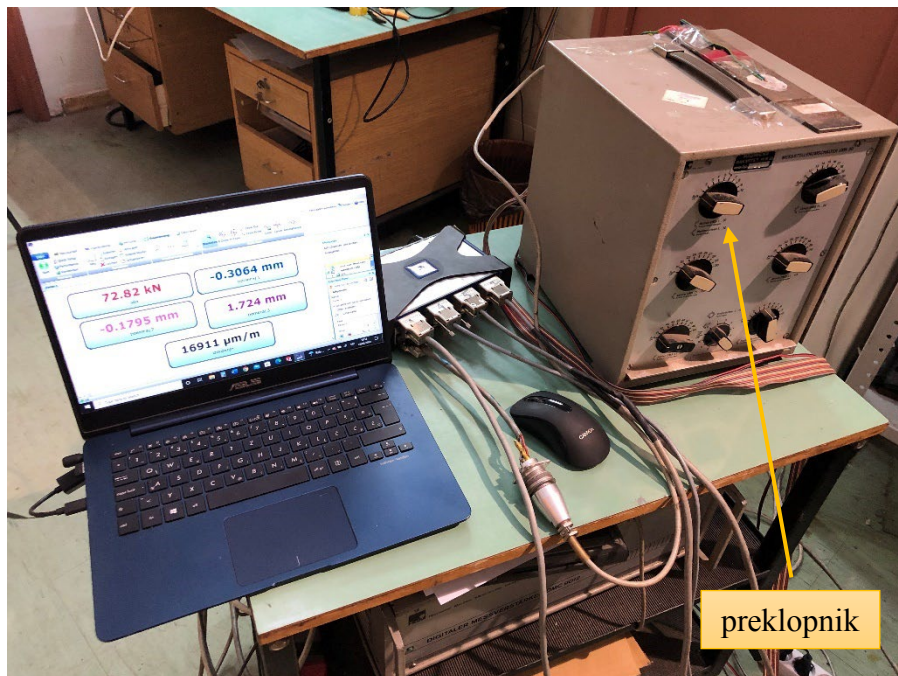


Slika 78 – Dispozicija mernih instrumenata i pomoćni ram za oslanjanja pojasnog štapa pod uglom od

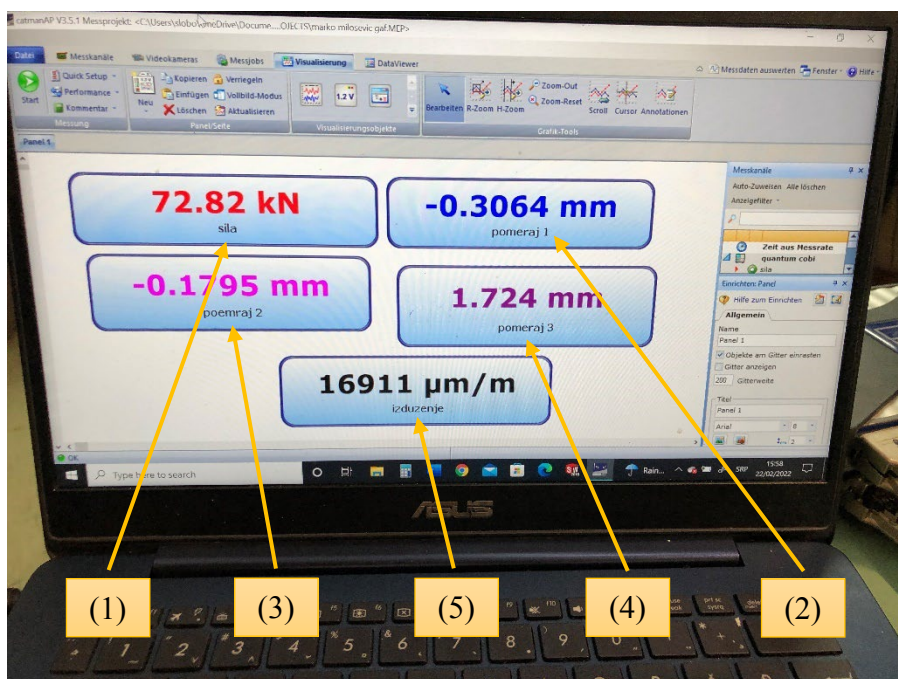
45°



Signali se iz mernog pojačivača Quantum MX 840 dovode u računar (slika 79) i preko softvera Catman prikazuju u pogodnom obliku na ekranu i istovremeno zapisu na računaru u Excel datoteci. Na slici 80 je prikazan izgled ekrana u toku merenja.



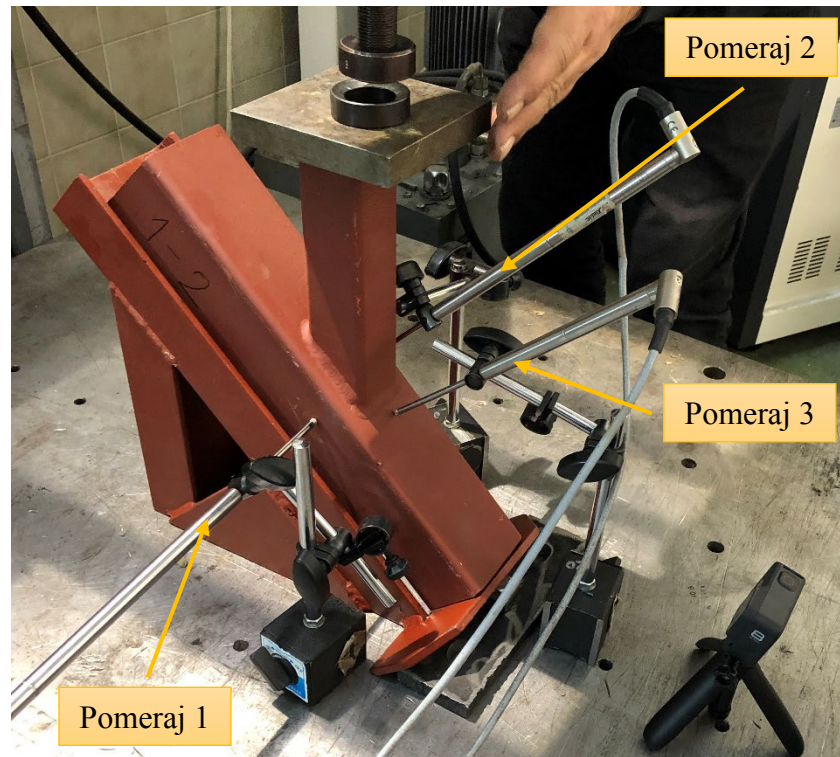
Slika 79 - Merni pojačivač Quantum MX 840 povezan sa računarom i softverom Catman



Slika 80 - Prikaz ekrana u toku merenja

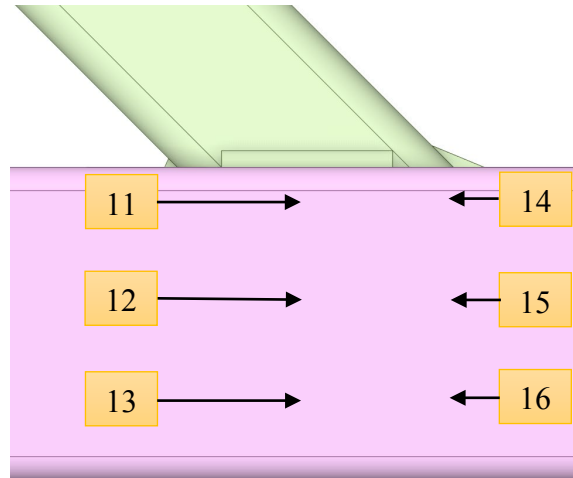


U softveru Catman u polju (1) prikazivana je sila kojom presa opterećuje uzorak (slika 80). Merne ćelije pomeraja (slika 81) postavljene su preko magnetnih držača upravno na karakteristične preseke gde su pomeranja merena, a vrednost je očitavana u softveru u polju (2), (3) i (4) (slika 80).

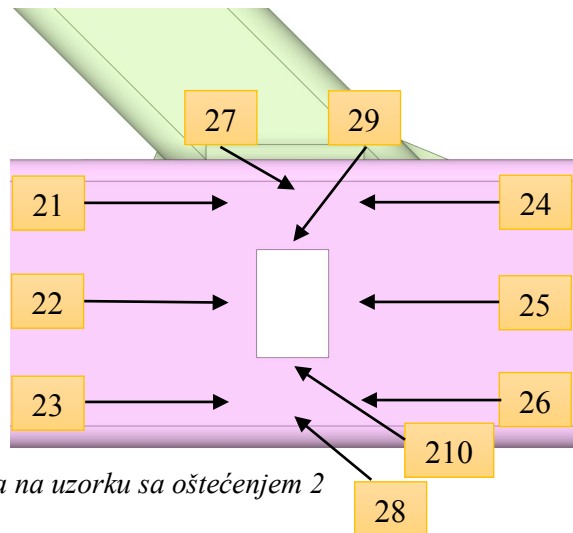
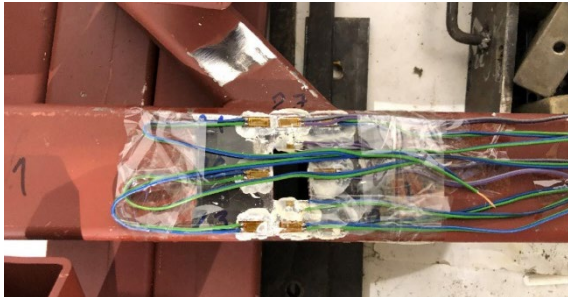


*Slika 81 - Dispozicija mernih ćelija pomeraja kod neoštećenog uzorka*

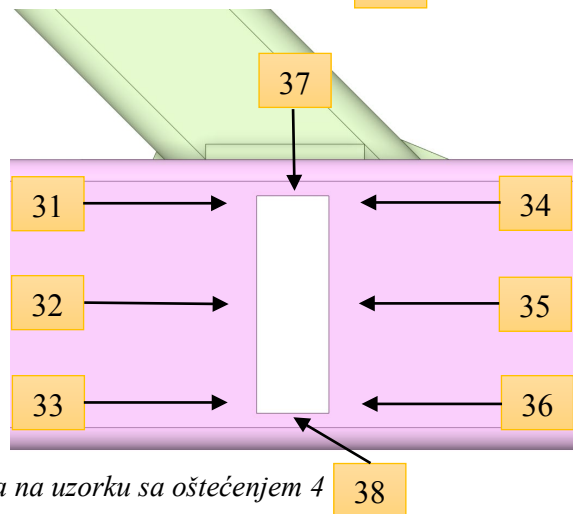
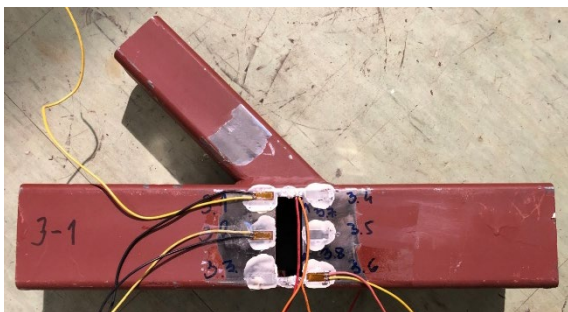
Polje (5) prikazivalo je dilataciju određene merne trake. Preklopnikom (slika 79) su uključivane merne trake 11, 12, itd (11 – merna traka na uzorku br. 1 na mestu 1, 12 – merna traka na uzorku br. 1 na mestu 2...) (slike 82, 83 i 84).



Slika 82 - Raspored mernih traka na neoštećenom uzorku



Slika 83 - Raspored mernih traka na uzorku sa oštećenjem 2



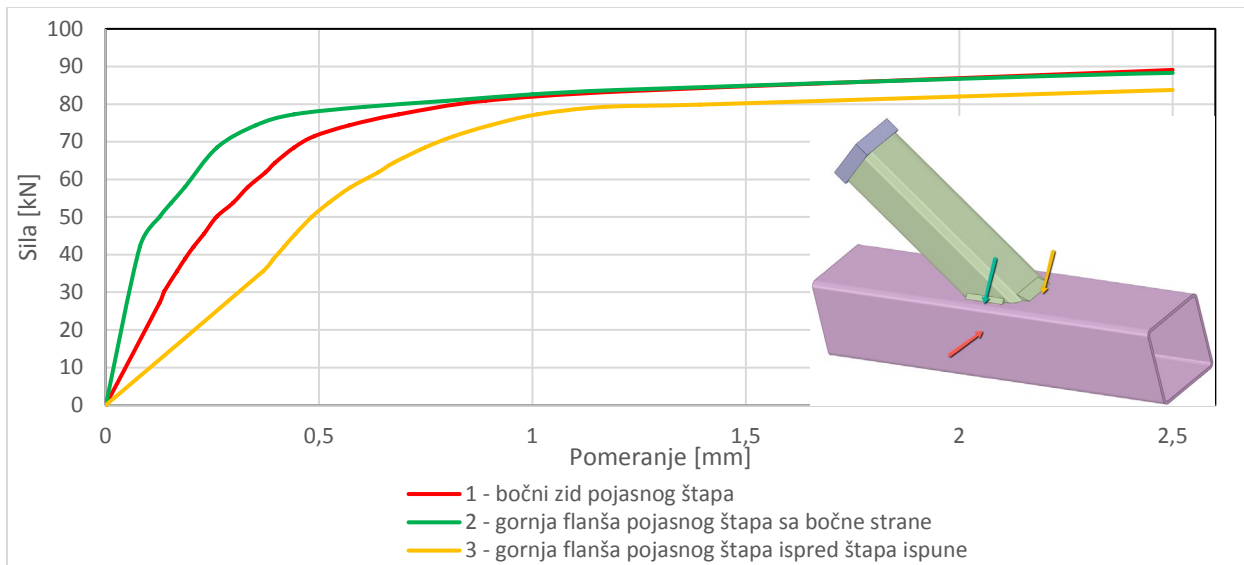
Slika 84 - Raspored mernih traka na uzorku sa oštećenjem 4

Preklopnik je za svaku mernu traku imao priključenu kompenzacionu mernu traku koja je za merne trake LY41 bila  $700 \Omega$ , a za merne trake LY21  $120 \Omega$ , čime je formiran polumost za pojačivač Quantum MX 840. Obzirom da se vršilo statičko merenje dilatacije, podaci su se unosili ručno u tabelu, dok su sila i pomeranja ostali isti u toku merenja.

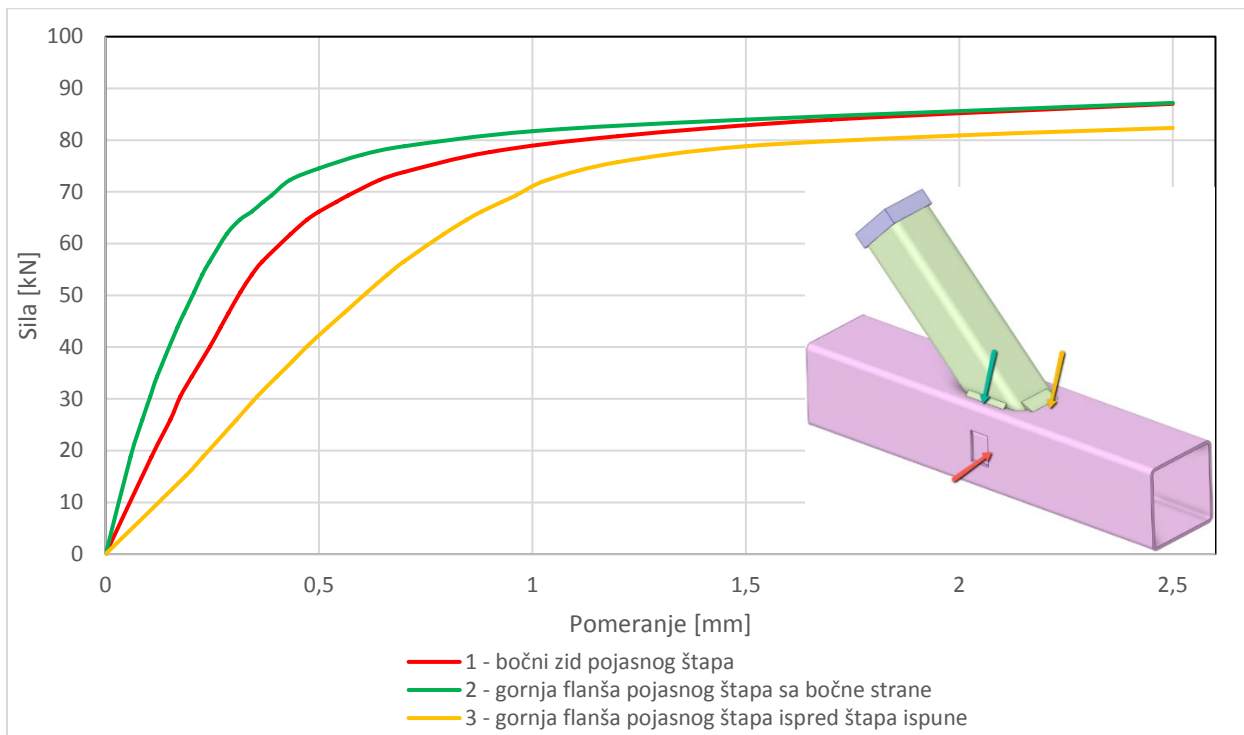
Prilikom ispitivanja pojasni štap veze je, pomoću pomoćnog rama za oslanjanje, postavljen pod uglom od  $45^\circ$  u odnosu na horizontalnu ravan, što je omogućilo da se hidrauličnom presom unese aksijalna sila u dijagonalni element. Da bi izbeglo ekscentrično unošenje sile u štap ispune, odnosno da bi se unosila samo vertikalna sila u štap ispune, opterećenje je unošeno preko sfernog zgloba merne ćelije Z4A 100 kN postavljenog između dijagonale i prese (slika 78).

### **6.3. REZULTATI ISPITIVANJA GRANIČNE NOSIVOSTI DIREKTNO ZAVARENIH VEZA IZRAĐENIH OD RHS SA OŠTEĆENJEM**

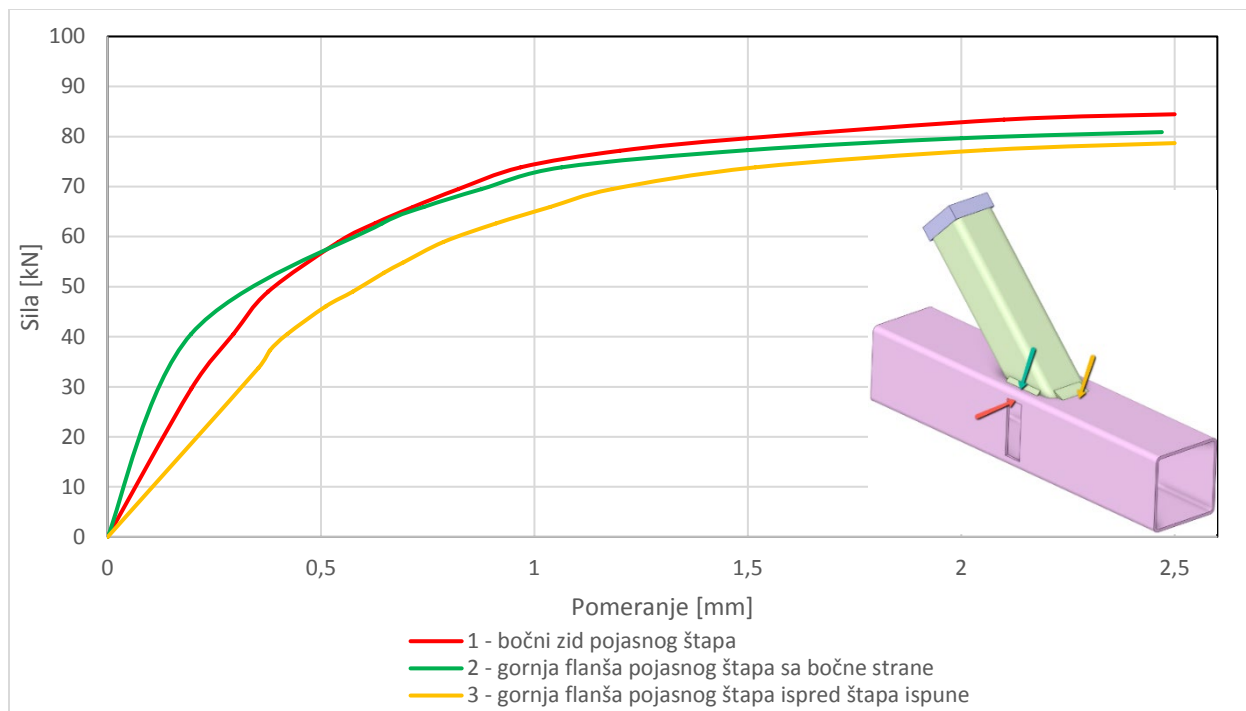
Na slikama 85, 86 i 87 prikazani su dijagrami pomeranja karakterističnih tačaka pri graničnoj nosivosti veze, za slučaj neoštećene veze (slika 85), veze sa oštećenjem 2 (slika 86) i veze sa oštećenjem 4 (slika 87), dobijeni primenom eksperimentalnim putem.



*Slika 85 - Dijagram prosečnih pomeranja karakterističnih tačaka neoštećene veze dobijen eksperimentalnim putem*



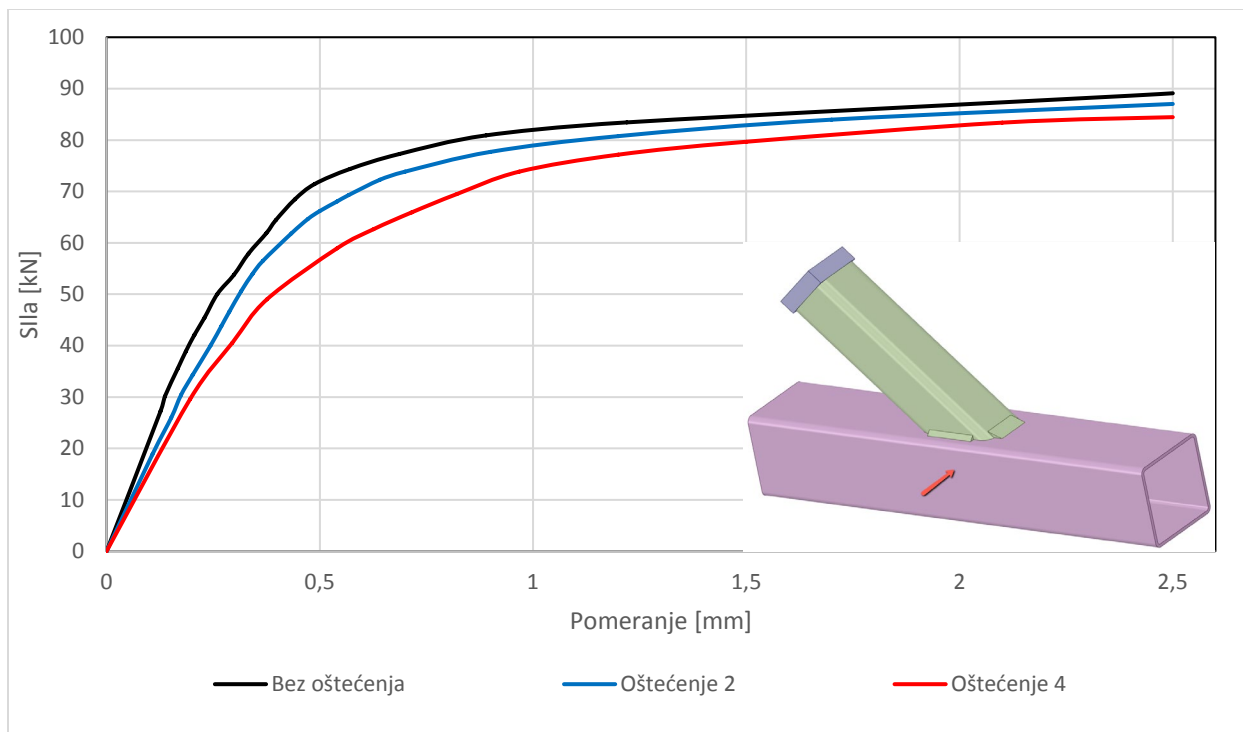
*Slika 86 - Dijagram prosečnih pomeranja karakterističnih tačaka veze sa oštećenjem 2 dobijen eksperimentalnim putem*



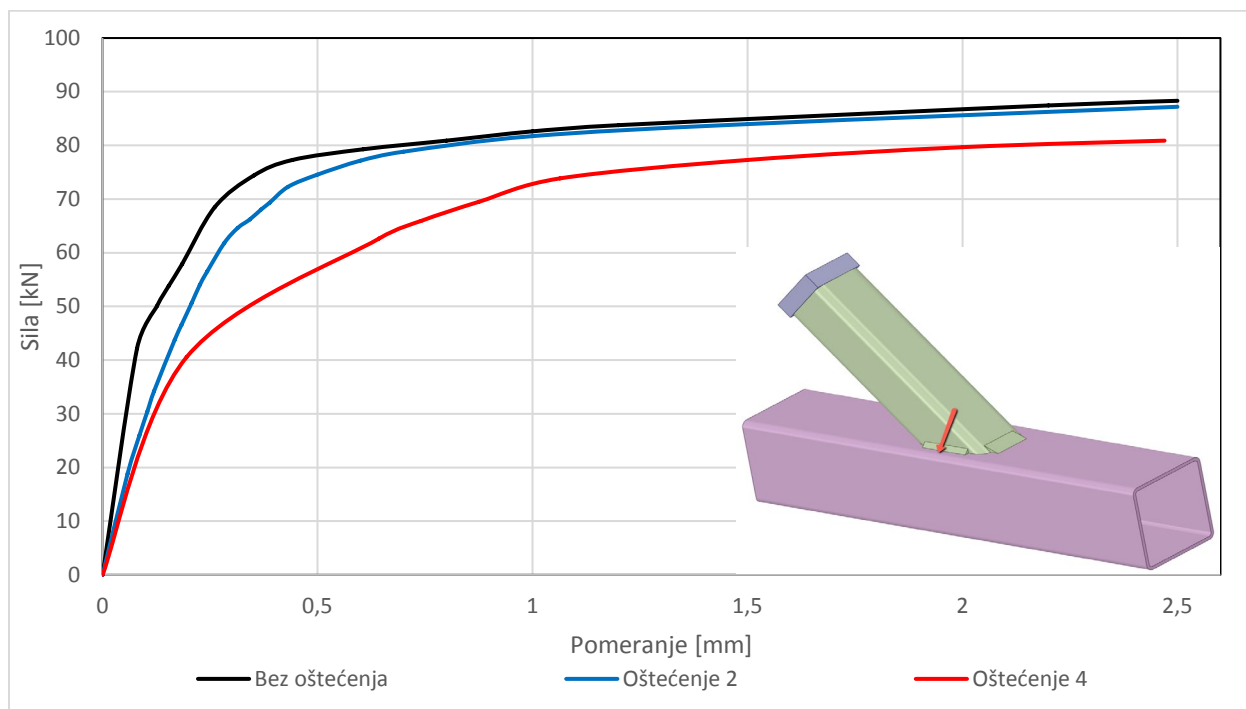
*Slika 87 - Dijagram prosečnih pomeranja karakterističnih tačaka veze sa oštećenjem 4 dobijen eksperimentalnim putem*

Na slikama 88, 89 i 90 prikazani su uporedni dijagrami pomeranja neoštećene veze i veze sa oštećenjima 2 i 4 u karakterističnim tačkama veze, dobijeni eksperimentalnim putem, na sledećim pozicijama:

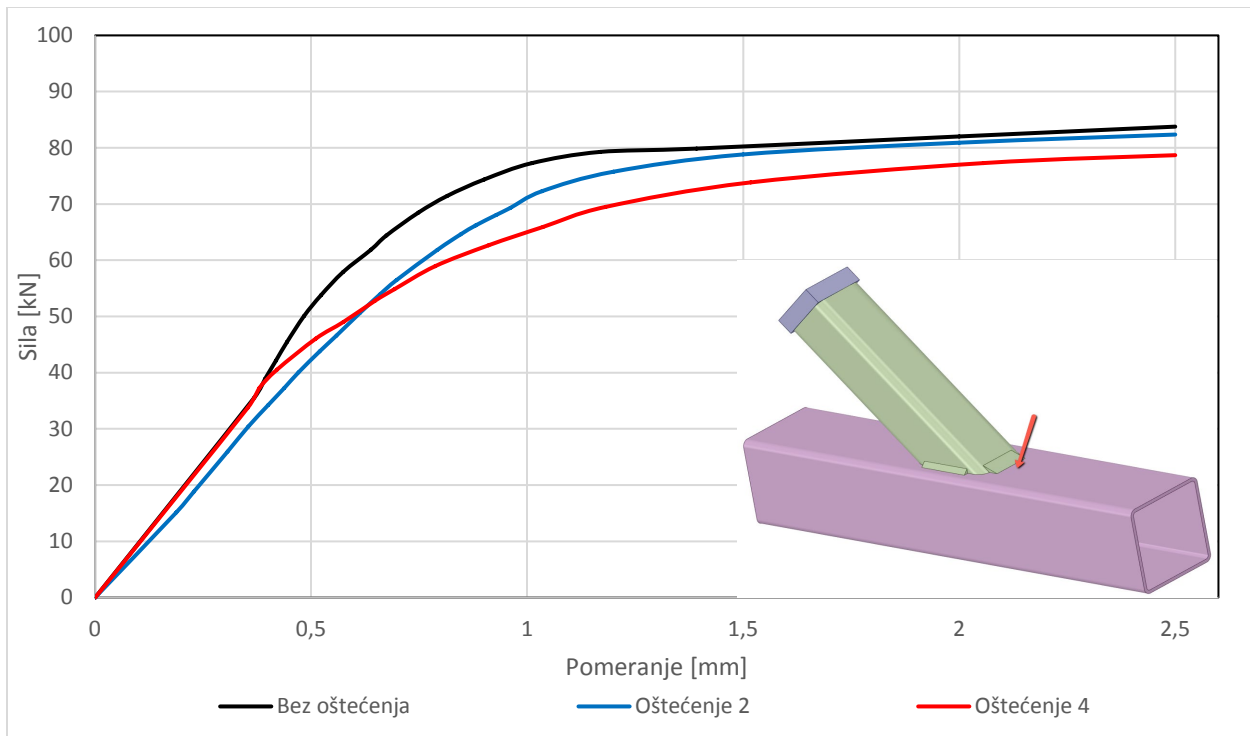
- bočni zid pojasnog štapa (slika 88);
- gornja flanša pojasnog štapa sa bočne strane štapa ispune (slika 89);
- gornja flanša pojasnog štapa ispred štapa ispune (slika 90).



Slika 88 - Uporedni dijagram prosečnih pomeranja tačke na bočnom zidu pojasnog štapa dobijen eksperimentalnim putem



Slika 89 - Uporedni dijagram prosečnih pomeranja tačke na gornjoj flanši pojasnog štapa sa bočne strane štapa ispune dobijen eksperimentalnim putem

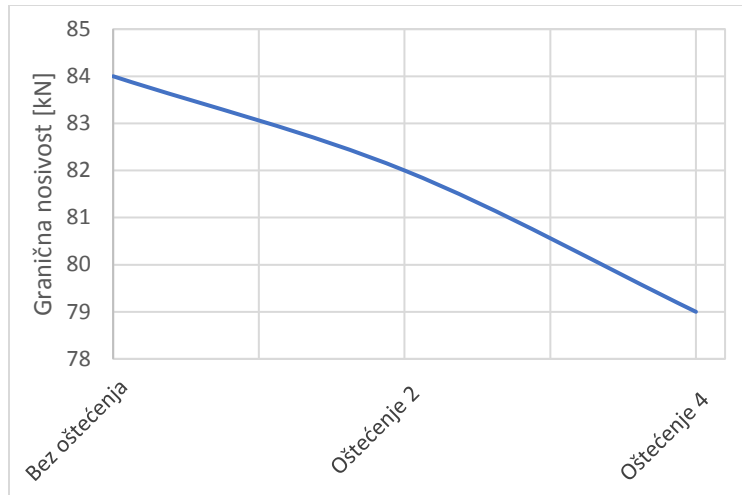


Slika 90 - Uporedni dijagram prosečnih pomeranja tačke na gornjoj flanši pojasnog štapa ispred štapa ispune dobijen eksperimentalnim putem

Granične nosivosti direktno zavarenih Y veza od RHS dobijene eksperimentalnim putem, pri maksimalnoj deformaciji koja iznosi  $\Delta = 3\% \cdot b_0 = 2,4 m$ , kao i nosivost po EC 3 uzimajući u obzir i uticaj šavova, prikazani su u tabeli 15 (slika 91).

Tabela 15 - Granične nosivosti veze dobijene eksperimentalnim putem

Uzorak	Granična nosivost	Nosivost po EC 3 uzimajući u obzir i uticaj šavova
Bez oštećenja	89,0 kN	57,93 kN
Oštećenje 2	82,0 kN	-
Oštećenje 4	79,0 kN	-



*Slika 91 - Dijagram granične nosivosti u zavisnosti od stepena oštećenja dobijen eksperimentalnim putem*

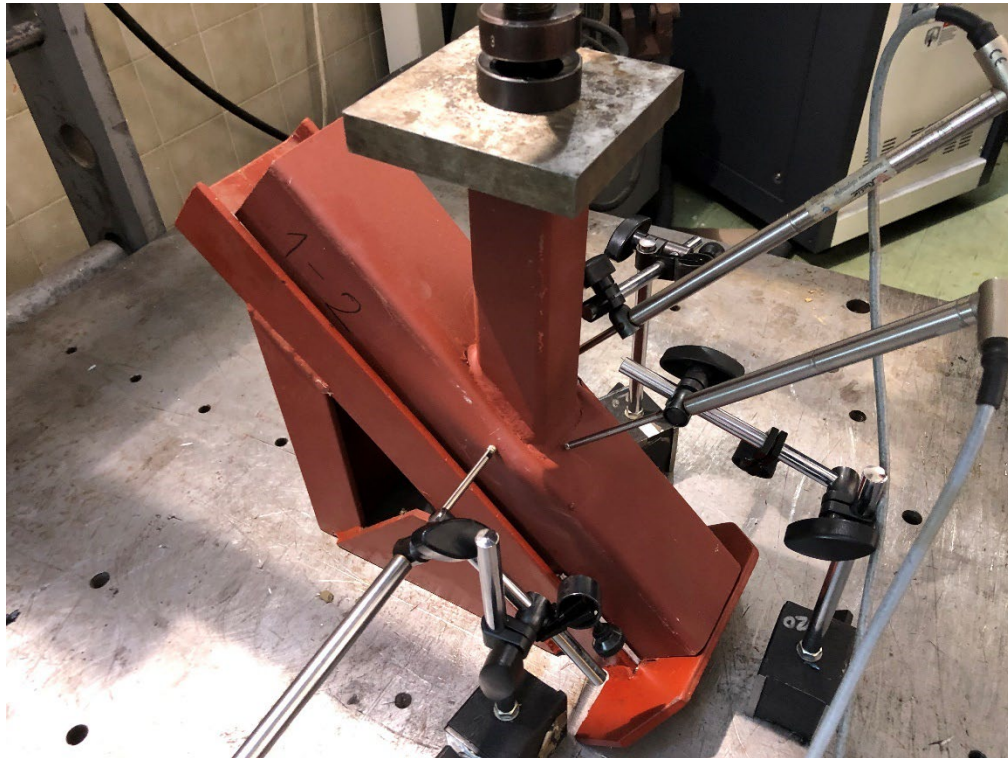
Eksperimentalni rezultati su potvrdili rezultate dobijene numeričkim putem. Potvrdilo se da sa porastom oštećenja dolazi do veće deformacije elemenata veze pri istim intenzitetima aksijalnih sila, a samim tim i do pada granične nosivosti veze. Pomeranja tačaka, odnosno deformacija veze pri eksperimentalnom ispitivanju se događaju pri većem intenzitetu aksijalne sile. Oblik dijagrama eksperimentalnih rezultata prati oblik dijagrama rezultata dobijenih numeričkim putem, uz nešto veće vrednosti intenziteta aksijalnih sila.

Na fotografijama 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102 i 103 prikazani su svi ispitivani uzorci sa lokalnim deformacijama nakon ispitivanja.





*Slika 92 - Neoštećen uzorak br. 1 - lokalne deformacije*



*Slika 93 - Neoštećen uzorak br. 2 - lokalne deformacije*



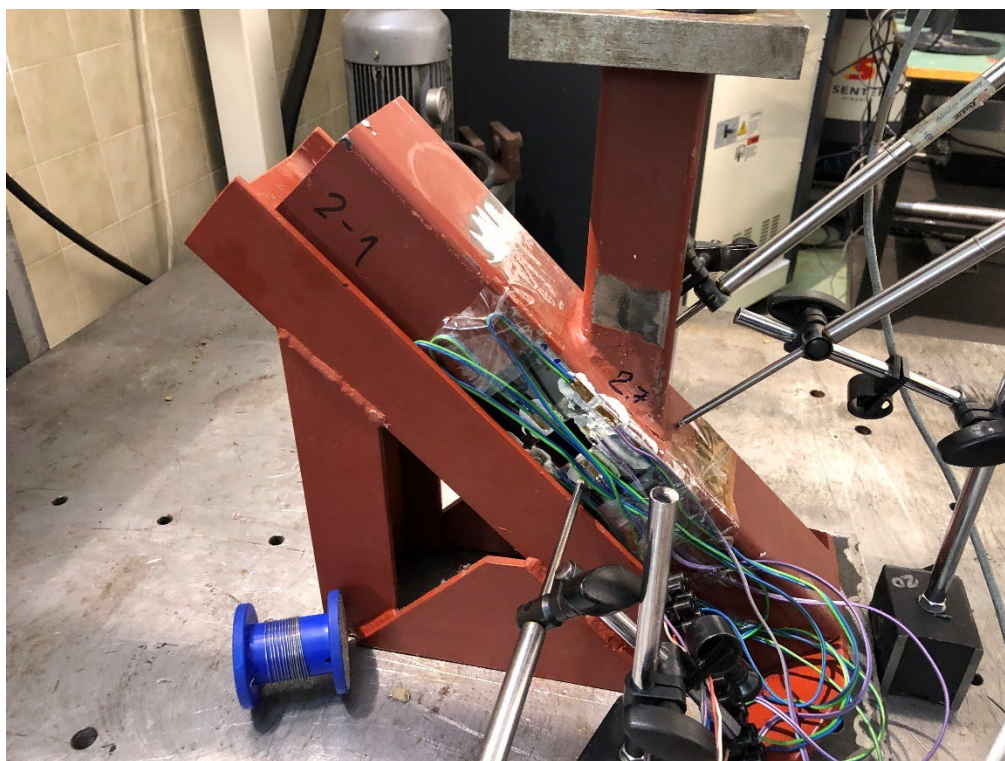


*Slika 94 - Neoštećen uzorak br. 3 - lokalne deformacije*



*Slika 95 - Neoštećen uzorak - uporedni prikaz uzoraka 1, 2 i 3 nakon ispitivanja*





*Slika 96 - Uzorak br. 1 sa oštećenjem 2 - lokalne deformacije*



*Slika 97 - Uzorak br. 2 sa oštećenjem 2 - lokalne deformacije*

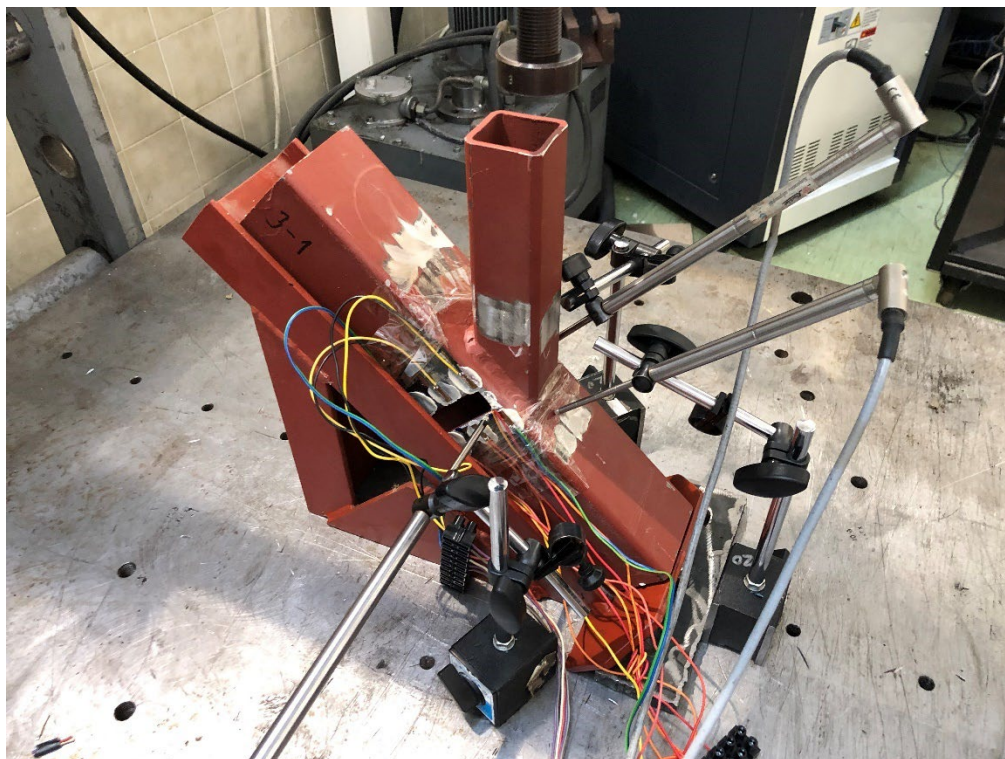


*Slika 98 - Uzorak br. 3 sa oštećenjem 2 - lokalne deformacije*



*Slika 99 - Uzorci sa oštećenjem 2 - uporedni prikaz uzoraka 1, 2 i 3 nakon ispitivanja*





*Slika 100 - Uzorak br. 1 sa oštećenjem 4 - lokalne deformacije*

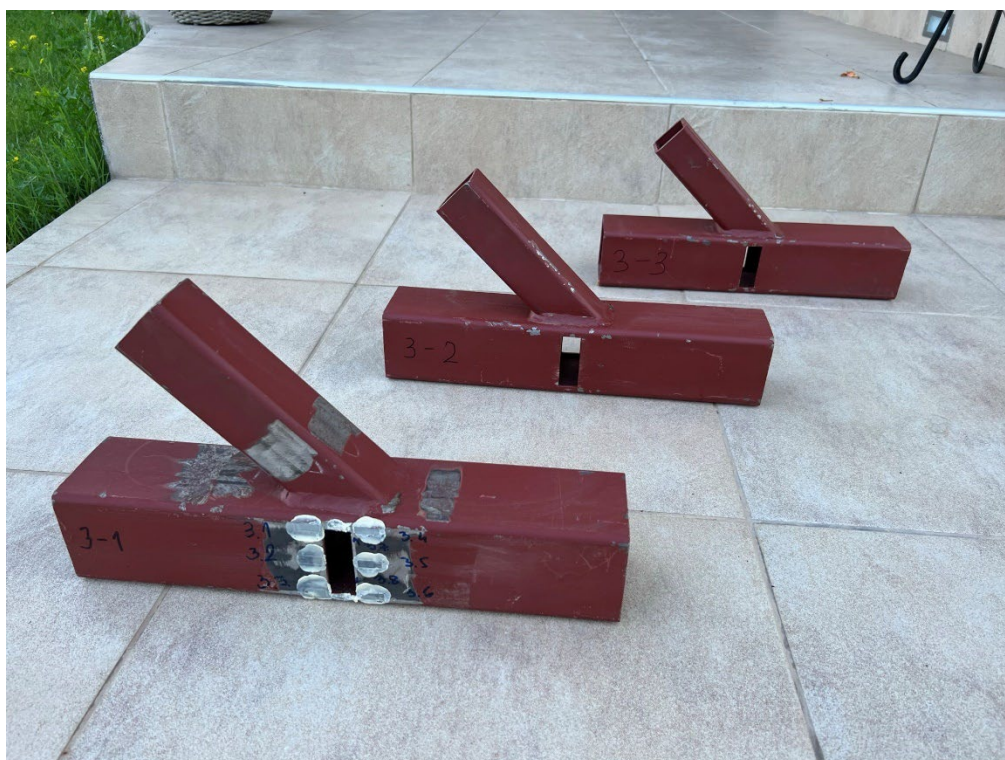


*Slika 101 - Uzorak br. 2 sa oštećenjem 4 - lokalne deformacije*





*Slika 102 - Uzorak br. 3 sa oštećenjem 4 - lokalne deformacije*



*Slika 103 - Uzorci sa oštećenjem 4 - uporedni prikaz uzoraka 1, 2 i 3 nakon ispitivanja*

## **6.4. NAPONI I DEFORMACIJE U OSNOVNOM MATERIJALU DIREKTNO ZAVARENIH VEZA OD RHS SA OŠTEĆENJEM**

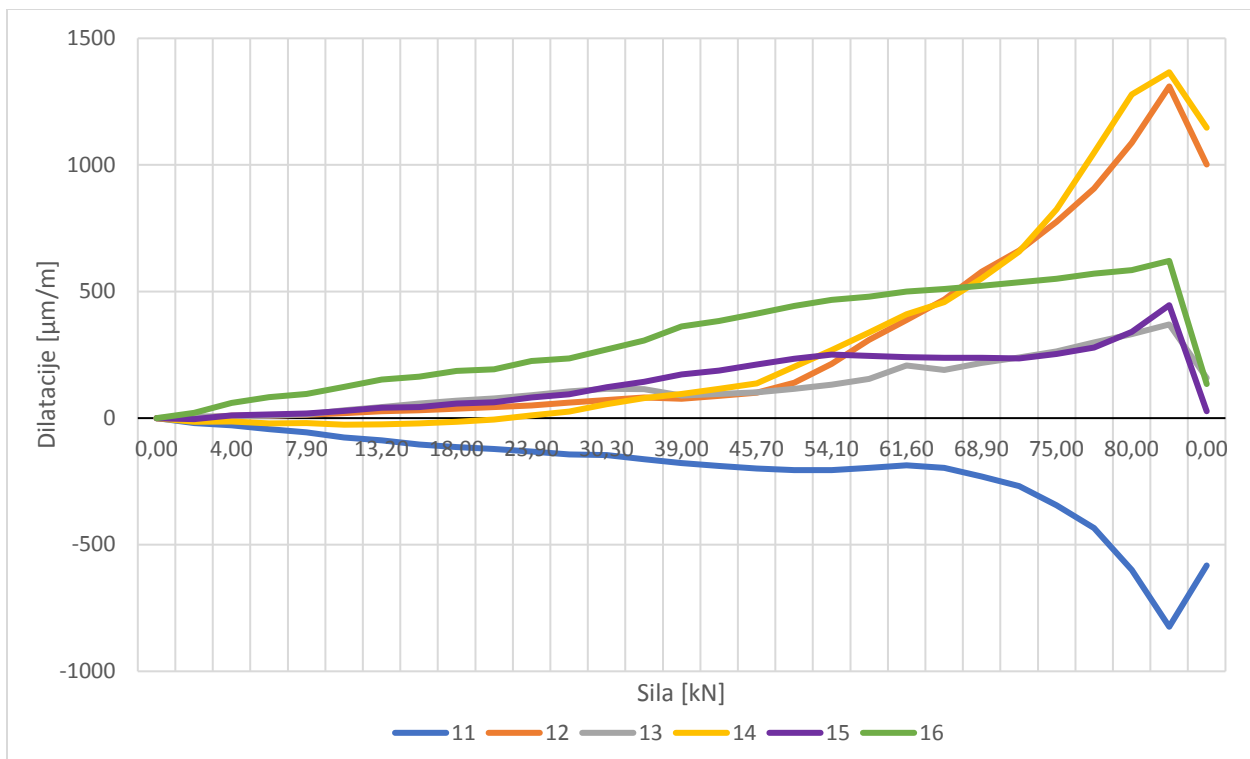
Merenje napona izvršeno je na 3 uzorka i to na jednom neoštećenom uzorku (uzorak 1-1), jednom uzorku sa oštećenjem 2 (uzorak 2-1) i jednom uzorku sa oštećenjem 4 (uzorak 3-1). Merenje napona vršeno je mernim trakama LY 41 – 6 mm 700  $\Omega$  i LY 21 – 1,5 mm 120  $\Omega$  koje su za uzorke zalepljene dvokomponentnim lepkom X60. Merne trake su preko preklopnika za merne trake za pojedinačno statičko merenje napona u jednoj mernoj tački povezani na pojačivač Quantum MX 840, koji je dalje povezan sa računarom i softverom Catman u kome se vrši zapis rezultata. Raspored mernih traka prikazan je na slikama 82, 83 i 84.

Na slici 104 prikazan je dijagram dilatacija neoštećenog uzorka, a na slici 105 dijagram napona neoštećenog uzorka dobijen eksperimentalnim putem.

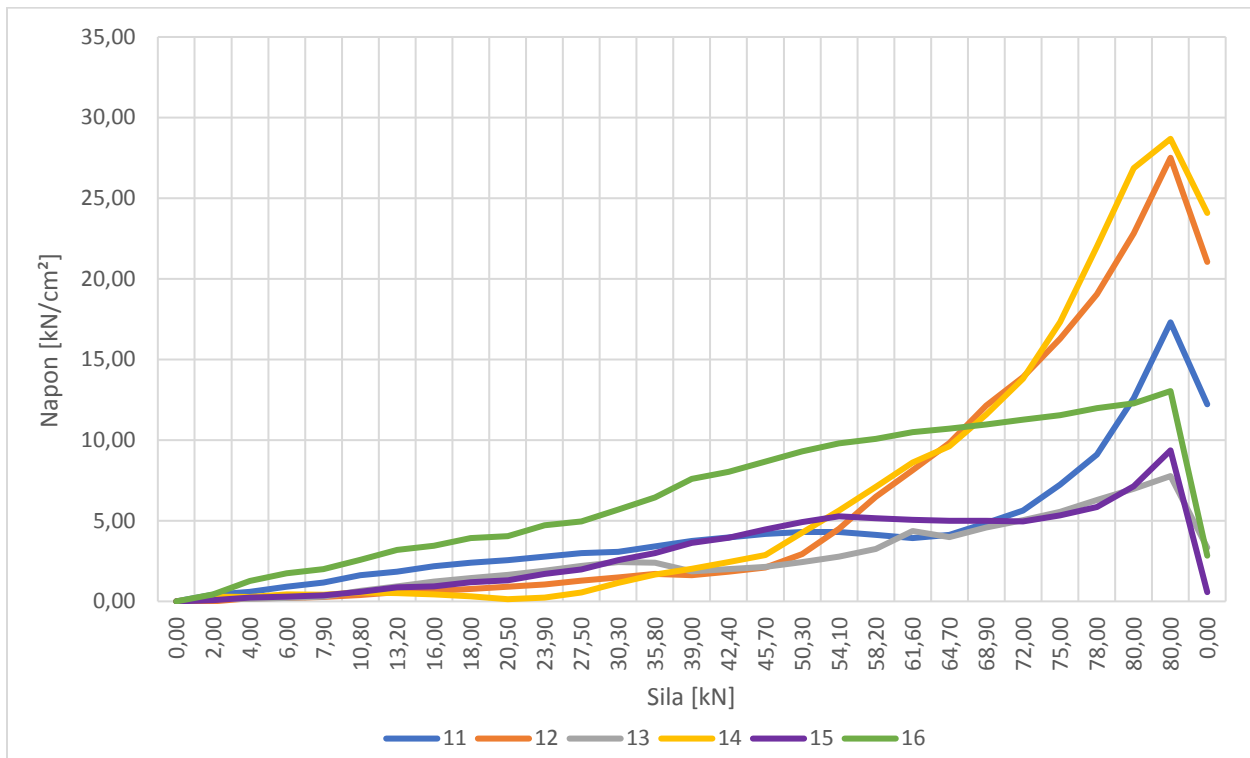
Na slici 106 prikazan je dijagram dilatacija uzorka sa oštećenjem 2, a na slici 107 dijagram napona uzorka sa oštećenjem 2 dobijen eksperimentalnim putem.

Na slici 108 prikazan je dijagram dilatacija uzorka sa oštećenjem 4, a na slici 109 dijagram napona uzorka sa oštećenjem 4 dobijen eksperimentalnim putem.

Sa dijagrama napona može se videti da maksimalne vrednosti napona u mernim tačkama prekoračuju normiranu granicu razvlačenja čelika i da se kreću u rasponu od cca 25-30 kN/cm<sup>2</sup>. Na mernim mestima gde je došlo do prekoračenja normirane granice razvlačenja, kao i na nekim mernim mestima sa nižim vrednostima napona, imamo pojavu plastičnih deformacija. Ovo ukazuje da je došlo do prekoračenja granice elastičnosti, odnosno da je dostignuta zona plastičnosti. Pojava zona sa plastičnim deformacijama mogu se videti na fotografijama uzoraka nakon ispitivanja (slike 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102 i 103).

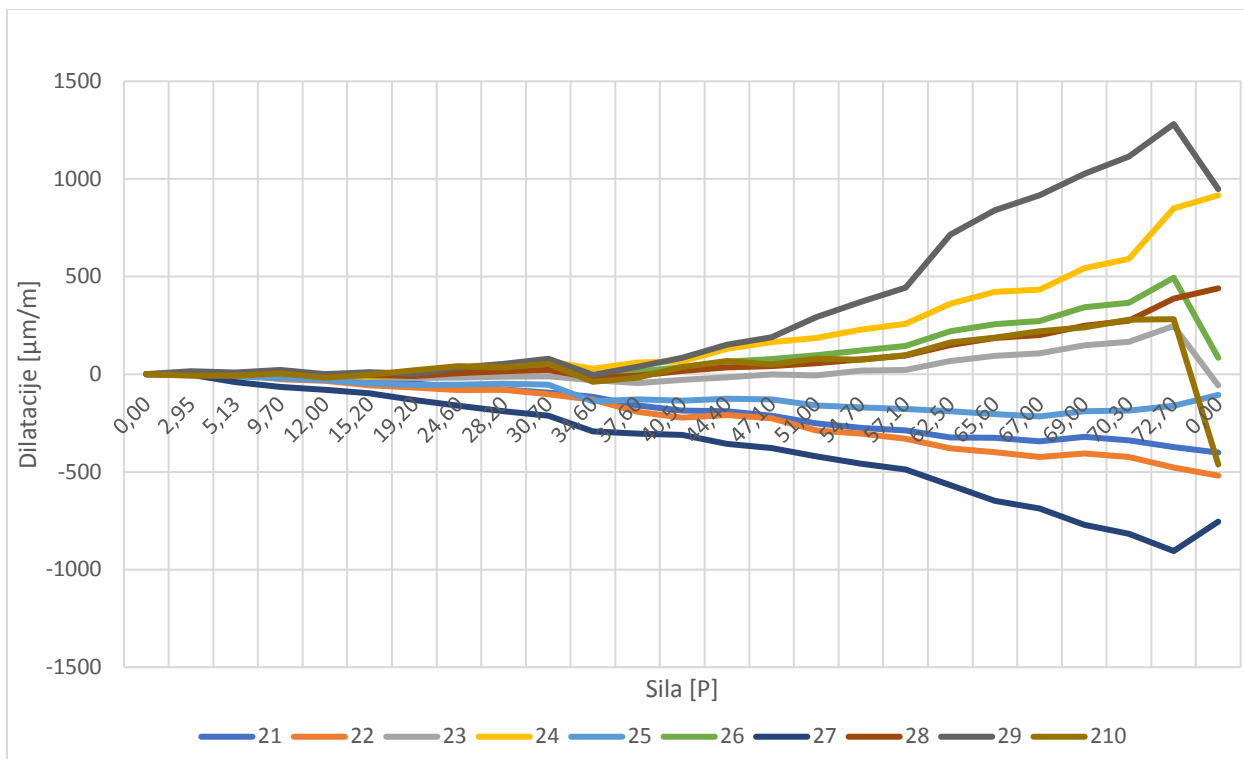


Slika 104 - Dijagram dilatacija [ $\mu\text{m/m}$ ] neoštećenog uzorka dobijen eksperimentalnim putem

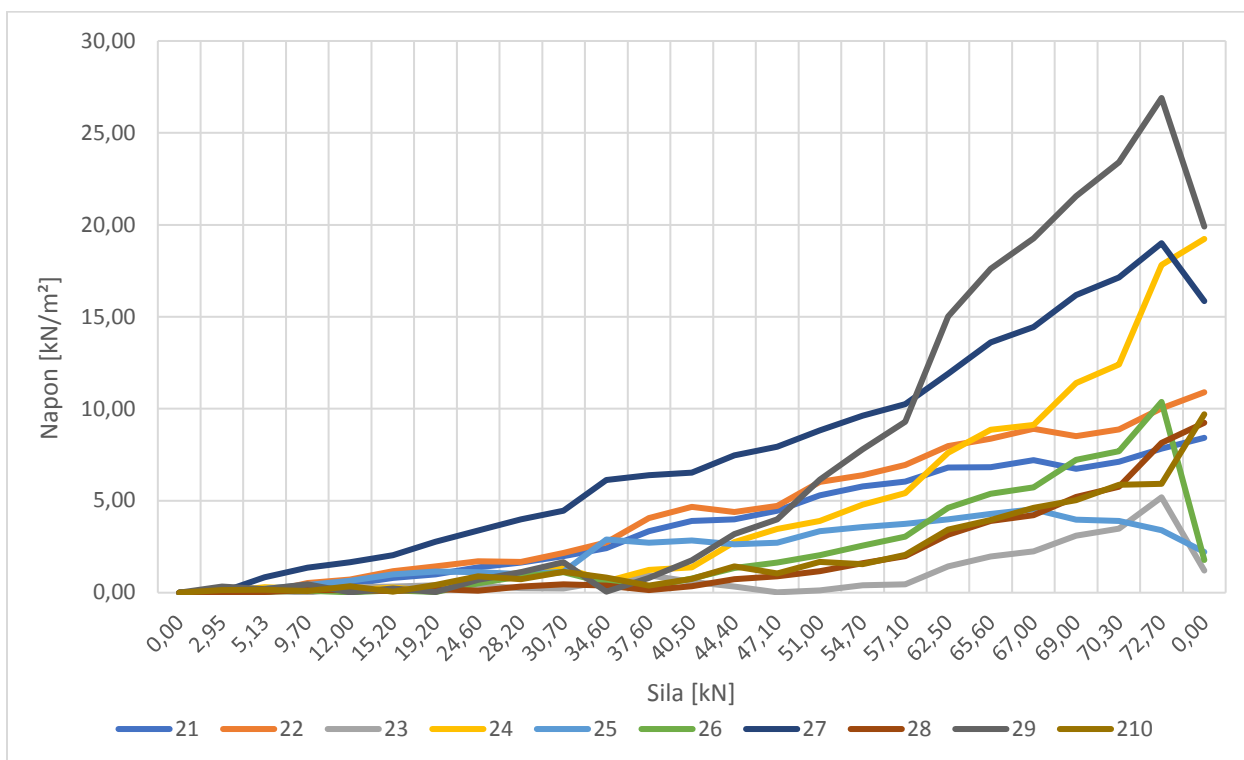


Slika 105 - Dijagram napona [ $\text{kN/cm}^2$ ] neoštećenog uzorka dobijen eksperimentalnim putem

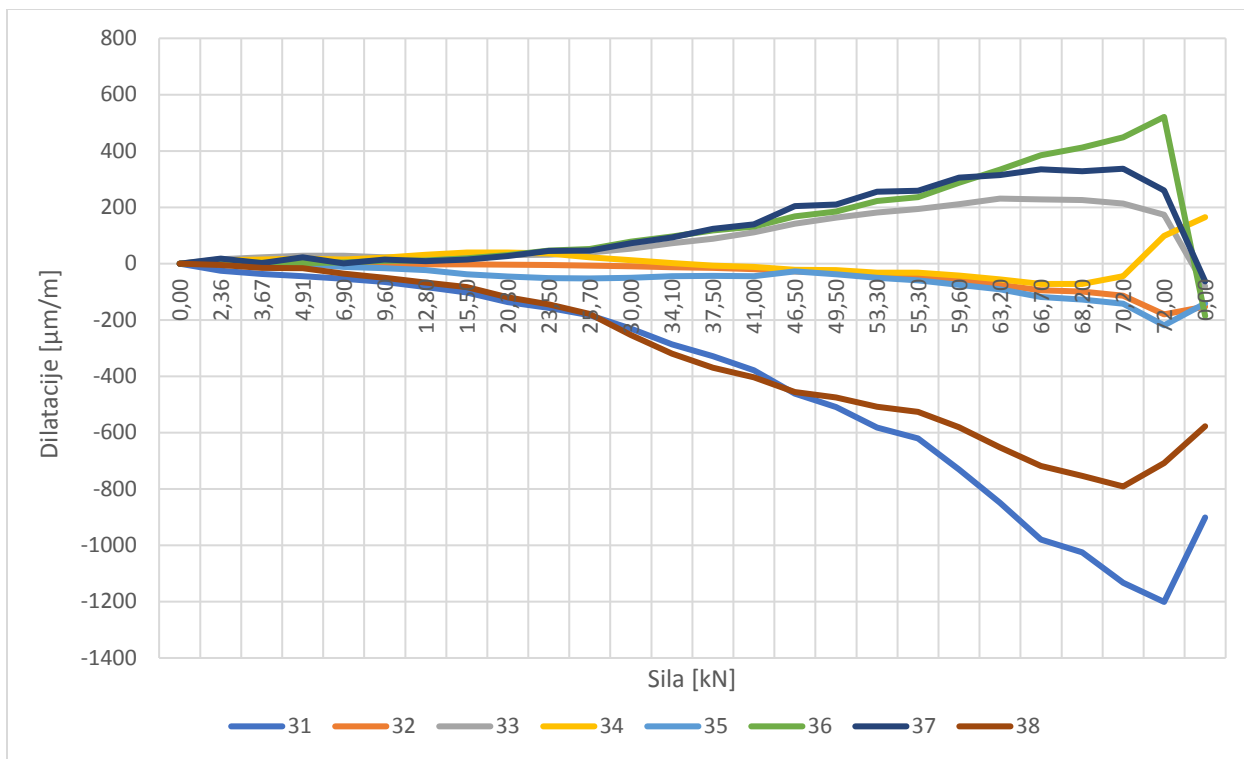




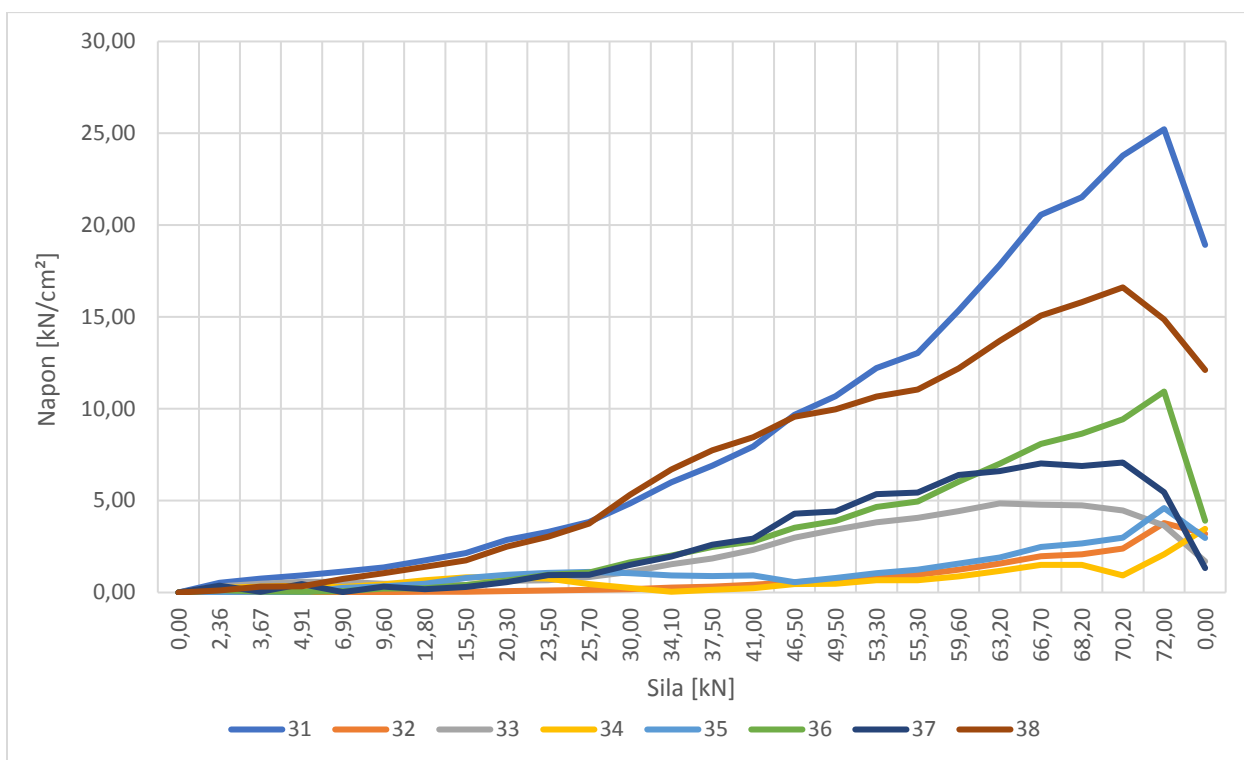
Slika 106 - Dijagram dilatacija [ $\mu\text{m/m}$ ] uzorka sa oštećenjem 2 dobijen eksperimentalnim putem



Slika 107 - Dijagram napona [ $\text{kN/cm}^2$ ] uzorka sa oštećenjem 2 dobijen eksperimentalnim putem



Slika 108 - Dijagram dilatacija [ $\mu\text{m/m}$ ] uzorka sa oštećenjem 4 dobijen eksperimentalnim putem

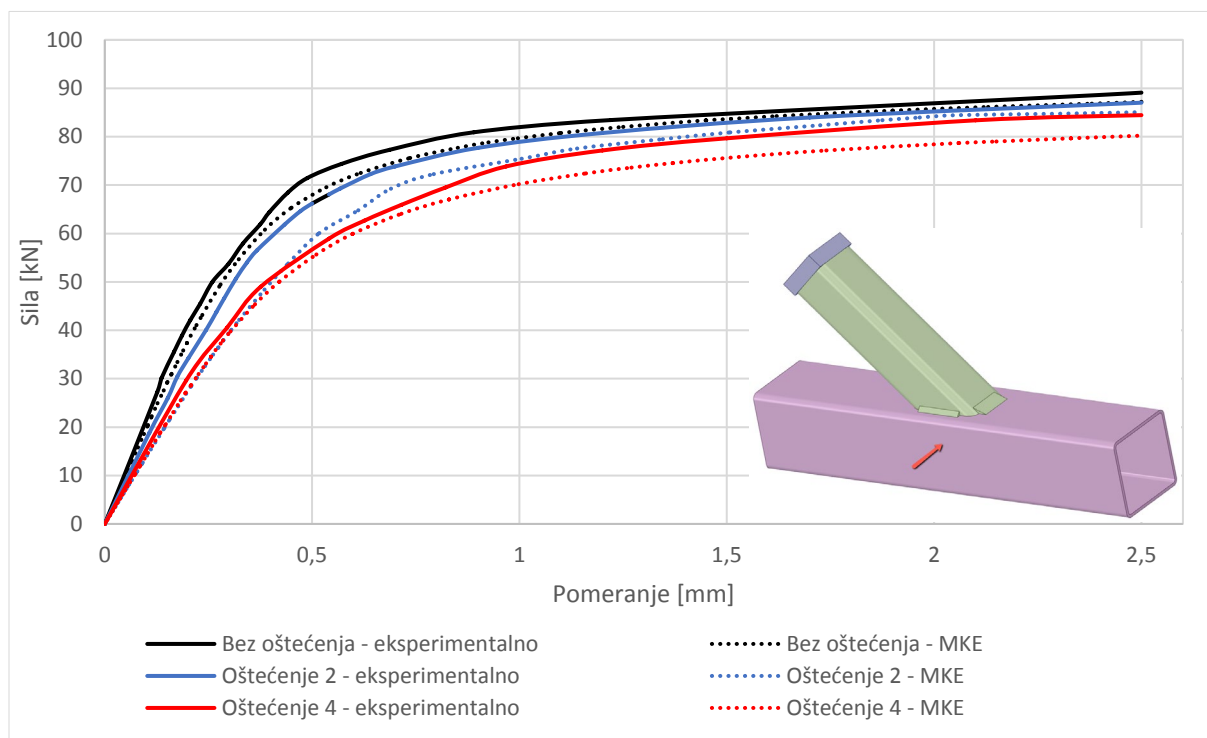


Slika 109 - Dijagram napona [ $\text{kN/cm}^2$ ] uzorka sa oštećenjem 4 dobijen eksperimentalnim putem

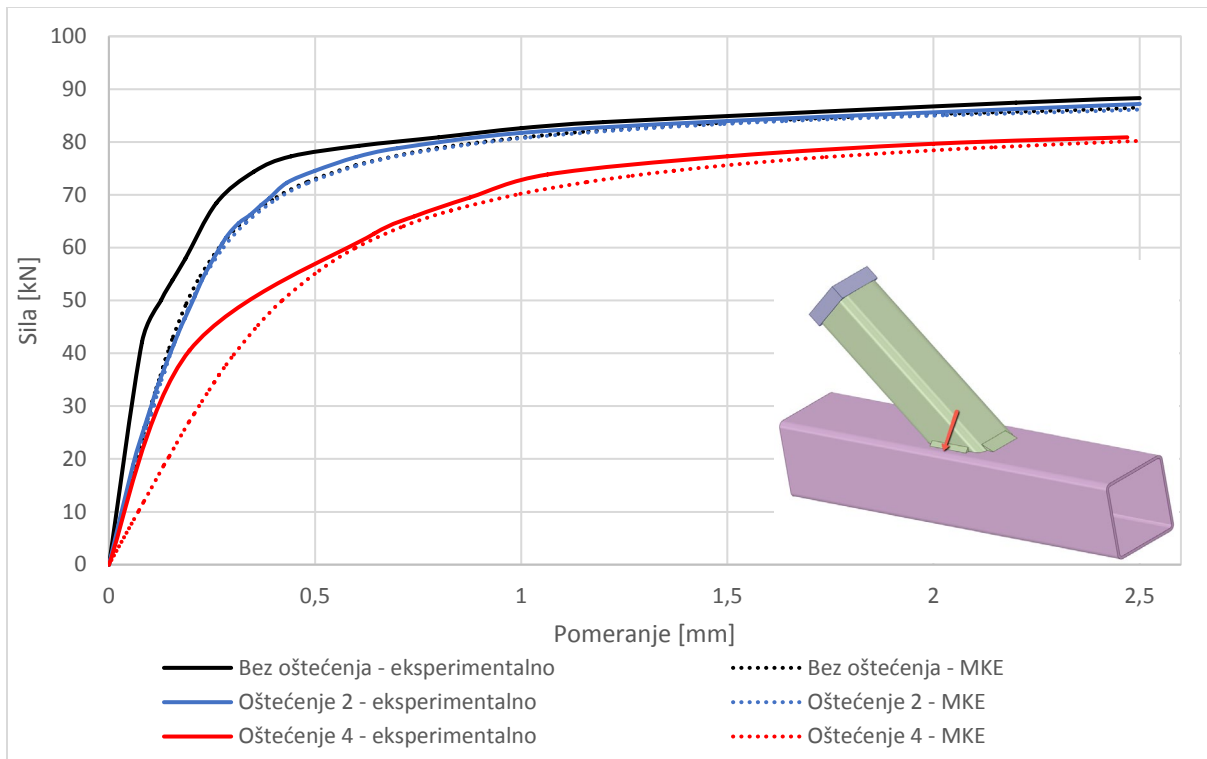
## 6.5. UPOREDNA ANALIZA REZULTATA PONAŠANJA DIREKTNO ZAVARENIH Y VEZA OD RHS SA OŠTEĆENJEM, DOBIJENIH NUMERIČKIM I EKSPERIMENTALNIM PUTEM

Na slikama 110, 111 i 112 prikazani su uporedni dijagrami pomeranja neoštećene veze i veze sa oštećenjima 2 i 4 u karakterističnim tačkama veze, dobijeni primenom MKE i eksperimentalnim putem na sledećim pozicijama:

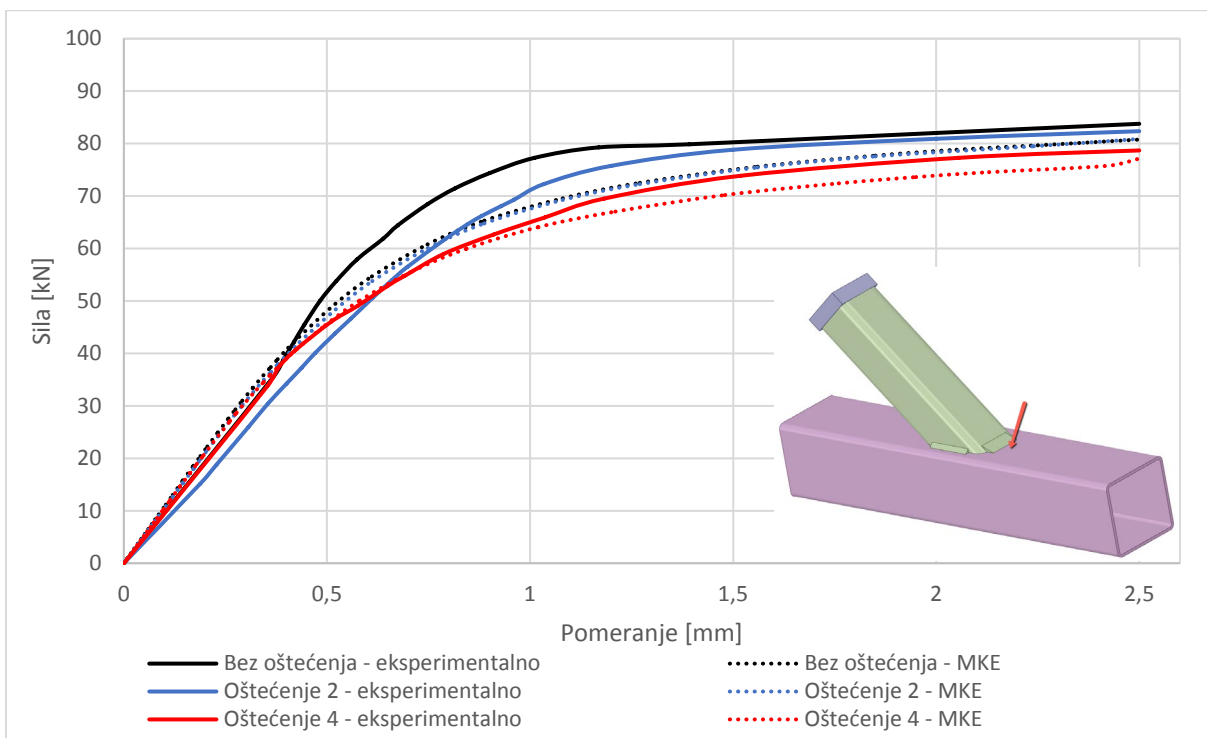
- bočni zid pojasnog štapa (slika 110);
- gornja flanša pojasnog štapa sa bočne strane štapa ispune (slika 111);
- gornja flanša pojasnog štapa ispred štapa ispune (slika 112).



Slika 110 - Uporedni dijagrami pomeranja tačke na bočnom zidu pojasnog štapa



Slika 111 - Uporedni dijagrami pomeranja tačke na gornjoj flanši pojasnog štapa sa bočne strane štapa ispune



Slika 112 - Uporedni dijagrami pomeranja tačke na gornjoj flanši pojasnog štapa ispred štapa ispune

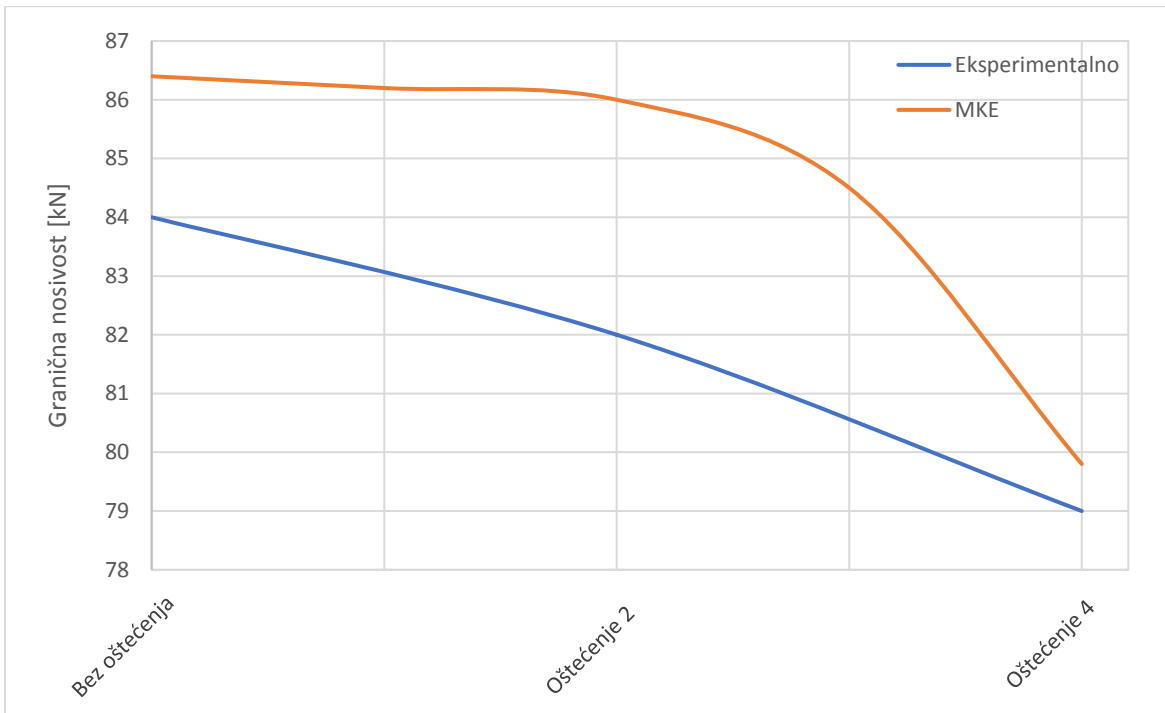
Tabela 16 - Uporedni prikaz graničnih nosivosti u kN

Uzorak	Nosivost po EC 3 uzimajući u obzir i uticaj šavova	Numerička analiza MKE	Eksperimentalno određena vrednost
Bez oštećenja	57,93 kN	86,4 kN	89,0 kN
Oštećenje 1		86,2 kN	
Oštećenje 2		86,0 kN	82,0 kN
Oštećenje 3		84,5 kN	
Oštećenje 4		79,8 kN	79,0 kN

U tabeli 16 dat je prikaz uporednih graničnih vrednosti u kN dobijenih:

- računskim putem prema postupku datom u SRPS EN 1993;
- numeričkom analizom – MKE;
- eksperimentalnim putem.

Na slici 113 prikazan je uporedni dijagram graničnih nosivosti veza dobijenih primenom MKE i eksperimentalnim putem, za slučajeve veze bez oštećenja i sa različitim stepenom oštećenja.



Slika 113 - Uporedni dijagram graničnih nosivosti veza dobijenih primenom MKE i eksperimentalnim putem

## **7. POUZDANOST DIREKTNO ZAVARENIH VEZA OD RHS SA OŠTEĆENJEM**

### **7.1. TRAJNOST ČELIČNIH KONSTRUKCIJA**

Održivi razvoj predstavlja razvoj koji zadovoljava potrebe u sadašnjem trenutku, ali koji istovremeno ne utiče na mogućnost budućih generacija da zadovolje sopstvene potrebe [102]. Održivi razvoj se, pored zaštite životne sredine, fokusira i na ekonomske i socijalne probleme. U oblasti konstrukcija, održivi razvoj posvećuje pažnju na efikasnu upotrebu sirovina, minimalnu upotrebu energije i emisiju štetnih produkata tokom životnog veka objekta, trajanje, kao i produženi proračunski eksploatacioni vek objekta [12]. Pod proračunskim eksploatacionim vekom podrazumeva se pretpostavljeni period u kojem će se konstrukcija, ili njen deo, koristiti za predviđenu namenu, sa očekivanim održavanjem, ali bez potrebe za velikom popravkom [79]. Evrokod 0 daje indikativni proračunski eksploatacioni vek objekata u zavisnosti od tipa i značaja objekta:

- 10 godina – privremene konstrukcije,
- 15-30 godina – poljoprivredne i slične konstrukcije,
- 50 godina – konstrukcije zgrada i druge jednostavne konstrukcije,
- 100 godina – konstrukcije monumentalnih zgrada, mostovi i dr.

U istraživanjima [76] definisan je eksploatacioni vek čelične konstrukcije i delova čelične konstrukcije na 75 godina.

Čelik, kao konstruktivni materijal, može efikasno da ispuni zahteve održivog razvoja, zahvaljujući svojim svojstvima:

- visok stepen iskorišćenosti materijala;
- fleksibilnost;
- industrijska proizvodnja;
- brzina izgradnje;
- mogućnost reciklaže.

Pored navedenih prednosti, treba spomenuti i nedostatak čelika, kao konstruktivnog materijala, koje se ogleda u trajnosti. Na trajnost čelika, pored ljudskog faktora i incidentnih situacija (požar, zemljotres, udar), veliki uticaj ima korozija čelika. Koliko je značajan uticaj korozije na trajnost čeličnih konstrukcija, najbolje govori podatak da su istraživanja, sprovedena 70-ih i 80-ih godina prošlog veka, pokazala da je uticaj korozije na ekonomiju različitih zemalja iznosio i do 3% bruto domaćeg proizvoda [53]. Kada su oštećenja značajna, neophodne su skupe popravke i održavanja. Čak i kada nije ugrožena upotrebljivost objekta, pogoršanje izgleda usled korozije dovodi do pada vrednosti objekta.

## **7.2. UTICAJ KOROZIJE NA TRAJNOST ČELIČNIH KONSTRUKCIJA**

Korozija predstavlja propadanje metala, kao rezultat reakcije sa okolinom (atmosfera, vlažnost vazduha, temperatura, vetar, gasovi, kontakt sa tlom, kontakt sa slanom ili slatkom vodom, prisustvo mikroba i bakterija, prisustvo sumpor dioksida, natrijum hlorida, amonijum sulfata i dr.). Postoji nekoliko oblika korozije (koje su navedene u poglavlju 4.1.4), a svakako se atmosferska korozija izdvaja kao najčešći tip korozije sa velikim uticajem na trajnost čelika. Posledica atmosferske korozije je smanjivanje debljine zidova preseka, smanjivanje površine poprečnog preseka čeličnog elementa, što dovodi do smanjivanja nosivosti čeličnog elementa. Na brzinu procesa rastvaranja metala (korozije) utiču dve grupe faktora: endogeni i egzogeni faktori. Endogeni faktori su vezani za sam metal i tu spadaju sastav metala, potencijal metala u rastvoru, hemijska i fizička homogenost površine i dr. Egzogeni faktori su povezani sa sastavom atmosfere. S tim u vezi, EN 12500 [23] definiše 5 spoljašnjih tipova okruženja na osnovu prisustva korozivnih čestica u vazduhu [53]:

1. ruralna zona – sela i manji gradovi, mala kontaminacija korozivnim česticama (veštačka đubriva, hloridi, ugljen dioksid);
2. urbana zona – gusto naseljena područja, malo industrijskih aktivnosti, srednja kontaminacija korozivnim agensima (sumpor dioksidi);

3. industrijska zona – intenzivne industrijske aktivnosti, visoka kontaminacija korozivnim česticama (sumpor dioksidi);
4. morska zona – područja u blizini mora ili unutrašnje zone na koje utiče salinitet u vazduhu. Na dejstvo korozije utiču topografski uslovi, dominantni smer vetra i dr.;
5. morska industrijska atmosfera – područja u blizini mora i industrijskih zona ili unutrašnje zone koje se nalaze u dominantnom pravcu vetra.

Trenutno važeći Evropski propisi [79], [80], [82] daju samo osnovne preporuke i principe u vezi sa trajnošću čeličnih konstrukcija i korozijom, koji se odnose na izbor osnovnog materijala, upotrebu zaštitnih premaza, bez preciznih uputstvima za projektovanje u korozivnim sredinama.

U standardu [48] data je definicija trajnosti u odnosu na koroziju, u kome se kaže da je trajnost sposobnost antikorozivne zaštite, samog metala ili premaza da zadovoljava svoju funkciju za određeni period vremena, nakon koga se pristupa merama održavanja.

U standardu [84] definisane su klase trajnosti u odnosu na koroziju:

- niska trajnost – 2 do 5 godina;
- srednja trajnost – 5 do 15 godina;
- visoka trajnost – više od 15 godina.

U radu [52] autori su razvili model za određivanje gubitaka usled korozije. Model uzima u obzir četiri promenljive: vlažnost, sumpor dioksid, salinitet i temperaturu. Izraz za određivanje gubitaka usled korozije glasi:

$$y = A \cdot t^B \left(\frac{t_w}{C}\right)^D \cdot \left(1 + \frac{SO_2}{E}\right)^F \cdot \left(1 + \frac{Cl}{G}\right)^H \cdot e^{J(T_v + T_0)} \quad (24)$$

gde su:

- $y$  – gubitak usled korozije [ $\mu m$ ],
- $t$  – vreme izloženosti [god],
- $t_w$  – vreme navlaženosti [h/god],
- $SO_2$  – koncentracija sumpor dioksida [ $\mu m/m^3$ ],
- $Cl$  – brzina taloženja hlorida [ $mg/m^2/dan$ ],
- $T_v$  – temperatura vazduha [ $^{\circ}C$ ],
- $A, B, C, D, E, F, G, H, J, T_0$  – empirijski koeficijenti (tabela 17).



Tabela 17 - Empirijski koeficijenti za konstrukcioni čelik

Empirijski koeficijenti									
A	B	C	D	E	F	G	H	J	T <sub>0</sub>
13.4	0.98	3800	0.46	25	0.62	50	0.34	0.016	20

### 7.3. FUNKCIJA POUZDANOSTI I FUNKCIJA OTKAZA

Jedna od definicija pouzdanosti glasi: pouzdanost je sposobnost objekta (konstrukcije ili elementa konstrukcije) da ispuni funkciju za koju je projektovan za definisani period vremena pod definisanim uslovima. Pouzdanost objekta podrazumeva sigurnost, funkcionalnost i trajnost.

Funkcija pouzdanosti  $R(t)$  je vremenski zavisna funkcija i izražava se kao vrednost (procenat ili broj) verovatnoće ponašanja konstrukcije u funkciji vremena  $t$  (u intervalu  $t \geq 0$ ).

Osobina funkcije  $R(t)$ :

- za vreme kad  $t \rightarrow 0$  funkcija  $R(t) \rightarrow 1$
- za vreme kad  $t \rightarrow \infty$  funkcija  $R(t) \rightarrow 0$

znači da je:

$$0 < R(t) \leq 1 \quad (25)$$

Funkcija nepouzdanosti poznata kao funkcija otkaza  $F(t)$  predstavlja verovatnoću otkaza konstrukcije u vremenu  $t$  (u intervalu  $t \geq 0$ ).

Osobina funkcije  $F(t)$ :

- za vreme kad  $t \rightarrow 0$  funkcija  $F(t) \rightarrow 0$
- za vreme kad  $t \rightarrow \infty$  funkcija  $F(t) \rightarrow 1$

Funkcije  $R(t)$  i  $F(t)$  se određuju na osnovu teorije verovatnoće, preko funkcije raspodele otkaza (kumulativna funkcija raspodele). Funkcija pouzdanosti i funkcija otkaza, u funkciji vremena  $t$  ( $0 \leq t < \infty$ ), imaju sledeći međusobni odnos:

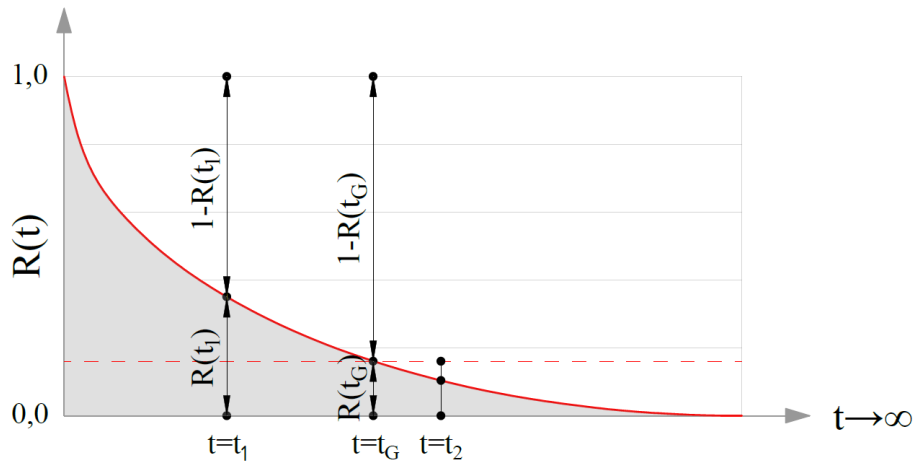
$$R(t) + F(t) = 1 \quad (26)$$

odnosno:

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (27)$$

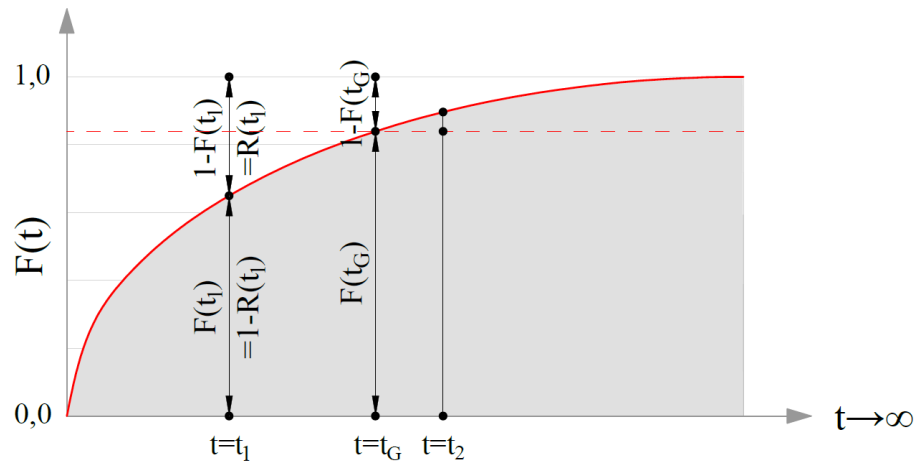
Ako  $R(t)$  verovatnoća pouzdanosti iznosi 1, onda verovatnoća pouzdanosti iznosi 100%, pa samim tim ne postoji verovatnoća otkaza konstrukcije, pa je funkcija otkaza konstrukcije 0%.

Funkcija pouzdanosti  $R(t)$  (slika 114) i funkcija otkaza  $F(t)$  (slika 115) grafički su prikazane na narednim slikama.



Slika 114 – Funkcija pouzdanosti  $R(t)=1-F(t)$

Funkcija pouzdanosti  $R(t)$  važi u intervalu vremena  $0 \leq t \leq t_G$ . U trenutku  $t = t_G$ ,  $R(t)$  ima graničnu vrednost, a vreme  $t_G$  predstavlja upotrebnii vek konstrukcije.



Slika 115 – Funkcija otkaza  $F(t)=1-R(t)$

U trenutku  $t = 0$  funkcija pouzdanosti i funkcija otkaza imaju sledeće vrednosti:

$$\begin{cases} R(t) = 1 \\ F(t) = 0 \end{cases} \quad (28)$$

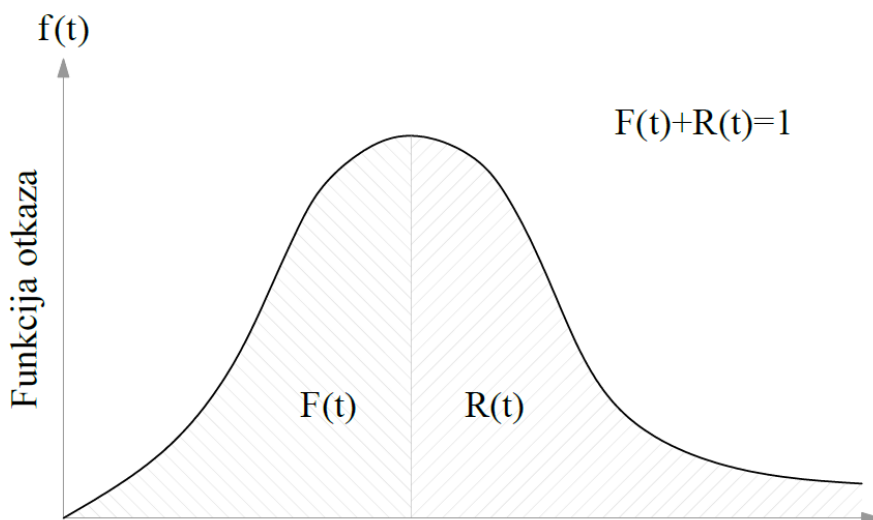
odnosno, u trenutku  $t = \infty$ :

$$\begin{cases} R(t) = 0 \\ F(t) = 1 \end{cases} \quad (29)$$

Diferencijacijom izraza (27) dolazimo do funkcije gustine otkaza:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (30)$$

koja se grafički može predstaviti dijagramom na slici 116:



Slika 116 – Funkcija gustine otkaza

Pouzdanost u građevinskom konstrukterstvu se može izraziti preko indeksa pouzdanosti i preko funkcije verovatnoće pouzdanosti. Indeks pouzdanosti  $\beta$  (reliability index) predstavlja kvantifikovanu vrednost pouzdanosti i može se odrediti na osnovu stohastičkog modela dve slučajne promenljive: uticaje od dejstava  $E$  i odgovarajuće nosivosti  $R$ . Probabilistički koncept proračuna konstrukcija obuhvata verovatnoću otkaza konstrukcija  $P_f$  i marginu sigurnosti  $P_r$ . Na osnovu margine sigurnosti:

$$G = R - E \quad (31)$$

odnosno srednje vrednosti  $\mu_G$  funkcije  $G$  dobija se indeks pouzdanosti:

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} \quad (32)$$

gde su:

- $\mu_g$  – srednja vrednost funkcije  $g(x)$ ,
- $\sigma_g$  – standardna devijacija.

U analizi pouzdanosti, potrebno je da pouzdanost konstrukcije zadovolji sledeći uslov:

$$\beta > \beta_d \quad (33)$$

gde je  $\beta_d$  računaska vrednost indeksa pouzdanosti. Ova vrednost  $\beta_d$  se, prema EN 1990 [79] takođe naziva i ciljna vrednost (target value) i za proračunski životni vek konstrukcije ima sledeće vrednosti:

- $\beta_d = 3,8$  – za granično stanje nosivosti,
- $\beta_d = 1,5$  – za granično stanje upotrebljivosti.

U zavisnosti od brzine procesa degradacije objekta (konstrukcije ili elementa konstrukcije) kriva funkcije pouzdanosti može imati različiti oblik. Brzina procesa degradacije zavisi od velikog broja faktora, kao što su kvalitet projektovanog rešenja, kvalitet materijala, kvalitet izvođenja i održavanja, mere zaštite konstrukcije, preopterećenje, agresivnost spoljašnje sredine i dr.

Tokom eksploatacionog veka konstrukcije neminovno dolazi do manjeg ili većeg oštećenja konstrukcije, bilo kao posledica incidentnih situacija ili normalne upotrebe objekta. Inicijalnu pojavu oštećenja prati propagacija oštećenja, koja može biti brža ili sporija, u zavisnosti od velikog broja faktora. U nekom trenutku, nakon dostizanja kritične veličine oštećenja, može doći do ugrožavanja funkcionisanja konstrukcije, a u krajnjem slučaju i ugrožavanja sigurnosti konstrukcije.

Propagaciju oštećenja možemo izraziti preko promene nekih geometrijskih parametara (površine, visine, širine, debljine i dr.) u funkciji vremena  $t$  (kao gubitak površine  $\Delta A(t)/A$  ili visine preseka  $\Delta h(t)/h$ ).

Funkcija pouzdanosti  $R(t)$  ima stalnu tendenciju opadanja tokom vremena, dok funkcija verovatnoće otkaza  $F(t)$  ima stalnu tendenciju rasta tokom vremena.

Oštećenja možemo izraziti sledećim izrazima [87]:

$$\Delta A(t) = \Delta A_{kr} \left(\frac{1}{T}\right)^a \cdot t^a \quad (34)$$

$$\Delta h(t) = \Delta h_{kr} \left(\frac{1}{T}\right)^a \cdot t^a \quad (35)$$

Navedeni izrazi predstavljaju stepene funkcije vremena, kod kojih su:

- $\Delta A_{kr}$  – granično oštećenje kao gubitak poprečnog preseka
- $\Delta h_{kr}$  – granično oštećenje kao gubitak visine preseka
  - $a = 1$  – označava proces proporcionalnosti oštećenja i vremena tokom upotrebe elemenata i predstavlja referentnu vrednost,
  - $a < 1$  – pokazuje brže procese oštećenja,
  - $a > 1$  – pokazuje sporije procese oštećenja.

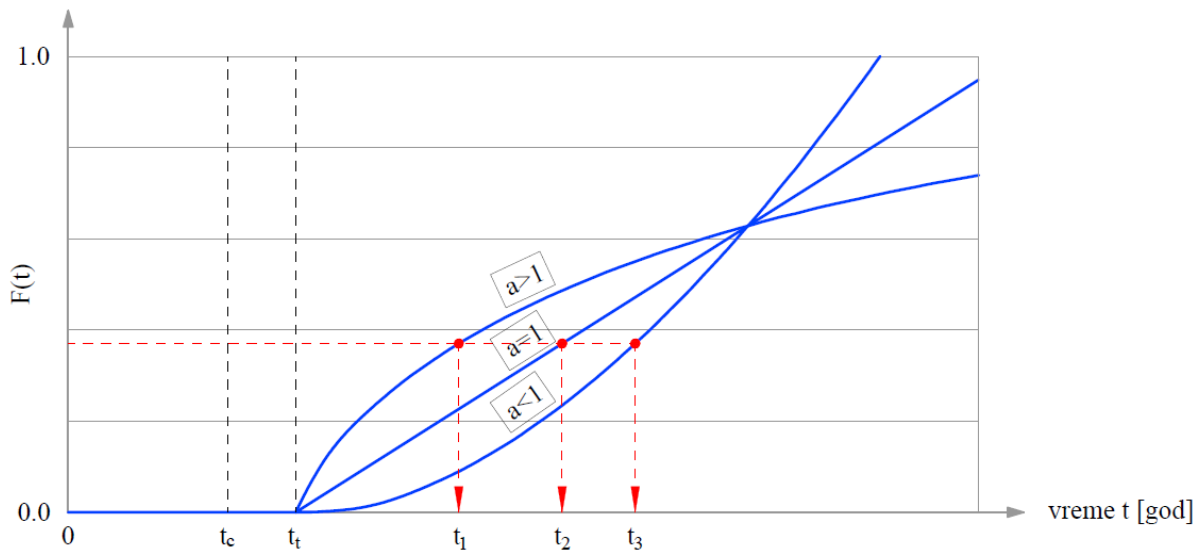
Granično oštećenje ( $\Delta A_{kr}$ ;  $\Delta h_{kr}$ ) je oštećenje pri kome je ugrožena nosivost i funkcionalnost konstrukcije. Trenutak u kome se pojavljuje granično oštećenje ( $t = t_G$ ) predstavlja kraj upotrebnog veka konstrukcije.

Konstrukcija u vremenu  $t = 0$ , odnosno  $t/t_G = 0$  je na početku upotrebe koda je objekat u najboljem mogućem stanju. U trenutku  $t = t_G$ , odnosno  $t/t_G = 1$ , znači da je objekat na kraju upotrebnog veka.

Na slici 117 prikazan je dijagram funkcije otkaza u intervalu vremena  $t \{0, +\infty\}$  [65], [64], [51]. Period vremena od 0 do  $t_c$  predstavlja vreme trajanja zaštitnog sloja, period od  $t_c$  do  $t_t$  tranziciono vreme. Od trenutka  $t_t$  ( $t \{t_t, +\infty\}$ ) nastupa period nastanka i propagacije korozije. Kriva dijagrama nakon vremena  $t_t$ , u zavisnosti od brzine propagacije korozije, može biti linearna ( $a = 1$ ), usporena (konveksna  $a > 1$ ) ili ubrzana (konkavna  $a < 1$ ). Upotrebni vek konstrukcije  $t_1, t_2, t_3$  za svaku krivu se određuje preko vrednosti funkcije  $F(t)$  tako da je:

- za krivu:  $a > 1$ , je  $t_1$ ,
- za krivu:  $a = 1$ , je  $t_2$ ,

- za krivu:  $a < 1$ , je  $t_3$ .



Slika 117 – Faktor (funkcija) otkaza elementa

Način na koji dolazi do promene oštećenja tokom vremena može se odrediti probabilističkim metodama i predstaviti Vajbulovom funkcijom (Weibull function) ili nekom drugom eksponencijalnom funkcijom. Vajbulova funkcija, kod koje su vrednosti za  $t = 0 \Rightarrow R(t) = 1$  i  $t \rightarrow +\infty \Rightarrow R(t) = 0$ , ima sledeći oblik:

$$P_r = R(t) = \exp(-(t/\eta)^k) = e^{-(t/\eta)^k} \quad (36)$$

gde su:

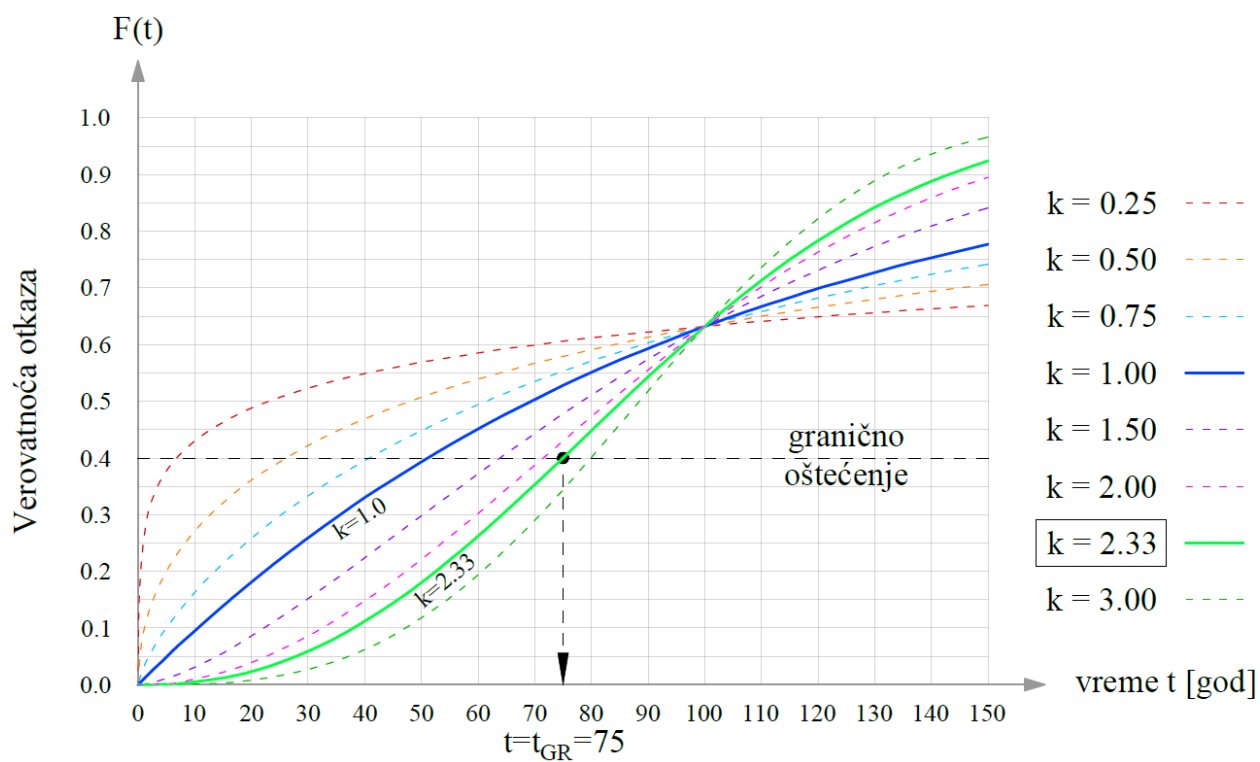
- $\eta$  – parametar razmere [god]
- $t$  – vreme
- $k$  – parametar oblika krive koji zavisi od brzine degradacije.

$\eta$  parametar za posmatranu proragaciju oštećenja kod čeličnih konstrukcija u toku vremena od 100 godina ima vrednost  $\eta = 100$  god.

Faktor  $k$  zavisi od brzine degradacije. Za čelične konstrukcije koje nisu izložene dejstvu atmosferilija za upotrebnii vek se mogu koristiti krive sa sporijim procesom degradacije (slika 118) čije su vrednosti eksponenta  $k = 1,5 - 2,0 - 2,33 - 3,0$ , pri čemu je upotrebnii vek 75 godina [76]. Kao granica degradacije uzima se stanje konstrukcije sa oštećenjima čija je pouzdanost na kraju životnog veka  $R > 50\%$ . U ovom istraživanju za određivanje upotrebnog veka uzeta je

pouzdanost od  $R = 60\%$  (odnosno za  $\frac{\Delta A_{gr}}{A} > 0,5$ , što znači da je  $1 - \frac{\Delta A_{gr}}{A} < 0,5$ , gde je  $A_{gr}$  granična vrednost oštećenja), sa kritičnim oštećenjem sa funkcijom otkaza  $F = 40\%$ , što odgovara vrednosti Weibull-ove funkcije od  $k = 2,33$  (slika 118). Referentna vrednost procesa degradacije je za  $k = 1,0$ , što odgovara upotrebnom vek od 51 godine (slika 118) i krive sa bržim procesom degradacije za nezaštićene konstrukcije je  $k = 0,25 - 0,50 - 0,75$ , gde za  $k = 0,50$  odgovara upotrebnom veku od 26 godina.

U daljem istraživanju će se koristiti upotrebnom veku od 75 godina (granična vrednost  $t_{GR} = 75 \text{ god}$ ), kojoj odgovara Weibulova kriva sa vrednošću eksponenta  $k = 2,33$ .



Slika 118 – Weibulova kriva verovatnoće otkaza

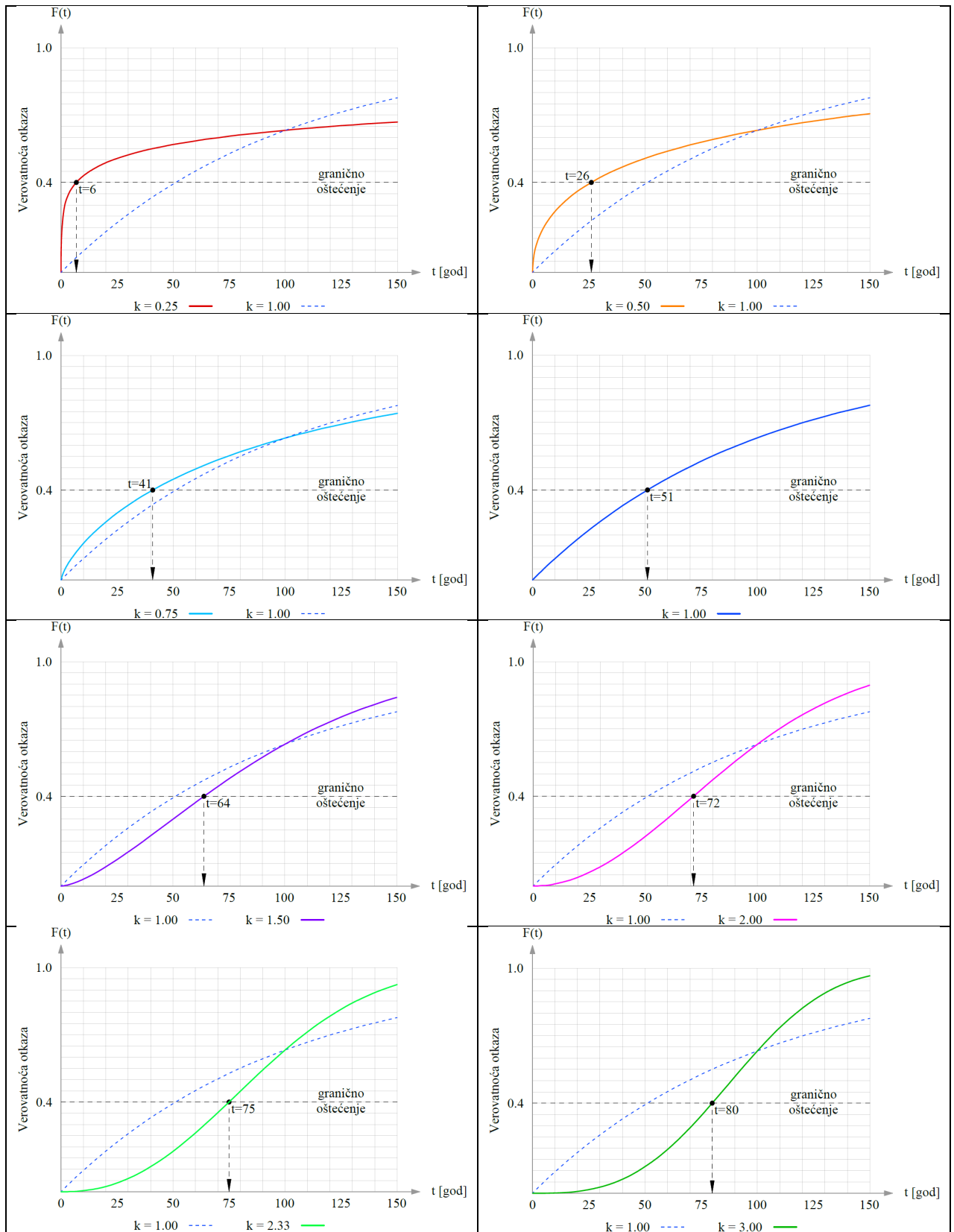
Na slici 118 prikazane su Weibulove krive verovatnoće za različite brzine degradacije  $k = \{0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,50; 2,00; 2,33; 3,00\}$ , dok su u tabeli 18 vrednosti verovatnoće otkaza prema Weibulovoj krivoj za karakteristične vrednosti brzine degradacije u karakterističnom trenutku.

*Tabela 18 – Vrednosti verovatnoće otkaza prema Weibulovoj krivoj za karakteristične vrednosti koeficijenta brzine degradacije*

<i>t</i> [god]	<b>k</b>								
	<b>0,25</b>	<b>0,50</b>	<b>0,75</b>	<b>1,00</b>	<b>1,50</b>	<b>2,00</b>	<b>2,33</b>	<b>2,50</b>	<b>3,00</b>
50	0,431	0,493	0,552	0,607	0,702	0,779	0,820	0,838	0,882
75	0,394	0,421	0,447	0,472	0,522	0,570	0,600	0,614	0,656
100	0,368	0,368	0,368	0,368	0,368	0,368	0,368	0,368	0,368

Dijagrami parametarske studije za granična oštećenja po pojedinim Weibulovim krivama, kod kojih sa povećanjem eksponenta *k* raste životni vek, prikazani su na slici 119.





Slika 119 - Weibulove krive otkaza za različite vrednosti parametra oblika  $k$

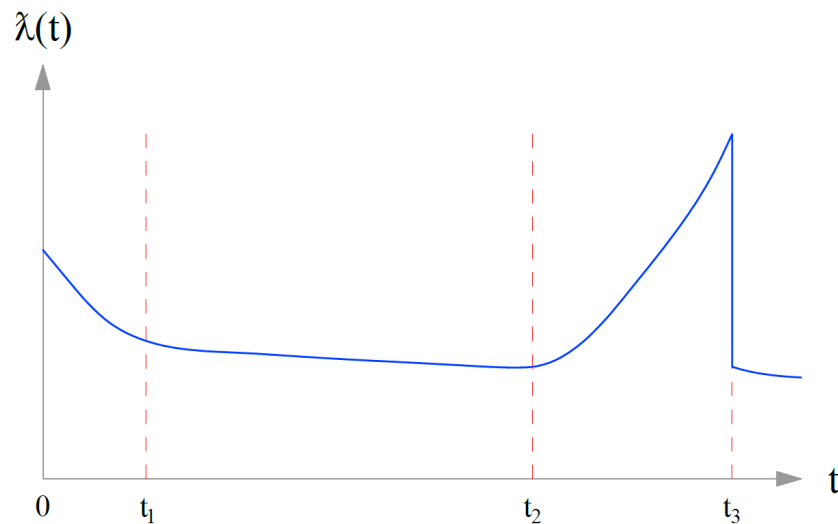
## 7.4. PONAŠANJE KONSTRUKCIJE TOKOM ŽIVOTNOG VEKA

Ponašanje konstrukcije tokom životnog veka konstrukcije može se prikazati funkcijom intenziteta otkaza  $\lambda(t)$  (slika 120):

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (37)$$

ili:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (38)$$



Slika 120 – Funkcija intenziteta otkaza

Na slici 120 uočljive su različite faze u životnom veku konstrukcije. Ranu fazu upotrebe konstrukcije  $(0, t_1)$  odlikuje opadanje funkcije intenziteta konstrukcije. Rana faza upotrebe, u zavisnosti od tipa objekta, može trajati od 6 do 12 meseci. U tom periodu pojavljuju se rani otkazi u vidu početnih oštećenja konstrukcije (prslina, pukotine, deformacije, sleganja), tzv. „naleganje objekta“.

Zatim imamo period „mirnog rada konstrukcije“  $(t_1, t_2)$  tokom kojeg se javljaju tzv. slučajni otkazi konstrukcije koje je teško predvideti i utvrditi, ali se može prihvatiti da je učestalost njihovog javljanja konstantna. Ovaj period, u zavisnosti od tipa objekta, može trajati 20, 30...50 godina.

Narednu fazu ( $t_2, t_3$ ) odlikuje povećanje intenziteta otkaza, čiji je uzrok „trošenje“ objekta (oštećenja, korozija, uvećane prsline, pukotine i deformacije usled prekoračenja nosivosti...) kod koje se povećava verovatnoća otkaza konstrukcije. U trenutku  $t_3$ , kada se izvrši popravka i sanacija objekta, funkcija intenziteta otkaza naglo opada, a zatim dalje nastavlja period „mirnog rada konstrukcije“ do sledećeg povećanja intenziteta otkaza.

Ovakav oblik dijagrama funkcije intenziteta otkaza, koje se još naziva i „KADA“, se javlja kod svih tipova konstrukcija i objekata.

## 7.5. INDEKS OŠTEĆENJA

Za potrebe analize uticaja oštećenja na nosivost direktno zavarenih veza elemenata rešetkastih nosača od šupljih čeličnih profila definisan je indeks oštećenja, koji može da se odredi kao koren srednje kvadratnih odstupanja:

- preko graničnih nosivosti:

$$IO = \sqrt{\frac{(N_1 - N_0)^2}{N_0^2}} \quad (39)$$

- preko površine poprečnog preseka pojasnog štapa u zoni veze:

$$IO = \sqrt{\frac{(A_1 - A_0)^2}{A_0^2}} \quad (40)$$

U tabeli 19 date su veličine i površine analiziranih oštećenja, površine poprečnih preseka pojasnog štapa u zoni veze i granične nosivosti veza dobijenih numeričkom analizom i eksperimentalnom analizom, za uzorke bez oštećenja i sa različitim veličinama oštećenja. Merodavna vrednost za određivanje granične nosivosti nije bilo prekoračenje napona u vezi, već prekoračenje dozvoljene vrednosti deformacije. Dozvoljena vrednost deformacija, prema preporukama Međunarodnog instituta za zavarivanje (IIW) iznosi 3% od širine ( $b_0$ ) / visine ( $h_0$ ) pojasnog štapa.

Tabela 19 – Veličine oštećenja i graničnih nosivosti uzoraka

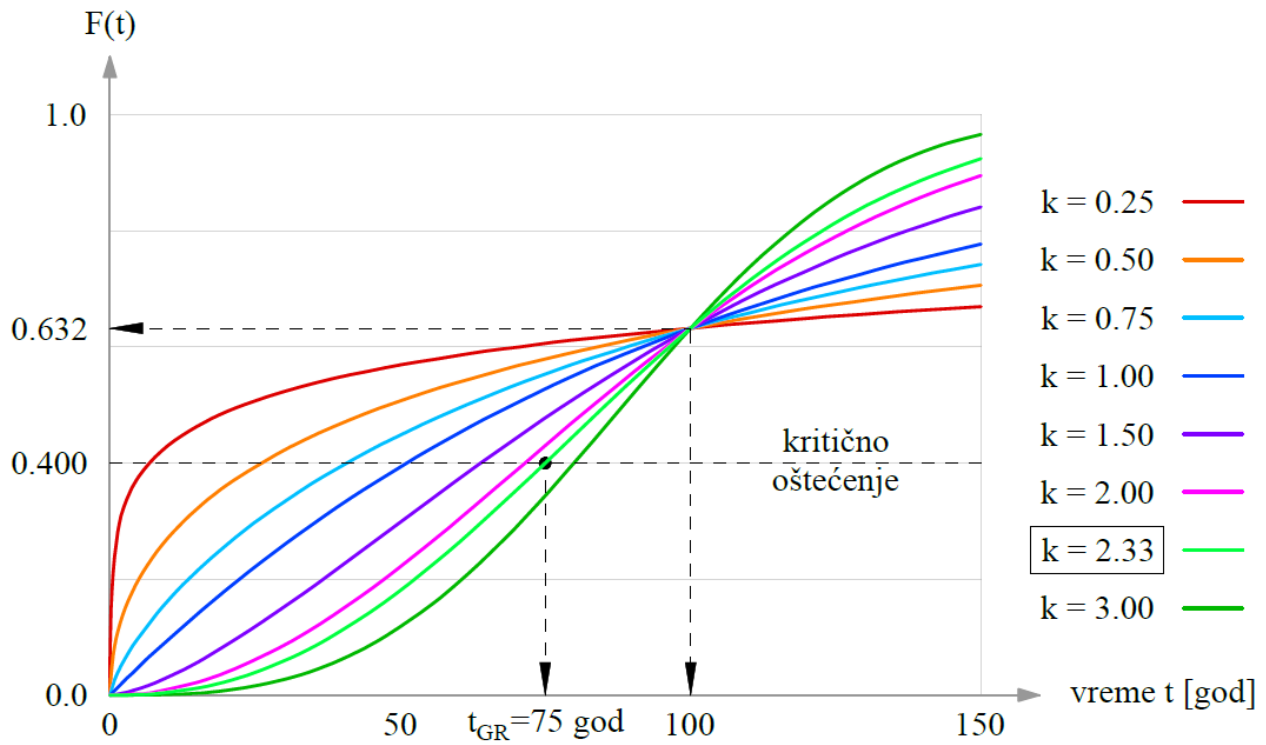
Uzorak	Veličina oštećenja	Površina oštećenja	Površina poprečnog preseka pojasnog štapa u zoni veze	Granična nosivost dobijena primenom numeričke analize MKE	Eksperimentalno određena vrednost granične nosivosti
Bez oštećenja			9,01 cm <sup>2</sup>	86,4 kN	90,7 kN
Oštećenje 1	2 x 2,0/1,5 cm	0,90 cm <sup>2</sup>	8,11 cm <sup>2</sup>	86,2 kN	
Oštećenje 2	2 x 2,0/3,0 cm	1,80 cm <sup>2</sup>	7,21 cm <sup>2</sup>	86,0 kN	90,3 kN
Oštećenje 3	2 x 2,0/4,5 cm	2,70 cm <sup>2</sup>	6,31 cm <sup>2</sup>	84,5 kN	
Oštećenje 4	2 x 2,0/6,0 cm	3,60 cm <sup>2</sup>	5,41 cm <sup>2</sup>	79,8 kN	84,0 kN

U tabeli 20 date su vrednosti indeksa oštećenja dobijenih preko površina poprečnog preseka pojasnog štapa u zoni veze i graničnih nosivosti veze dobijenih numeričkom analizom i eksperimentalnom analizom.

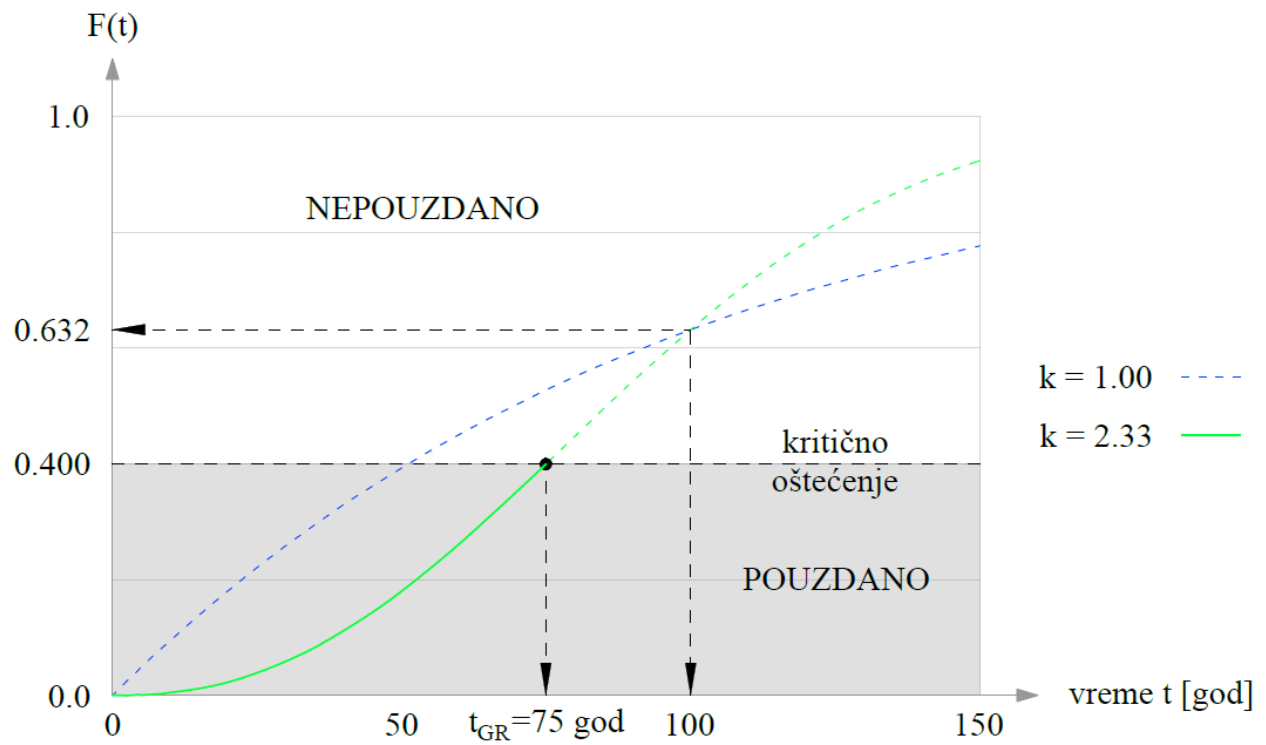
Tabela 20 – Vrednosti indeksa oštećenja

Uzorak	preko površine poprečnog preseka pojasnog štapa u zoni veze	preko granične nosivosti dobijene numeričkom analizom	preko granične nosivosti dobijene eksperimentalnom analizom
Bez oštećenja	0	0	0
Oštećenje 1	0,09989	0,00231	
Oštećenje 2	0,19978	0,00463	0,00441
Oštećenje 3	0,29967	0,02199	
Oštećenje 4	0,39956	0,07639	0,07387

Na osnovu Vejbulove krive sa eksponentom  $k = 2,33$  se zaključuje da za životni vek konstrukcije od 100 godina odgovara funkcija otkaza od 0,632, a funkciji otkaza 0,400 odgovara životni vek konstrukcije od 75 godina (slike 121 i 122).

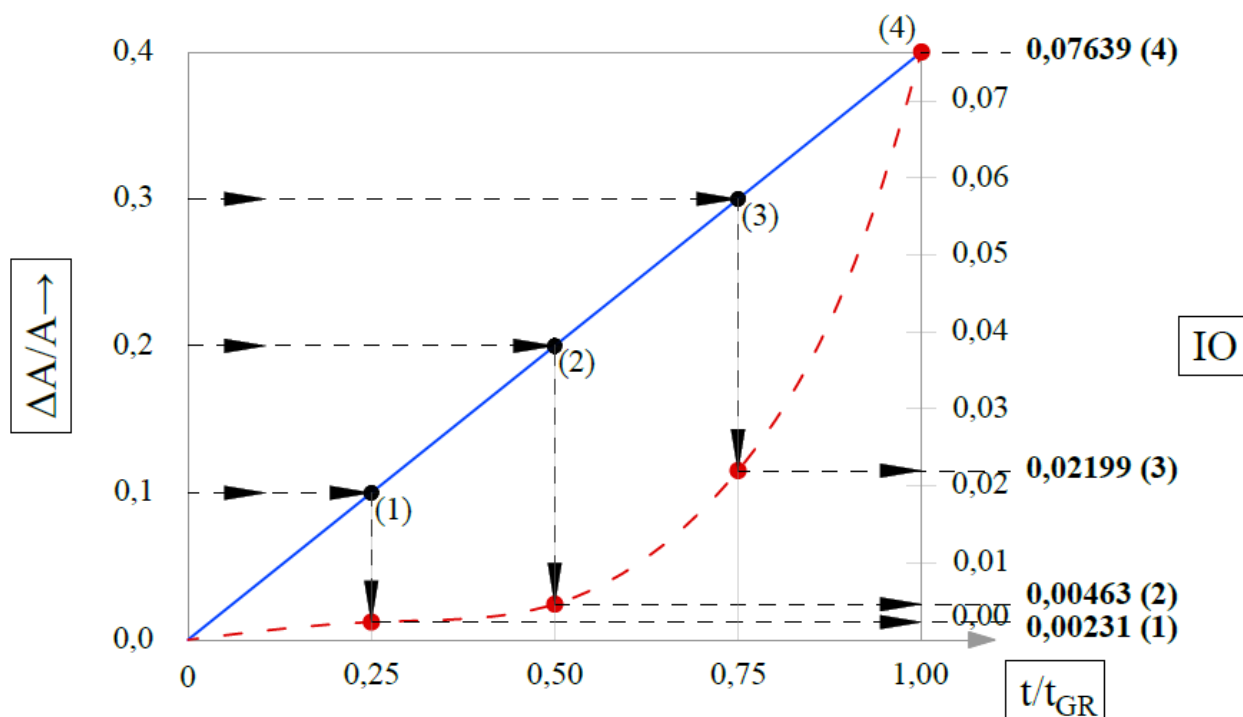


Slika 121 – Funkcija otkaza za različite vrednosti parametra oblika  $k$



Slika 122 – Funkcija otkaza za vrednost parametra oblika  $k=2,33$

Korišćenjem rezultata granične nosivosti veze dobijenih numeričkim i eksperimentalnim putem, odnosno vrednosti indeksa oštećenja (tabela 20), formiran je dijagram zavisnosti faktora oštećenja, faktora vremena i indeksa oštećenja. Na slici 123 dat je dijagram sa vrednostima indeksa oštećenja dobijenih numeričkim putem, dok je na slici 124 dat dijagram sa vrednostima indeksa oštećenja dobijenih numeričkim i eksperimentalnim putem.



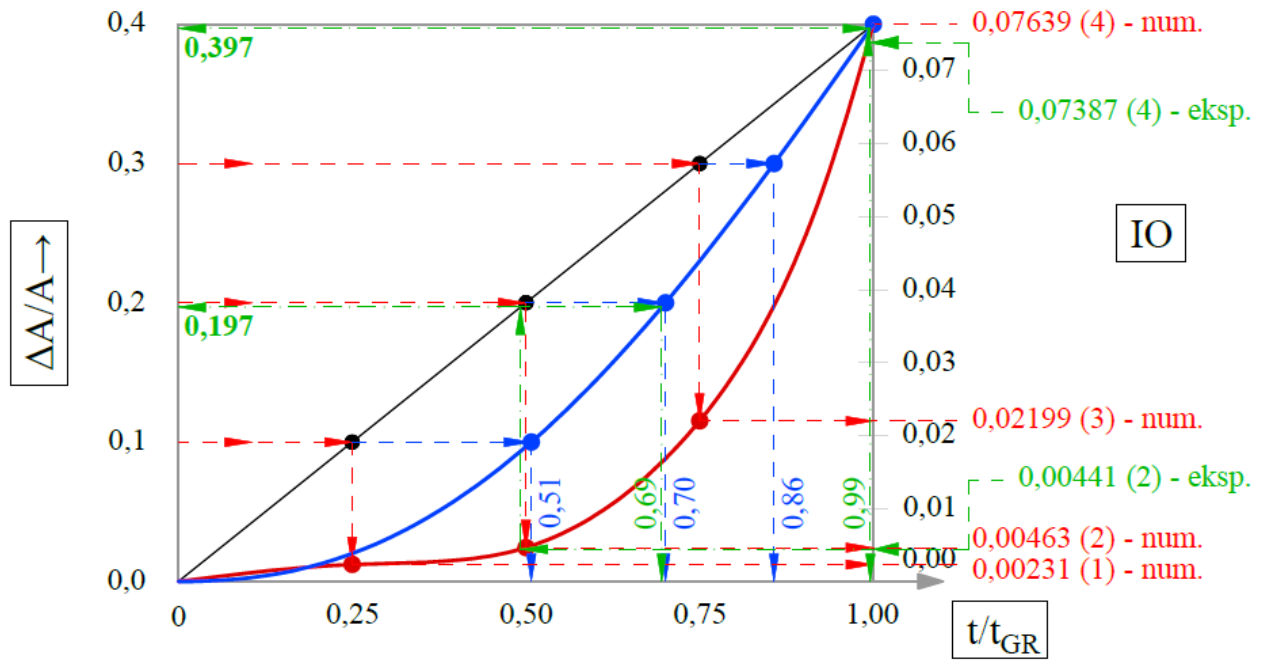
Slika 123 – Određivanje indeksa oštećenja preko faktora oštećenja

Dijagram na slici 124 predstavlja nomogram na kome se, u zavisnosti od toga koji parametar je poznat - faktor oštećenja ( $\Delta A/A$ ), faktor vremena ( $t/t_{GR}$ ), indeks oštećenja ( $IO$ ) – mogu očitati ostali parametri.

Upotrebom ovog nomograma (slika 124) može se doći do sledećih informacija:

1. za poznati faktor oštećenja ( $\Delta A/A$ ) mogu se očitati faktor vremena i indeks oštećenja;
2. za poznati faktor vremena ( $t/t_{GR}$ ) mogu se očitati faktor oštećenja i indeks oštećenja;
3. za poznati indeks oštećenja ( $IO$ ) mogu se očitati faktor oštećenja i faktor vremena.

Nomogramom (slika 124) se može predvideti koliko će biti oštećenje čelične veze i indeks oštećenja u određenom trenutku vremena.



Slika 124 – Nomogram zavisnosti faktora oštećenja, faktora vremena i indeksa oštećenja

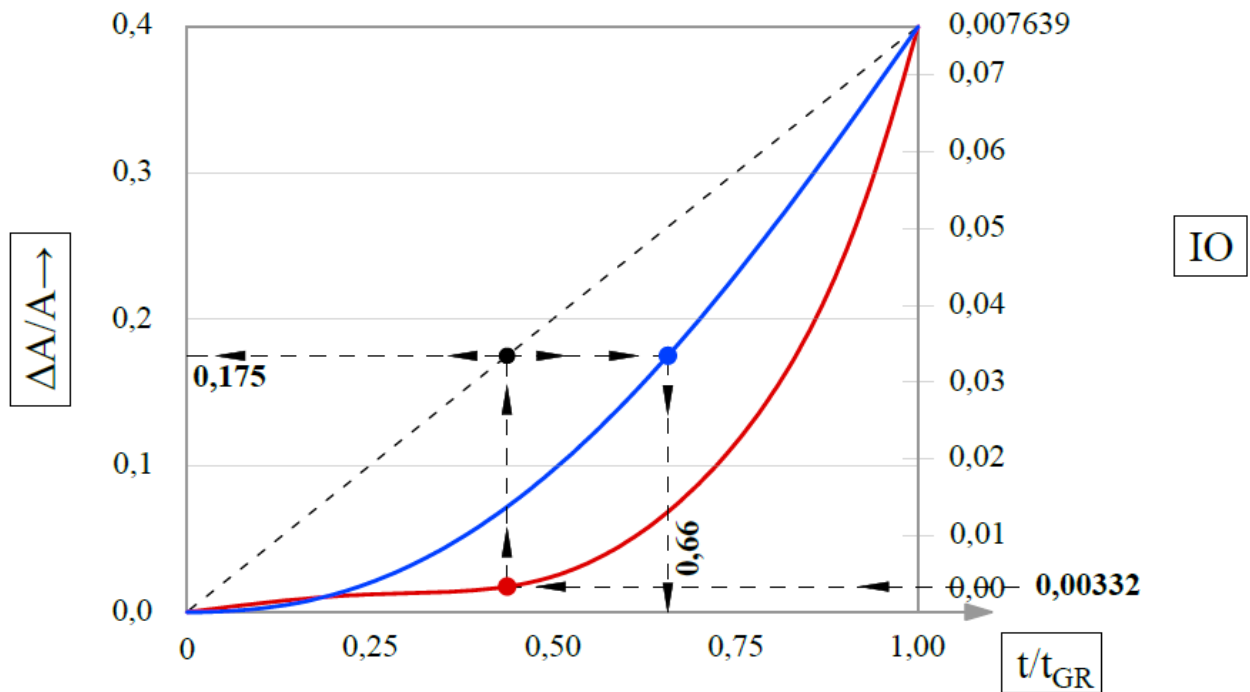
Primer postupaka određivanja nekih od parametara ( $\Delta A/A$ ,  $t/t_{GR}$  ili indeks oštećenja) prikazan je na slikama 125 i 126 i 127.

Za slučaj poznatog indeksa oštećenja dolazimo do sledećih vrednosti (slika 125):

poznato:  $IO = 0,00332$

$\rightarrow \Delta A/A = 0,175$

$\rightarrow t/t_{GR} = 0,66$



Slika 125 – Primer određivanja faktora oštećenja i faktora vremena za poznati indeks oštećenja

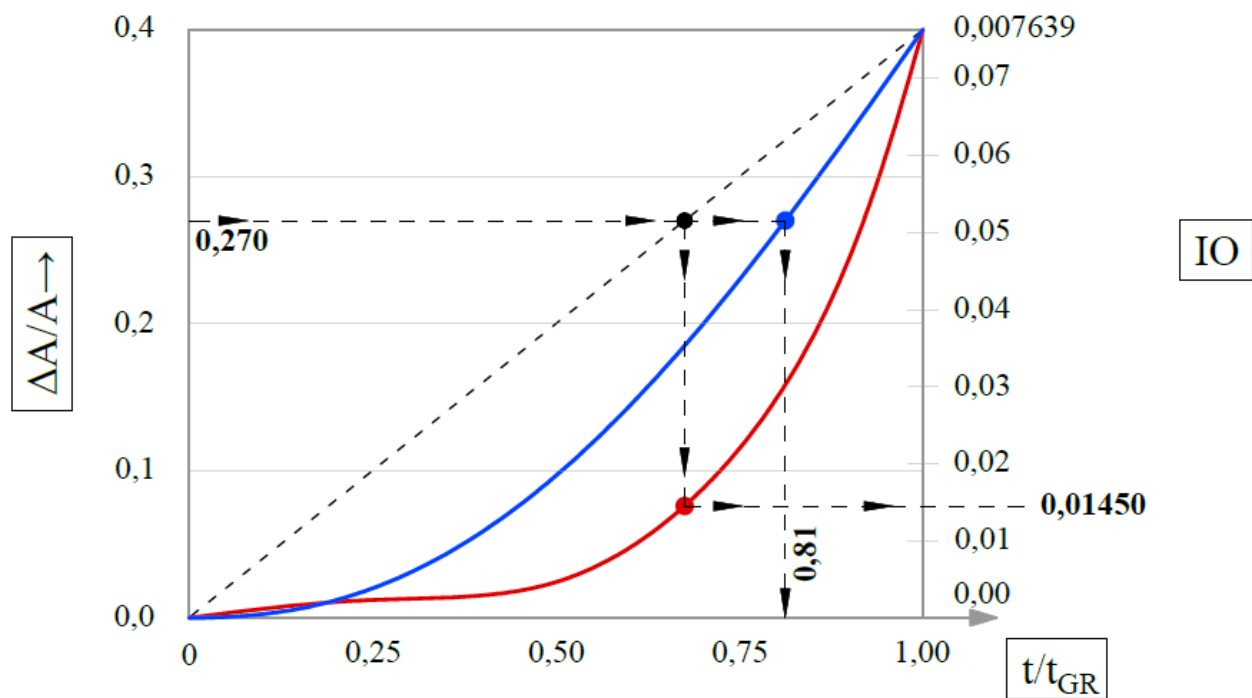


Za slučaj poznatog faktora oštećenja dolazimo do sledećih vrednosti (slika 126):

poznato:  $\Delta A/A = 0,270$

→  $IO = 0,01450$

→  $t/t_{GR} = 0,81$



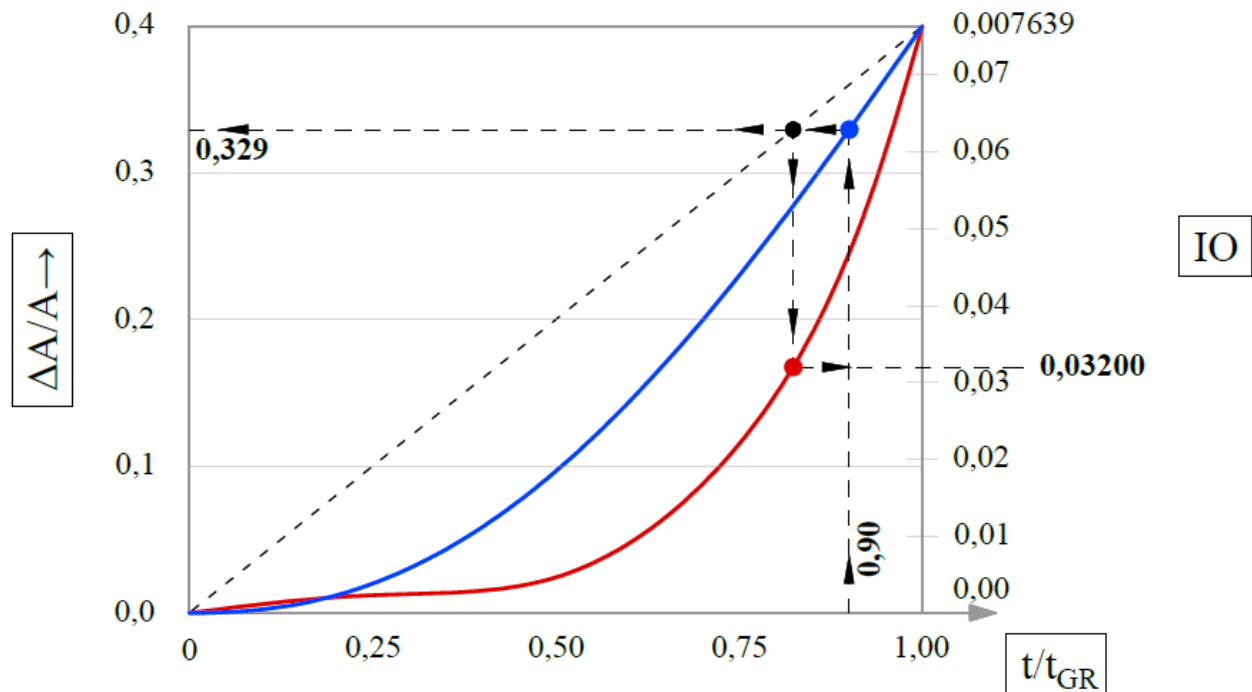
Slika 126 - Primer određivanja indeksa oštećenja i faktora vremena za poznati faktor oštećenja

Za slučaj poznatog faktora vremena dolazimo do sledećih vrednosti (slika 127):

poznato:  $t/t_{GR} = 0,90$

→  $IO = 0,03200$

→  $\Delta A/A = 0,329$



Slika 127 - Primer određivanja faktora oštećenja i indeksa oštećenja za poznati faktor vremena

## 8. ZAKLJUČAK

Primena šupljih profila kao konstruktivnih elemenata počela je sredinom dvadesetog veka, kada se ovladalo procesom proizvodnje šupljih profila. Zahvaljujući prednostima koje sa sobom nose, do kraja dvadesetog veka šuplji profili povećavaju svoj udeo u izgradnji objekata od čeličnih konstruktivnih elemenata. Posebno se izdvajaju šuplji profili pravougaonog i kvadratnog poprečnog preseka koji, ne samo da imaju niz prednosti u odnosu na otvorene profile, već imaju i prednosti u odnosu na šuplje profile kružnog poprečnog preseka.

Primena šupljih profila pravougaonog i kvadratnog poprečnog preseka svoju prednost posebno ostvaruje pri izradi rešetkastih nosača, kako ravanskih, tako i prostornih rešetkastih nosača, kod kojih do izražaja dolaze benefiti šupljih profila. Za razliku od tradicionalnih veza elemenata rešetkastih nosača ostvarenih posredstvom čvornih limova, veze direktno zavarenih elemenata rešetkastih nosača od šupljih profila zahtevaju drugačiji pristup prilikom konstruisanja i dimenzionisanja. Raspored napona i lokalnih deformacija kod ovakvih tipova veza je nelinearan i dosta složen. Da bi se odredili optimalni proračunski modeli i adekvatni teorijski principi kojima se dokazuje realno ponašanje ovakvih veza, sproveden je veliki broj numeričkih i eksperimentalnih istraživanja u poslednjih tridesetak godina.

Poseban slučaj, do sada nedovoljno istražen, predstavlja oštećenje čeličnog profila u zoni veza rešetkastih nosača. Oštećenje čelika ima značajan uticaj na ispunjavanje predviđene funkcije čeličnih elemenata. Uzroci oštećenja mogu biti različiti, od mehaničkih izazvanih preopterećenjem ili udarom u vidu pukotina do deteriorativnih agresivnih hemijskih i bioloških dugotrajnih korozivnih promena. U zavisnosti od veličine i prirode, oštećenja čeličnih konstrukcija mogu dovesti do oštećenja drugih konstruktivnih i nekonstruktivnih delova objekta, ugroziti funkcionisanje konstrukcija, a u krajnjem slučaju i bezbednost konstrukcije. Zbog toga je poznavanje procesa i mehanizama oštećenja čeličnih konstrukcija, kao i njihovih uzroka i efekata, od bitnog značaja za trajnost čeličnih konstrukcija. Ovaj rad se bavi numeričkom i eksperimentalnom analizom ponašanje tipa „Y“ veza kod ravanskih rešetkastih nosača opterećenih na dejstvo aksijalne sile pri statičkom opterećenju, sa posebnim osvrtom na uticaj oštećenja. U modelu je izabrano inicijalno oštećenje u čvoru u videu „male“ vertikalne pukotine oblika uskog pravougaonika i zatim propagacija tog oštećenja izražena po visini pojasnog štapa.

U ovom radu prikazani su rezultati numeričkog i eksperimentalnog istraživanja direktno zavarene „Y“ veze pojasnog štapa i dijagonale od RHS profila pri propagaciji oštećenja na pojasnom štapu, kao i veze sa elementima bez oštećenja. Rezultati, kako numeričkog, tako i eksperimentalnog istraživanja, prikazani su numerički i grafički na dijagramima. Rezultati numeričkog i eksperimentalnog istraživanja se u velikoj meri poklapaju.

Eksperimentalno istraživanje izvršeno je na uzorcima bez oštećenja i uzorcima sa oštećenjem 2 i oštećenjem 4. Eksperimentalni rezultati su potvrdili rezultate dobijene numeričkim putem. Potvrdilo se da sa porastom oštećenja dolazi do veće deformacije elemenata veze pri istim intenzitetima aksijalnih sila, a samim tim i do pada granične nosivosti veze. Pomeranja tačaka, odnosno deformacija veze pri eksperimentalnom ispitivanju se događaju pri većem intenzitetu aksijalne sile. Oblik dijagrama eksperimentalnih rezultata prati oblik rezultata dobijenih numeričkim putem, uz nešto veće vrednosti intenziteta aksijalnih sila.

U radu se koristi metoda konačnih elemenata (MKE) pomoću koje se analizira složeno stanje napona i deformacija u čvoru rešetke, što je analitičkim metodama nemoguće. Eksperimentalna analiza potvrđuje rezultate proračuna za određeni broj usvojenih parametara usvojenog MKE modela.

Granična nosivost veze dostignuta je prema iskorišćenju deformacija lokalne plastifikacije površine preseka pojasnog elementa, odnosno pri dostizanju granične nosivosti veze. Oblik loma pri dostizanju granične nosivosti veze spada u grupu a) [83] lom plastifikacijom površine pojasa ili njegovog čitavog preseka, plastični lom površine pojasa ili plastični lom poprečnog preseka pojasa. Granična nosivost veze je, prema preporukama Međunarodnog instituta za zavarivanje (IIW), definisana u iznosu od 3% od širine ( $b_0$ ) / visine ( $h_0$ ) / prečnika ( $d_0$ ) kojoj odgovara granična nosivost veze.

Prilikom ispitivanja vizuelno nije primećena pojava prslina u zonama najvećih deformacija veze.

Istraživanjem se došlo do zavisnosti granične nosivosti i stepena oštećenja usled propagacije oštećenja, što u daljem istraživanju, formiranjem indeksa oštećenja, omogućuje primenu metoda proračuna prema životnom veku konstrukcije.

Na osnovu iznetog istraživanja numeričkom i eksperimentalnom analizom može se zaključiti da sa porastom oštećenja pojasnog elementa veze, granična nosivost veze nelinearno opada [60]. Pad

granične nosivost veze uzoraka sa oštećenjem od 10% i 20% je neznatan i iznosi cca 0,5%, dok na ispitivanim uzorcima sa oštećenjem poprečnog preseka pojasnog štapa od 40% pad granične nosivosti veze iznosi svega cca 8%. Ovo ukazuje na dobro ponašanje veze pri izabranim oštećenjima. Istraživanjem se došlo do zavisnosti veličine granične nosivosti i stepena oštećenja usled propagacije oštećenja, što pri monitoringu stanja konstrukcije omogućuje procenu nosivosti konstrukcije u eksploataciji.

Merenje napona u domenu elastičnog ponašanja izvršeno je na 3 uzorka i to na jednom neoštećenom uzorku, jednom uzorku sa oštećenjem 2 i jednom uzorku sa oštećenjem 4. Rezultati merenih napona pri eksperimentalnoj analizi pokazuju da maksimalne vrednosti napona u merenim tačkama prekoračuju normiranu granicu razvlačenja čelika i kreću se u rasponu od cca 25-30 kN/cm<sup>2</sup>. Na mernim mestima gde je došlo do prekoračenja normirane granice razvlačenja, kao i na nekim mernim mestima sa nižim vrednostima napona, imamo pojavu zaostalih deformacija, što je rezultat prekoračenja granice proporcionalnosti. Ponašanje čelika iza granice proporcionalnosti je nelinearno i prati ga pojava trajnih plastičnih deformacija u ovoj oblasti.

Projektovani upotrebni vek konstrukcije je pretpostavljeni period vremena za koji će konstrukcija ili konstruktivni element vršiti svoju namenu, uz predviđeno održavanje, ali bez značajnijih popravki [47], [88]. Konstrukcija mora da bude proračunata i izvedena, na takav način, da ona, tokom svog predviđenog veka, sa odgovarajućim stepenima pouzdanosti i ekonomično, može da prihvati sva dejstva i uticaje, za koje je verovatno da mogu da nastanu u toku izvođenja i eksploatacije, kao i da ostane podobna za upotrebu koja ja zahtevana [79]. U zavisnosti od predviđenog upotrebnoeg veka konstrukcije, Evrokod 0 predviđa klasifikaciju konstrukcija u jednu od 5 kategorija proračunskog eksploatacionog veka, a prema značaju konstrukcije ili njenih delova.

Sposobnost objekta da ispuni funkciju za koju je projektovana za definisani period vremena pod definisanim uslovima je pouzdanost. Pouzdanost objekta podrazumeva sigurnost, funkcionalnost i trajnost. Za potrebe analize oštećenja na nosivost direktno zavarenih veza elemenata rešetkastih nosača od šupljih čeličnih profila, definisan je indeks oštećenja (*IO*). Korišćenjem rezultata granične nosivosti veze dobijenih numeričkim i eksperimentalnim putem, odnosno vrednosti indeksa oštećenja, formiran je dijagram zavisnosti faktora oštećenja, faktora vremena i indeksa

oštećenja – nomogram. Uz pomoć ovog nomograma, a u zavisnosti od poznatih parametara, mogu se očitati faktor oštećenja, faktor vremena ili indeks oštećenja.

## **8.1. ORIGINALNI NAUČNI DOPRINOS**

Istraživanja ove doktorske disertacije su uticaji oslabljenja čvora od inicijalnih oštećenja do propagacije oštećenja tokom vremena eksploatacije konstrukcije, na nosivost direktno zavarenih veza elemenata rešetkastih nosača od šupljih čeličnih profila. Analiza napona i deformacija na modelima sa oštećenjima pokazuje da su za sva predstavljena modela merodavne deformacije. Granična vrednost deformacije je sračunata za iznos od 3% od visine oslabljenog poprečnog preseka pojasnog štapa, kojoj odgovara granična nosivost veze na dijagramu sila – deformacija.

Naučni doprinos disertacije se ogleda u formiranju originalnog matematičkog i eksperimentalnog modela u utvrđivanju ponašanja direktno zavarenih veza elemenata rešetkastih nosača od šupljih čeličnih profila i zavisnosti granične nosivosti od stepena oštećenja. Rezultati ovog istraživanja do sada nisu bili dovoljno poznati naučnoj javnosti. Rezultati ovog istraživanja pokazuju u kojoj meri propagacija oštećenja čeličnih elemenata utiču na nosivost veza rešetkastih nosača od šupljih čeličnih profila.

Još jedan značajan doprinos, do koga se došlo istraživanjem u ovoj disertaciji, je formiranje međusobne zavisnosti propagirajućeg oštećenja i indeksa oštećenja tokom vremena, uz pomoć koje se može, pri pojedinačnoj oceni stanja konstrukcije ili monitoringu, omogućiti procena nosivosti konstrukcije u eksploataciji.

## **8.2. MOGUĆI PRAVCI BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA**

Na osnovu rezultata istraživanja prikazanih u ovoj doktorskoj disertaciji, kao i na osnovu pregleda dostupne literature, mogu se navesti neki od mogućih pravaca daljih istraživanja:

- istraživanje ponašanja direktno zavarenih veza rešetkastih nosača od elemenata otvorenih poprečnih preseka;
- istraživanje ponašanja direktno zavarenih veza rešetkastih nosača za drugačije tipove veza: K, KT, N, T, X, DK, KK, X, TT, DY, XX;
- istraživanje ponašanja direktno zavarenih veza rešetkastih nosača za drugačije oblike, veličine i položaje oštećenja.

## LITERATURA

- [1] Alpsten G.: Uncertainties and Human Errors in the Design and Execution of Steel Structures, IABSE Symposium Report, Vol. 107, No. 1, International Association for Bridge and Structural Engineering, 2017.;
- [2] Androić B., Dujmović D., Džeba I.: Čelične konstrukcije 1, IA Projektiranje, Zagreb, 2009.;
- [3] Androić B., Dujmović D., Džeba I.: Čelične konstrukcije 2, IA Projektiranje, Zagreb, 2007.;
- [4] Androić B., Dujmović D., Džeba I.: Inženjerstvo pouzdanosti 1, IA Projektiranje, Zagreb, 2006.;
- [5] ANSYS – Software manual
- [6] Bittencourt M.C., Lima L.R.O., De Vellasco P.C.G.S., Silva J.G.S., Neves L.G.C.: A numerical analysis of tubular joints under static loading, Proceedings of APCOM'07 in conjunction with EPMESC XI, Kyoto, Japan, 2007.;
- [7] Bouwkamp J.G.: Concept of tubular-joint design, Journal of the Structural Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 90, No. ST2, pp. 77-101., 1964.;
- [8] Brčić V., Čukić R.: Eksperimentalne metode u projektovanju konstrukcija, Građevinska knjiga, Beograd, 1988.;
- [9] Brodka J.: Stahlrohrkonstruktionen, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln-Braunsfeld, Germany, 1968., ISBN 978-3481109912;
- [10] Bronzova M., Garifullin M., Mela K.: Influence of fillet welds on structural behavior of RHS T joints, International Symposium on Tubular Structure, pp. 590-597, 2019.;
- [11] Buđevac, D.: Metalne konstrukcije u zgradarstvu, Građevinska knjiga, peto izdanje, 2009.;
- [12] Cascini L., Portioli F., Landolfo R.: Durability design of metal structures based on lifetime safety factor method, In Proc. Int conf on Sustainable Construction, Materials and Practices, SB07, Lisabon, Portugal, pp. 522-529, 2007.;
- [13] CEN – European Committee for Standardization (2005): EN 1993 Design of Steel Structures – All Parts;
- [14] Chavan V., Nimbalkar V., Jaiswal A.: Economic Evaluation of Open and Hollow Structural Sections in Industrial Trusses, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 3, Issue 2, February 2014., ISSN: 2319-8753;



- [15] Cleveland R.M., Ghosh A.K.: Inelastic Effects on Springback in Metals, International Journal of Plasticity 18, ELSEVIER, 2002.;
- [16] Debeljković M.: Čelične konstrukcije u industrijskim objektima, Građevinska knjiga, Beograd, 1995.;
- [17] Di Sarno L., Majidian A., Karagiannakis G.: The Effect of Atmospheric Corrosion on Steel Structures: A State-of-the-Art and Case-Study, Buildings, 2021.;
- [18] Dobrić J.: Analiza ponašanja čvorova rešetkastih nosača od šupljih profila, Magistarski rad, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2007.;
- [19] Dutta D., Wardenier J., Yeomans N., Sakae K., Bucak Ö., Packer J.A.: Design guide for fabrication, assembly and erection of hollow section structures, TÜV-Verlag, Köln, 1998., ISBN 3-8249-0443-8;
- [20] Dutta D., Würker K.G.: Handbuch Hohlprofile in Stahlkonstruktionen, Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, Germany, 1988., ISBN 3-88585-528-3;
- [21] Dutta D.: Hohlprofilkonstruktionen, Ernst & Sohn, Berlin, Germany, 1999. ISBN 3-433-01310-1;
- [22] Dutta D.: Structures with hollow sections, Wiley-VCH Verlag GmbH, Berlin, Germany, 2002., ISBN 978-3-433-01458-5;
- [23] EB 12500: 2000: Protection of metallic materials against corrosion – Corrosion likelihood in atmospheric environment – Classification, determination and estimation of corrosivity of atmospheric environments;
- [24] EN 10210-1:2006 ECISS/TC 103: Hot finished structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels – Part 1: Technical delivery conditions;
- [25] EN 10210-2:2006 ECISS/TC 103: Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels – Part 2: Tolerances, dimensions and sectional properties;
- [26] EN 10210-2:2006 ECISS/TC 103: Hot finished structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels – Part 2: Tolerances, dimensions and sectional properties;
- [27] EN 10219-1:2006 ECISS/TC 103: Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels – Part 1: Technical delivery conditions;
- [28] EN ISO 25817:1992 – Lučno zavareni spojevi u čeliku – Uputstvo za nivoe kvaliteta za imperfekcije, 1992.;
- [29] EN ISO 6892-1:2009, ECISS/TC 101: Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature (ISO 6892-1:2009);
- [30] ENV 1993-1-1:1992 Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, 1992;

- [31] Garifullin M., Bronzova M., Pajunen S., Mela K., Heinisuo M.: Initial axial stiffness of welded RHS T joints, *Journal of Constructional Steel Research*, 153 459-472, 2019.;
- [32] Garifullin M., Pajunen S., Mela K., Heinisuo M., Huvala J.: Initial in-plane rotational stiffness of welded RHS T joints with axial force in main member, *Journal of Constructional Steel Research*, 139, pp. 353-362, 2017.;
- [33] Garifullin M., Pajunen S., Mela K., Heinisuo M.: 3D component method for welded tubular T joints, *Tubular Structures XVI: Proceedings of the 16th International Symposium for Tubular Structures*, pp. 165-173, 2017. ;
- [34] Garifullin M., Pajunen S., Mela K., Heinisuo M.: Finite element model for rectangular hollow section T joints, *Rakenteiden Mekaniikka (Journal of Structural Mechanics)*, Vol. 51, No 3, pp. 15-40, 2018.;
- [35] Hoffman K.: *An Introduction to Measurements using Strain Gages*, Hottinger Balldwin Messtechnik GmbH, Darmstad, 2004.;
- [36] Hsiao P. C., Hayashi K., Inamasu H., Luo Y. B., Nakashima M: Development and testing of naturally buckling steel braces, *Journal of Structural Engineering*, 142(1), 2016.;
- [37] <https://cathwell.com/app/uploads/2019/09/Corrosion-cell-1-e1568876193829-1024x422.jpg>
- [38] <https://civildigital.com/wp-content/uploads/2014/06/0512-is-2-300x225.jpg>
- [39] [https://de.wikipedia.org/wiki/Medienbr%C3%BCcke#/media/Datei:Medienbruecke\\_Muenchen-02.JPG](https://de.wikipedia.org/wiki/Medienbr%C3%BCcke#/media/Datei:Medienbruecke_Muenchen-02.JPG)
- [40] [https://en.wikipedia.org/wiki/Fatigue\\_%28material%29#/media/File:Pedalarm\\_Bruch.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Fatigue_%28material%29#/media/File:Pedalarm_Bruch.jpg)
- [41] <https://hgg-group.com/machines/cnc-pipe-cutting-line-rbpc/rbpc-rollerbed-pipe-cutting-machine/>
- [42] <https://journeyz.co/the-15-most-famous-truss-bridges-around-the-world/>
- [43] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1b/DuctileFailure.jpg>
- [44] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cd/Sgnationalstadium.png>
- [45] [https://www.mannesmann-stainless-tubes.com/company/history/;](https://www.mannesmann-stainless-tubes.com/company/history/)
- [46] Hu X., Chen R., Xiang Y., Chen Y., Li Q.: Mechanical Behavior of Damaged H-Section Steel Structure, *Advances in Civil Engineering*, 2021.;
- [47] ISO 2394 – General principles on reliability for structures, 2015.;
- [48] ISO 8044: 2020: Korozija metala i legura – Rečnik, Institut za standardizaciju Srbije, 2020.;

- [49] Jamm W.: Form strength of welded tubular connections and tubular structures under static loading, *Schweissen und Schneiden*, Vol. 3, Germany, 1951.;
- [50] Khan A.S., Wang X.: *Strain Measurements and Stress Analysis*, Prentice Hall International, London, 2001.;
- [51] Kim D.K., Wong E.W.C., Cho N.K.: An advanced technique to predict time-dependent corrosion damage of onshore, offshore, nearshore and ship structures: Part I= generalization, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 12(1), 657-666, 2020.;
- [52] Klinesmith D.E., McCuen R.H., Albrecht P.: Effect of environmental condition rates, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(2), 121-129, 2007.;
- [53] Landolfo, R., Cascini, L., Portioli, F.: Modeling of metal structure corrosion damage: A state of the art report. *Sustainability*, 2(7), 2163-2175, 2010.;
- [54] Lee M.M.K.: Strength, stress and fracture analyses of offshore tubular joints using finite elements, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 51.3, pp. 265-286, 1999.;
- [55] Lie S.T., Lee C.K., Wong S.M.: Model and mesh generation of cracked tubular Y-joints, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.70.2, pp. 161-184, 2003.;
- [56] Lu L.H., Winkel G.D., Yu Y., Wardinier J.: Deformation limit for the ultimate strength of hollow section joints, *Proceedings 6th International Symposium on Tubular Structures*, Melbourne, Australia, Tubular Structures VI, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 341-347, 1996.;
- [57] Mang F., Bucak Ö.: *Hohlprofilkonstruktionen*, *Stahlbau-Handbuch*, Bd. I, Stahlbau-Verlag, Köln, Germany, 1983.;
- [58] Marković Z.: *Granična stanja čeličnih konstrukcija prema Evrokodu*, *Akademski misao*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2014.;
- [59] Marshall P.W., Toprac A.A.: Basis for tubular design, ASCE preprint 2008., April 1973., *Welding Journal*, U.S.A., 1974.;
- [60] Milošević M., Stojić D., Živković S., Jovanović D.: Numerical and experimental analysis of a steel „Y“ joint with damage, *Građevinar*, 2023., (Letter of acceptance, Paper ID: 3529-2022, 28.04.2023.)
- [61] Natarajan M., Toprac A.A.: *Studies on tubular joints in Japan: Review of research reports*, University of Texas Report, U.S.A., 1968.;
- [62] Natarajan M., Toprac A.A.: *Studies on tubular joints in USA, Review of research reports*, Structures Fatigue Research Laboratory, The University of Texas, Austin, USA, 1969.;

- [63] Packer J.A., Wardenier J., Kurobane Y., Dutta D., Yeomans N.: Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading, TÜV-Verlag, Köln, 1992., ISBN 3-8249-0089-0;
- [64] Paik J.K., Thayamballi A.K.: Ultimate limit state design of steel-plated structures, John Wiley & Sons, 2003.;
- [65] Paik J.K., Thayamballi A.K.: Ship-shaped offshore installations: design, building and operation, Cambridge University Press, 2007.;
- [66] Pasternak H., Hoch H.U., Füg D.: Stahltragwerke im Industriebau, John Wiley & Sons, 2010.;
- [67] Pelletier H., Krier J., Cornet A., Mille P.: Limits of using bilinear stress-strain curve for finite model element modeling of nanoindentation response on bulk materials, Thin Solid Films, Vol.379.1-2, pp. 147-155, 2000.;
- [68] Pineau A., Benzerga A. A., Pardoën T.: Failure of metals I: Brittle and ductile fracture, Acta Materialia, 107, 424-483, 2016.;
- [69] Popa A.R., Topličić Ćurčić G., Živković S.: Application of modern types of steel in construction from the aspect of material properties according to Eurocode 3, Facta Univesitatis, Series: Architecture and Civil Engineering, Vol. 18, N° 3, pp. 309-318, 2020., <https://doi.org/10.2298/FUACE210127021P>;
- [70] Pravilnik za građevinske konstrukcije, „Sl. glasnik RS“, br. 89/2019, 52/2020 i 122/2020;
- [71] Pržulj M.: Mostovi: koncipiranje, projektovanje, konstruisanje, pouzdanost, građenje, gospodarenje, obnova, Udruženje “Izgradnja”, 2014;
- [72] Puthli R.S.: Hohlprofilkonstruktionen aus Stahl nach DIN V ENV 1993 (EC3) und DIN 18 800 (11.90), Werner Verlag GmbH & Co. K.G., Düsseldorf, Germany, 1998., ISBN 3-8041-2975-7;
- [73] Qin G. C., Lan T., Qin Q., Xu S. H., Zhang Z. X.: Degradation model and evaluation criteria for the seismic behavior of corrosion H-section steel column, KSCE Journal of Civil Engineering, 2019.;
- [74] Rautaruukki: Design Handbook for Rautaruukki Structural Hollow Sections, Hämeenlinna, Finland, 1998., ISBN 952-5010-22-8;
- [75] Rondal J., Würker K.-G., Dutta D., Wardenier J., Yeomans N.: Structural stability of hollow sections, Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, 1992.;
- [76] Sansom M., Meijer J.: Life-cycle assessment (LCA) for steel construction, Eur, (20570), 1-160, 2002.;

- [77] Schoefs F., Correia M. J., Perna H., Manuela Salta M., Gaillet L., Patricio H.: Duratinet: Maintenance and Repair of Transport Infrastructure – Technical Guide: Steel Structures – Part III, Deterioration, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Divisão de Divulgação Científica e Técnica, Lisboa, Portugal, 2012.;
- [78] So K.K., Cheung M., Zhang E.X.: Life-cycle management strategy on steel girders in bridges, Hindawi Publishing Corporation, Advances in Civil Engineering, 2012.;
- [79] SRPS EN 1990:2012, Evrokod 0 – Osnove projektovanja konstrukcija, Institut za standardizaciju Srbije, 2012.;
- [80] SRPS EN 1993-1-1:2012, Evrokod 3 – Projektovanje čeličnih konstrukcije – Deo 1-1: Opšta pravila i pravila za zgrade, Institut za standardizaciju Srbije, 2012.;
- [81] SRPS EN 1993-1-2: 2012, Evrokod 3 – Projektovanje čeličnih konstrukcija – Deo 1-2: Projektovanje konstrukcija na dejstvo požara, Institut za standardizaciju Srbije, 2012.;
- [82] SRPS EN 1993-1-4:2012: Evrokod 3 – Projektovanje čeličnih konstrukcija, Deo 1-4: Opšta pravila – Dodatna pravila za nerđajuće čelike, Institut za standardizaciju Srbije, 2012.;
- [83] SRPS EN 1993-1-8:2012, Evrokod 3 – Projektovanje čeličnih konstrukcija – Deo 1-8: Projektovanje veza, Institut za standardizaciju Srbije, 2012.;
- [84] SRPS EN ISO 12944-1:2018: Boje i lakovi – Zaštita od korozije čeličnih konstrukcija zaštitnim sistemima boja – Deo 1: Opšti uvod, Institut za standardizaciju Srbije, 2018.;
- [85] SRPS U.M1.047/1987.: Ispitivanje konstrukcija visokogradnje probnim opterećenjem I ispitivanje do loma;
- [86] Stahlrohr-Handbuch: 9. Aufl. Vulkan-Verlag, Essen, Germany, 1982;
- [87] Stojić N.: Detekcija oštećenja betona na bazi propagacije ultrazvučnih talasa za potrebe ocene stanja betonskih elemenata mostova, Doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, 2020., Niš;
- [88] Tamburić J., Nikolić V., Stojić D.: Service life and durability of architectonic structures, Facta Universitatis, series: Architecture and Civil Engineering, 275-384, 2016.;
- [89] Togo T.: Experimental study on mechanical behaviour of tubular joints, Ph.D. Thesis, Osaka University, Osaka, Japan, 1967.;
- [90] Tousignant K., Packer J.A.: Fillet weld effective lengths in CHS X-connections II: Finite element modelling, parametric study and design, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 141, pp. 77-90, 2018.;
- [91] Turnić D., Igić T., Živković S., Igić A., Spasojević Šurdilović M.: On the Optimal Design of Steel Shells with Technological Constraints, Applied Sciences, 12(5), 2282, 2022.;

- [92] Vacev T.: Optimalno rešenje čvora čelične prostorne rešetke primenom nelinearne analize, Doktorska teza, Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, 2009.;
- [93] Vellasco P. D. S., Hobbs R. E.: Local Web Buckling in Tapered Composite Beams: A Parametric Study, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, 23, 411-425, 2001.;
- [94] Wang M., Shi Y., Yang W., Wang Y.: Influence of damage and degradation index on steel frame under severe earthquakes, *Advances in Structural Engineering*, 2015.;
- [95] Wang Y.Q., Jiang Y., Shi Y.J., Sun P.: Non-linear analysis of ultimate loading capacity of cast tubular Y-joints under axial loading, *Tubular Structures XII Proceedings of the 12th International Symposium on Tubular Structures*, Shanghai, China, pp. 529-532., 2008.;
- [96] Wanke J.: *Stahlrohrkonstruktionen*, Springer Verlag, Vienna, Austria, 1966., ISBN 978-3211807910;
- [97] Wardenier J., Packer J.A., Zhao X.-L., Van Der Vegte G.J.: *Hollow Sections in Structural Applications*, CIDECT, Geneva, Switzerland, 2010.;
- [98] Wardenier J., Stark. J.W.B.: The static strength of welded lattice girder joints in structural hollow sections: Parts 1-10. CIDECT Final Report 5Q-78/4, Delft University of Technology, The Netherlands, 1978.;
- [99] Wardenier J.: *Hollow section joints*, Delft University Press, Delft, The Netherlands, 1982.;
- [100] Wardenier J.: *Hollow Sections in Structural Applications*, Delft University of Technology, The Netherlands, 2001.;
- [101] Webster J.G.: *Tehe measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*, CRC Press, Boca Raton, 1999.;
- [102] World Commission on Environment and Development (WCED): *Our Common Future*, Report A/42/427, United Nations, 1987.;
- [103] Yang N., Bai F.: Damage analysis and evaluation of light steel structures exposed to wind hazards, *Applied Sciences*, 2017.;
- [104] Yin Y., Lui X., Lei P., Zhou L.: Stress concentration factor for tubular CHS-to-RHS Y-joints under axial loads Locas stress HSS Brace wall, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 148, pp- 768-778., 2018.;
- [105] Živković S., Milošević M.: *Zbirka rešenih zadataka iz čeličnih konstrukcija prema Evrokodu*, Građevinsko – arhitektonski fakultet, Univerzitet u Nišu, Niš, 2017.;

- [106] Živković S., Stojković N., Turnić D., Milošević M.: Numerical modelling of Y joints of trusses made of steel hollow sections, Tehnički vjesnik / Technical Gazette (TV/TG), pp. 2083-2088, 2020.;
- [107] Živković S., Stojković N., Turnić D., Spasojević Šurdilović M., Branković J. M.: Analysis of Hollow Section „Y“ Connections with the Application of Non-Linear Material Modeling, Metals, 13(5), 855, 2023., <https://doi.org/10.3390/met13050855>;
- [108] Živković S.: Doprinos proračunu direktno zavarenih veza elemenata rešetkastih nosača od šupljih čeličnih profila pravougaonog i kvadratnog poprečnog preseka, Doktorska disertacija, Građevinsko-arhitektonski fakulteta, Univerzitet u Nišu, Niš, 2015.;
- [109] Živković S.: Prilog proračunu čeličnih okvirnih konstrukcija sa deformabilnim vezama štapova, Magistarski rad, Građevinsko-arhitektonski fakulteta, Univerzitet u Nišu, Niš, 2009.;

## POPIS SLIKA

Slika 1 - Proizvodnja šupljih profila pravougaonog poprečnog preseka [22] .....	13
Slika 2 - Uporedni dijagram težine šupljih i otvorenih preseka opterećenih na fleksiono izvijanje u odnosu na silu pritiska [97].....	14
Slika 3 – Poređenje ujednačenosti debljine sloja zaštitnog premaza kod otvorenih i šupljih profila [19].....	15
Slika 4 - Otpornost strujanju fluida različitih oblika poprečnih preseka [97].....	16
Slika 5 - Obrada krajeva CHS profila [41] .....	17
Slika 6 – Oslanjanje rožnjače na gornji pojas rešetkastog nosača od RHS .....	17
Slika 7 - Poslovna zgrada, Minhen, Nemačka [39] .....	19
Slika 8 – Nacionalni stadion, Singapur [44] .....	19
Slika 9 – Ikitsuki most, Japan [42].....	20
Slika 10 – Ravanski (a) i prostorni (b, c i d) rešetkasti nosači.....	21
Slika 11 - Pratt ispuna rešetkastog nosača .....	23
Slika 12 - Warren ispuna rešetkastog nosača.....	23
Slika 13 - Modifikovana Warren ispuna rešetkastog nosača .....	24
Slika 14 - Howe ispuna rešetkastog nosača .....	24
Slika 15 - „K“ ispuna rešetkastog nosača .....	25
Slika 16 - Različiti načini ispune rešetkastih nosača .....	25
Slika 17 - Veličina ugiba nosača [2] .....	34
Slika 18 - Nadvišenje nosača .....	35
Slika 19 - Tipovi veza rešetkastih nosača od šupljih profila .....	40
Slika 20 - Konvencija o označavanju dimenzija poprečnih preseka po SRPS EN 1993-1-8 .....	42
Slika 21 - Debljina ugaonog šava [108].....	43
Slika 22 - Debljina užljebljenih šavova kod šupljih profila pravougaonog poprečnog preseka [83] .....	43
Slika 23 - Razmak veze [83].....	48
Slika 24 - Preklop veze [83].....	48
Slika 25 - Definicija oznaka u vezi [83] .....	49
Slika 26 - Karakteristična oštećenja čeličnih konstrukcija [78].....	58



Slika 27 - Plastični lom koji pokazuje lokalno stanjivanje i nepravilnu površinu loma [43] .....	59
Slika 28 - Krti lom [38].....	60
Slika 29 – Izvijanje [36].....	61
Slika 30 – Izbočavanje [93] .....	61
Slika 31 - Lom usled zamora [40].....	62
Slika 32 - Lamelarno cepanje .....	63
Slika 33 - Lamelarno cepanje kod veze konzole za stub [16].....	63
Slika 34 - Hemijska oštećenja [77] .....	64
Slika 35 - Prodor vegetacije kroz šupljinu glavnog nosača mosta preko reke Mlave na putu za manastir Rukumija.....	64
Slika 36 - Proces korozije [37].....	65
Slika 37 - Zardali oslonci na mostu preko reke Mlava na putu za manastir Rukumija .....	66
Slika 38 - Rđa.....	66
Slika 39 - Opšta korozija.....	66
Slika 40 - Opšta korozija na glavnom nosaču mosta preko reke Nišave na ulazu u nišku tvrđavu .....	67
Slika 41 - Galvanska korozija na delovima mosta preko reke Mlave na putu za manastir Rukumija .....	67
Slika 42 - Galvanska korozija .....	67
Slika 43 - Tačkasta korozija.....	68
Slika 44 - Hemijska korozija.....	69
Slika 45 - Korozija pukotina .....	69
Slika 46 - Biometalna korozija .....	70
Slika 47 - Naponska korozija na poprečnim nosačima mosta preko reke Nišave ispred niške tvrđave.....	71
Slika 48 - Naponska korozija .....	71
Slika 49 - Bakterijska korozija.....	71
Slika 50 - Izgled veze čeličnih elemenata nakon požara .....	73
Slika 51 - Granična deformacija veze .....	76
Slika 52 - Geometrija neoštećenog uzorka .....	77

Slika 53 - Prikaz veličine i položaja oštećenja: a) oštećenje 1, b) oštećenje 2, c) oštećenje 3, d) oštećenje 4.....	79
Slika 54 - Dispozicija veze .....	80
Slika 55 - Konturni uslovi.....	85
Slika 56 - Mreža konačnih elemenata neoštećene veze .....	86
Slika 57 - Mreže konačnih elemenata oštećenih veza: a) oštećenje 1, b) oštećenje 2, c) oštećenje 3, d) oštećenje 4 .....	86
Slika 58 - Ukupna deformacija za graničnu nosivost neoštećene veze .....	88
Slika 59 - Ukupna deformacija za graničnu nosivost veze sa oštećenjem 1 .....	89
Slika 60 - Ukupna deformacija za graničnu nosivost veze sa oštećenjem 2.....	90
Slika 61 - Ukupna deformacija za graničnu nosivost veze sa oštećenjem 3.....	91
Slika 62 - Ukupna deformacija za graničnu nosivost veze sa oštećenjem 4.....	92
Slika 63 - Ekvivalentni naponi u vezi za graničnu silu nosivosti neoštećene veze .....	93
Slika 64 - Ekvivalentni naponi u vezi za graničnu silu nosivosti veze sa oštećenjem 1.....	94
Slika 65 - Ekvivalentni naponi u vezi za graničnu silu nosivosti veze sa oštećenjem 2.....	95
Slika 66 - Ekvivalentni naponi u vezi za graničnu silu nosivosti veze sa oštećenjem 3.....	96
Slika 67 - Ekvivalentni naponi u vezi za graničnu silu nosivosti veze sa oštećenjem 4.....	97
Slika 68 - Dijagram pomeranja karakterističnih tačaka neoštećene veze primenom MKE.....	98
Slika 69 - Dijagram pomeranja karakterističnih tačaka veze sa oštećenjem 2 primenom MKE ..	99
Slika 70 - Dijagram pomeranja karakterističnih tačaka veze sa oštećenjem 4 primenom MKE ..	99
Slika 71 - Uporedni dijagram pomeranja tačke na bočnom zidu pojasnog štapa primenom MKE .....	100
Slika 72 - Dijagram pomeranja tačke na gornjoj flanši pojasnog štapa sa bočne strane štapa ispune primenom MKE .....	101
Slika 73 - Dijagram pomeranja tačke na gornjoj flanši pojasnog štapa ispred štapa ispune primenom MKE .....	101
Slika 74 - Dijagram graničnih nosivosti veza u zavisnosti od stepena oštećenja veza primenom MKE.....	102
Slika 75 - Geometrija neoštećenog uzorka [108].....	104
Slika 76 - Hidraulična presa nosivosti 100 t na univerzalnom ramu u Laboratoriji za Mehatroniku na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Nišu.....	105

Slika 77 - Šema povezivanja uzorka sa mernim sistemom za .....	106
Slika 78 – Dispozicija mernih instrumenata i pomoćni ram za oslanjanja pojasnog štapa pod uglom od 45° .....	107
Slika 79 - Merni pojačivač Quantum MX 840 povezan sa računarom i softverom Catman .....	108
Slika 80 - Prikaz ekrana u toku merenja .....	108
Slika 81 - Dispozicija mernih ćelija pomeraja kod neoštećenog uzorka .....	109
Slika 82 - Raspored mernih traka na neoštećenom uzorku .....	110
Slika 83 - Raspored mernih traka na uzorku sa oštećenjem 2 .....	110
Slika 84 - Raspored mernih traka na uzorku sa oštećenjem 4 .....	110
Slika 85 - Dijagram prosečnih pomeranja karakterističnih tačaka neoštećene veze dobijen eksperimentalnim putem .....	112
Slika 86 - Dijagram prosečnih pomeranja karakterističnih tačaka veze sa oštećenjem 2 dobijen eksperimentalnim putem .....	112
Slika 87 - Dijagram prosečnih pomeranja karakterističnih tačaka veze sa oštećenjem 4 dobijen eksperimentalnim putem .....	113
Slika 88 - Uporedni dijagram prosečnih pomeranja tačke na bočnom zidu pojasnog štapa dobijen eksperimentalnim putem .....	114
Slika 89 - Uporedni dijagram prosečnih pomeranja tačke na gornjoj flanši pojasnog štapa sa bočne strane štapa ispune dobijen eksperimentalnim putem .....	114
Slika 90 - Uporedni dijagram prosečnih pomeranja tačke na gornjoj flanši pojasnog štapa ispred štapa ispune dobijen eksperimentalnim putem .....	115
Slika 91 - Dijagram granične nosivosti u zavisnosti od stepena oštećenja dobijen eksperimentalnim putem .....	116
Slika 92 - Neoštećen uzorak br. 1 - lokalne deformacije .....	117
Slika 93 - Neoštećen uzorak br. 2 - lokalne deformacije .....	117
Slika 94 - Neoštećen uzorak br. 3 - lokalne deformacije .....	118
Slika 95 - Neoštećen uzorak - uporedni prikaz uzoraka 1, 2 i 3 nakon ispitivanja .....	118
Slika 96 - Uzorak br. 1 sa oštećenjem 2 - lokalne deformacije .....	119
Slika 97 - Uzorak br. 2 sa oštećenjem 2 - lokalne deformacije .....	119
Slika 98 - Uzorak br. 3 sa oštećenjem 2 - lokalne deformacije .....	120
Slika 99 - Uzorci sa oštećenjem 2 - uporedni prikaz uzoraka 1, 2 i 3 nakon ispitivanja .....	120

Slika 100 - Uzorak br. 1 sa oštećenjem 4 - lokalne deformacije .....	121
Slika 101 - Uzorak br. 2 sa oštećenjem 4 - lokalne deformacije .....	121
Slika 102 - Uzorak br. 3 sa oštećenjem 4 - lokalne deformacije .....	122
Slika 103 - Uzorci sa oštećenjem 4 - uporedni prikaz uzoraka 1, 2 i 3 nakon ispitivanja .....	122
Slika 104 - Dijagram dilatacija [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ] neoštećenog uzorka dobijen eksperimentalnim putem	124
Slika 105 - Dijagram napona [ $\text{kN}/\text{cm}^2$ ] neoštećenog uzorka dobijen eksperimentalnim putem	124
Slika 106 - Dijagram dilatacija [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ] uzorka sa oštećenjem 2 dobijen eksperimentalnim putem .....	125
Slika 107 - Dijagram napona [ $\text{kN}/\text{cm}^2$ ] uzorka sa oštećenjem 2 dobijen eksperimentalnim putem .....	125
Slika 108 - Dijagram dilatacija [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ] uzorka sa oštećenjem 4 dobijen eksperimentalnim putem .....	126
Slika 109 - Dijagram napona [ $\text{kN}/\text{cm}^2$ ] uzorka sa oštećenjem 4 dobijen eksperimentalnim putem .....	126
Slika 110 - Uporedni dijagrami pomeranja tačke na bočnom zidu pojasnog štapa .....	127
Slika 111 - Uporedni dijagrami pomeranja tačke na gornjoj flanši pojasnog štapa sa bočne strane štapa ispune .....	128
Slika 112 - Uporedni dijagrami pomeranja tačke na gornjoj flanši pojasnog štapa ispred štapa ispune .....	128
Slika 113 - Uporedni dijagram graničnih nosivosti veza dobijenih primenom MKE i eksperimentalnim putem .....	129
Slika 114 – Funkcija pouzdanosti $R(t)=1-F(t)$ .....	134
Slika 115 – Funkcija otkaza $F(t)=1-R(t)$ .....	134
Slika 116 – Funkcija gustine otkaza .....	135
Slika 117 – Faktor (funkcija) otkaza elementa .....	138
Slika 118 – Weibulova kriva verovatnoće otkaza .....	139
Slika 119 - Weibulove krive otkaza za različite vrednosti parametra oblika k .....	141
Slika 120 – Funkcija intenziteta otkaza .....	142
Slika 121 – Funkcija otkaza za različite vrednosti parametra oblika k .....	145
Slika 122 – Funkcija otkaza za vrednost parametra oblika $k=2,33$ .....	145
Slika 123 – Određivanje indeksa oštećenja preko faktora oštećenja .....	146

Slika 124 – Nomogram zavisnosti faktora oštećenja, faktora vremena i indeksa oštećenja.....	147
Slika 125 – Primer određivanja faktora oštećenja i faktora vremena za poznati indeks oštećenja .....	148
Slika 126 - Primer određivanja indeksa oštećenja i faktora vremena za poznati faktor oštećenja .....	149
Slika 127 - Primer određivanja faktora oštećenja i indeksa oštećenja za poznati faktor vremena .....	150

## POPIS TABELA

Tabela 1 - Dozvoljeni odnosi između raspona i visine da bi se izbeglo bočno izvijanje prema SRPS EN 1993-1-1 [75].....	15
Tabela 2 - Uslovi za klasifikaciju poprečnih preseka.....	30
Tabela 3 - Evropske krive izvijanja prema vrsti poprečnog preseka.....	33
Tabela 4 - Preporučene vrednosti dopuštenih ugiba prema SRPS EN 1993-1-1/NA.....	35
Tabela 5 - Oblici loma kod veza između elemenata ispune i pojaseva od šupljih profila pravougaonog poprečnog preseka (RHS) [83].....	46
Tabela 6 - Opseg važenja za zavarene veze između elemenata ispune od CHS i RHS profila i pojasnih elemenata od RHS profila.....	51
Tabela 7 - Dodatni uslovi za određivanje proračunske nosivosti zavarenih veza između elemenata od šupljih profila kvadratnog ili kružnog poprečnog preseka pri dejstvu aksijalne sile.....	52
Tabela 8 - Proračunske nosivosti zavarenih veza između elemenata od šupljih profila kvadratnog ili kružnog poprečnog preseka pri dejstvu aksijalne sile.....	53
Tabela 9 - Proračunske nosivosti zavarenih T, X i Y veza između elemenata ispune od RHS ili CHS profila i pojaseva od RHS profila pri dejstvu aksijalne sile.....	54
Tabela 10 - Proračunske nosivosti zavarenih K i N veza između elemenata ispune od RHS ili CHS profila i pojaseva od RHS profila pri dejstvu aksijalne sile.....	55
Tabela 11 - Indikativni proračunski vek konstrukcije [79].....	75
Tabela 12 - Analizirani uzorci.....	78
Tabela 13 - Konturni uslovi.....	85
Tabela 14 - Granične nosivosti veza dobijene primenom MKE.....	102
Tabela 15 - Granične nosivosti veze dobijene eksperimentalnim putem.....	115
Tabela 16 - Usporedni prikaz graničnih nosivosti u kN.....	129
Tabela 17 - Empirijski koeficijenti za konstrukcioni čelik.....	133
Tabela 18 – Vrednosti verovatnoće otkaza prema Weibulovoj krivoj za karakteristične vrednosti koeficijenta brzine degradacije.....	140
Tabela 19 – Veličine oštećenja i graničnih nosivosti uzoraka.....	144
Tabela 20 – Vrednosti indeksa oštećenja.....	144

## **BIOGRAFIJA AUTORA**

Marko Milošević, master inženjer građevinarstva, rođen je 22.12.1987. godine u Nišu. Završio je Osnovnu školu „Karađorđe“ u Gornjem Matejevcu sa odličnim uspehom. Gimnaziju „Svetozar Marković“ u Nišu, prirodno-matematički smer, završio je sa odličnim uspehom.

Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu upisao je školske 2006/2007. godine. Zvanje inženjer građevinarstva dobija 2010. godine. Odbranom Master rada pod nazivom „Alternativno rešenje krovne konstrukcije tribina istok – zapad stadiona Čair“ 2011. godine dobija zvanje master inženjer građevinarstva. Upisavši Doktorske akademske studije Građevinsko – arhitektonskog fakulteta u Nišu, nastavlja svoje školovanje u oblasti građevinarstva.

Kao saradnik učestvuje u nastavi na Katedri za tehničku mehaniku i teoriju konstrukcija i Katedri za materijale i konstrukcije od 2011. godine.

Autor je brojnih naučnih radova objavljenih u zbornicima različitih nacionalnih i internacionalnih konferencija i časopisa.

Kao projektant konstrukcije, učestvovao je u izradi i autor je većeg broja projekata konstrukcije. Jedan od objekata koji se izdvaja je Višenamenska lamela Elektronskog fakulteta u Nišu i Naučno-tehnološki park Niš – II faza, na kojima je Odgovorni projektant projekta konstrukcije.

Oženjen je i otac je ćerke Anđelije.

## **IZJAVA O AUTORSTVU**

Izjavljujem da je doktorska disertacija, pod naslovom

### **ISTRAŽIVANJE UTICAJA OŠTEĆENJA I POUZDANOST DIREKTNO ZAVARENIH VEZA ELEMENATA REŠETKASTIH NOSAČA OD ŠUPLJIH PROFILA**

koja je odbranjena na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu Univerziteta u Nišu:

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da ovu disertaciju, ni u celini, niti u delovima, nisam prijavljivao na drugim fakultetima, niti univerzitetima;
- da nisam povredio autorska prava, niti zloupotrebio svojinu drugih lica.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci, koji su u vezi sa autorstvom i dobijanjem akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada, i to u katalogu Biblioteke, Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Nišu, kao i u publikacijama Univerziteta u Nišu.

U Nišu, \_\_\_\_\_.

Potpis autora disertacije:

---

Marko B. Milošević



# **IZJAVA O ISTOVETNOSTI ŠTAMPANOG I ELEKTRONSKOG OBLIKA DOKTORSKE DISERTACIJE**

Naslov disertacije:

## **ISTRAŽIVANJE UTICAJA OŠTEĆENJA I POUZDANOST DIREKTNO ZAVARENIH VEZA ELEMENATA REŠETKASTIH NOSAČA OD ŠUPLJIH PROFILA**

Izjavljujem da je elektronski oblik moje doktorske disertacije, koju sam predao za unošenje u **Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu**, istovetan štampanom obliku.

U Nišu, \_\_\_\_\_.

Potpis autora disertacije

---

Marko B. Milošević

## IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Nikola Tesla“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu unese moju doktorsku disertaciju, pod naslovom:

### **ISTRAŽIVANJE UTICAJA OŠTEĆENJA I POUZDANOST DIREKTNO ZAVARENIH VEZA ELEMENATA REŠETKASTIH NOSAČA OD ŠUPLJIH PROFILA**

Disertaciju sa svim prilogima predao sam u elektronskom obliku, pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju, unetu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu, mogu koristiti svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons), za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
- 3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade (CC BY-NC-ND)**
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerade (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

U Nišu, \_\_\_\_\_.

Potpis autora disertacije:

---

Marko B. Milošević