

Primljen / Received: 13.5.2022.

Ispravljen / Corrected: 13.1.2023.

Prihvaćen / Accepted: 28.4.2023.

Dostupno online / Available online: 10.7.2023.

Numerička i eksperimentalna analiza čeličnog "Y" priključka s oštećenjima

Autori:

Mr.sc. **Marko Milošević**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Nišu, Srbija

Građevinski fakultet

marko.milosevic.mat@gmail.com

Autor za korespondenciju

Prof.dr.sc. **Dragoslav Stojić**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Nišu, Srbija

Građevinski fakultet

dragoslav.stojic@gaf.ni.ac.rsIzv.prof.dr.sc. **Srđan Živković**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Nišu, Srbija

Građevinski fakultet

srdjan.zivkovic@gaf.ni.ac.rsDoc.dr.sc. **Dragan S. Jovanović**, dipl.ing.stroj.

Sveučilište u Nišu, Srbija

Strojarski fakultet

dragan.s.jovanovic@masfak.ni.ac.rs

Prethodno priopćenje

Marko Milošević, Dragoslav Stojić, Srđan Živković, Dragan S. Jovanović

Numerička i eksperimentalna analiza čeličnog "Y" priključka s oštećenjima

Oštećenje čelika može značajno utjecati na performanse čeličnih elemenata, utječući na druge konstrukcijske i nekonstrukcijske dijelove zgrade i ugrožavajući sigurnost i funkcioniranje. Razumijevanje procesa i mehanizama oštećenja čelične konstrukcije ključno je za poboljšanje njezine trajnosti. U ovom su radu prikazane numeričke i eksperimentalne analize ponašanja "Y" priključaka rešetkastih nosača u ravnini opterećenih uzdužnom silom, s posebnim naglaskom na učinke oštećenja. U ovom su radu prikazani rezultati numeričkih i eksperimentalnih istraživanja izravno zavarenog Y priključka SHS pojasnog štapa i dijagonalnih elemenata s oštećenjem priključka u obliku uske vertikalne pravokutne pukotine. Odstupanje rezultata dobivenih numeričkim i eksperimentalnim postupcima iznosilo je u prosjeku 3 % do 5 %.

Ključne riječi:

eksperimentalna analiza, numerička analiza, čelični priključci, Y priključak, rešetkaste grede, RHS i SHS presjeci

Research Paper

Marko Milošević, Dragoslav Stojić, Srđan Živković, Dragan S. Jovanović

Numerical and experimental analyses of a steel "Y" joint with damage

Steel damage can significantly impact steel elements' performance, affecting other structural and non-structural building parts and compromising safety and functioning. Understanding the processes and mechanisms of steel structure damage is crucial for improving its durability. This paper presents numerical and experimental analyses of type "Y" joint behaviour of truss beams in a plane loaded by an axial force, with a special accent on the damage effects. This paper presents the results of numerical and experimental research on the directly welded Y joint of the SHS chord and diagonal members with damage in the joint in the form of a narrow vertical rectangular crack. The deviation of the results obtained by the numerical and experimental procedures was, on average 3 % to 5 %.

Key words:

experimental analysis, numerical analysis, steel joints, Y joint, truss beams, RHS and SHS sections

1. Uvod

Rešetkaste grede izvedene od šupljih čeličnih profila u građevinarstvu se primjenjuju za izgradnju zgrada i mostova [1]. Često se upotrebljavaju kao krovni nosači, podrožnice, međukatni nosači i nosači dizalica u industrijskim halama, sportskim zgradama, kongresnim dvoranama, izložbenim paviljonima i visokim građevinama. Primjenjuju se zbog višestrukih prednosti, kao što su velika nosivost, nizak aerodinamički koeficijent, brza i laka montaža, mogućnost primjene u unutarnjim prostorima za prolaz instalacija i vodova, niska cijena antikorozivne zaštite, ekonomičnost i mogućnost kreativnog konstrukcijskog i arhitektonskog oblikovanja. Rešetkaste grede imaju i nedostatke, kao što su dodatni rad (osobito za rešetkaste grede izrađene od šupljih kružnih profila) i viši jedinični trošak u odnosu na toplovaljane profile.

Prednosti primjene kvadratnih i pravokutnih šupljih profila za priključke rešetkastih greda s izravno zavarenim elementima u usporedbi s kružnim cijevima su neosporne, što se odražava u formalnim i konstrukcijskim prednostima (ravno rezanje), jednostavnosti i po potrebi ukрутama pojasnih i bočnih ploča.

Priključni elementa rešetkastih nosača mogu biti izravni ili neizravni. Izravni priključak karakteriziraju štapovi ispune izravno zavareni na pojas elementa. Ti priključci mogu biti s ojačanjem ili bez ojačanja. U neizravnom priključku, pojasni štap i štapovi ispune međusobno su spojeni preko čvornih limova pomoću zakovica, vijaka ili zavarivanja. Prijenos sila izravnog priključka (kao što sugerira njegov naziv) izravan je, s jednog elementa na drugi; kod neizravnog priključka prijenos je dulji jer se sila najprije prenosi na čvorni lim, a zatim sa čvornog lima na drugi element. Naravno, izravni bi priključak trebao imati prednost jer je, statistički gledano, mogućnost pogreške dvostruko manja. U isto vrijeme, ne smije se zanemariti lokalno izvijanje pojasa poprečnog presjeka na priključku zbog uvođenja sile preko čvornog lima.

Tijekom rada može doći do oštećenja dijelova čeličnih konstrukcija i njihovih priključaka zbog nedovoljnog ili neodgovarajućeg održavanja. Oštećenja mogu biti mehanička, tj. uzrokovana preopterećenjem ili udarom u obliku pukotina, ili se može raditi o oštećenju uzrokovanom kemijskim ili biološkim dugotrajnim korozivnim djelovanjem. Ta oštećenja mogu smanjiti nosivost konstrukcije, oštetiti ostale konstrukcijske i nekonstrukcijske dijelove zgrade te ugroziti funkcionalnost i sigurnost konstrukcije. Razumijevanje uzroka i učinaka oštećenja, kao i procesa, mehanizama i širenja oštećenja, važno je za uporabni vijek čeličnih konstrukcija.

U ovom su radu prikazane eksperimentalne i numeričke analize na modelima s oštećenjem i bez oštećenja "Y" priključaka rešetkastih greda u ravnini opterećenih aksijalnom silom tijekom statičkog opterećenja. Model uključuje početnu "malu" vertikalnu pukotinu u obliku uskog pravokutnika visine 15 mm. Zatim se to oštećenje postupno širi duž visine pojasnog elementa (po 15 mm) dok ne dosegne konačnu veličinu od 60 mm (slika 5.).

U praksi, ako se tijekom nadzora konstrukcija otkrije oštećenje tj. "mala" pukotina u čvoru rešetke, ona se s vremenom povećava.

2. Pregled propisa i istraživanja

2.1. Tehnički propisi

Sadašnji propisi za projektiranje metalnih konstrukcija u Europi su EN 1993-1-1 (*Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija – dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade*) [2] i EN 1993-1-8 (*Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija – dio 1-8: Proračun priključaka*) [3].

2.2. Teorijska istraživanja

U magistarskom su radu [4] detaljno prikazana sva pravila za određivanje proračunske krajnje otpornosti priključaka prema EC3, ravninskih i prostornih okvirnih rešetkastih greda, opterećenih aksijalnom silom i/ili momentom savijanja. Te su formulacije grafički prikazane i popraćene odgovarajućim numeričkim primjerima, koji su posebno važni za brzo određivanje otpornosti u početnim fazama proračuna. Osim priključaka od šupljih pravokutnih profila, autor je analizirao i druge vrste priključaka (od šupljih pravokutnih, kvadratnih i drugih oblika cijevnih profila, te I, H i U profila).

U okviru CIDECT-a (International Committee for the Development and Study of Tubular Structures) objavljeni su radovi [5, 6] koji se bave teorijskim principima proračuna izravno zavarenih priključaka izrađenih od šupljih profila. Ove publikacije dale su preporuke za proračun te vrste priključaka.

Autori su u radu [7] dopunili rezultate i pravila za proračun izravno zavarenih priključaka šupljih profila te opisali promjene, unapređenja, proširenja i preporuke. Predstavljene su dvije nove CIDECT smjernice za proračun priključaka.

Nedavno je objavljen rad [8] kako bi se dao pregled nedavnih istraživanja zavarenih priključaka šupljih profila od čelika visoke čvrstoće (engl. *high-speed steel* - HSS). Taj rad opisuje pravila proračuna izravno zavarenih priključaka od čelika visoke čvrstoće i sažima novija istraživanja u ovom području.

2.3. Eksperimentalna istraživanja

U doktorskom je radu [9] analizirano eksperimentalno istraživanje ponašanja izravno zavarenih priključaka elemenata rešetkastih nosača izrađenih od šupljih pravokutnih i kvadratnih čeličnih profila. Autor je analitičkim i numeričkim postupcima provedenima na modelima "T" i "Y" priključaka te dobivanjem eksperimentalne potvrde rezultata došao do relevantnih rezultata na temelju kojih se donose zaključci o učincima različitih parametara na ponašanje ovih tipova priključaka. Autor je također pokazao da se nosivost eksperimentalno ispitanih priključaka doseže uslijed lokalne plastifikacije površine na pojasnici pojasnog elementa; priključak pokazuje elastoplastično ponašanje s izraženom elastičnom deformacijom, a utjecaj

plastifikacije bočnih stijenki na krajnju otpornost je zanemariv. Ovaj je rad nastavak istraživanja započetog tom disertacijom. Principi i parametri primijenjeni u disertaciji [9] poslužili su kao osnova za planiranje eksperimenata u ovom radu.

2.4. Numerička istraživanja

U radu [10] prikazani su rezultati parametarskog istraživanja statičke čvrstoće cjevastih "T" priključaka s ojačanim pojasom opterećenih na savijanje u ravnini. Navedeno istraživanje, provedeno primjenom nelinearnih konačnih elemenata, pokazalo je da debljina bočne stijenke pojasa značajno utječe na ukupnu nosivost T-priključaka, što je utjecalo na definiciju geometrije modela ispitanih u ovom istraživanju.

Marcel Garifullin i skupina autora također su pridonijeli analizi ponašanja "T" priključaka izravnih zavarenih šupljih pravokutnih presjeka. U radu [11] oni su razvili model konačnih elemenata "T" priključka od visokokvalitetnog čelika, opterećenog aksijalnim silama i momentom savijanja u ravnini. Na temelju rezultata niza eksperimentalnih ispitivanja autori su dali preporuke za odabir optimalnog tipa konačnog elementa. U radu [12] istraživana je metoda komponenata za modeliranje "T" priključaka šupljih profila pod djelovanjem aksijalnih sila i momenata u ravnini pomoću kombinacije opruga i prijedloga postupaka za takav tip modela. Autori rada [13] istraživali su utjecaj kutnih zavora uzrokovanih povećanom površinom poprečnog presjeka elemenata ispunje u zoni priključka na pravokutne šuplje "T" priključke. Analizirano je ponašanje priključaka s različitim geometrijama i dimenzijama kutnog zavora. Istraživanje je predložilo povećanje poprečnog presjeka elemenata ispunje, što bi rezultate proračuna priključka učinilo točnijima te bi dalo realno ponašanje priključka.

U radu [14] autori su numerički istraživali statičku čvrstoću cjevastih "T"/"Y" priključaka ojačanih čeličnim pločama. Istraživači su pokazali da je čvrstoća priključaka ojačanih čeličnim pločama veća od čvrstoće neojačanih priključaka i predložili su novu jednadžbu za određivanje granične čvrstoće "T"/"Y" priključaka ojačanih pločama pod aksijalnim tlačnim opterećenjima.

U radu [15] analizirano je ponašanje različitih oblika CHS i RHS "Y" priključaka. Primjenom metode konačnih elemenata, autori su izveli jednadžbe za određivanje faktora koncentracije naprezanja.

Druga skupina autora, pomoću nelinearne analize metodom konačnih elemenata za određivanje krajnje nosivosti "Y" priključaka [16], zaključila je da varijacija geometrijskih parametara priključka značajno utječe na njegovo ponašanje. Posebnu pozornost posvetili su modeliranju zavora, odnosno gustoći mreže konačnih elemenata u blizini zavora koji se zbog svoje funkcije nalaze na mjestima gdje dolazi do naglih promjena toka sila i koncentracije naprezanja. Autori su dali preporuke za oblikovanje mreže konačnih elemenata u zoni zavora.

U radu [17] autori su opisali metode za proračun preciznih geometrijskih modela i modela konačnih elemenata za cjevaste Y-priključke s pukotinama. Predložene su metode za modeliranje

pukotina na bilo kojem mjestu na sjecištu pojasnog elementa i elementa ispunje, kao i za generiranje mreže konačnih elemenata Y-priključaka s oštećenjem i bez njega.

Rad [18] prikazuje tehnike modeliranja koje se primjenjuju u analizi konačnih elemenata za dobivanje informacija o čvrstoći, zonama opterećenja i faktorima intenziteta opterećenja. Osim toga, smjernice o diskretizaciji modela, izboru elemenata, primjeni krivulje materijala, interpretaciji rezultata i numeričkim tehnikama imaju određena ograničenja.

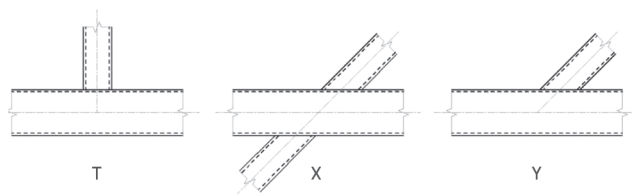
U radu [19] provedena je nelinearna simulacija konačnih elemenata temeljena na parametarskom istraživanju za analizu cijevnih priključaka, uzimajući u obzir geometriju zavora, materijal i geometrijske nelinearnosti. Autori ovog istraživanja analizirali su ponašanje omjera širine elementa ispunje i pojasnog elementa i omjera debljine i širine pojasnog elementa. Autori rada [20] bavili su se numeričkim modeliranjem Y-priključaka HSS elemenata rešetkastih greda. Prikazali su dobivene rezultate, odabrali parametre nelinearne numeričke analize i iznijeli praktične zaključke primijenjene u ovom istraživanju.

Cilj je istraživača također bio utvrditi učinke svojstava materijala [21]. S obzirom na to da istraživači često upotrebljavaju pojednostavljeni dijagram naprezanja i deformacije (bilinearni dijagram), autori su u svom radu predstavili ograničenja takvog pristupa.

3. Izravno zavareni priključci čeličnih rešetkastih greda – opće informacije

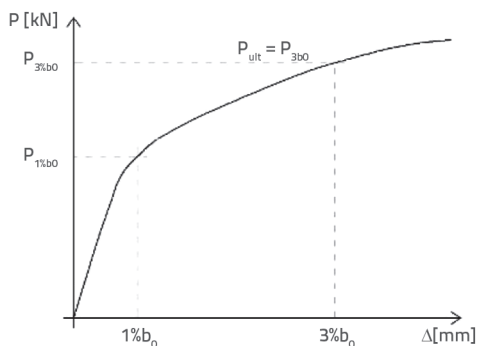
Za razliku od tradicionalnih priključaka izvedenih čvornim limovima, priključci izravno zavarenih elemenata rešetkastih greda izrađenih od šupljih profila zahtijevaju različite pristupe tijekom izgradnje i proračuna. Rezultati istraživanja u ovom području, koji se temelje na teoriji graničnog stanja, pokazuju da ponašanje ovakvih priključaka ne ovisi samo o kvaliteti osnovnog materijala, geometrijskim karakteristikama elemenata priključka, te obliku i intenzitetu opterećenja u pojasnom štapu grede, već i o konstrukciji priključka, odnosno njegovom obliku. Izvedene jednadžbe koje određuju nosivost zadanih priključaka za svaki potencijalni način otkazivanja prikazane su kao funkcija maksimalne nosivosti elementa ispunje pod djelovanjem aksijalne sile i/ili momenta savijanja. Definirana su i ograničenja u odnosima geometrijskih karakteristika elemenata priključka, odnosno područje valjanosti, koja ispunjavaju uvjete graničnog stanja uporabljivosti i ogledaju se u obliku ograničenja lokalnih deformacija na priključku, kao i sprječavanje smanjenja sposobnosti rotacije i/ili deformacije. Sve jednadžbe za otpornost priključaka dokazane su eksperimentalno unutar definiranih raspona valjanosti. U slučajevima prekoračenja čvrstoće priključka i kada nije moguće promijeniti definirane poprečne presjeke elemenata rešetkastih greda, potrebno je ojačavati priključak ovisno o načinu otkazivanja.

Slika 1. prikazuje neke (T, X, Y priključci) od više vrsta ravninskih priključaka rešetkastih greda šupljih konstrukcijskih presjeka prema EC 3.



Slika 1. Vrste priključaka rešetkastih greda od šupljih profila [3]

Na temelju brojnih numeričkih i eksperimentalnih istraživanja utvrđen je kriterij otkazivanja koji se temelji na vrijednosti graničnog stanja uporabljivosti, što je važno za određivanje krajnje čvrstoće RHS (engl. *Rectangular Hollow Section*) ili CHS (engl. *Circular Hollow Section*) priključaka, kod kojih krivulja naprezanja i deformacije, odnosno momenta rotacije ne prikazuje preciznu vrijednost za krajnju silu. U istraživanjima [11, 22-27], definirana je krajnja vrijednost deformacije koja iznosi 3 % širine (b_0) / visine (h_0) kojoj odgovara krajnja otpornost priključka, kao što je prikazano na slici 2. u dijagramu P- Δ (sila – deformacija).



Slika 2. Krajnja deformacija priključka

Na temelju eksperimentalnih istraživanja koja su proveli Wardenier i Stark 1978. i Kurobane 1980./1981., a u odnosu na ponašanje priključaka izravno zavarenih elemenata rešetkastih greda izrađenih od šupljih profila, formirani su osnovni načini otkazivanja priključaka [3] (slika 3.), na kojima se temelje proračunske otpornosti priključaka šupljih profila.

4. Numerička i eksperimentalna analiza krajnje otpornosti čeličnog Y priključka s oštećenjima

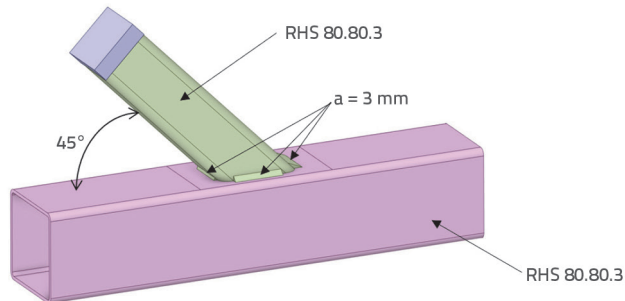
U ovom se radu istražuju učinci oštećenja elementa ispune na otpornost Y-priključka izrađenog od izravno zavarenih pravokutnih šupljih presjeka pod djelovanjem aksijalne sile. Za numerička i eksperimentalna ispitivanja odabrani su hladnooblikovani profili S235JR čelika. Element pojasa je izrađen od SHS-a $80 \times 80 \times 3$, a štap ispune je izrađen od SHS-a $50 \times 50 \times 4$. Element ispune je postavljen pod kutom od 45° u odnosu na element pojasa. Pojasni štap i štap ispune zavareni su kutnim zavarima debljine 3 mm. Duljine pojasnog štapa i štapa ispune bile su 400, odnosno 200 mm. Slika 4. prikazuje geometriju priključka bez oštećenja.

Način otkazivanja	Aksijalno opterećenje
(a) Otkazivanje lica pojasnice (plastično otkazivanje lica pojasnice) ili plastifikacija pojasa (plastično otkazivanje poprečnog presjeka pojasa)	
(b) Otkazivanje bočne stijenke pojasa (ili otkazivanje hrpta pojasa) popuštanjem, gnječenjem ili gubitkom stabilnosti (cripling ili savijanje bočne stijenke pojasa ili hrpta pojasa) ispod tlačnog elementa ispune	
(c) Otkazivanje pojasa u posmiku	
(d) Proboj stijenke cijevnog profila pojasa uslijed posmika (početak pukotine dovodi do odvajanja elementa ispune od elementa pojasa)	
(e) Otkazivanje elementa ispune sa smanjenom efektivnom širinom (pukotine u zavarima ili na elementima ispune)	
(f) Lokalno izbočivanje elementa ispune ili šupljeg profila elementa pojasa na mjestu priključka	

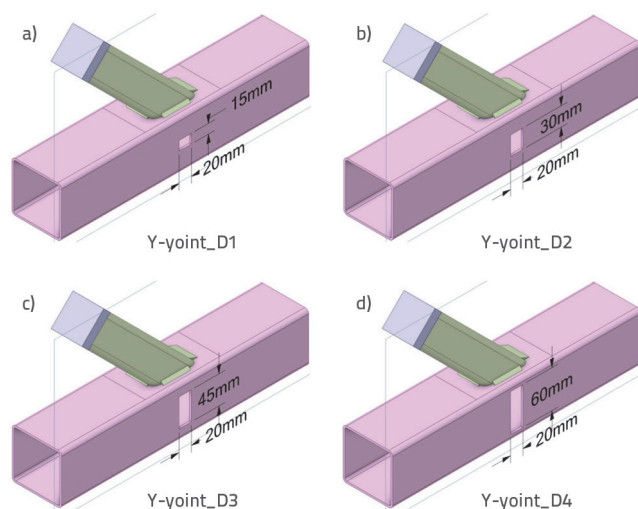
Slika 3. Načini otkazivanja priključaka elemenata ispune i pojasa pravokutnog šupljeg presjeka [3]

Ovim se istraživanjem željelo utvrditi u kojoj mjeri oštećenje i njegovo širenje u pojasnom štapu utječe na krajnju otpornost priključka u usporedbi s priključkom bez oštećenja. Predmet ovog istraživanja bilo je širenje oštećenja u vertikalnom smjeru; odnosno visina oštećenja se povećala, a širina oštećenja ostala je nepromijenjena. U tu su svrhu uspoređeni rezultati

neoštećenih i oštećenih uzoraka (slika 5. i tablica 1.) dobiveni metodom konačnih elemenata. Odabrano oštećenje bilo je u obliku pukotina (simuliranih kao uski pravokutnici) i nalazilo se s obje strane pojasnog štapa ispod priključka štapa ispune i pojasnog štapa.



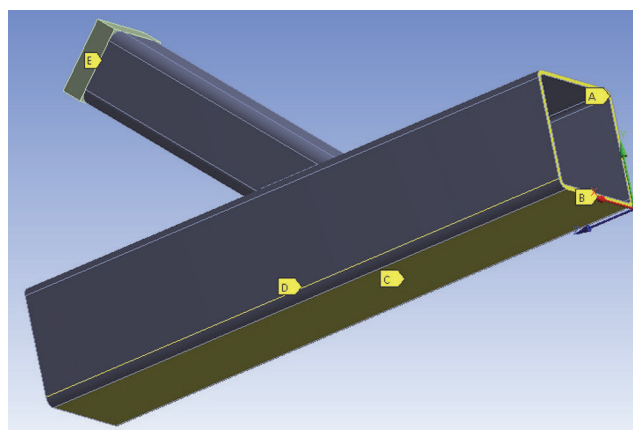
Slika 4. Geometrija uzorka bez oštećenja (Y-priključak_ND)



Slika 5. Analizirani uzorci s oštećenjima na bočnim stranama pojasnog štapa: a) Y-priključak_D1; b) Y-priključak_D2; c) Y-priključak_D3; d) Y-priključak_D4

4.1. Numerička analiza

Numeričkom su analizom ispitani priključci bez oštećenja i priključci s različitim postocima oštećenja (9,55 %, 19,10 %, 28,66 % i 38,21 %). Veličine oštećenja na objema stranama pojasnog štapa prikazane su u tablici 1. Proračunski model modeliran je metodom konačnih elemenata u programskom paketu ANSYS [28]. Analiza je uključivala geometrijske i materijalne nelinearnosti. Priključak je modeliran kao spoj dvaju čvrstih tijela. Pojasni štap i štapovi ispune modelirani su kao dva neovisna tijela. Ova dva elementa spojena su kutnim zavarom debljine 3 mm. Radi jednostavnosti, modelirani su samo ravni dijelovi zavara na kontaktu pojasnog štapa i štapa ispune, a kružni dio nije. Još jedno volumno tijelo modelirano je na slobodnom kraju štapa ispune. To volumno tijelo simulira sferni element koji se primjenjuje za prijenos sile na štap ispune. Da bi se postigla dovoljno visoka krutost, usvojeni materijal sfernog elementa imao je tisuću puta veće vrijednosti modula elastičnosti i čvrstoće materijala od elemenata priključka. Granični uvjeti (tablica 2. i slika 6.) i kontaktni uvjeti (između sferne ploče i dijagonalnog štapa ispune, dijagonalnog štapa ispune i zavara te zavara i pojasnog štapa) modelirani su kako bi se realno simulirali eksperimentalni uvjeti.



Slika 6. Granični uvjeti

Tablica 1. Analizirani uzorci

Uzorak	Veličina oštećenja s obje strane	Postotak oštećenja poprečnog presjeka [%]
Bez oštećenja (Y-priključak_ND)	-	0
Oštećenje 1 (Y-priključak_D2)	15 x 20 mm	9,55
Oštećenje 2 (Y-priključak_D2)	30 x 20 mm	19,10
Oštećenje 3 (Y-priključak_D3)	45 x 20 mm	28,66
Oštećenje 4 (Y-priključak_D4)	60 x 20 mm	38,21

Tablica 2. Rubni uvjeti

Objašnjenje slike 6.	Vrsta elementa	Spriječeni pomak
A	Površinski oslonac	Z = 0
B	Linijski oslonac	X = Y = Z = 0
C	Površinski oslonac	Y = 0
D	Linijski oslonac (obje strane elementa pojasa)	X = 0
E	Točkasti oslonac (sredina gornje površine volumne ploče)	Opterećenje kao pomak čvora Y = Z = 6 mm

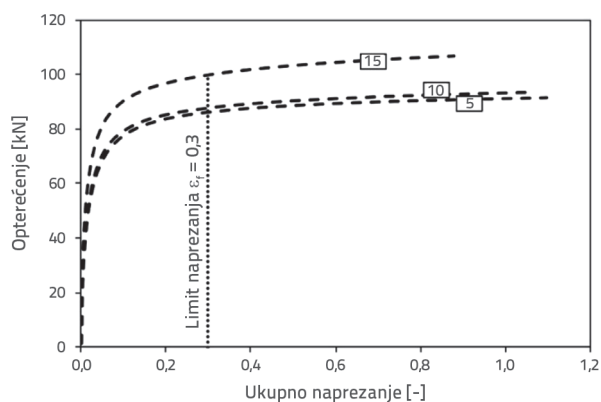
Tablica 3. Karakteristike materijala usvojenog za numeričku analizu

Element	f_v [MPa]	f_u [MPa]	E [MPa]
SHS 80x80x3	361	402	207400
SHS 50x50x4	410	430	201600

Kontakti između pojasnog štapa i kutnog zavora, kutnog zavora i štapa ispune, te štapa ispune i krutog tijela modelirani su primjenom spojenog kontaktnog para između površina lica tijela. Materijal u modelu odgovara materijalu na kojem je provedeno eksperimentalno ispitivanje (tablica 3.). Polja su modelirana s istim karakteristikama materijala kao i štap ispune (SHS 50x50x4). Nelinearno ponašanje čelika modelirano je multilinearom izotropnim očvršćivanjem. Nagib krivulje naprezanja i deformacije između granice popuštanja (f_v) i vlačne čvrstoće (f_u) usvojen je kao 1 % Youngovog modula elastičnosti (E). Nakon postizanja vlačne čvrstoće usvojeni materijal smatran je idealno plastičnim.

Mreža konačnih elemenata modelirana je pomoću generatora u programskom paketu. U područjima koncentracije visokih naprezanja, na gornjoj pojasnici pojasnog elementa, mreža konačnih elemenata je gušća (konačni elementi su bili dvostruko manji od konačnih elemenata na ostalim dijelovima modela) (slika 7.). Mreža je formirana pomoću elemenata SOLID187, višeg 3-D reda elemenata s 10 čvorova i kvadratnog ponašanja pomaka, što je pogodno za modeliranje mreža nepravilnog oblika. Istraživanja autora u radu [20] na Y-priključku pokazala su da elementi mreže manji od 10 mm nisu dali točnije rezultate (slika 8). Stoga je u ovom radu pri modeliranju priključka s oštećenjem i bez oštećenja usvojena mreža s elementima od 10 mm, tj. 5 mm u gušćem području (gornja pojasnica pojasnog elementa).

Aksijalna tlačna sila primijenjena je na element dijagonalnog priključka pomicanjem središnje točke tvrde plohe sferičnog priključka.

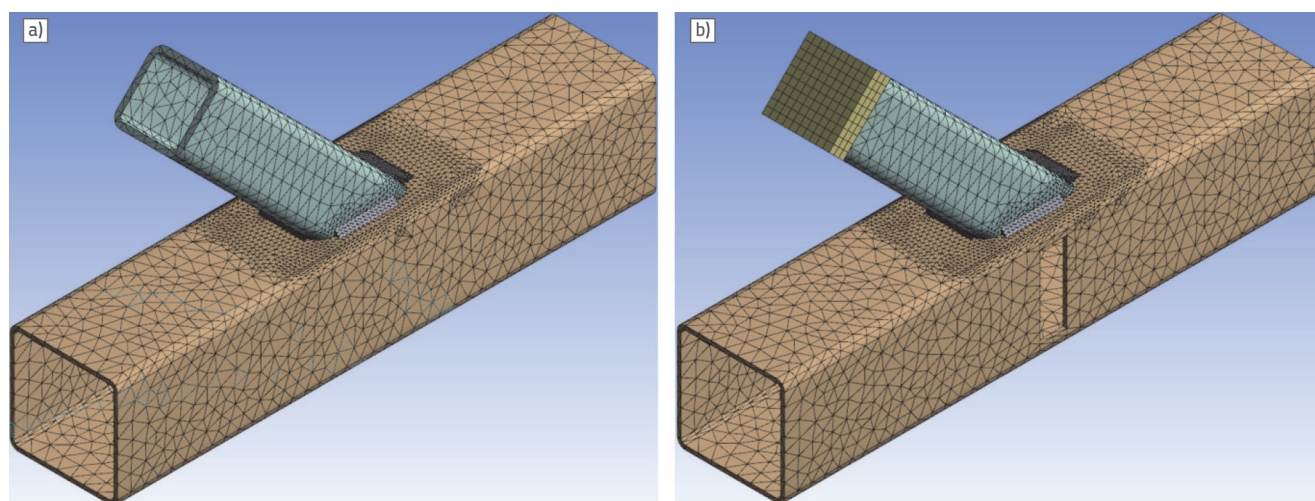


Slika 8. Analiza konvergencije mreže [20]

U tablici 4 navedene su vrijednosti krajnje otpornosti priključka dobivene numeričkom analizom metode konačnih elemenata.

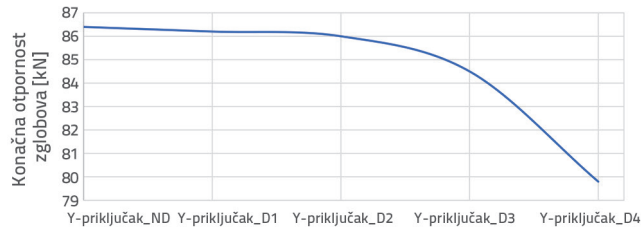
Tablica 4. Granični otpori priključka dobiveni primjenom metode konačnih elemenata

Uzorak	Granični otpor [kN]
Bez oštećenja (Y-priključak_ND)	86,4
Oštećenje 1 (Y-priključak_D1)	86,2
Oštećenje 2 (Y-priključak_D2)	86,0
Oštećenje 3 (Y-priključak_D3)	84,5
Oštećenje 4 (Y-priključak_D4)	79,8



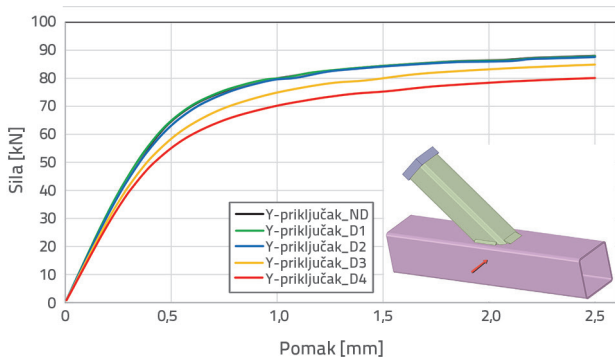
Slika 7. Mreža konačnih elemenata: a) priključka bez oštećenja; b) priključka s najvećim postotkom oštećenja

Kao što je i očekivano, rezultati numeričke analize pokazali su da s nastankom i daljnjim širenjem oštećenja dolazi do opadanja krajnje otpornosti priključka. Krajnja otpornost priključka određena je, u skladu s preporukama Međunarodnog instituta za zavarivanje (engl. *International Institute of Welding - IIW*), pri naprezanju u iznosu od (slika 9.). Ta je preporuka rezultat eksperimentalnih ispitivanja koja dokazuju da je kod kontrole otpornosti priključka granično stanje uporabljivosti nebitno, odnosno tijekom uporabe konstrukcije ne dolazi do pojave pukotina.

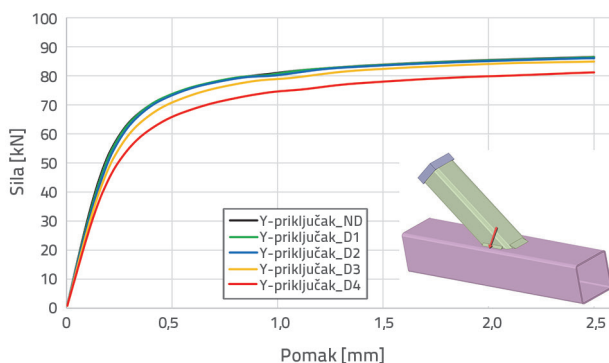


Slika 9. Dijagram graničnog otpora ovisno o stupnju oštećenosti

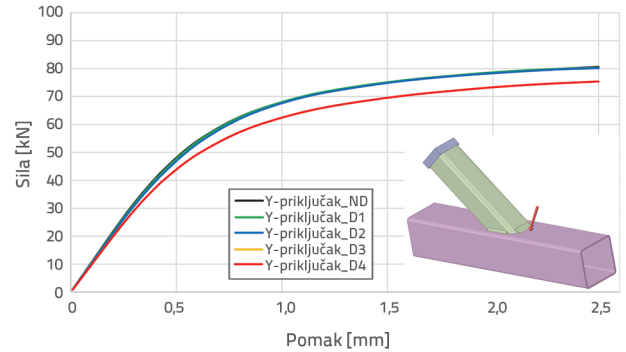
Slike 10., 11. i 12. prikazuju dijagrame pomaka točke na bočnoj stijenci elementa pojasa, na bočnoj strani gornje pojasnice i na gornjoj pojasnici elementa pojasa ispred elementa ispune, koji su određeni pomoću metode konačnih elemenata, za slučajeve uzoraka bez oštećenja i uzoraka s oštećenjem (9,55 %, 19,10 %, 28,66 % i 38,21 %).



Slika 10. Numerički dobiveni dijagrami sila-pomak točke bočne stijenke pojasnog štapa



Slika 11. Numerički dobiveni dijagrami sila-pomak točke na gornjoj pojasnici pojasnog štapa na strani štapa ispune

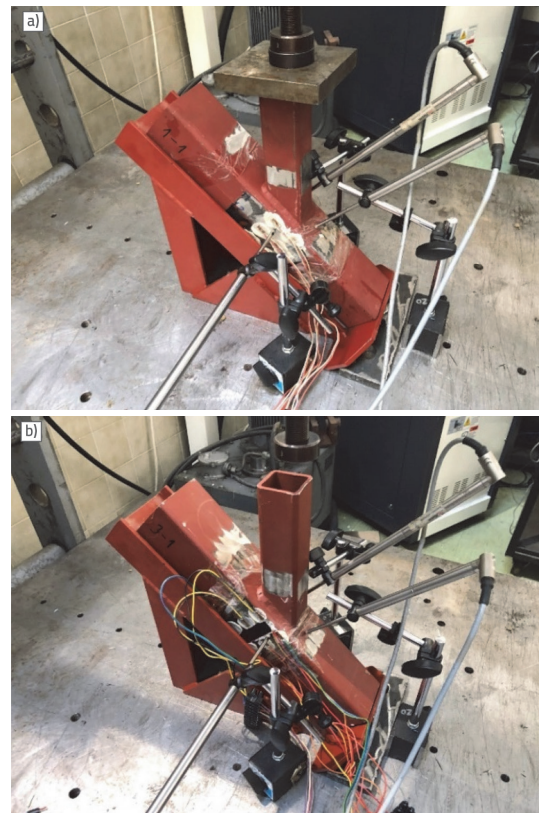


Slika 12. Numerički dobiveni dijagrami sila-pomak točke na gornjoj pojasnici pojasnog štapa ispred štapa ispune

Rezultati pokazuju da se s povećanjem postotka oštećenosti iste vrijednosti karakterističnog pomaka točke javljaju pri manjim intenzitetima aksijalnih sila; to jest, što je niži postotak oštećenosti, manji je pomak točke.

4.2. Eksperimentalna analiza

Eksperimentalna ispitivanja provedena su na uzorcima bez oštećenja, na dvije vrste uzoraka s oštećenjima, jednom uzorku s 19,10 % oštećenja (Y-priključak_D2) i jednom uzorku s 38,21 % oštećenja (Y-priključak_D4) (slika 13.). Ispitivanje je obavljeno hidrauličnom prešom kapaciteta 100 tona u laboratoriju Strojarskog fakulteta Sveučilišta u Nišu.



Slika 13. Ispitivanje uzorka: a) bez oštećenja (Y-priključak_ND), b) s oštećenjem 4 (Y-priključak_D4)

Za upisivanje i bilježenje rezultata primijenjena je sljedeća oprema za mjerenje (svu je opremu proizveo Hotinger Baldwin Messtechnik):

- uređaji za mjerenje pomaka (puta) WA 100, WA 50 i WA 20
- uređaji za mjerenje sile Z4A 100 kN
- tenzometri LY 41 – 6 mm 700 Ω i LY 21 – 1,5 mm 120 Ω ; mjerni uređaji zalijepljeni su dvokomponentnim ljepilom X60
- sklopka za tenzometre za pojedinačno statičko mjerenje naprezanja u jednoj točki mjerenja
- pojačalo Quantum MX 840.

Pojasni štap je u svrhu ispitivanja postavljen pod kutom od 45° u odnosu na vodoravnu ravninu, što je omogućilo hidrauličnoj preši prenijeti aksijalnu silu na dijagonalni element. Kako bi

se izbjegao ekscentrični prijenos sile na dijagonalni element, opterećenje se prenosilo preko sferičnog elementa postavljenog između dijagonalnog elementa i preše. Opterećenje se primjenjuje u propisanom rasponu definiranom u normi EN ISO 6892-1 [29].

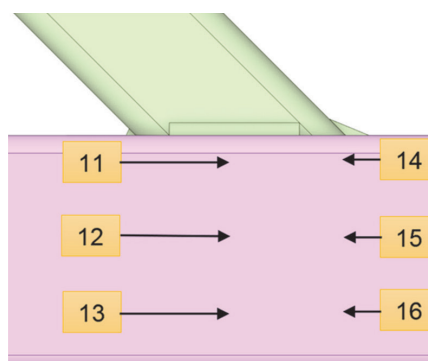
Tenzometri su raspoređeni prema raspoloživom prostoru za ugradnju na točku mjerenja i očekivanom naprezanju promatranih točaka na pojasnom štapu:

- tenzometri LY 41 – 6 mm 700 Ω – pozicije 11, 12, 13, 14, 15, 16, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 31, 32, 33, 34, 35, i 36
- tenzometri LY 21 – 1,5 mm 120 Ω – pozicije 29, 210, 37, 38.

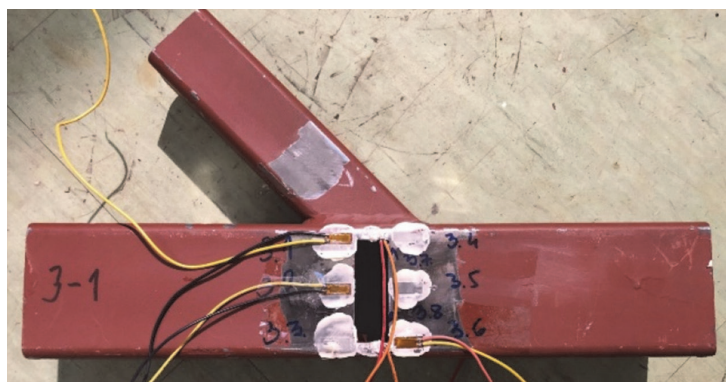
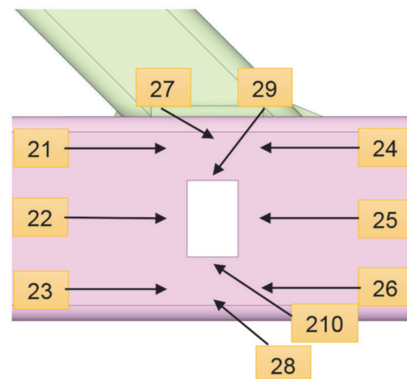
Slike 14., 15. i 16. prikazuju raspored tenzometara na modelu bez oštećenja (Y-priključak_ND) odnosno na oštećenim modelima 2 (Y-priključak_D2) i 4 (Y-priključak_D4).



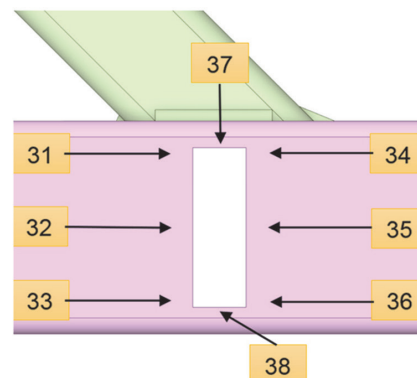
Slika 14. Raspored tenzometara na uzorku bez oštećenja (Y-priključak_ND)



Slika 15. Raspored tenzometara na uzorku s oštećenjem 2 (Y-priključak_D2)



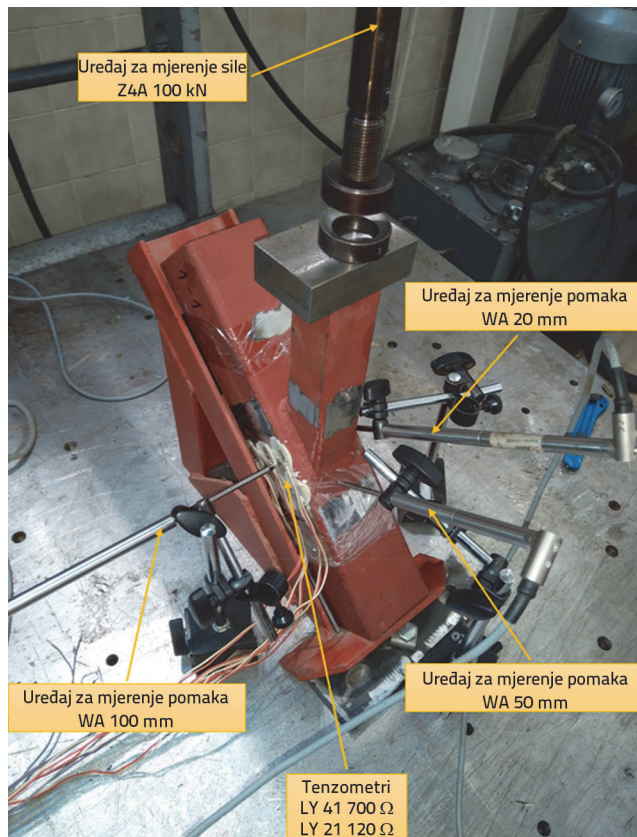
Slika 16. Raspored tenzometara na uzorku s oštećenjem 4 (Y-priključak_D4)



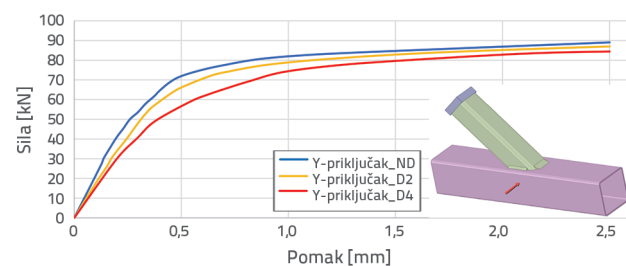
Slika 17. prikazuje raspored mjernih uređaja i tenzometara na neoštećenom uzorku (Y-priključak_ND).

Slike 18., 19. i 20. prikazuju eksperimentalno dobivene dijagrame sila-pomak karakterističnih točaka u kojima je došlo do najvećeg naprezanja.

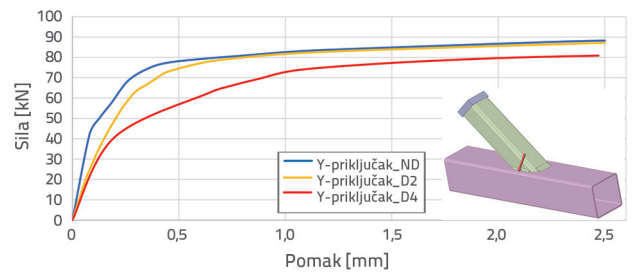
Promatrajući dijagrame na slikama 18., 19. i 20. može se zaključiti da na označenim točkama (točka na bočnoj stijenci elementa pojasa, točka na gornjoj pojasnici elementa pojasa na bočnoj strani elementa ispune i točka na gornjoj pojasnici elementa pojasa ispred elementa ispune) pri istoj sili, promatrani model ima veću deformaciju sa značajnijim oštećenjem, odnosno krajnja otpornost opada s povećanjem veličine oštećenja.



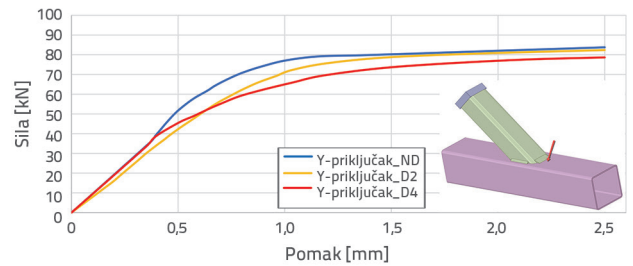
Slika 17. Raspored mjernih uređaja i tenzometara na uzorku bez oštećenja (Y-priključak_ND)



Slika 18. Eksperimentalno dobivene dijagrame pomaka točke na strani pojasnog štapa



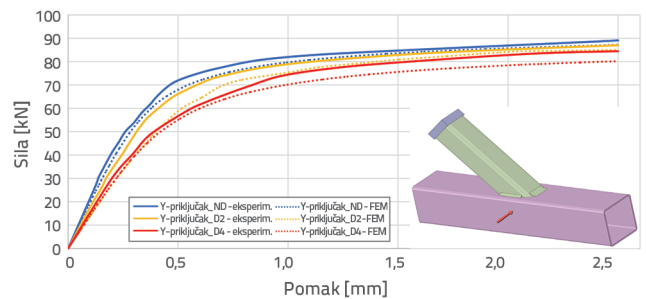
Slika 19. Eksperimentalno dobivene dijagrame pomaka točke na bočnoj pojasnici pojasnog štapa na bočnoj strani štapa ispune



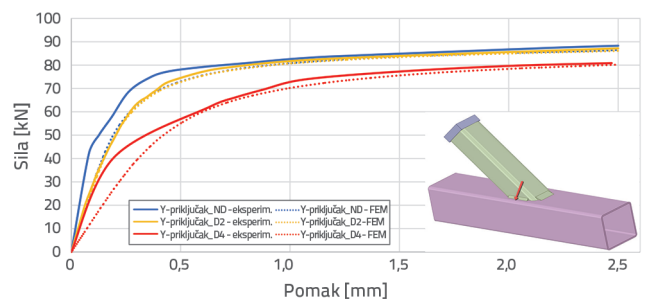
Slika 20. Eksperimentalno dobivene dijagrame pomaka točke na gornjoj pojasnici pojasnog štapa ispred štapa ispune

5. Diskusija

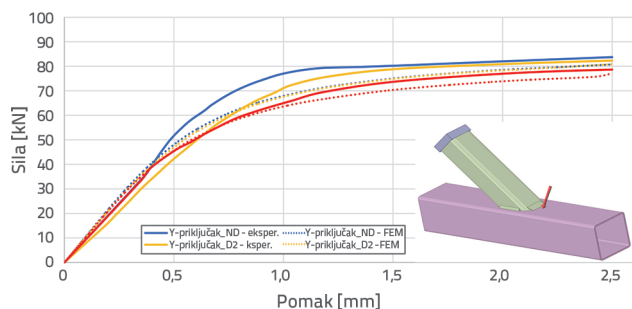
Na slikama 21., 22. i 23. prikazani su usporedni dijagrami pomaka karakterističnih točaka u kojima se očekuje najveće naprezanje, dobiveni metodom konačnih elemenata i eksperimentima.



Slika 21. Usporedni dijagrami pomaka točke na strani elementa pojasa



Slika 22. Usporedni dijagrami pomaka točke na gornjoj pojasnici elementa pojasa na bočnoj strani elementa ispune



Slika 23. Usporedni dijagrami pomaka točke na gornjoj pojasnici elementa pojasa ispred elementa ispune

U ovom su radu prikazani rezultati numeričkih i eksperimentalnih istraživanja izravno zavarenog Y priključka SHS pojasnog štapa i dijagonalnih elemenata s oštećenjem priključka u obliku uske vertikalne pravokutne pukotine. To se oštećenje širi po visini pojasnog štapa do maksimalne duljine, kao i po priključku s elementima bez oštećenja. Rezultati numeričkog istraživanja metodom konačnih elemenata i eksperimentalnog istraživanja su se podudarali. Odstupanje rezultata dobivenih numeričkim i eksperimentalnim postupcima iznosilo je u prosjeku 3 % do 5 %. Eksperimentalni podaci potvrđuju numerički dobivene rezultate. Povećanjem oštećenja dolazi do većeg naprezanja elemenata priključka pri istim intenzitetima aksijalnih sila, odnosno do pada krajnje otpornosti. Pomak točke, odnosno deformacija priključka u eksperimentalnim istraživanjima javlja se pri većim intenzitetima aksijalne sile. Oblik dijagrama eksperimentalnih

rezultata podudara se s oblikom dijagrama numerički dobivenih rezultata, uz nešto veće intenzitete aksijalnih sila.

6. Zaključak

U radu je prikazana primjena metode konačnih elemenata za analizu složenog stanja naprezanja i deformacije u čvoru rešetke, što nije uvijek moguće pri primjeni analitičkih metoda. Eksperimentalna je analiza potvrdila rezultate proračuna za određeni broj usvojenih parametara odabranog modela konačnih elemenata.

Krajnja otpornost priključka postignuta je zbog iscrpljivanja lokalne plastifikacije površine elementa pojasa (načini otkazivanja (a) i (b), prema tablici 3. [3]).

U zonama priključaka s najizraženijom deformacijom tijekom ispitivanja nisu otkrivene pukotine.

Istraživanjem je utvrđena ovisnost graničnog otpora i stupnja oštećenosti kao posljedica širenja oštećenja, što je olakšalo procjenu nosivosti konstrukcije tijekom praćenja stanja konstrukcije.

Na temelju rezultata numeričke i eksperimentalne analize zaključeno je da s povećanjem oštećenja pojasnog štapa priključka, krajnja otpornost priključka nelinearno opada. Pad krajnje otpornosti uzoraka s oštećenjem od 9,55 % i 19,10 % je zanemariv i iznosi otprilike 0,5 %, dok je kod ispitivanih uzoraka s oštećenjem presjeka pojasnog štapa od 38,21 % zabilježen pad krajnje otpornosti priključka bio otprilike 8 %, što pokazuje dobro ponašanje priključka za odabrano oštećenje.

LITERATURA

- [1] Milošević, M., Živković, S.: Rešetkasti nosači bez čvornih limova od šupljih čeličnih profila, Zbornik radova Građevinsko-arhitektonskog fakulteta, 31 (2016) 16, pp. 92-111.
- [2] EN 1993-1-1 – Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- [3] EN 1993-1-8 – Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints.
- [4] Dobrić, D.J.: Analiza ponašanja čvorova rešetkastih nosača od šupljih profila, magistarski rad, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2007.
- [5] Wardenier, J., Kurobane, Y., Packer, J.A., Van der Vegte, G.J., Zhao, X.L.: Design guide for circular hollow section (CHS) joints under predominantly static loading, CIDECT, TUV-Verlag, 2008.
- [6] Zhao, X.L., Herion, S., Packer, J.A., Puthli, R.S., Sedlacek, G., Wardenier, J., Yeomans, N.F.: Design guide for circular and rectangular hollow section welded joints under fatigue loading, CIDECT, TUV-Verlag, 2001.
- [7] Zhao, X.L., Wardenier, J., Packer, J.A., Vegte, G.V.D.: Current static design guidance for hollow-section joints, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 163 (2010) 6, pp. 361-373, <https://doi.org/10.1680/stbu.2010.163.6.361>
- [8] Lan, X., Chan, T.M.: Recent research advances of high strength steel welded hollow section joints, Structures, 17 (2019), pp. 58-65, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.11.015>
- [9] Živković, S.: Doprinos proračunu direktno zavarenih veza elemenata rešetkastih nosača od šupljih čeličnih profila pravougaonog i kvadratnog poprečnog preseka, doktorski rad, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Univerziteta u Nišu, 2014.
- [10] Yang, D.P., Shao, Y.B., Long, F.L., Niu, G.Q., Zhang, L., Zhi, J.B.: Static strength of RHS T-joints with reinforced chord under in-plane bending load, Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publication Ltd., 488 (2014), pp. 790-794, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.488-489.790>
- [11] Garifullin, M., Pajunen, S., Mela, K., Heinisuo, M.: Finite element model for rectangular hollow section T joints, Rakenteiden Mekaniikka (Journal of Structural Mechanics), 51 (2018) 3, pp. 15-40, <https://doi.org/10.23998/rm.70439>
- [12] 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. <https://doi.org/10.1201/9781351210843-20>

- [13] 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. https://doi.org/10.3850/978-981-11-0745-0_055-cd
- [14] Nassiraei, H., Lotfollahi-Yaghin, M.A., Ahmadi, H.: Static strength of collar plate reinforced tubular T/Y-joints under brace compressive loading, Journal of Constructional Steel Research, 119 (2016), pp. 39-49, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.12.011>
- [15] Yin, Y., Lui, X., Lei, P., Zhou, L.: Stress concentration factor for tubular CHS-to-RHS Y-joints under axial loads, Journal of Constructional Steel Research, 148 (2018), pp. 768-778, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.06.003>
- [16] 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.
- [17] Lie, S.T., Lee, C.K., Wong, S.M.: Model and mesh generation of cracked tubular Y-joints, Engineering Fracture Mechanics, 70 (2003) 2, pp. 161-184, [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(02\)00036-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(02)00036-X)
- [18] Lee, M.M.K.: Strength, stress and fracture analyses of offshore tubular joints using finite elements, Journal of Constructional Steel Research, 51 (1999) 3, pp. 265-286, [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(99\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(99)00025-5)
- [19] 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.
- [20] 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), 27 (2020) 6, pp. 2083-2088, <https://doi.org/10.17559/TV-20190513073712>
- [21] 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, 379 (2000) 1-2, pp. 147-155, [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(00\)01559-5](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(00)01559-5)
- [22] Packer, J.A., Wardenier, J., Kurobane, Y., Dutta, D., Yeomans, N.: Design Guide for Rectangular Hollow Section (RHS) Joints Under Predominantly Static Loading, The International Committee for the Study and Development of Tubular Structures, Köln, Germany 1992.
- [23] Lu, L.H., de Winkel, G.D., Wardenier, Yu, Y.: Deformation limit for the ultimate strength of hollow section joints, Proceedings of the Sixth International Symposium on Tubular Structures, Melbourne, Australia, 1994.
- [24] Lu, L.H.: The static strength of I-beam to rectangular hollow section column connections, PhD thesis, Delft University Press, Delft, The Netherlands, 1997.
- [25] De Winkel, G.D.: The static strength of I-beam to circular hollow section column connections, PhD thesis, Delft University Press, Delft, The Netherlands, 1998.
- [26] Zhao, X.L.: Deformation limit and ultimate strength of welded T-joints in cold-formed RHS sections, Journal of constructional steel research, 53 (2000) 2, pp. 149-165.
- [27] Kosteski, N., Packer, J.A., Puthli, R.S.: A finite element method based yield load determination procedure for hollow section connections, Journal of Constructional Steel Research, 59 (2003) 4, pp. 453-471.
- [28] ANSYS – Software manual.
- [29] EN ISO 6892-1:2020: Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature (ISO 6892-1:2019).