

Numeričko modeliranje posmične veze između čelika i betona kod spregnutih nosača izvedenih od hladno oblikovanih profila

Vlaho Žuvelek¹, doc. dr. sc. Ivan Ćurković²

¹Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, vlaho.zuvelek@grad.unizg.hr

²Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, ivan.curkovic@grad.unizg.hr

Sažetak

Spregnute međukatne konstrukcije od čelika i betona koje su izgrađene od hladno oblikovanih čeličnih nosača (HOP) i betonske ploče mogu pružiti značajne prednosti u odnosu na tradicionalna rješenja. Jedno od takvih inovativnih rješenja je predmet ovog rada koje se sastoji od HOP nosača izvedenih od HOP i valovitog hrpta sastavljenih uz pomoć točkastog zavarivanja te betonske ploče koja je s nosačem povezana s inovativnom posmičnom vezom. U nastavku rada će se predstaviti numeričko modeliranje dviju vrsta posmičnih veza koje su prikladne za spomenute spregnute sustave. Jedna vrsta veze sadrži vijke koji omogućavaju izravnu posmičnu vezu između pojasnice nosača i betonske ploče. Druga vrsta veze je ostvaren uz pomoć betonskih moždanika koji koriste valoviti hrbat nosača. Rezultati numeričke simulacije ukazuju da rješenje s vijcima osiguravaju veću krutost posmične veze pri čemu istovremeno dolazi do redukcije duktilnosti.

Ključne riječi: spregnuti nosač, hladno oblikovani čelik, točkasti zavari, betonski moždanik, demontažna posmična veza

Numerical study of shear connection in cold-formed steel-concrete composite beam

Abstract

Composite systems made by combining cold-formed steel (CFS) and concrete can produce excellent properties compared to traditional solutions. One such innovative solution is the subject of this paper which consists of built-up CFS with corrugated web, connected by spot-welds and concrete slab with innovative type of shear connection. This paper presents numerical investigation of two types of shear connections suitable for the proposed composite solution. One type of shear connection is completed using bolts which provide a direct shear connection between the flange of CFS girder and the concrete slab. The second type of shear connection was completed using composite dowel rib connector. The results of FE simulations indicate that solution with bolts ensures higher stiffness of the shear connection, but in turn reduces its ductility.

Key words: composite beam, cold-formed steel (CFS), spot-weld, composite dowel rib connector, demountable shear connector

1 Uvod

Spregnuti sustavi međukatnih konstrukcija od čelika i betona su među najisplativijim konstrukcijskim sustavima za primjenu kod višekatnih građevina jer kombiniraju konstrukcijsku učinkovitost s brzinom gradnje. Dodatna optimizacija ovih sustava može se postići primjenom sastavljenih hladno oblikovanih profila (HOP), te inovativnim rješenjima posmičnih veza koji bi osigurali manji utrošak materijala, bržu proizvodnju, jeftiniju ugradnju, te mogućnost demontaže s ciljem ponovne uporabe ili recikliranja na kraju životnog vijeka.

Primjena HOP u spregnutim konstrukcijama izvedenim od čelika i betona može rezultirati mnogima prednostima ovisno o primjeni konstrukcijskih rješenja [1–4]. Takve prednosti se očituju u smanjenju visine ploče, slobode oblikovanja poprečnog presjeka i jednostavne prilagodbe nepravilnim tlocrtima, brzom i širokoj dostupnosti takvih profila zbog jednostavne tehnologije izrade, fleksibilnosti montaže na licu mjesta ili u radionici [5]. Međutim, zbog vitkosti presjeka HOP, imaju određena ograničenja kada je potrebno pokriti veće raspone jer to zahtijeva veće presjeke. Takva problematika se pak može izbjeći primjenom valovitog hrpta. Upotreba valovitih hrptova dozvoljava primjenu tanjih limova bez ukruta, što rezultira manjim troškovima materijala te procijenjenim uštedama od 10 - 30 % u usporedbi s uobičajenim limenim nosačima i više od 30 % u usporedbi sa standardnim vruće valjanim nosačima. Na primjer, otpornost na izvijanje sinusoidalnog valovitog lima debljine 1 mm usporediva je s otpornosti ravnog hrpta debljine najmanje 12 mm [6]. Nadalje, nosači s valovitim hrptom uobičajeno koriste ravne ploče kao pojasnice nosača što zahtijeva posebne tehnike zavarivanja kako bi ih se zavarilo za valoviti hrpat i samim time uzrokuje brojne poteškoće [7]. Umjesto ravnih ploča predlaže se primjena HOP koji dozvoljavaju različite načine spajanja kao npr. vijcima, točkastim zavarima i tehnikom hladnog prijenosa metala, koji su istraženi u [8-10], utvrđeno je da povezivanje točkastim zavarivanjem ima najpovoljniju otpornost [11]. Ovako sastavljeni HOP nosači s valovitim hrptom, koristeći točkasto zavarivanje, rezultiraju odličnom duktilnošću i nosivosti, pri čemu također, točkasto zavareni nosači pokazuju veću krutost i nosivost u odnosu na nosače kod kojih se koriste samobušajući vijci [12, 13]. Drugi važan razlog primjene tehnike točkastog zavarivanja je da takvo rješenje omogućuje standardizaciju detalja u projektiranju i izvedbi, dozvoljava automatizaciju procesa proizvodnje što zauzvrat može povećati brzinu izrade sastavljenih HOP elemenata s valovitim hrptovima [6]. Još jedna bitna komponenta, pogotovo kada se razmatra spregnute nosače je posmična veza koja omogućuje interakciju između materijala i uvelike može utjecati na ukupno ponašanje sustava. Ponašanje same posmične veze ovisi o njezinoj čvrstoći, tj. o stupnju posmične veze koji se može definirati kao omjer posmične otpornosti spojnih sredstava u odnosu na otpornost najslabije komponente spregnutog presjeka (u ovom slučaju čelične grede

ili betonske ploče). Najčešća vrsta posmične veze koja se danas koristi ostvaruje se korištenjem zavarenih moždanika s glavom, koji predstavljaju jedinu posmičnu vezu koja je standardizirana unutar europskih normi [14]. Međutim, u posljednje vrijeme naglasak se stavlja na rješenja posmičnih veza koja omogućuju demontažu konstrukcijskog sustava u slučaju potrebe za modifikacijom, popravkom ili rekonstrukcijom. Detaljan pregled korištenih posmičnih veza koje omogućuju demontažu spregnutog sustava nedavno je prikazan u radu [15]. Na osnovi tog rada, zaključeno je da postoje veliki problemi vezani za otpornost i duktilnost različitih demontažnih posmičnih veza te da su potrebna daljnja istraživanja istih. Lakkavali i Liu [16] proučavali su četiri rješenja za prijenos posmične sile između HOP i betona među kojima su veze ostvarene preko kontaktnih ploha, unaprijed savijenih dijelova profila, pret hodno izbušenih rupa u profilima i samobušećim vijcima. Uzorci koji su sadržavali savijene dijelove pojasnice, pokazali su se kao najbolje rješenje, ostvarujući najveću otpornost i najmanje progibe u pogledu upotrebljivosti, dok su rješenja koja koriste vezu preko kontaktnih ploha rezultirala najnižom otpornosti i krutosti. Bamaga i dr. [17] nedavno su predložili i istražili tri različita rješenja demontažne posmične veze, koristeći posmične veze ostvarene uz pomoć valjane čelične ploče, jednostrukog ili dvostrukog profila koji su vijcima povezani za nosač. Rezultati ovog istraživanja dokazali su da sva tri predložena rješenja posmične veze imaju odgovarajuće otpornost kao i duktilno ponašanje. Osim prikazanih točkastih tipova posmičnih veza, istražena su rješenja kontinuirane posmične veze u obliku betonskih moždanika, koji također predstavljaju inovativno i obećavajuće rješenje posmične veze [18]. Iz svega navedenog očito je da još uvijek nedostaju potpuni podaci o cjelokupnom ponašanju HOP-a u spregnutim sustavima kao i nedostaci vezani za izvedbu posmične veze koje je također potrebno dodatno istražiti. Iz tog razloga, uspostavljen je istraživački projekt LWT-FLOOR kojem je cilj u prvoj fazi pronaći adekvatnu posmičnu vezu. U ovom radu, numerički su istražene dvije predložene posmične veze čiji će rezultati služiti kao podloga za daljnja eksperimentalna ispitivanja.

2 Numerički modeli

2.1 Vrsta i geometrija modela

Uz pomoć računalnog programa ABAQUS/CAE, razvijeni su trodimenzionalni modeli koji će biti korišteni u eksperimentalnom ispitivanju, tj. *push-out* testu. Kako bi se ostvarila uspješna konvergencija, zbog same složenosti modela korišten je ABAQUS Explicit [19]. Modeli s vijčanom posmičnom vezom (Slika 1. a-b) postignuti su primjenom vijaka s ugrađenom maticom u betonskoj ploči. Upotrebom ovakve posmične veze omogućuje se kontroliranje rotacije vijka i njegovog pomaka za vrijeme opterećivanja, te se omogućava veća krutost veze u odnosu na vijke bez ugrađene

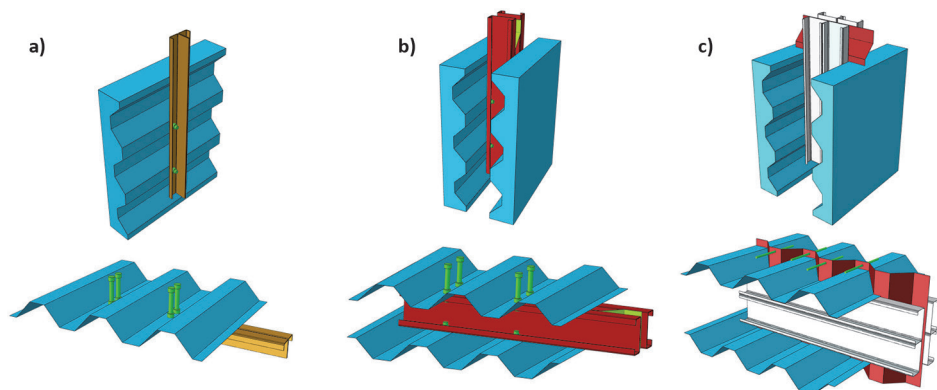
matice [15]. Vijci su postavljeni kroz prethodno izbušene rupe u profiliranom čeličnom limu betonske ploče i HOP profilima. Kod ove vrste posmične veze korišteni su vijci promjera 12 i 16 mm. Vijci koji su korišteni u modelima imaju reducirani radijus vijka na mjestu navoja između matica čiji radijus iznosi 10,4 mm za M12 i 14,1 mm za M16. Reducirani radijus je proračunat iz površine jezgre vijka [20]. Vijci M16 su primijenjeni kako bi se zadovoljio uvjet minimalnog promjera moždanika koji je propisan EN-1994-1 [14]. S druge strane, M12 vijci su uzeti u obzir kao konstruktivni vijci s najmanjim promjerom sukladno [21]. Za kvalitetu vijaka odabrana je kvaliteta 8.8 kao jedna od najčešće korištenih kvaliteta za konstrukcijske vijke. Kod takve posmične veze potrebno je zadovoljiti uvjet za visinu vijka u betonu koji je propisan EN-1994-1-1 [14], a navodi da nominalna visina vijka ne smije biti manja od 2d iznad vrha profiliranog lima betonske ploče. Sukladno tome ukupna visina vijka u betonu iznosi 95 mm. Kod prve posmične veze, promatran je i sustav koji je sastavljen od HOP *back-to-back* načinom bez valovitog hrpta (slika 1.a) kako bi se usporedile otpornosti s modelom koji sadrži valoviti hrpat (slika 1.b). Modeli s betonskim moždanicama kao inovativnom posmičnom vezom ostvareni su uz pomoć valovitog hrpa koji ima ulogu betonskog moždanika. U ovom slučaju valoviti hrpat koji tvori sastavljeni nosač s HOP profilima je propušten, te je ugrađen u betonsku ploču (slika 1.c). Kod ovakve posmične veze, prijenos posmične sile indirektno je ostvaren s betona u valoviti hrpat od kuda se dalje prenosi u HOP profile. Iz tog su razloga varirane dvije različite debljine valovitog hrpta. Dodatno su kroz rupe u valovitom hrptu u betonskoj ploči postavljene armaturne čelične šipke promjera 8 mm i duljine 220 mm. Valoviti hrpat je povezan s HOP C profilima uz pomoć točkastih zavara. Sukladno planiranim eksperimentalnim ispitivanjima, korištena su tri točkasta zavara na kontaktnim površinama valovitog hrpta i HOP C profila. Obzirom da podaci eksperimentalnog ispitivanja točkastih zavara još nisu dostupni, isti su u modelima definirani kao krute točke kako bi se izbjeglo neželjeno ponašanje ili otkazivanje.

Tablica 1. prikazuje 20 različitih modela koji su razmatrani u ovom radu. Kod modela s vijčanom posmičnom vezom varirana je debljina HOP-a (2,5 i 3 mm), kvaliteta čelika (DX51d i S350GD) i promjer vijka (M12 i M16). Modeli koji sadrže oznaku 'W' predstavljaju modele s valovitim hrptom između HOP-a (slika 1.b), dok oni bez takve oznake predstavljaju modele gdje su HOP izravno spojeni *back-to-back* načinom (slika 1.a). Također, za drugu posmičnu vezu napravljena je parametarska analiza gdje je varirana debljina valovitog hrpta (0,8 i 1,5 mm) i vrsta betona (obični NC20/25 i lakoagregatni LC20/22 beton). Geometrija svih modela usvojena je sukladno nominalnoj geometriji uzoraka za buduća eksperimentalna ispitivanja (tablica 1.). Betonska ploča armirana je armaturnom mrežom Q524.

Tablica 1. Geometrijske karakteristike uzoraka *push-out* ispitivanja

Naziv modela	Kvaliteta čelika	HOP profil [mm]	Valoviti hrbat [mm]	Vijci	Razred betona	Betonska ploča [mm]	Profilirani lim [mm]
S1/S1W	DX51d	120x47x2.5	780x120x1.25	M12	C20/25	720x600x120	720x600x1.0
S2/S2W	S350GD			M12			
S3/S3W	DX51d			M16			
S4/S4W	S350GD			M16			
D1/D1W	DX51d	120x47x3.0	780x120x1.25	M12			
D2/D2W	S350GD			M12			
D3/D3W	DX51d			M16			
D4/D4W	S350GD			M16			
C1	DX51d	120x47x2.0	780x420x0.8	-	C20/25		
C2	DX51d		780x420x0.8	-	LC20/22		
C3	DX51d		780x420x1.5	-	C20/25		
C4	DX51d		780x420x1.5	-	LC20/22		

Simetrični uvjeti oslanjanja su jedino bili primjenjivi na modele prikazane na slici 1. a). Kod modela s vijčanom posmičnom vezom, primijenjeni su volumni konačni elementi (C3D8) za HOP nosače, betonsku ploču i vijke. Međutim, profilirani lim i valoviti hrbat su modelirani s plošnim konačnim elementima (S4R). U modelima s betonskim moždanicima svi elementi su modelirani s plošnim konačnim elementima, izuzev betonske ploče koja je modelirana s volumnim konačnim elementima. Armaturne šipke u betonskoj ploči modelirane su sa štapnim konačnim elementima (T3D2), dok su armaturne šipke koje su provučene kroz valoviti hrbat modelirane uz pomoć štapnih konačnih elementa (B31). U svrhu optimiziranja vremena provedbe numeričke simulacije, uz istovremeno zadržavanje visoke točnosti rezultata, bilo je potrebno formirati mrežu s pravilnim konačnim elementima.



Slika 1. Numerički modeli: posmična veza s vijcima – a) bez valovitog hrpta, b) s valovitim hrptom; c) posmična veza s betonskim moždanicom

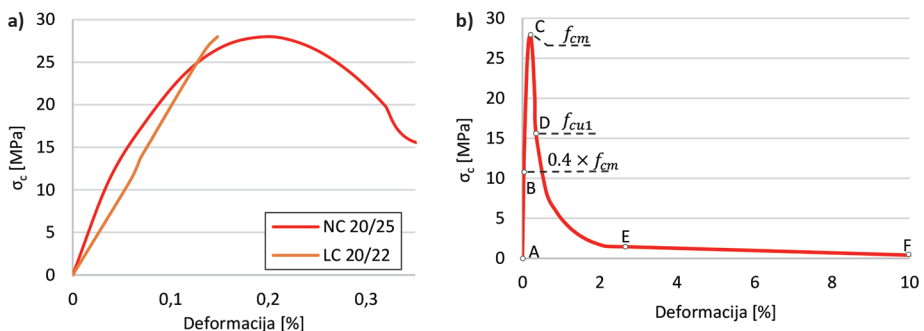
2.2 Materijalne karakteristike

2.2.1 Čelik

Radni dijagram čelika predstavljen je uz pomoć bilinearne krivulje sukladno EN 1993-1-5, Annex C [22]. Za sve čelične elemente u modelima primijenjen je modul elastičnosti od 210 GPa, Poisson-ov broj od 0,3 i gustoća čelika od 7850 kg/m³. Za hladno oblikovani čelik kvalitete DX51d, granica popuštanja i čvrstoća usvojene su s vrijednostima 270 MPa i 325 MPa, dok su za čelik S350GD te vrijednosti iznosile 350 MPa i 420 MPa. Kao što je prethodno navedeno, modeli sadrže i vijke kvalitete 8,8 za koje su uzete nominalne vrijednosti granice popuštanja i čvrstoće od 640 MPa i 800 MPa. Za armaturnu mrežu i šipke granica popuštanja definirana je s vrijednosti 500 MPa.

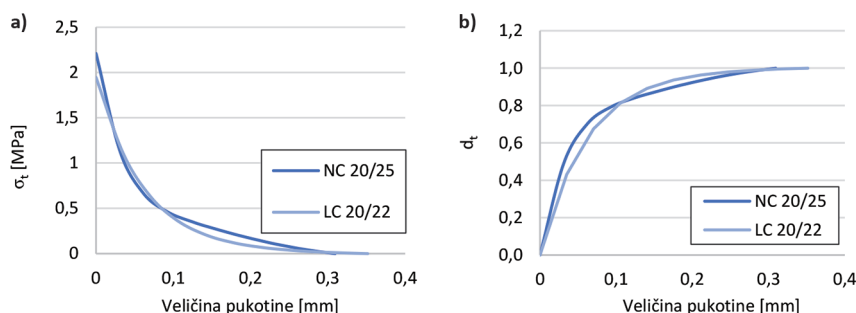
2.2.2 Beton

U svrhu simuliranja stvarnog ponašanja armirano betonske ploče korišten je takozvani *concrete damaged plasticity model* (CDP). Ovakav model zasnovan je na dva glavna mehanizma otkazivanja betona tj. raspucavanje u vlaknu i drobljenje u tlaku. Za CDP je potrebno definirati pojedine parametre, pri čemu su preuzete vrijednosti iz rada [23] uz iznimku kuta dilatacije od 31° prema [24], dok su svi ostali parametri uzeti sa zadanim vrijednostima danima u Abaqus-u [19]. Parametre koje je potrebno zadati za *concrete compression damage* i *concrete tension damage* proračunati su prema izrazima danima u [24]. Na osnovi tih izraza, na slici 2.a prikazan je radni dijagram betona prema EN 1992-1-1 [25]. Obzirom da se očekuje značajno drobljenje betona oko posmične veze, ponašanje betona u tlaku puno je točnije definirati prema odnosu naprezanje-deformacija prikazanom na slici 2.b danom u radu [26]. Takav odnos korišten je u numeričkim modelima ovog rada, zbog toga što krivulja propisana Eurocodom ne uzima u obzir ponašanje betona do potpunog drobljenja posebice za lakoagregatni beton.



Slika 2. Radni dijagrami za beton: a) prema EN 1992-1-1; b) proširenje krivulje prema [24]

Vlačno ponašanje betona je definirano uz pomoć izraza danih u [23]. Na osnovi dobivenih podataka, na slici 3. prikazan je razvoj vlačnih naprežanja, σ_t i degradacije krutosti, d_t u odnosu na veličinu pukotine. Za određivanje svih potrebnih parametara korištene su gustoće od 2400 kg/m^3 za obični beton i 1750 kg/m^3 za lakoagregatni beton.



Slika 3. Vlačno ponašanje betona

2.3 Kontakti, rubni uvjeti i unos opterećenja

Potrebno je definirati kontakte koji utječu na ponašanje modela kako bi se ostvarila što bolja točnost rezultata u usporedbi sa eksperimentalnim istraživanjem. Ponašanje između pojedinih elemenata posmične veze ostvareno je korištenjem takozvane *surface-to-surface* opcije i *general contact* opcije u Abaqus softwaru [19]. Karakteristike ponašanja kontaktnih površina sadrže normalno i tangencijalno ponašanje uz pomoć kojih se onda pravilno prenose vertikalne i horizontalne sile između kontaktnih površina. Kod normalnog ponašanja onemogućeno je međusobno prodiranje jednog elementa u drugi, dok tangencijalno ponašanje omogućuje trenje između pojedinih elemenata koje je definirano uz pomoć koeficijenta trenja. U numeričkim modelima ovog rada, koeficijent trenja usvojen je s vrijednošću 0,3. Ovakve karakteristike ponašanja kontakta definirane su između površina HOP C profila, vijka, valovitog hrpta, profiliranog lima i betonske ploče. Armaturna mreža i šipke modelirani su tako da su ugrađeni u betonsku ploču pomoću opcije *embed*. U numeričkim modelima točkasti zavari su modelirani kao krute točke kako bi se spriječilo neželjeno ponašanje, tj. njihovo otkazivanje.

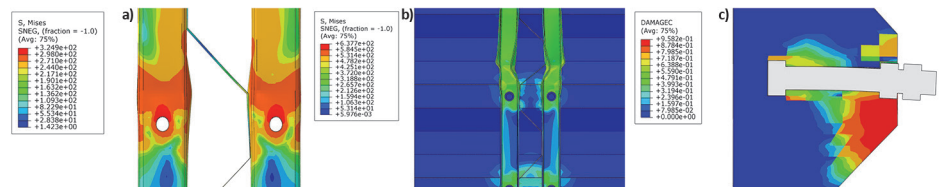
Jednoliki pomak u vertikalnom smjeru (Y smjeru) zadan je u vrhu HOP nosača. Kod modela s vijčanom posmičnom vezom iznos vertikalnog pomaka iznosi -10 mm, dok kod modela s betonskim moždanicima iznosi -30 mm. Na osnovi vrijednosti tih pomaka usklađena je brzina nanošenja pomaka u modelima. Kao što je ranije spomenuto, primijenjeni su simetrični rubni uvjeti na sredini svakog HOP C profila kod modela bez valovitog hrpta. Oslanjanje uzoraka ostvaruje se preko donjih ploha betonskih ploča gdje su te ravnine modelirane kao oslonac sa spriječenim pomaci-

ma u svim smjerovima. Dodatno na mjestu unosa pomaka, onemogućena je rotacija oko x i z osi te translacija u x i z smjeru kako bi se izbjeglo neželjeno ponašanje na mjestu unosa opterećenja.

3 Rezultati numeričkih modela

3.1 Modeli s vijčanom posmičnom vezom

Unutar dobivenih rezultata, uočena su tri moda otkazivanja koja su prikazana na slici 4. Prvi mod otkazivanja očituje se u obliku izduženja rupe na HOP C profilu nakon dostizanja otpornosti po omotaču rupe. Drugi mod otkazivanja odnosi se na gubitak stabilnosti HOP C profila koji se očituje brзом promjenom krutosti i naglim smanjenjem otpornosti nakon dosezanja krajnje čvrstoće. Treći mod otkazivanja je otkazivanje betona gdje dolazi do drobljenja betona i stvaranja pukotina oko posmičnog spojnog sredstva, što također može izazvati nagli pad krutosti i otpornosti dobivenih rezultata.



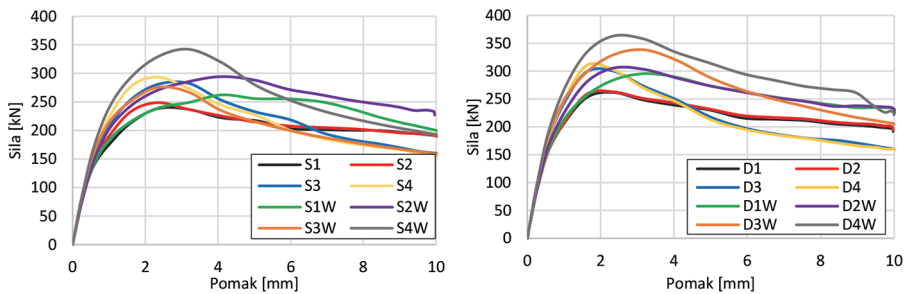
Slika 4. Tri moda otkazivanja: a) otpornost po omotaču rupe; b) gubitak stabilnosti HOP profila; c) otkazivanje betona (drobljenje betona)

Dobiveni numerički rezultati uspoređeni su s karakterističnim vrijednostima koje se mogu izračunati pomoću izraza danih u Eurocode-u, bilo EN 1993-1-8 [27] ili EN 1994-1-1 [14]. Izračunate karakteristične vrijednosti uključuju otpornost po omotaču rupe HOP profila ($F_{b,Rk}$), otpornost poprečnog presjeka HOP profila (N_{Rk}) i otpornost posmične veze u čeliku ($P_{Rk,S}$) ili u betonu ($P_{Rk,C}$) s faktorom i bez faktora redukcije, k_t . Naime, zbog postavljanja rebara betonske ploče okomito na HOP profil, otpornost posmične veze može se dodatno smanjiti primjenom faktora redukcije k_t . Za odabranu geometriju profiliranog lima betonske ploče, faktor redukcije iznosi 0,58, što je manje od gornje granične vrijednosti od 0,7 predviđene EN 1994-1-1 [14]. Ove izračunate vrijednosti prikazane su u tablici 2.

Tablica 2. Karakteristične vrijednosti otpornosti u kN prema Eurocode-u za različite modele

Naziv modela	$F_{b,Rk}$	N_{Rk}	$P_{Rk,S}$	$k_t \cdot P_{Rk,S}$	$P_{Rk,C}$	$k_t \cdot P_{Rk,C}$
S1/S1W	21,1	144	54,4	31,6	32,3	18,7
S2/S2W	27,3	186	54,4	31,6	32,3	18,7
S3/S3W	28,6	144	100	58	57,5	33,4
S4/S4W	37	186	100	58	57,5	33,4
D1/D1W	25,4	181	54,4	31,6	32,3	18,7
D2/D2W	32,8	235	54,4	31,6	32,3	18,7
D3/D3W	34,4	181	100	58	57,5	33,4
D4/D4W	44,4	235	100	58	57,5	33,4

Proračunate vrijednosti uspoređene su s numeričkim rezultatima u tablici 3, gdje je za usporedbu vrijednosti iz tablice 2 potrebno pomnožiti s osam, izuzev vrijednosti N_{Rk} koju je potrebno pomnožiti s dva. Numerički dobiveni odnos sile i pomaka HOP profila za S/SW i D/DW modele, koji razmatraju HOP profile debljine 2,5 i 3 mm, prikazan je na slici 5. Krivulje dobivene za S modele ukazuju na isti mod otkazivanja. Kod svih modela došlo je do otkazivanja posmične veze u betonu, iako analitički rezultati iz tablice 2 mogu ukazivati da je u pojedinim modelima došlo do otkazivanja po omotaču rupe. Međutim, kada se detaljno istraže modeli, vidi se da nije došlo do otkazivanja po omotaču rupe što se može opravdati očekivanom situacijom gdje analitički modeli daju manju otpornost od stvarne i/ili numeričke vrijednosti otpornosti. Također, da se radi o istom modu otkazivanja, tj. o otkazivanju posmične veze preko betona, može se zaključiti iz činjenice da su sve vrijednosti otpornosti kod S modela, koji su nominalno isti izuzev povećane čvrstoće čelika HOP za 30 %, vrlo bliske. S druge strane, krivulje dobivene za SW modele ukazuju na postojanje različitih modova otkazivanja. S1W pokazuje da je dosegnuta krajnja čvrstoća nakon čega sila opada. Kada se model detaljno istraži, može se vidjeti da su rupe za vijke dosegle otpornost po omotaču rupe, te su se izdužile što je u konačnici rezultiralo gubitkom stabilnosti HOP profila na što ukazuje brzo smanjenje otpornosti na kraju. Pri tome kod ovog uzorka istovremeno dolazi do mjestimičnog drobljenja betona, međutim nije nastupilo otkazivanje posmične veze u betonu. Kod modela S2W nakon dosezanja otpornosti dolazi do polaganog pada sile, te uvid u model pokazuje da je došlo do otkazivanja betona, bez gubitka stabilnosti profila, iako su, slično kao i kod S uzoraka, analitičke vrijednosti otpornosti po omotaču rupe i vrijednosti otkazivanja posmične veze preko betona bliske. Rezultati modela S3W i S4W pokazuju naglo smanjenje otpornosti nakon dosezanja krajnje čvrstoće što upućuje na činjenicu da je došlo do gubitka stabilnosti HOP-a, što se ujedno vidi i pregledom samih modela, iako je ponovno analitički izračunata otpornost po omotaču rupe nešto niža od tlačne otpornosti HOP-a na razini presjeka.



Slika 5. Odnos sile i pomak

Krivulje sila-pomak dobivene za D i DW modele ukazuju na mod otkazivanja kao i kod S modela tj. dolazi do otkazivanja posmične veze preko betona. Nadalje, kada se odgovarajući modeli detaljno istraže, može se potvrditi da kod nijednog modela nije došlo do otkazivanja zbog doseganja otpornosti po omotaču rupe, iako rezultati u tablici 2. mogu ukazivati drugačije. Ponovno, kao i kod S modela, dobivene vrijednosti otpornosti D i DW modela vrlo su bliske unatoč različitoj kvaliteti čeličnog materijala, što upućuje na jedan mod otkazivanja tj. otkazivanje preko betona. Uvidom u modele D3W uočen je gubitak stabilnosti što je vidljivo i po obliku krivulje u usporedbi s krivuljom modela D4W. Za razliku od toga, model D4W ne pokazuje nikakav gubitak stabilnosti te je u tom slučaju došlo do isključivog otkazivanja betona, što je očekivano prema vrijednostima u tablici 2.

Tablica 3. Usporedba numeričkih i analitičkih vrijednosti za odabrane modove otkazivanja u kN

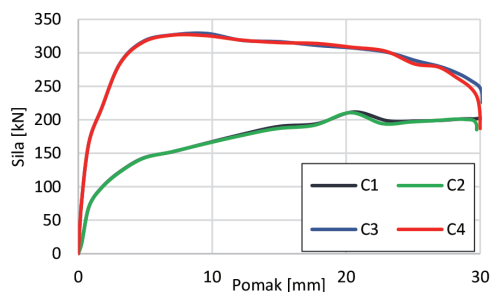
Naziv modela	Mod otkazivanja	Naziv modela	Mod otkazivanja	F_{NUM}	F_{CALC}	F_{CALC}/F_{NUM}	$k_t \cdot F_{CALC}$	$k_t \cdot F_{CALC}/F_{NUM}$
S1	Beton	S1W	Stabilnost	240 263	259 288	1,08 1,09	150 -	0,63 -
S2	Beton	S2W	Beton	250 294	259 259	1,04 0,88	150 150	0,6 0,51
S3	Beton	S3W	Stabilnost	284 276	460 288	1,62 1,04	267 -	0,93 -
S4	Beton	S4W	Stabilnost	294 343	460 372	1,56 1,08	267 -	0,91 -
D1	Beton	D1W	Beton	262 296	259 259	0,99 0,87	150 150	0,57 0,51
D2	Beton	D2W	Beton	264 303	259 259	0,98 0,85	150 150	0,57 0,50
D3	Beton	D3W	Stabilnost	300 339	460 362	1,53 1,07	267 -	0,89 -
D4	Beton	D4W	Beton	310 358	460 460	1,48 1,28	267 267	0,86 0,75

Dobiveni rezultati upućuju na to da se kod modela s manjim promjerom vijka faktor redukcije može potpuno izostaviti ili primijeniti s modificiranim vrijednostima, dok se za veće promjere vijaka isti mora uzeti u obzir. Također, rezultati upućuju na to da su predložene vrijednosti faktora redukcije dane u EN 1994-1-1 [14] previše konzervativne, ali i na to da je njegova primjena upitna obzirom da su materijal kao i promjer korištenih vijaka u analiziranim modelima izvan predloženog opsega danog u normi. Konačno, rezultati jasno pokazuju da razmak spojnih sredstava kojima se

formira posmična veza značajno utječe na način otkazivanja sustava, te ukoliko je razmak nedovoljan otkazivanje posmične veze će uvijek nastupiti preko betona.

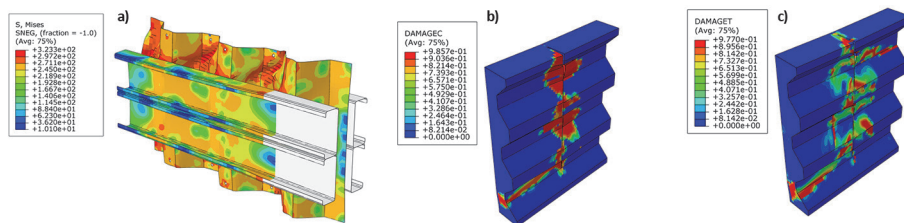
3.2 Modeli posmične veze s betonskim moždanicima

Numerički rezultati dobiveni za C modele prikazani su na slici 6, gdje je dan odnos sile i pomaka.



Slika 6. Odnos sile i pomaka

Dobiveni rezultati pokazuju dva različita moda otkazivanja, tj. popuštanje valovitog hrpta pri posmiku kroz formiranje vlačnog polja (slika 7. a) i mješoviti mod popuštanja valovitog hrpta i otkazivanja betona (slike 7.a do 7.c). Prvi mod otkazivanja dobiva se za uzorke koji za valoviti hrbat koriste limove debljine 0,8 mm. U ovom slučaju dobivene krivulje za uzorke C1 i C2 ne pokazuju smanjenje otpornosti jer otkazivanje čelika nije eksplicitno definirano u numeričkim modelima. Međutim, za modele C3 i C4 krivulje, nakon dosezanja krajnje otpornosti, polagano padaju. To je zbog činjenice da se kod ovih modela koristio deblji lim za valoviti hrbat (1,5 mm), te je kod njih osim posmičnog otkazivanja valovitog hrpta došlo i do otkazivanja betona.



Slika 7. Modovi otkazivanja za C modele: a) posmično otkazivanje valovitog hrpta; b) otkazivanje betona (drobljenje betona); c) otkazivanje betona (vlačne pukotine)

4 Zaključak

U ovom istraživanju simulirano je dvadeset *push-out* testova kako bi se dobili rezultati potrebni za provođenje stvarnih eksperimentalnih ispitivanja. Dobiveni rezultati daju sljedeće zaključke koje je potrebno dodatno potvrditi eksperimentalno dobivenim rezultatima.

- Posmična veza ostvorena pomoću vijaka pokazuje veću krutost i veću čvrstoću, međutim, manje je duktilna.
- Rezultati pokazuju da bi se faktor redukcije k_t mogao povećati, dok bi se za manje promjere vijaka čak mogao i u potpunosti izostaviti. Stoga je potrebno dodatno istražiti utjecaj promjera vijka na otkazivanje preko betona kada su rebra ploče postavljena poprečno na nosač.
- Dodatno, valjanost primjene faktora redukcije k_t mora se provjeriti kada se koriste čvrstoće čelika veće od 450 N/mm^2 i moždanici promjera manjeg od 16 mm.
- Rezultati pokazuju da zbog malog razmaka posmičnih sredstava ne može doći do razvoja pune nosivosti betona u profiliranom rebu za svaki vijak posebno, jer vrlo brzo dolazi do preklapanja područja otkazivanja betona. Stoga je potrebno dodatno istražiti utjecaj razmaka vijaka unutar rebara betonske ploče na ponašanje modela s vijčanom posmičnom vezom.
- Gustoća betona, kada se koriste slične klase betona, ne utječe na ponašanje modela koji koriste posmičnu vezu s betonskim moždanicima.

Financiranje

Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom UIP-2020-02-2964 (LWT-FLOOR).

Literatura

- [1] Wehbe N., Bahmani P., Wehbe A.: Behavior of Concrete/Cold Formed Steel Composite Beams: Experimental Development of a Novel Structural System, *Int. J. Concr. Struct. Mater.* (2013), vol. 7, no. 1, pp. 51–59
- [2] Bamaga S. O. et al.: Feasibility of developing composite action between concrete and cold-formed steel beam, *J. Cent. South Univ.*, vol. 20, no. 12, pp. 3689–3696, 2013.
- [3] M. Irwan J., Hanizah A. H., Azmi I.: Test of shear transfer enhancement in symmetric cold-formed steel–concrete composite beams, *J. Constr. Steel Res.* (2009), vol. 65, no. 12, pp. 2087–2098.
- [4] Hsu C-T., Punurai S., Punurai W., Majdi Y.: New composite beams having cold-formed steel joists and concrete slab, *Eng. Struct.* (2014), vol. 71, pp. 187–200.

- [5] Hanaor A.: Tests of composite beams with cold-formed sections, *J. Constr. Steel Res.* (2000), vol. 54, no. 2, pp. 245–264.
- [6] Dubina D., Ungureanu V., Gîlia L.: Experimental investigations of cold-formed steel beams of corrugated web and built-up section for flanges, *Thin-Walled Struct.* (2015), vol. 90, pp. 159–170.
- [7] Hamada M., Nakayama K., Kakihara M., Saloh K., Ohtake F.: Development of welded I-beam with corrugated web, *The Sumitomo Search* (1984), vol. 29, pp. 75–90.
- [8] Dubina D., Ungureanu V., and Gîlia L.: Cold-formed steel beams with corrugated web and discrete web-to-flange fasteners, *Steel Constr.* (2013), vol. 6, no. 2, pp. 74–81.
- [9] Ungureanu V. et al.: Welding technologies for built-up cold-formed steel beams: experimental investigations, in *Ninth International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS'2018)*, 2018, p. e-Proceedings.
- [10] Bazar Ş., Ungureanu V., Dubină D., Burcă M.: Built-Up Cold-Formed Steel Beams with Corrugated Webs Connected with Spot Welding, *Adv. Mater. Res.* (2015), vol. 1111, pp. 157–162.
- [11] Briskham P., Blundell N., Han L., Hewitt R., Young K., Boomer D.: Comparison of Self-Pierce Riveting, Resistance Spot Welding and Spot Friction Joining for Aluminium Automotive Sheet, *SAE Technical Papers* (2006).
- [12] Ungureanu V., Lukačević I., Both I., Burca M., Dubina D.: Built-Up Cold-Formed Steel Beams with Corrugated Webs Connected by Spot Welding - Numerical Investigations, *International Colloquia on Stability and Ductility of Steel Structures (SDSS 2019)*, p. e-Proceedings.
- [13] Lukačević I., Čurković I., Rajić A., Čudina I.: Innovative Lightweight Cold-Formed Steel-Concrete Composite Floor System – LWT-FLOOR project, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* (2021), vol. 1203, no. 3, p. 032078.
- [14] European Committee for Standardization CEN, EN 1994-1-1: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2004.
- [15] Jakovljević I., Spremić M., Marković Z.: Demountable composite steel-concrete floors: A state-of-the-art review, *Građevinar* (2021), vol. 73, no. 3. Union of Croatian Civil Engineers and Technicians, pp. 249–263.
- [16] Lakkavalli B. S., Liu Y.: Experimental study of composite cold-formed steel C-section floor joists, *J. Constr. Steel Res.* (2006), vol. 62, no. 10, pp. 995–1006.
- [17] Bamaga S. O., Tahir M. M., Tan C. S., Shek P. N., Aghlara R.: Push-out tests on three innovative shear connectors for composite cold-formed steel concrete beams, *Constr. Build. Mater.* (2019), vol. 223, pp. 288–298.

- [18] Majdi Y., Hsu C. T. T., Punurai S.: Local bond-slip behavior between cold-formed metal and concrete, *Engineering Structures* (2014), vol. 69. pp. 271–284.
- [19] User CAE. Abaqus 2016 (2016).
- [20] European Committee for Standardization CEN, EN ISO 898-1: 2013: Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel – Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes – Coarse thread and fine pitch thread, 2013.
- [21] European Committee for Standardization CEN, EN 1090-2: 2018: Execution of steel structures and aluminium structures – Part 2: Technical requirements for steel structures, 2018.
- [22] European Committee for Standardization CEN, EN 1993-1-5: Eurocode 3: Design of Steel Structures—Part 1-5: Plated Structural Elements.,2005.
- [23] Lukačević I., Čurković I., Rajić A., Bartolac M.: Lightweight Composite Floor System—Cold-Formed Steel and Concrete—LWT-FLOOR Project, *Buildings* (2022), vol. 12, no. 2.
- [24] Arezoomand Langarudi P., Ebrahimnejad M.: Numerical study of the behavior of bolted shear connectors in composite slabs with steel deck, *Structures* (2020), vol. 26. pp. 501–515.
- [25] European Committee for Standardization CEN, EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of Concrete Structures—Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, 2004.
- [26] Pavlović M., Marković Z., Veljković M., Buđevac D.: Bolted shear connectors vs. headed studs behaviour in push-out tests, *J. Constr. Steel Res.* (2013), vol. 88, pp. 134–149.
- [27] European Committee for Standardization CEN, EN 1993-1-8: Eurocode 3: Design of steel structures—Part 1-8: Design of joints, 2005.