

Društvo građevinskih konstruktera Srbije - 16. KONGRES

28-30. 09. 2022.
ARANĐELOVAC



ZBORNIK RADOVA SA NACIONALNOG KONGRESA

U SARADNJI SA



Република Србија
Министарство
просвете, науке и
технолошког развоја

POKROVITELJ



Инђињерска
комора
Србије

PLATINASTI SPONZORI



PUT INZENJERING



ZLATNI SPONZORI





Ivan Milićević¹, Branko Milosavljević², Milan Spremić³, Rastislav Mandić⁴

PONAŠANJE VEZE ZAVRTNJA I ARMATURE OSTVARENE POMOĆU MEHANIČKE SPOJNICE PRI DEJSTVU SILE ZATEZANJA

Rezime:

Primena montažno-demontažnih veza između čeličnih i AB elemenata omogućava ubrzani proces i smanjenje troškova izgradnje građevinskih konstrukcija ali i njihovu potencijalnu ponovnu upotrebu, što vodi ka održivom razvoju i cirkularnoj ekonomiji. Montažno-demontažni konektor koga čine: (1) mehanička spojnica i armaturni anker koji se postavljaju u opлатu pre betoniranja, i (2) zavrtanjem kojim se čelični element povezuje za betonskim sve češće se koristi u savremenim montažno-demontažnim građevinskim konstrukcijama. Nosivost i ponašanje spregnute veze pri dejstvu sila smicanja, sila zatezanja ili njihove interakcije, za ove tipove konektora još uvek su nedovoljno istraženi. U radu su analizirani nosivost i lokalno ponašanje ovakvog konektora pri dejstvu sile zatezanja, na osnovu eksperimentalnih rezultata i numeričke analize u programu Abaqus.

Ključne reči: mehaničke spojnice, demontažne veze, zatezanje, spregnute konstrukcije

THE BEHAVIOUR OF THREADED SPLICING CONNECTION BETWEEN BOLT AND REINFORCEMENT UNDER TENSION LOAD

Summary:

The use of demountable connections between steel and RC elements reduces the construction time and costs of composite structures while enabling the reuse of these elements, which leads to a sustainable design and circular economy. A specific type of demountable connector is made out of two parts: (1) mechanical coupler and rebar anchor placed in formwork before casting of concrete element, and (2) steel bolt used for connecting steel to concrete element. It is increasingly being used in contemporary demountable building structures. The resistance and behaviour of composite connections under shear or tension forces, as well as their interaction, for this type of connectors are still insufficiently defined. The paper presents local behaviour and resistance of this type of connector under tension load, based on experimental tests and numerical analysis conducted in Abaqus software.

Key words: mechanical couplers, demountable connections, tension load, composite structures

¹ Mast.inž.građ., asistent, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bul. kralja Aleksandra 73, ivanm@imk.grf.bg.ac.rs

² Dr. v.profesor, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bul. kralja Aleksandra 73, brankom@imk.grf.bg.ac.r

³ Dr. v. profesor, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bul. kralja Aleksandra 73, spremic@imk.grf.bg.ac.rs

⁴ Dr. profesor u penziji, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bul. kralja Aleksandra 73, rale@grf.bg.ac.rs

1. UVOD

Kombinovanje čeličnih i armiranobetonskih elemenata u spregnutim i mešovitim građevinskim konstrukcijama proisteklo je iz težnje ka skraćenju vremena i smanjenju troškova izgradnje građevinskih objekata. Ponašanje ovakvih konstrukcija značajno zavisi od ponašanja spoja između čeličnih i AB elemenata, koji se ostvaruju primenom mehaničkih spojnih sredstava odnosno konektora. Ključni faktori koji utiču na ponašanje spojeva su: (1) sile koje deluju na konektore, (2) položaj konektora u odnosu na raspoložive dimenzije AB elementa, i (3) tip i geometrija primjenjenog konektora.

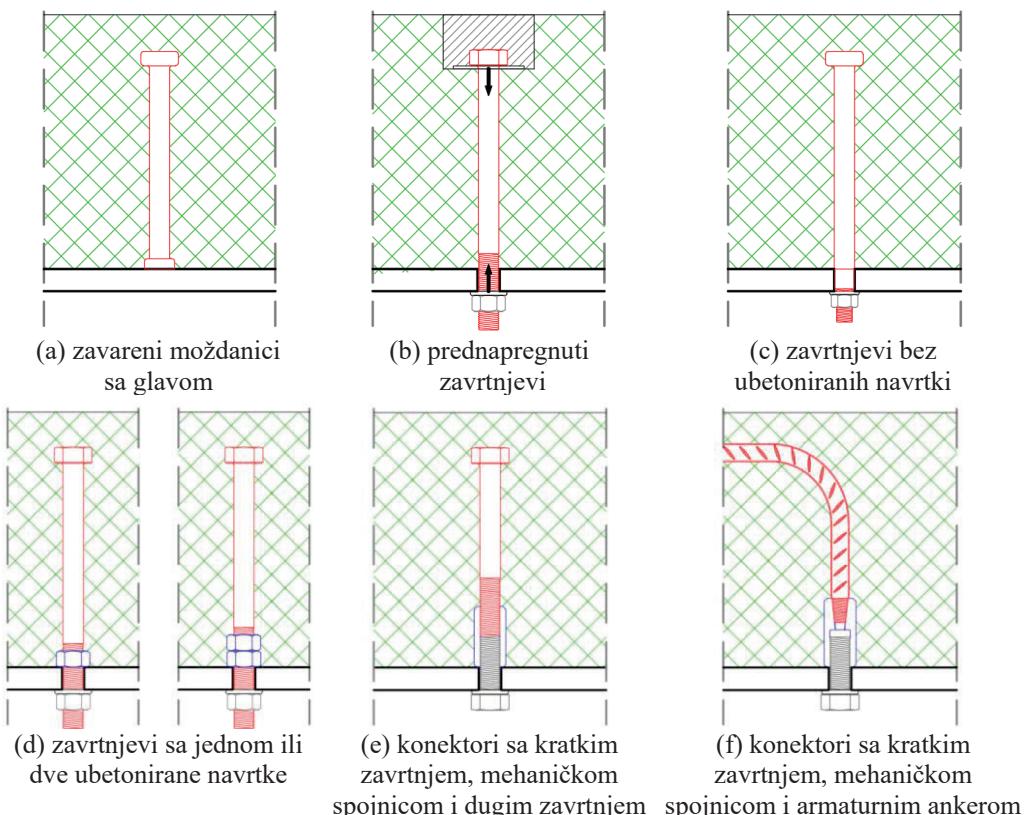
Sile koje se prenose na spoju čeličnog i armiranobetonskog elementa zavise od tipa njihovog spoja. U opštem slučaju, spojevi mogu biti napregnuti momentima savijanja, momentima torzije, smičućim i aksijalnim silama odnosno njihovom kombinacijom. Pri tome, momenti savijanja i momenti torzije koji deluju na grupu konektora u spoju mogu se razložiti na aksijalne sile i smičuće sile koje deluju na pojedinačne konektore u spoju, respektivno [1]. Ponašanje samostalnih konektora pri kombinovanom dejstvu sila smicanja i zatezanja zavisi od njihovog ponašanja pri čistom smicanju i pri čistom zatezanju kao i od odnosa ovih sila, tj. ugla pod kojim deluje rezultantna sila.

Spojevi čeličnih i armiranobetonskih elemenata tradicionalno se ostvaruju zavarivanjem moždanika sa glavom na flanšama čeličnog profila, kontinualno i uniformno duž flanše (videti sliku 1(a)). Razlog leži u brzom izvođenju primenom automatskog zavarivanja kao i u njihovom adekvatnom i pouzdanom ponašanju pri smicanju, zatezanju i njihovoј interakciji, što je dokazano brojnim eksperimentalnim i numeričkim istraživanjima [2,3]. Za razliku od spojeva sa zavarenim moždanicima, upotreba spojeva sa demontažnim konektorima omogućava relativno jednostavnu demontažu i ponovnu upotrebu konstruktivnih elemenata pa čak i kompletnih konstrukcija na kraju „prvog upotrebnog veka“. Tokom proteklih nekoliko decenija, izvršeno je više eksperimentalnih i numeričkih analiza različitih tipova demontažnih konektora, među kojima su najzastupljeniji prikazani na slikama 1(b)-1(d). U pogledu smičućeg ponašanja, zaključeno je da ovi konektori imaju uporedivu nosivost sa zavarenim moždanicima, ali značajno manju krutost kao i duktilnost. Uočeno je da se postavljanjem jedne ili dve ubetonirane navrtke povećava krutost konektora. U pogledu ponašanja pri zatezanju, zaključeno je da su vidovi loma i nosivost demontažnih konektora koji se sidre glavom slični kao kod zavarenih moždanika [1].

U poslednjih nekoliko godina, različite grupe istraživača analizirale su primenu demontažnih smičućih konektora sa zavrtnjevima i mehaničkim spojnicama (kaplerima), koje se najčešće koriste za nastavljanje zategnutih armaturnih šipki u AB konstrukcijama. Ovi tipovi konektora prikazani su na slikama 1(e) i 1(f). Spoj između čeličnog i AB elementa na gradilištu ostvaruje se pomoću kratkog zavrtnja koji se vezuje za prethodno ubetoniranu mehaničku spojnicu u AB element. Sidrenje konektora u AB element može se ostvariti povezivanjem mehaničke spojnice sa drugim, dužim zavrtnjem [4,5] ili povezivanjem mehaničke spojnice sa armaturnim ankerom [6,7]. Rezultati istraživanja smičućeg ponašanja su pokazali da su ovi konektori slični zavrtnjevima sa ubetoniranim navrtkama. Bez obzira na način sidrenja konektora, istaknuto je da se pri dejstvu poduznog smicanja deformacija dominantno javlja u kratkom zavrtnju. Imajući u vidu da je u tom slučaju površina AB elementa na mestu konektora ravna, primena konektora sa mehaničkom spojnicom omogućava jednostavniju demontažu nego primena ostalih demontažnih konektora.

U slučaju dejstva sile zatezanja, konektori sa mehaničkom spojnicom imaju kompleksnije ponašanje u poređenju sa ostalim konektorima prikazanim na slici 1. Razlog leži u tome što su konektori sa mehaničkom spojnicom, u opštem slučaju, formirani spajanjem tri elementa različitih mehaničkih i geometrijskih karakteristika (videti slike 1(e) i 1(f)). Stoga, njihovo ponašanje pri zatezanju, a samim tim i pri kombinovanom naprezanju, zavisi od ponašanja „najslabije karike“ u konektoru. Na primer, kod konektora koje su koristili Yang i ost. [4] mehaničke spojnice imale su značajne deformacije pri ispitivanju konektora na zatezanje. S druge strane, kod konektora sa mehaničkom spojnicom i armaturnim ankerom, armaturni anker može biti najslabija karika ukoliko se koriste visokovredni zavrtnjevi [8].

Cilj ovog rada je analiza lokalnog ponašanja konektora koji je formiran povezivanjem zavrtnja, mehaničke spojnice i armaturnog ankera pri zatezanju (slika 1(f)). U tu svrhu, izvršeno je eksperimentalno ispitivanje neubetoniranog konektora testom zatezanja na kidalici. Tokom ispitivanja mereni su intezitet sile zatezanja i deformacije konektora na karakterističnim mestima. Na osnovu rezultata eksperimentalnog ispitivanja izvršena je numerička nelinearna analiza konektora sa mehaničkom spojnicom u programu Abaqus, sa akcentom na modeliranju veze između mehaničke spojnice i armaturnog ankera.



Slika 1 – Primeri različitih tipova spojnih sredstava

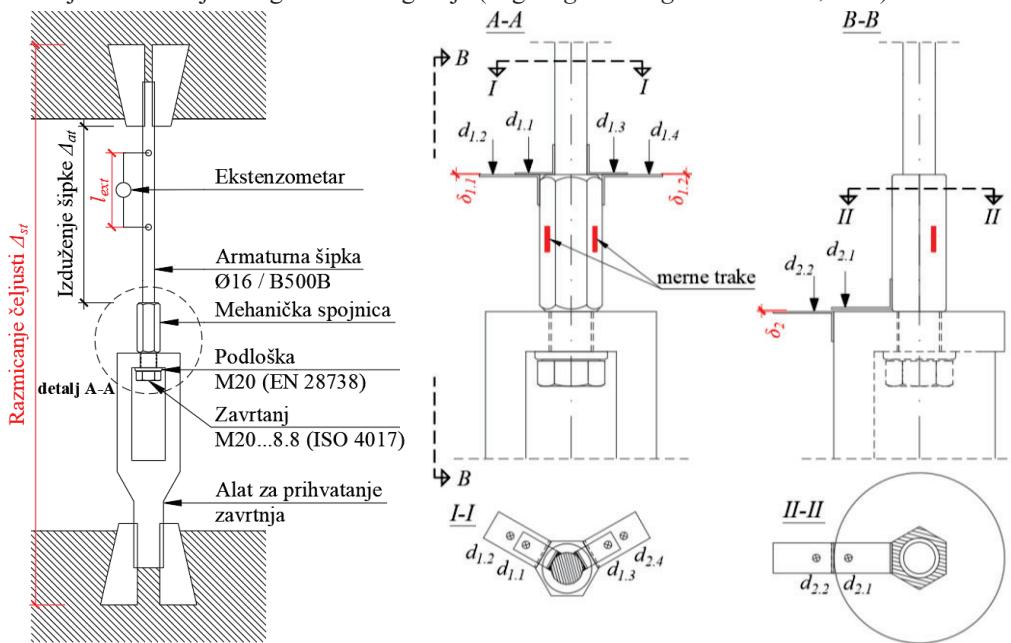
2. EKSPERIMENTALNA ANALIZA

Ponašanje i nosivost konektora sa mehaničkom spojnicom i armaturnim ankerom određeni su eksperimentalnim putem, ispitivanjem na kidalici Shimadzu kapaciteta 300 kN. Analizirani konektori formirani su povezivanjem zavrtnja M20 i armaturne šipke prečnika $d_a = 16$ mm pomoću mehaničke spojnice. Veza između zavrtnja i mehaničke spojnice ostvarena pomoću standardnog metričkog navoja dok je veza između armature i spojnice ostvarena pomoću koničnog navoja (videti sliku 1(f)). Mehaničke karakteristike čelika od kojih su napravljeni elementi konektora prikazane su u Tabeli 1.

Tabela 1 – Ispitane mehaničke karakteristike komponenata demontažnog konektora

| Komponenta | Modul elastičnosti E (GPa) | Granica razvlačenja $f_{0,2}$ (MPa) | Čvrstoća pri zatezanju f_u (MPa) | Uk. dilatacija pri kidanju ϵ_u (%) |
|---------------|------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---|
| Zavrtanj M20 | 204,3 | 855,2 | 930,6 | 16,19 |
| Meh. spojnica | 206,6 | 770,1 | 846,0 | 6,94 |
| Armatura Ø16 | 193,3 | 554,7 | 668,4 | 19,65 |

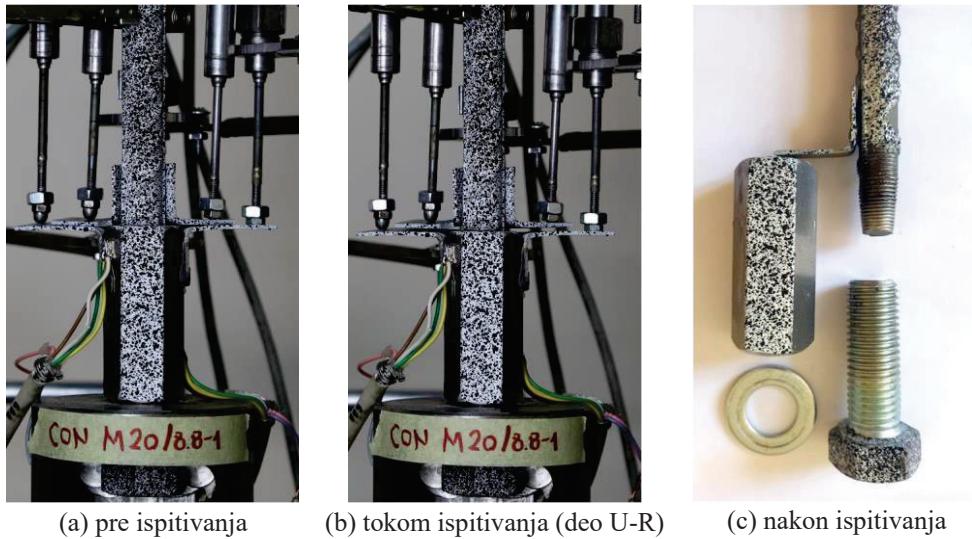
Dispozicija ispitivanja konektora na kidalici zajedno sa merenim veličinama (označenim crvenom bojom) prikazana je na slici 2. Ukupno su ispitana 2 uzorka. Zavrtnjevi su prednapregnuti silom koja je približna jednaka 20% sile punog prednaprezanja. Sila zatezanja nanošena je pri konstantom prirastu razmicanja čeljusti kidalice u iznosu 1,0 mm/min. Merenje deformacija uzorka prilikom nanošenja sile izvršena je na dva načina: (1) merenjem u diskretnim tačkama pomoću induktivnih ugibomera, mernih traka i ekstenzometra, i (2) merenjem korelacijom digitalnih fotografija (eng. *Digital Image Correlation, DIC*).



Slika 2 – Dispozicija ispitivanja konektora sa mehaničkom spojnicom na zatezanje na kidalici

U prvom slučaju, izduženje armaturne šipke mereno je ekstenzometrom na dužini l_{ext} , sa mernom bazom od 100 mm. Pomeranja $d_{1,1}$ do $d_{2,2}$ merena su pomoću 6 induktivnih ugibomera (LVDT) sa nezavisnih, fiksnih tačaka. Izvlačenja armature iz mehaničke spojnice $\delta_{1,1}$ i $\delta_{1,2}$ određena su na kao razlike izmerenih pomeranja $d_{1,1}$ i $d_{1,2}$ odnosno $d_{1,3}$ i $d_{1,4}$, respektivno. Veličina δ_1 predstavlja srednju vrednost izvlačenja $\delta_{1,1}$ i $\delta_{1,2}$. Na sličan način dobijeno je odvajanje mehaničke spojnice od površine čeličnog alata δ_2 , na osnovu kog su sračunate dilatacije zavrtnja ε_b na debljini steznog paketa od 24 mm. Dilatacije mehaničke spojnice ε_{co} merene su pomoću mernih traka, na mestu između zavrtnja i armature kao najslabijeg preseka, kao što je prikazano na slici 1(f). Rezultati merenja deformacija u diskretnim tačkama i primenom DIC metode imali su dobra poklapanja. U ovom radu su prikazani samo rezultati merenja deformacija u diskretnim tačkama.

Izgled konektora pre, tokom i nakon ispitivanja prikazan je na slici 3. Oba uzorka pretrpela su lom izvlačenjem armature iz mehaničke spojnice. Deformacije spojnice i zavrtnja bile su zanemarljive, pa ih je bilo moguće jednostavno demonterati nakon ispitivanja (slika 3(c)).

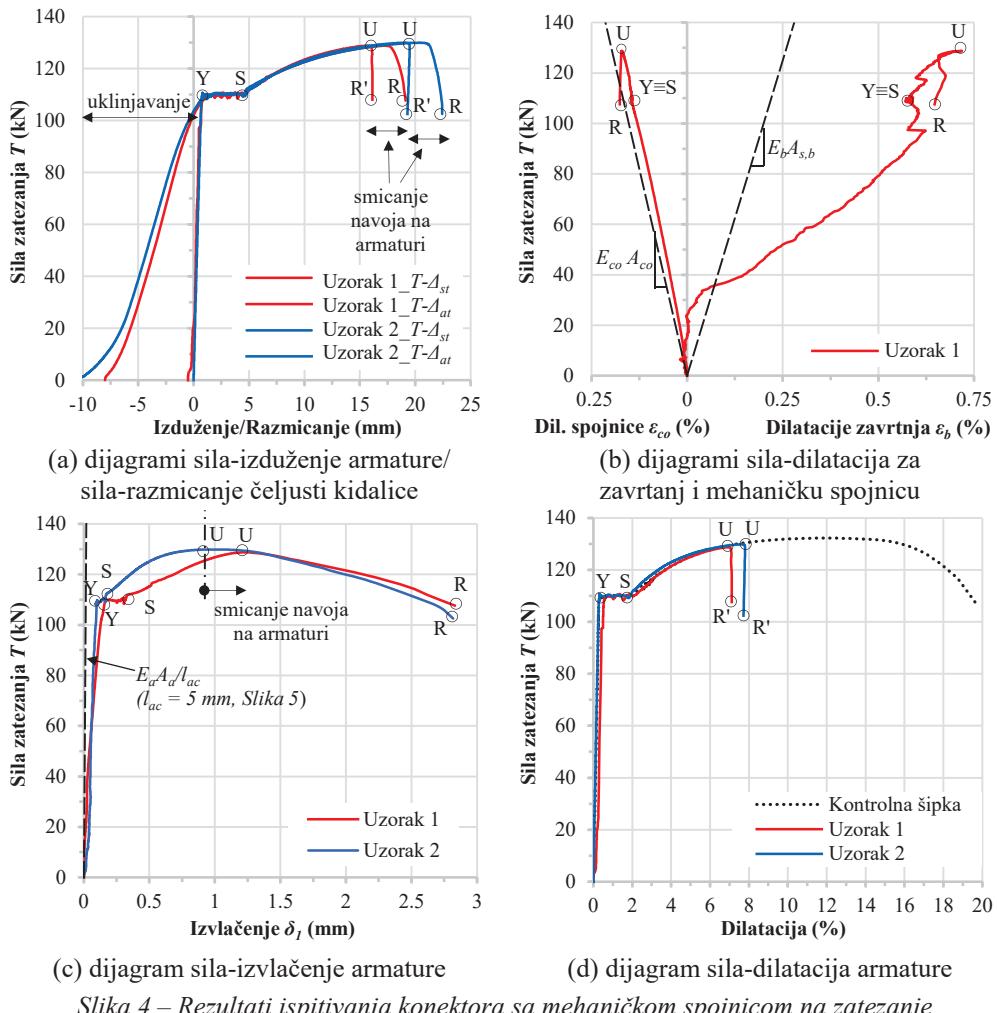


Slika 3 – Izgled konektora sa mehaničkom spojnicom pre, tokom i nakon ispitivanja na zatezanje

Rezultati eksperimentalnih ispitivanja prikazani su na slici 4. Nosivost uzoraka 1 i 2 na zatezanje iznosi $T_{u,1} = 128,7$ kN i $T_{u,2} = 129,9$ kN, što je oko 4% manje od nosivosti kontrolne šipke. Na slici 4(a) prikazana je zavisnost razmicanja čeljusti kidalice Δ_{st} i izduženja čiste dužine armaturne šipke Δ_{at} u funkciji sile zatezanja T . Izduženje šipke Δ_{at} dobijeno je skaliranjem izduženja izmerenih pomoću ekstenzometra. Na dijagramima se uočavaju 4 karakteristične tačke: „Y“ – početak tečenja armature, „S“ – početak ojačanja armature, „U“ – maksimalna nosivost armature odnosno konektora, „R“ – lom konektora. Na osnovu prikazanih dijagrama može se zaključiti da se pomeranja Δ_{st} i Δ_{at} značajno razlikuju sve dok se armatura nalazi u elastičnoj oblasti, zbog ukljinjavanja čeljusti kidalice u šipku armature i u alat za prihvatanje zavrtnja. U znatno manjoj meri, toj razlici doprinosi i elastično izduženje zavrtnja i mehaničke spojnice čemu svedoče male, povratne dilatacije ova dva elementa (slika 4(b)). Nakon toga, razlike između Δ_{st} i Δ_{at} dve veličine su praktično zanemarljive sve do dostizanja maksimalne

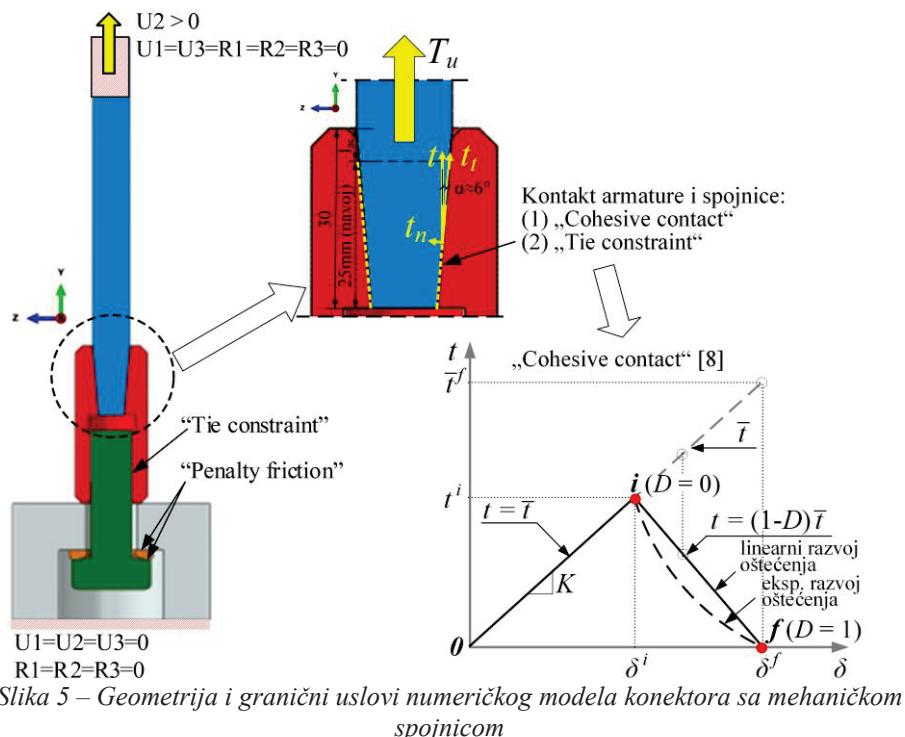
nosivosti konektora. Rezultati su pokazali da ponašanje konektora kao celine odgovara ponašanju kontrolne šipke (slika 4(d)). Dostizanje maksimalne sile zatezanja u konektoru poklapa se sa početkom pojave smicanja i savijanja koničnog navoja na armaturi unutar mehaničke spojnice. Rezultat toga je izvlačenje armaturnog ankera iz mehaničke spojnice i povećanje merene veličine δ_1 na delu U-R, kao što je prikazano na slici 4(c). U ovoj oblasti, u armaturnom ankeru nema dodatnog prirasta dilatacija, što je ilustrovano linijom U-R' na slikama 4(a) i 4(d).

Rezultati merenja veličina δ_1 i δ_2 u elastičnoj oblasti pokazali su određena odstupanja od teorijski sračunatih vrednosti odgovarajućih krutosti, kao što se može videti na slikama 4(b) i 4(c). Ova odstupanja su posebno naglašena u slučaju odvajanja δ_2 odnosno dilatacija zavrtnja ε_b na dužini steznog paketa. Razlog leži u velikoj udaljenosti LVDT ugibomera od mesta odgovarajućih veza komponenta konektora, što se može uočiti na slici 2(b). Poredjenja radi, rezultati merenja DIC metodom pokazali su bolja poklapanja sa teorijskim vrednostima.



3. NUMERIČKA ANALIZA

Numerička analiza konektora sa mehaničkom spojnicom izvršena je na trodimenzionalnom (3D) nelinearnom modelu u programu Abaqus [8], koji je prikazan na slici 5. Prilikom formiranja modela napravljena su geometrijska pojednostavljena u odnosu na realnu geometriju delova konektora, u skladu sa zaključcima iz eksperimentalne analize. Zbog elastičnog ponašanja zavrtnja tokom ispitivanja, navoj na zavrtnju nije eksplicitno modeliran već je duž tela zavrtnja usvojen konstantan kružni poprečni presek čija je površina jednaka površini ispitnog preseka zavrtnja. Dodatno, veza zavrtnja i mehaničke spojnice modelirana je kao kruta veza („Tie constraint“). Navoji na armaturnom ankeru i mehaničkoj spojnci su takođe izostavljeni, zbog složene geometrije navoja na orebrenim armaturnim šipkama (videti sliku 3(c)). Veza armature i spojnice modelirana je idealizovanom konusnom kontaktom površinom, kao što je prikazano na slici 5. Usvojeno je da se kontakt ostvaruje na dužini od 25 mm, što je manje od ukupne dužine šipke unutar spojnice. Razlog tome je odsustvo kompletног navoja na gornjem delu armaturnog ankera. Veza između armature i spojnice je modelirana na dva načina, krutom vezom („Tie constraint“) i tzv. kohezivnim kontaktom („Cohesive contact“) prema [8].



Kohezivni kontakt između dve površine definisan je vezom nominalnog napona t u funkciji relativnog pomeranja (odvajanja) površina δ , koja je prikazana na slici 5. Prema [8], ova veza ima četiri karakteristična dela: $0-i$ – elastični deo, i – inicijacija oštećenja veze, $i-f$ – deo razvoja oštećenja veze, f – potpuno oštećenje (prekid) veze. Elastično ponašanje kontakta definisano je vezom napon-pomeranje:

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_n & 0 & 0 \\ 0 & K_s & 0 \\ 0 & 0 & K_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} \quad (1)$$

gde su

- t_n, t_s, t_t normalni, tangencijalni i podužni nominalni naponi,
- $\delta_n, \delta_s, \delta_t$ normalno, tangencijalno i podužno relativno pomeranje,
- K_n, K_s, K_t normalna, tangencijalna i podužna krutost.

Degradacija i prekid kontakta između dve površine definisani su kriterijumom inicijacije oštećenja, funkcijom (zakonom) razvoja oštećenja i maksimalnim relativnim pomeranjem. Kriterijum inicijacije oštećenja može biti definisan odgovarajućim maksimalnim naponom (t^*) ili maksimalnim pomeranjem (δ^*) iz jednačine (1). U opštem slučaju, funkcija razvoja oštećenja može imati proizvoljan oblik. Primera radi, na slici 5 prikazane su linearna i eksponencijalna funkcija razvoja oštećenja. Bez obzira na oblik, funkcija oštećenja zavisi od skalarne veličine koja se naziva parametar oštećenja D i koja predstavlja glavni ulazni parametar pri definisanju degradacije i prekida kontakta u Abaqusu [8]. Parametar oštećenja ima vrednost $D = 0$ pri maksimalnom naponu i vrednost $D = 1$ pri maksimalnom relativnom pomeranju veze. Kao što se može zaključiti iz jednačine (1), sve tri komponente imaju nezavisno ponašanje u elastičnoj oblasti. Međutim, nakon ispunjenja kriterijuma inicijacije oštećenja za bilo koju od komponenti (pravca) veze, javlja se oštećenje u sva tri pravca sa istim zakonom razvoja oštećenja.

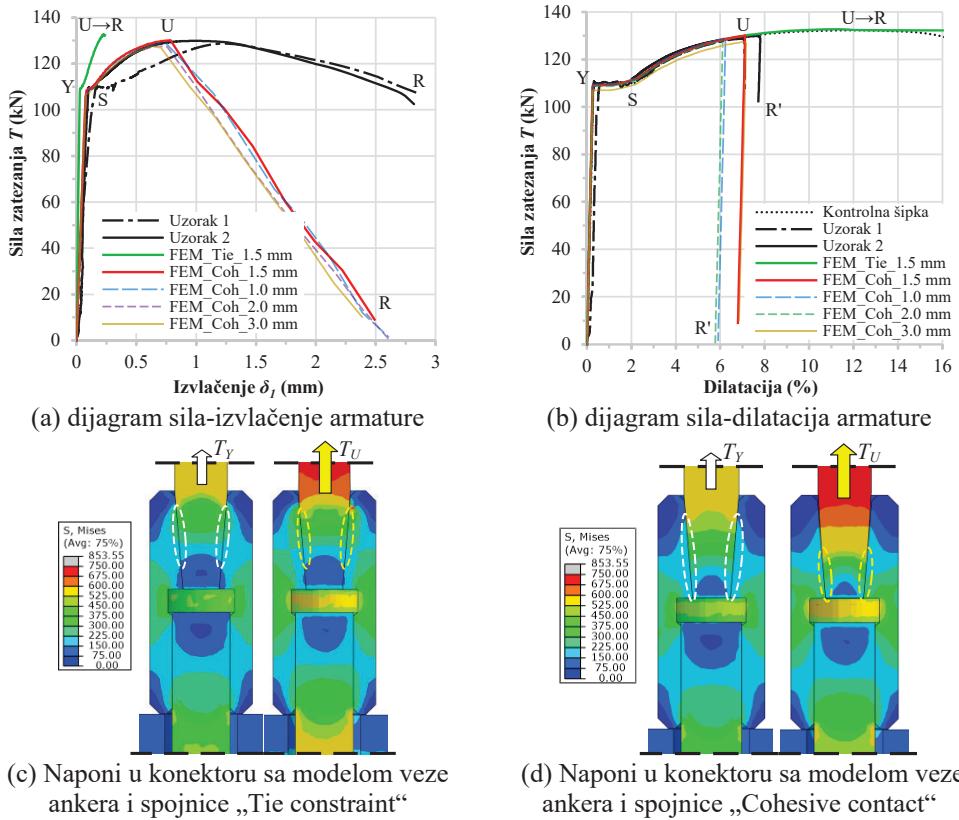
Karakteristike kohezivnog kontakta između armature i mehaničke spojnice u ovom radu definisane su na osnovu eksperimentalno određene veze sila-izvlačenje ($T-\delta_I$), koja je prikazana na slici 4(c). Imajući u vidu mali nagib izvodnice koničnog navoja (videti sliku 5), glavni parametri za definisanje ponašanja kontakta su podužni napon t_I i podužno relativno pomeranje δ_I . Za elastičnu krutost veze u sva tri pravca usvojena je vrednost $K_s = K_n = K_t = 2500 \text{ MPa/mm}$, koja je određena je iterativnim postupkom. Kriterijum inicijacije definisan je maksimalnim podužnim naponom $t_I^* = 128 \text{ MPa}$. Vrednost ovog napona približno je jednak vrednosti napona koji se dobija deljenjem granične sile konektora T_u kontaktnom površinom i projekcijom na izvodnicu, kao što je prikazano na slici 5. Razmatran je linearni razvoj oštećenja sa maksimalnim podužnim relativnim pomeranjem $\delta_I^* = 2,0 \text{ mm}$, koje je usvojeno na osnovu rezultata iz eksperimenata (deo U-R). Za druga dva pravca usvojene su iste karakteristike veze.

Mehaničke karakteristike materijala zavrtnja, mehaničke spojnice i armaturnog ankera modelirane su prema karakteristikama koje su prikazane u Tabeli 1. S obzirom da su spojница i zavrtanj pretpeli jako male deformacije tokom ispitivanja, za modeliranje njihovog ponašanja usvojeni su bilinearni elastoplastični dijagrami napon-dilatacija. Ponašanje armaturnog ankera modelirano je dijagramom napon-dilatacija kontrolne šipke, bez silazne grane dijagrama.

Za sve komponente konektora usvojeni su tetraedarski konačni elementi (C3D4). Zavrtanj, podloška, mehanička spojница i armaturni anker modelirani su konačnim elementima veličine 1,5 mm, dok je alat za prihvatanje zavrtnja modeliran konačnim elementima veličine 3 mm. Izvršena je analiza osetljivosti globalnog ponašanja modela na promenu veličine konačnih elemenata, za veličine konačnih elemenata konektora od 1 mm, 1,5 mm, 2 mm i 3 mm.

Rezultati nelinearne numeričke analize konektora sa mehaničkom spojnicom pri zatezanju prikazani su na slici 6. S obzirom na vid loma konektora koji se javio u eksperimentalnom ispitivanju, izvršeno je poređenje dijagrama sila-izvlačenje armature i dijagrama sila-dilatacija armature. Modeliranje kontakta između mehaničke spojnice i armature krutom vezom („Tie constraint“) relativno dobro opisuje ponašanje konektora sve do početka tečenja armaturnog

ankera, kao što je prikazano na slikama 6(a) i 6(b). Međutim, na prikazanim dijagramima mogu se uočiti jasne razlike u ponašanju veze u poređenju sa eksperimentalnim rezultatima pri silama koje su veće od sile na granici razvlačenja ankera. Lom konektora u ovom slučaju nastaje kidanjem armature (videti sliku 6(b), deo U→R). S druge strane, na istim slikama može se uočiti dobro poklanje rezultata numeričke analize modela sa kohezivnim kontaktom i rezultata eksperimentalnog ispitivanja konektora u oblasti izvlačenja armature do 0,8 mm (do maksimalne nosivosti). Pri većim izvlačenjima δ_l dolazi oštećenja kontakta u skladu sa usvojenim linearnim razvojem oštećenja (deo U-R), koje karakteriše brži pad sile zatezanja u odnosu eksperimentalno dobijene rezultate. Iako se bolje ponašanje modela na silaznoj grani dijagrama sila-izvlačenje može dobiti definisanjem tačnije funkcije razvoja oštećenja (trilinearne, parabolične, itd.), prikazani model dobro opisuje globalno ponašanje potrebno za razumevanje ponašanja veze. U ovom slučaju, lom konektora u numeričkoj analizi nastao je takođe izvlačenjem armaturnog ankera iz mehaničke spojnica. Na dijagramima se takođe vidi da je uticaj veličine konačnog elementa na ponašanje veze modelirane kohezivnim kontaktom relativno mali.



Slika 6 – Rezultati numeričke analize konektora sa mehaničkom spojnicom na zatezanje

Na slikama 6(c) i 6(d) prikazano je poređenje raspodele Mizesovih napona u vezi mehaničke spojnice i armaturnog ankera pri različitim nivoima sile zatezanja, kada je veza modelirana kao kruta veza i kohezivnim kontaktom, respektivno. Analizirani su nivoi sile zatezanja koji odgovaraju početku tečenja armaturnog ankera i maksimalnoj nosivosti konektora. Može se

zaključiti da se kod krute veze sila zatezanja dominantno prenosi u gornjem delu mehaničke spojnice, bez obzira na nivo sile zatezanja. S druge strane, modeliranjem veze kohezivnim kontaktom sila zatezanja se ravnomernije prenosi iz armaturnog ankera u mehaničku spojnicu sve do granice tečenja armature. Nakon dostizanja granice tečenja u armaturi javlja se oštećenje navoja u gornjem delu armaturnog ankera i pomeranje zone prenošenja sile ka donjem delu odnosno slobodnom kraju šipke. Toj činjenici ide u prilog raspodela Mizesovoih napona pri maksimalnoj sili zatezanja na slici 6(c). Slično kao i u eksperimentalnoj analizi, lom konektora nastao je gubitkom kontakta između mehaničke spojnice i donjeg dela (kraja) armaturne šipke.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu analizirano je ponašanje demontažnog konektora koji je formiran povezivanjem zavrtnja, mehaničke spojnice i armaturnog ankera pri zatezanju. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja pokazali su da značajan uticaj na ponašanje ovakvog konektora kao celine ima ponašanje armature, kao najslabije komponente. Nosivost uzoraka na zatezanje bila je približno jednaka nosivosti kontrolne armaturne šipke ($T_u = 129,3 \text{ kN}$). Lom uzoraka nastao je izvlačenjem armaturnog ankera iz mehaničke spojnice, kao posledice smicanja koničnog navoja na armaturnom ankeru. Na osnovu rezultata eksperimentalnog ispitivanja formiran je nelinearni trodimenzionalni model konektora. Posebna pažnja posvećena je modeliranju veze mehaničke spojnice i armaturnog ankera. Pokazano je da se složeno ponašanje ove veze do maksimalne nosivosti konektora može adekvatno simulirati primenom tzv. modela kohezivnog kontakta („Cohesive contact“) u programu Abaqus [8], čija primena i parametri su detaljno opisani.

ZAHVALNOST

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije na finansijskoj podršci u okviru projekta 200092.

LITERATURA

- [1] EN1992-4, Eurocode 2: Design of concrete structures - Design of fastenings for use in concrete. Brussels: CEN, 2018.
- [2] L. Pallarés and J. F. Hajjar, “Headed steel stud anchors in composite structures, Part II: Tension and interaction,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 66, no. 2, pp. 213–228, 2010, doi: 10.1016/j.jcsr.2009.08.008
- [3] L. Pallarés and J. F. Hajjar, “Headed steel stud anchors in composite structures, Part I: Shear,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 66, no. 2, pp. 198–212, 2010, doi: 10.1016/j.jcsr.2009.08.009
- [4] F. Yang, Y. Liu, Z. Jiang, and H. Xin, “Shear performance of a novel demountable steel-concrete bolted connector under static push-out tests,” *Eng. Struct.*, vol. 160, no. December 2017, pp. 133–146, 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.01.005
- [5] Kozma, C. Odenbreit, M. V. Braun, M. Veljkovic, and M. P. Nijgh, “Push-out tests on demountable shear connectors of steel-concrete composite structures,” *Structures*, vol. 21, no. Ascs, pp. 45–54, 2019, doi: 10.1016/j.istruc.2019.05.011
- [6] B. Milosavljević, I. Milićević, M. Pavlović, and M. Spremić, “Static behaviour of bolted shear connectors with mechanical coupler embedded in concrete,” *Steel Compos. Struct.*, vol. 29, no. 2, pp. 257–272, 2018, doi: 10.12989/scs.2018.29.2.257.
- [7] I. Milićević, B. Milosavljević, M. Pavlović, and M. Spremić, “Bolted connectors with mechanical coupler embedded in concrete: Shear resistance under static load,” *Steel Compos. Struct.*, vol. 36, no. 3, pp. 321–337, 2020, doi: 10.12989/scs.2020.36.3.321.
- [8] ABAQUS User Manual. Version 6.12. Providence, RI, USA: DS SIMULIA Corp; 2012.