

Primljen / Received: 21.5.2021.

Ispravljen / Corrected: 5.2.2022.

Prihvaćen / Accepted: 21.3.2022.

Dostupno online / Available online: 10.6.2022.

Karakteristike posmične veze u spregnutoj ploči od čelika i betona

Autori:



Doc.dr.sc. **Preetha Vellaichamy**, dipl.ing.građ.
Tehnološki institut Bannari Amman, Erode, Indija
Odjel za građevinarstvo
preethav@bitsathy.ac.in
Autor za korespondenciju



Izv.prof.dr.sc. **Senthilkumar Veerasamy**
Tehnički fakultet M. Kumarasamy, Karur, Indija
Odjel za građevinarstvo
civilvsk@gmail.com



Doc.dr.sc. **Vasudevan Mangottiri**, dipl.ing.građ.
Tehnološki institut Bannari Amman, Erode, Indija
Odjel za građevinarstvo
vasudevan@bitsathy.ac.in

Prethodno priopćenje

Preetha Vellaichamy, Senthilkumar Veerasamy, Vasudevan Mangottiri

Karakteristike posmične veze u spregnutoj ploči od čelika i betona

Spregnute ploče od čelika i betona s hladno oblikovanim profiliranim čeličnim limovima često se koriste u čeličnim okvirnim građevinama. U tim se pločama čelični lim koristi kao radna platforma u fazi izvođenja, dok u fazi uporabe djeluje kao vlačna armatura. Nosivost posmične veze spregnute ploče u ovom se radu ocjenjuje na dva različita profilirana čelična lima. Konkretno, izvedeno je dvanaest uzoraka spregnutih ploča te je ispitano njihovo ponašanje u stvarnoj veličini nanošenjem opterećenja u dvije točke. Osim toga, na temelju raspona spreznja i visine profila, analizira se ponašanje konstrukcije spregnute ploče u pogledu odnosa između opterećenja i pomaka, otpornosti posmične veze, koeficijenta duktilnosti i odnosa između opterećenja i proklizavanja. Rezultati pokazuju da uzorci najčešće otkazuju zbog otkazivanja uzdužne posmične veze između betona i profiliranog lima. Kako je uzdužni posmik složena pojava, empirijski pristupi služe za ocjenjivanje mehanizma posmične veze između betona i profilirane ploče. Provjera i usporedba rezultata eksperimentalnog ispitivanja provedena je na konvencionalnim i pojednostavljenim m-k modelima na temelju dubine profilirane ploče. Validirani rezultati pokazali su prihvatljivu razinu pouzdanosti pri predviđanju visine svakog profila na temelju interakcijskih vrijednosti m i k.

Ključne riječi:

spregnute ploče, posmična veza, m-k metoda, uzdužni posmik, odnos između opterećenja i proklizavanja

Research Paper

Preetha Vellaichamy, Senthilkumar Veerasamy, Vasudevan Mangottiri

Shear bond characteristics of steel concrete composite deck slab

Steel-concrete composite slabs with cold-formed, profiled steel deck sheets are popularly used in steel-framed buildings. In these slabs, the deck platform acts as a working platform during construction and also as tensile reinforcement under in-service load conditions. The shear bond capacity of the composite slab is evaluated in this study for two different profile steel deck sheets. Specifically, their composite behaviour is investigated by casting and testing twelve full-scale composite deck slab specimens using the two-point loading system. In addition, based on the shear span length and profile height, the structural performance of the composite deck slab is analysed in terms of load-displacement response, shear bond capacity, ductility index, and load-slip behaviour. The results show that the most common failure of all tested specimens occurs due to the longitudinal shear failure between the concrete and profile deck sheets. As the longitudinal shear is a complex phenomenon, empirical approaches are used to evaluate the shear bond mechanism between the concrete and profile deck. The verification and comparison of experimental test results are performed with conventional and simplified m-k models based on the profile deck depth. The validated results reveal an acceptable level of reliability for prediction of each profile height based on the m and k interaction values.

Key words:

composite deck sheet, shear bond, m-k method, longitudinal shear, load-slip behaviour

1. Uvod

Spregnute ploče sastavljene od hladno oblikovanih limova često se u svijetu koriste pri izvođenju čeličnih okvirnih građevina. Kod izvođenja ovakvog sustava stropnih ploča, profilirani lim, koji se oslanja na čelične grede, djeluje kao trajna oplata u fazi lijevanja betona. Nakon očvršćivanja betona, profilirani limovi mogu poslužiti i kao vlačna armatura bez skidanja privremene oplate na gradilištu, čime se bitno smanjuje vrijeme montaže, a poboljšava čvrstoća betona tijekom uporabnog trajanja građevine. Ponašanje na kontaktu između profiliranog lima i betona spregnutih ploča izuzetno je složeno. Primarno djelovanje spregnute ploče osigurava se pouzdanim mehanizmom spoja u kontaktnom sloju. Spregnuto djelovanje može se ostvariti mehaničkim uklještenjem koje se postiže pomoću udubljenja i uzdužnih ukruta u profiliranoj ploči, a prijenos trenjem postiže se usjećenim profilom ploče, kemijskim spajanjem i sidrenjem na krajevima. Sidra na krajevima su u praksi posmični moždanici zavareni na pojasnice čeličnih greda kroz profilirani lim. Preporučuje se primjena zavarenih moždanika jer se tako postiže spregnuto djelovanje prenošenjem posmičnih naprezanja [1, 2]. Sam oblik profila omogućuje bolju otpornost na proklizavanje u kontaktnom sloju, a istovremeno se i poboljšava otpornost na vertikalno odvajanje [3].

Krajnja čvrstoća na posmičnom spoju pokazatelj je nosivosti spregnutih ploča. Bilo bi vrlo teško teoretski predvidjeti ponašanje posmičnog spoja. Naime, takvo ponašanje ovisi o brojnim parametrima kao što su sidrenje na krajevima, geometrija profila, dužina raspona spreznjanja, debljina lima, vitkost ploče i položaj udubljenja na profiliranom limu [4]. Nekoliko istraživača navodi da se sidrenjem na krajevima povećava otpornost posmične veze za 10–33 %, što ovisi o dužini raspona i debljini lima [1, 5, 6]. U brojnim se studijama navodi da se nosivost spregnutih ploča povećava ako se upotrebljavaju moždanici [5]. Nosivost, krutost i karakteristike posmične veze spregnutih ploča određuju se empirijskim metodama kao što su primjerice m-k metoda i metoda djelomične uzdužne posmične veze prema normi EN1994-1-1:2012. U m-k metodi, "m" označava mehaničko uklještenje između čelične ploče i betona dok "k" označava trenje između dva materijala. U toj metodi, vrijednosti "m" i "k" su dva različita parametra za ocjenjivanje karakteristika posmične veze u spregnutim pločama [7]. Mnogi istraživači smatraju da se metoda τ_u može primijeniti za određivanje duktilnosti spregnutih ploča umjesto m-k metode. Kod izračunavanja maksimalnog posmičnog naprezanja τ_u , raspon spreznjanja treba biti dostatan da se postigne otkazivanje uzdužne posmične veze [8]. Također su vrednovane i pojednostavljene m-k krivulje na temelju rezultata eksperimentalnih ispitivanja [9].

Do sloma spregnutih ploča najčešće dolazi zbog savojnog i posmičnog otkazivanja na osloncima, a kontaktni sloj koji je najosjetljiviji na slom, pri ispitivanju je otkazivao

zbog popuštanja posmične veze. Krsti slom ploče može se zamijeniti duktilnim slomom ako se koriste moždanici, a do duktilnog sloma obično dolazi kada je opterećenje za 10 % veće od opterećenja koje dovodi do prvog zabilježenog proklizavanja na krajevima [10]. Maksimalno krajnje opterećenje može se definirati u obliku progiba na sredini raspona (Raspon/50) ako do sloma ne dođe ranije. Slom posmične veze često se manifestira u obliku dijagonalne vlačne pukotine u točki ili blizu točke unosa opterećenja u području betona, nakon čega dolazi do gubitka veze (delaminacije) između lima i betona [6]. Do proklizavanja na krajevima očito dolazi u kasnijim fazama opterećenja sa značajnim padom u zoni spreznjanja, pokazujući gubitak spregnutog djelovanja i horizontalnog proklizavanja [7]. U ovom se radu analizira nosivost i posmično ponašanje spregnutih ploča u smislu vrednovanja m-k vrijednosti te zamjenom m-k krivulja pojednostavljenim λ -q krivuljama.

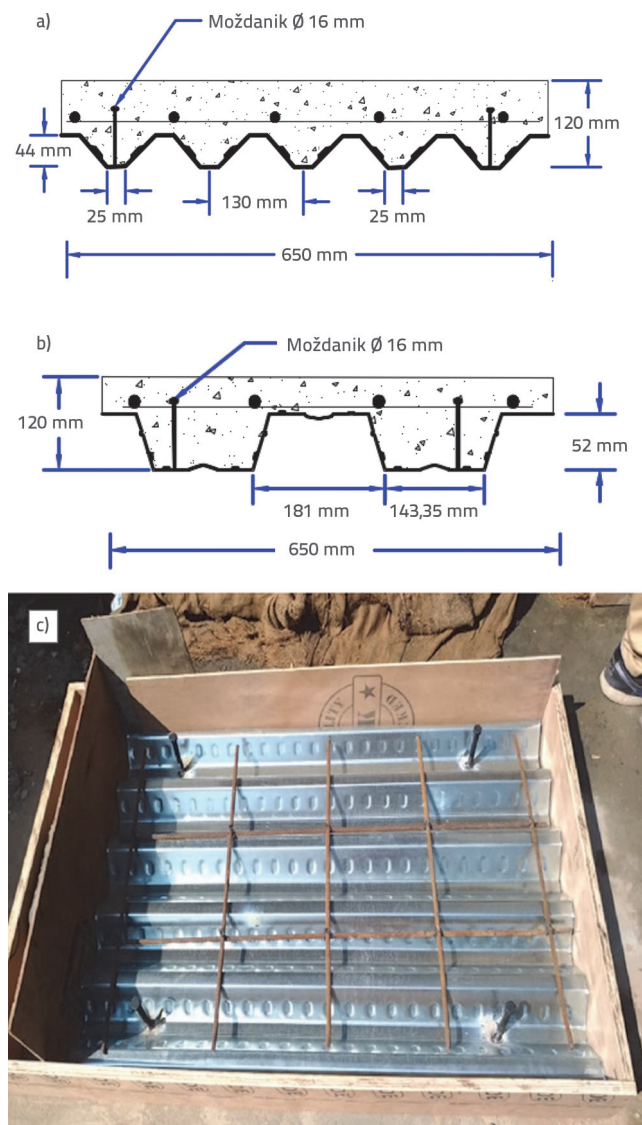
2. Materijali i metode

2.1. Izrada spregnute ploče

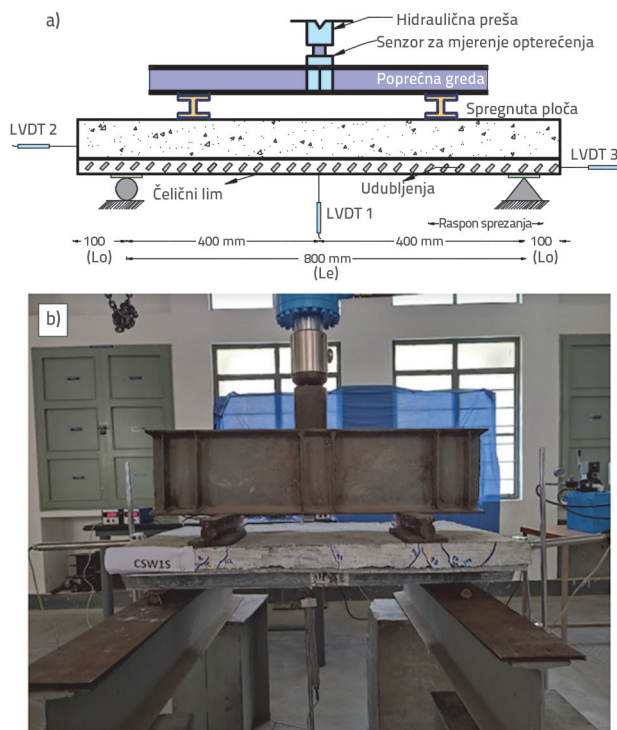
Eksperimentalno ispitivanje provedeno je na dva niza uzoraka sastavljena od po šest uzoraka spregnute ploče u stvarnoj veličini, dužine 1000 mm (L) i širine 650 mm (b), koji su izračunani prema normi EN1994-1-1:2012. Visine profiliranih limova korištenih u istraživanju su D44 i D52 a ukupna visina ploče iznosi 120 mm (slike 1.a i 1.b). Debljina profiliranog lima korištenog u ispitivanju iznosi 1 mm, a visina profila iznosi 44 mm, tj. 52 mm. Težina profiliranog lima D44 iznosi 10,2 kg/m², a njegova granica popuštanja iznosi 250 MPa. Težina profiliranog lima D52 iznosi 10,02 kg/m², a njegova granica popuštanja iznosi 240 MPa. Moždanici (vijci promjera 16 mm s polunavojem i glavom) pričvršćeni su na rubove valovitog lima (slika 1.c). Profilirani su limovi očišćeni prije betoniranja, a nakon toga je ugrađen beton sve do visine profila. Armaturne šipke promjera 8 mm postavljene su u razmacima od po 200 mm u oba smjera iznad visine profila s odgovarajućim zaštitnim slojem od 20 mm. Za lijevanje svih uzoraka spregnutih ploča korišten je obični portlandski cement (klase 43), drobljeni pijesak i krupnozrnati agregat veličine 20 mm. U ovom je istraživanju upotrebljen beton M20, a ciljana tlačna čvrstoća betona prikazana je u tablici 1.

Tablica 1. Rezultati dobiveni ispitivanjem svojstava betona

Oznaka uzorka	Tlačna čvrstoća betona M20 [MPa], nakon 28 dana	Prosječna tlačna čvrstoća [MPa]
CS01	27,25	26,30
CS02	25,34	
CS03	26,31	



Slika 1. Karakteristike presjeka: a) profiliranog lima D44; b) profiliranog lima D52; c) prikaz izvedbe uzoraka



Slika 2. Postav eksperimenta: a) shematski prikaz; b) prikaz načina nanošenja opterećenja

2.2. Ispitivanje spregnute ploče

Za potrebe ispitivanja izrađeni su uzorci spregnute ploče u stvarnoj veličini koji su zatim podignuti i simetrično raspoređeni kako bi se omogućilo ispitivanje pomoću preše kapaciteta 750 kN uz uvjete jednostavnog oslanjanja na krajevima. Za prikupljanje podataka korišten je računalni sustav, a linearno varijabilni diferencijalni transformatori (LVDT) su postavljeni na sredinu uzorka i na rubovima kako bi se mogli izmjeriti vertikalni pomaci i proklizavanje na krajevima. Na slikama 2.a i 2.b dan je shematski prikaz postava ispitivanja jednostavno

Tablica 2. Opis uzoraka

Oznaka profiliranog lima	Oznaka uzorka	Dužina raspona spreznjanja, Ls [mm]	Oznaka raspona spreznjanja	Moždanci
D44	D44-CSW1S-SS1	125	SS1	Moždanci promjera 16 mm s glavom, sidrenje na krajevima
D44	D44-CSW2S-SS2	150	SS2	
D44	D44-CSW3S-SS3	175	SS3	
D44	D44-CSW4S-LS1	225	LS1	
D44	D44-CSW5S-LS2	250	LS2	
D44	D44-CSW6S-LS3	300	LS3	
D52	D52-CSW1S-SS1	125	SS1	
D52	D52-CSW2S-SS2	150	SS2	
D52	D52-CSW3S-SS3	175	SS3	
D52	D52-CSW4S-LS1	225	LS1	
D52	D52-CSW5S-LS2	250	LS2	
D52	D52-CSW6S-LS3	300	LS3	

oslonjene spregnute ploče. Ploča se opterećuje jednoliko raspodijeljenim linijskim opterećenjem u dvije simetrično postavljene točke. Osni raspon uzorka spregnute ploče (L_e) iznosi 800 mm, s prepustima (L_o) od po 100 mm na svakoj strani oslonaca. Nepomični i klizni ležajevi simulirani su na osloncima po čitavoj širini uzorka kako bi se postigli uvjeti jednostavnog oslanjanja na krajevima. Dva linijska opterećenja zadana su po čitavoj širini uzorka postavljanjem čeličnih I-profila na odgovarajuće udaljenosti od oslonaca. Poprečna greda postavljena je uzduž ploče iznad točaka dvaju linijskih opterećenja, a senzor za mjerenje opterećenja postavljen je na sredinu poprečne grede za nanošenje monotonog opterećenja. Na početku svakog ispitivanja uzorci su preliminarno opterećeni kako bi se postigao odgovarajući kontakt između uzoraka i opreme za nanošenje opterećenja. Tijekom postupnog povećanja statičkog opterećenja bilježeni su progibi na sredini raspona (u svakom koraku opterećenja) i proklizavanje na krajevima (na oba oslonca) za obje skupine od po šest uzoraka i za svaki profil lima. U ovom je slučaju varijabilnost raspona spreznjanja postignuta mijenjanjem udaljenosti od osi jednog oslonca do najbliže točke unosa opterećenja [11]. S obzirom na uvjete ispitivanja, odabrane su tri skupine s kratkim rasponima spreznjanja (SS1, SS2 i SS3) koji redom iznose 125 mm, 150 mm i 175 mm, te tri skupine s dugim rasponima spreznjanja (LS1, LS2 i LS3) koji redom iznose 225 mm, 250 mm i 300 mm.



Slika 3. Obrazac pojave pukotina na spregnutoj ploči

3. Rezultati i rasprava

3.1. Odnos opterećenje-progib spregnutih ploča

Svi su uzorci opterećeni u dvije točke s promjenjivim rasponima spreznjanja kako bi se postigao tipični savojni i posmični mehanizam otkazivanja. Provedena je detaljna analiza progiba u sredini raspona te horizontalnog proklizavanja na krajevima, na kontaktu između betona i lima. Uočeno je linearno elastično ponašanje svih uzoraka sve do prve pojave proklizavanja. Također je uočeno da kod svih uzoraka na raspored pukotina uglavnom utječe uzdužno smicanje, kao što se može vidjeti u sažetom prikazu rezultata ispitivanja u tablici 3. i na slici 3.

Tablica 3. Sažeti prikaz rezultata ispitivanja

Oznaka profiliranog lima	Oznaka uzorka	Raspon spreznjanja, L_s [mm]	Opterećenje pri pojavi prve pukotine, P_y [kN]	Pomak pri popuštanju [mm]	Sila sloma, P_u [kN]	Maksimalni progib [mm]	Proklizavanje na krajevima [mm]	Indeks duktilnosti, D_I	Odnos P_u / P_y
D44	D44-CSW1S-SS1	125	71	4,1	145,3	22,6	5,6	5,02	2,05
D44	D44-CSW2S-SS2	150	69	4,6	142,6	24,8	5,2	4,59	2,07
D44	D44-CSW3S-SS3	175	57	6,1	140,2	25,3	4,9	3,11	2,46
D44	D44-CSW4S-LS1	225	53	6,3	81,4	26,7	4,7	3,11	1,54
D44	D44-CSW5S-LS2	250	52	8,2	79,9	27,8	4,3	2,91	1,54
D44	D44-CSW6S-LS3	300	49	6,5	76,3	28,56	4,2	3,52	1,56
D52	D52-CSW1S-SS1	125	69	4,5	131,8	26,4	5,6	5,31	1,91
D52	D52-CSW2S-SS2	150	59	4,3	134,5	28,7	5,4	5,49	2,28
D52	D52-CSW3S-SS3	175	57	6,3	128,5	30,5	4,8	4,63	2,25
D52	D52-CSW4S-LS1	225	46	10,7	68,3	31,4	4,6	1,80	1,48
D52	D52-CSW5S-LS2	250	49	7,6	67,4	33,7	4,2	2,58	1,38
D52	D52-CSW6S-LS3	300	52	10	69,7	34,8	3,5	3,48	1,34

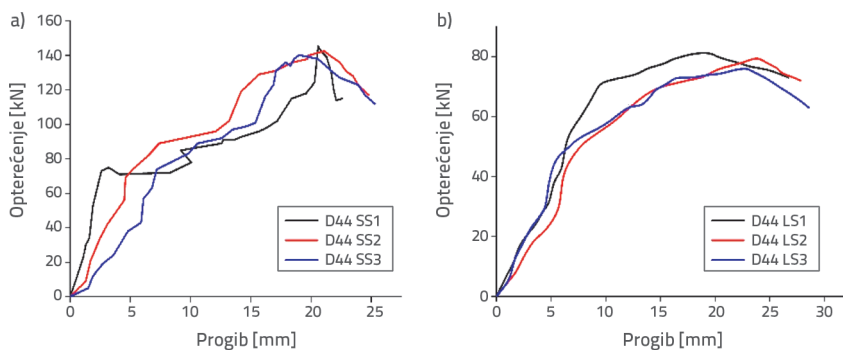
3.1.1. Odnos opterećenja i progiba

Na uzorke spregnute ploče nanoseno je statičko opterećenje za dvije konfiguracije limova, tj. D44 i D52, kako bi se odredio progib uzoraka pri nanošenju opterećenja. Na slici 4. prikazano je ponašanje uzoraka kratkog i dugog raspona spreznja za profilirani lim D44, a na slici 5. prikazana je krivulja opterećenje–progib za uzorke kratkog i dugog raspona spreznja za profilirani lim D52. Kod uzoraka s kratkim posmičnim rasponom (SS), ustanovljeno je da posmične pukotine dolaze iz zone oslonaca te se šire prema točkama unosa opterećenja, nakon čega se javljaju savojne pukotine koje nastaju u blizini donje zone središnjeg dijela raspona. Nakon dodatnog povećanja opterećenja, skupina pukotina pojavila se na dnu ploče odakle su se te pukotine brzo širile prema vrhu betona paralelno s linijom unosa opterećenja. Dodatno povećanje opterećenja dovelo je do neproporcionalnog progiba u sredini raspona ploče [16]. Spregnuto djelovanje između profiliranog lima i betona otkazalo je nakon postizanja krajnjeg opterećenja, upozoravajući na djelomično odvajanje lima. Uočeno je da se posmične pukotine formiraju u blizini točaka unosa opterećenja, s postupnim padom opterećenja usporedo s pojavom proklizavanja na krajevima. Međutim, kod dužih se raspona spreznja (LS) pukotine otvarale u donjem dijelu

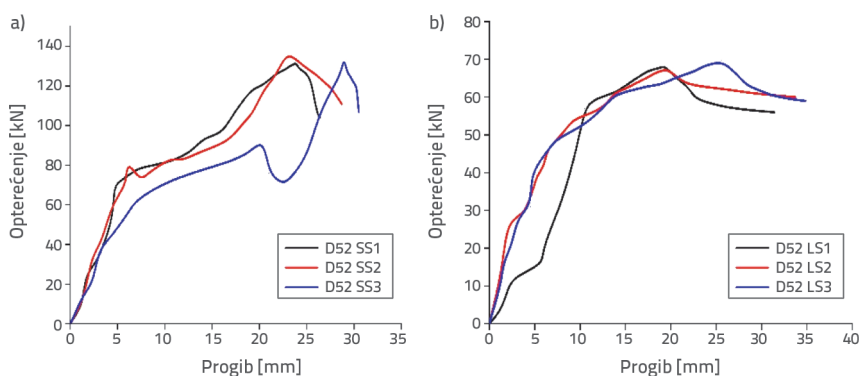
središnjeg dijela raspona nakon čega su se postupno širile prema točki unosa opterećenja. Nakon postizanja krajnjeg opterećenja, uočena je pojava odvajanja lima u srednjem dijelu raspona, što je popraćeno postupnim smanjenjem opterećenja. U sljedećem je stadiju uočeno lagano povećanje opterećenja, nakon čega je slijedio savojni slom uz značajan progib. Prosječni odnosi P_u/P_y pri ispitivanju uzoraka s kratkim i dugim posmičnim rasponima iznosili su redom 2,19 i 1,54 te 2,14 i 1,4 za profile D44 i D52, kao što se to vidi u tablici 3. Prosječne vrijednosti jasno pokazuju da manje posmične raspone karakterizira veća nosivost. Osim toga, uočen je bitan porast odnosa opterećenja (P_u/P_y) kod ploča s kratkim posmičnim rasponima u odnosu na one dugim posmičnim rasponima za spregnute ploče s čeličnim profilima D44 (42 %) i D52 (52 %).

3.1.2. Proklizavanje na krajevima spregnutih ploča

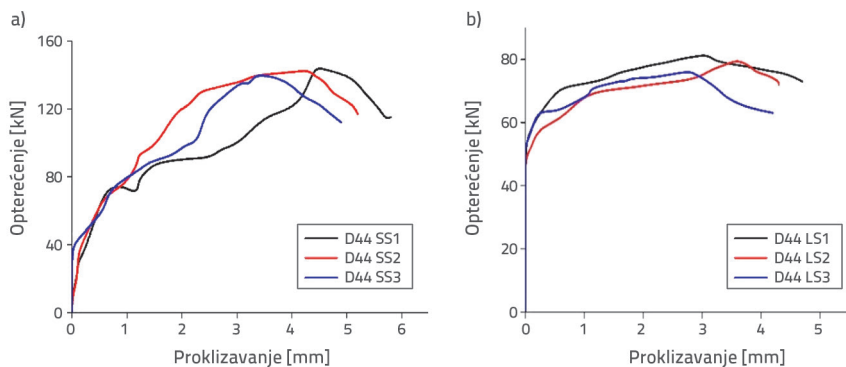
U početnoj fazi opterećenja zabilježeno je vrlo malo proklizavanje, ili ga uopće nije ni bilo. Nakon pojave prvih pukotina u svim uzorcima ploče, postupno dolazi do pojave proklizavanja na krajevima, s tim da je jače proklizavanje zabilježeno na kraćim fazama opterećenja. To znači da dolazi do slabljenja veze između profiliranog lima i betonske ploče, tj. do različitih iznosa proklizavanja na krajevima uz međusobno neovisno djelovanje profiliranog lima i betona. Do postupnog gubitka veze u pločama dolazi usporedo s dosezanjem krajnje nosivosti u završnoj fazi opterećenja. Prema zahtjevima norme EN1994-1-1:2012 [9] koji se odnose na duktilno posmično ponašanje, eksperimentalno dobiveno krajnje opterećenje treba za barem 10 % premašiti opterećenje pri kojem dolazi do proklizavanja od 0,1 mm. Odnos opterećenja i proklizavanja na krajevima prikazan je na slikama 6. i 7., gdje se uspoređuje vertikalno opterećenje i horizontalno proklizavanje uzoraka D44 i D52 na krajevima. Ta nam usporedba pokazuje da duži rasponi spreznja posjeduju manji kapacitet proklizavanja u odnosu na uzorke s kraćim rasponom spreznja. Prosječno proklizavanje uzoraka s dugim rasponom spreznja iznosilo je 4,4 mm za profil D44, tj. 4,1 mm za profil D52. Prosječno proklizavanje uzoraka s kratkim posmičnim rasponom iznosilo je 5,233 mm za profil D44, tj. 5,267 mm za profil D52. Prosječno proklizavanje uzoraka s kratkim posmičnim rasponom veće je za 1,27 puta od prosječnog proklizavanja uzoraka s dugim posmičnim rasponom.



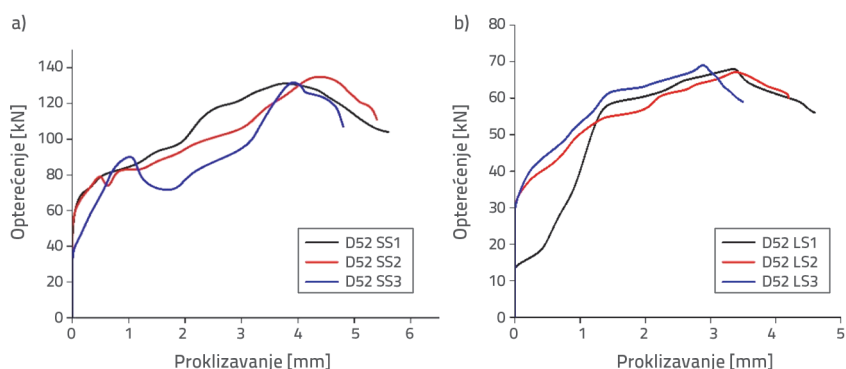
Slika 4. Progib pri opterećenju za uzorak D44: a) kratkog raspona spreznja; b) dugog raspona spreznja



Slika 5. Progib pri opterećenju za uzorak D52: a) kratkog raspona spreznja; b) dugog raspona spreznja



Slika 6. Odnos opterećenja i proklizavanja na krajevima za uzorak D44: a) s kratkim rasponom; b) s dugim rasponom



Slika 7. Odnos opterećenja i proklizavanja na krajevima za uzorak D52: a) s kratkim rasponom; b) s dugim rasponom

3.1.3. Indeks duktilnosti

Odnos između progiba u sredini raspona pri krajnjem opterećenju i elastičnog graničnog pomaka iskazuje se kao Indeks duktilnosti

dok "k" označava trenje između betona i čelika, kao što se to vidi na slici 8. za eksperimente s kratkim i dugim rasponom spreznjanja. U nastavku je prikazan izraz (1) koji se koristi u m-k metodi [6]:

Tablica 4. Vrijednosti indeksa duktilnosti

Oznaka profiliranog lima	Oznaka uzorka	Raspon, Ls [mm]	Pomak pri popuštanju, δ_v [mm]	Maksimalni progib, δ_m [mm]	Indeks duktilnosti DI (δ_m / δ_v)	Prosječni indeks duktilnosti, DI
D44	D44-CSW1S-SS1	125	4,1	22,6	5,02	4,24
D44	D44-CSW2S-SS2	150	4,6	24,8	4,59	
D44	D44-CSW3S-SS3	175	6,1	25,3	3,11	
D44	D44-CSW4S-LS1	225	6,3	26,7	3,11	3,18
D44	D44-CSW5S-LS2	250	8,2	27,8	2,91	
D44	D44-CSW6S-LS3	300	6,5	28,56	3,52	
D52	D52-CSW1S-SS1	125	4,5	26,4	5,31	5,14
D52	D52-CSW2S-SS2	150	4,3	28,7	5,49	
D52	D52-CSW3S-SS3	175	6,3	30,5	4,63	
D52	D52-CSW4S-LS1	225	10,7	31,4	1,80	2,62
D52	D52-CSW5S-LS2	250	7,6	33,7	2,58	
D52	D52-CSW6S-LS3	300	10	34,8	3,48	

(DI) [9]. Prosječni DI za eksperimente s kratkim i dugim posmičnim rasponom iznosio je 4.24 & 3.18, 5.14 & 2.31 za D44 & D52. U eksperimentima je primiječeno povećanje duktilnosti za gotovo 33 % kod kratkih raspona spreznjanja za uzorke D44 te za 122 % kod kratkih raspona spreznjanja za uzorke D54, kao što se to vidi u tablici 4. Odnos krajnje nosivosti i granice popuštanja izračunan je za kratki i dugi raspon spreznjanja, kao što je prikazano u tablici 4. Iz rezultata se vidi da se uzorci D52 odlikuju povoljnijom duktilnošću u odnosu na uzorke D44.

3.2. Određivanje posmične otpornosti spregnutih ploča

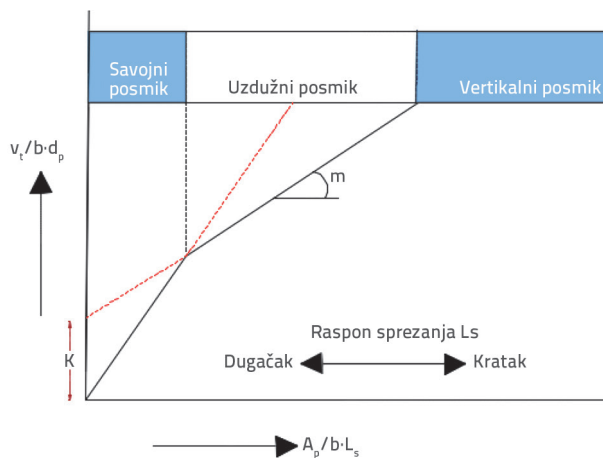
3.2.1. Ocjenjivanje pomoću m-k metode

Proračun i provjera otpornosti posmične veze provedena je prema normi EN1994-1-1:2012 određivanjem parametara čvrstoće pomoću vrijednosti "m" i "k" [12, 14, 15, 18]. Empirijske vrijednosti opisuju kapacitet profiliranog lima da prenosi posmik, gdje "m" označava mehanički spoj između betona i profiliranog lima,

Tablica 5. Eksperimentalni parametri za m-k metodu

Oznaka uzorka	Raspon sprezanja, L_s [mm]	Krajnje opterećenje [kN]	$V_u = 0,8 P_u/2$	$V_u/b \cdot d_p$ [N/mm ²]	$A_p/b \cdot L_s$
D44-CSW1S-SS1	125	145,3	58,12	0,912	0,0107
D44-CSW2S-SS2	150	142,6	57,04	0,895	0,0089
D44-CSW3S-SS3	175	140,2	56,08	0,880	0,0076
D44-CSW4S-LS1	225	81,4	32,56	0,511	0,0059
D44-CSW5S-LS2	250	79,9	31,96	0,502	0,0053
D44-CSW6S-LS3	300	76,3	30,52	0,479	0,0045
D52-CSW1S-SS1	125	131,8	52,72	0,862	0,0098
D52-CSW2S-SS2	150	134,5	53,8	0,880	0,0082
D52-CSW3S-SS3	175	128,5	51,4	0,841	0,0070
D52-CSW4S-LS1	225	68,3	27,32	0,447	0,0054
D52-CSW5S-LS2	250	67,4	26,96	0,441	0,0049
D52-CSW6S-LS3	300	69,7	27,88	0,456	0,0034

$$\frac{V_u}{bd} = \tau_{u,Rd} = m \frac{A_p}{bL_s} + k\sqrt{f'_c} \quad (1)$$



Slika 8. M-k metoda prema normi EN1994-1-1:2012

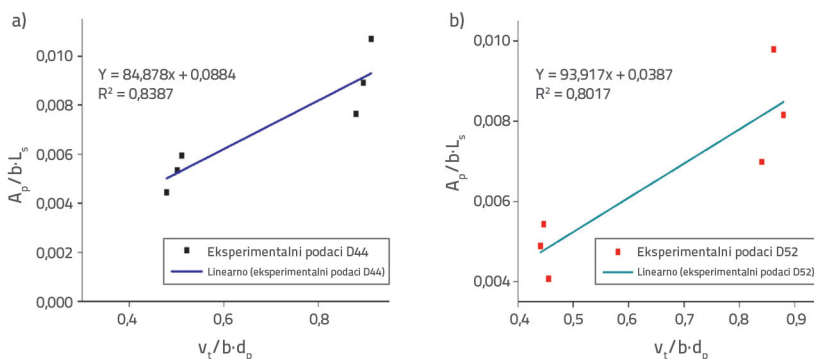
opterećenja u dvije točke, pri čemu je "b" širina uzorka, A_p je površina poprečnog presjeka profiliranog lima, a f'_c je čvrstoća betonskog valjka. Dužina raspona sprezanja L_s varira od 125 do 300 mm za šest grupa uzoraka pri određivanju m-k vrijednosti prema BS5950: Četvrti dio [13, 17] i specifikaciji ASCE 1992 [12,19]. Izraz (1) može se ponovo iskazati kako slijedi:

$$\frac{V_u}{bd\sqrt{f'_c}} = m \frac{A_p}{bL_s\sqrt{f'_c}} + k \quad (2)$$

U izrazu (2) prikazana je linearna jednadžba "y = mx + c", a osnovni empirijski parametri za izradu m-k krivulje prikazani su u tablici 3. Vrijednosti "m" i "k" za spregnute ploče prikazane su na slici 8. Na slikama 9.a i 9.b može se vidjeti da su vrijednosti "m" za ploču D52 više od onih za ploču D44. Viši stupanj mehaničkog uklještenja uočen je kod uzoraka D52 u kontaktnoj zoni s dvostranim udubljenjima i s horizontalnim ukrutama po dužini profila. Karakteristike posmične veze za spregnutu ploču, prikazane u tablici 3., izračunane su pomoću izraza (1).

U izrazu (1) V_u je krajnja posmična otpornost koja je jednaka polovici ukupnog krajnjeg opterećenja (P_u) za sustav unosa

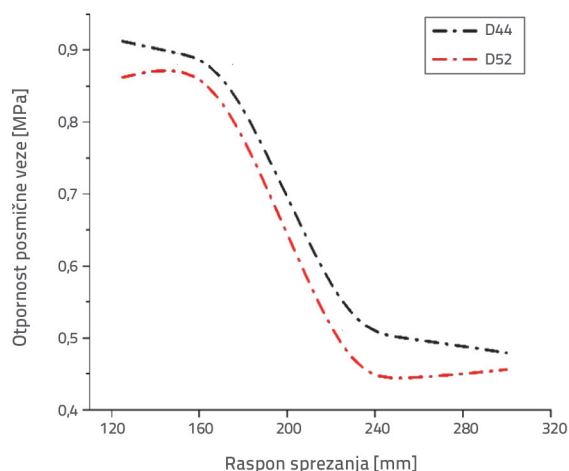
3.2.2. Utjecaj posmičnog raspona na otpornost posmične veze



Slika 9. M-k krivulja za: a) profil D44; b) profil D52

Proračunska otpornost posmične veze, $\tau_{u,Rd}$ izračunana je prema izrazu (1) na temelju površine profila A_p i raspona sprezanja L_s . Utjecaj raspona sprezanja na otpornost posmične veze spregnute ploče upućuje na postupni pad koji se javlja usporedo s dužinom raspona sprezanja, kao što se to vidi na slici 10. Otpornost posmične veze varira ovisno o dužini ploče, visini profila, ukrutama na profiliranom limu i o rasporedu udubljenja. Otpornost posmične veze uzorka D44 povećava se sa smanjenjem

širine donjih pojasnica profila. Općenito uzevši, korištenjem moždanika u kombinaciji s udubljenjima na limu postiže se veća otpornost posmične veze kod svih spregnutih ploča. Također, primjenom moždanika, ukruta i udubljenja, spregnute ploče D52 imaju više koristi od ploča D44 te posljedično imaju veću otpornost posmične veze primjenom tih ograničenih varijacija.



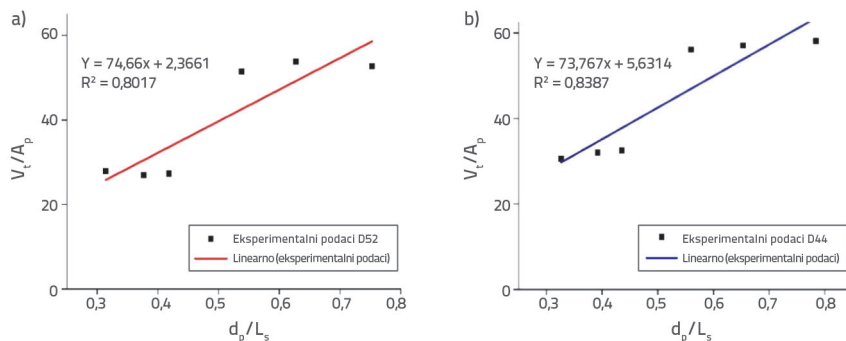
Slika 10. Odnos otpornosti posmične veze i posmičnog raspona

3.2.3. Utjecaj omjera 'dp/Ls' na kapacitet posmične veze

Nova pojednostavljena jednadžba λ -q, izvedena iz m-k jednadžbe, primjenjuje se u analizi učinkovitosti uzdužne posmične čvrstoće, a temelji se na omjeru statičke visine presjeka i raspona sprezanja (d_p/L_s) [9].

$$\frac{V_t}{A_s} = \lambda \frac{d_p}{L_s} \quad (3)$$

U izrazu (3) opisuje se uzdužni posmik u funkciji omjera d_p/L_s , pri čemu je λ nagib nove empirijske jednadžbe oblika $y = \lambda x + q$. Slika 11. prikazuje uzdužnu posmičnu čvrstoću ocijenjenu pomoću λ -q metode. Empirijske vrijednosti iznose 84,71 za λ , tj. 3,55 za q . Niži omjer d_p/L_s (dugi raspon sprezanja) dovodi do manje otpornosti na uzdužni posmik, a viši odnos d_p/L_s (kratak raspon sprezanja) dovodi do veće otpornosti na uzdužni posmik, slike 11.a i 11.b.



Slika 11. Modificirana m-k (λ -q) krivulja izvedena za: a) profil D44; b) profil D52

4. Zaključak

Provedeno je eksperimentalno istraživanje radi proučavanja ponašanja uzoraka spregnute ploče s moždanicima. U istraživanju su korišteni različiti rasponi sprezanja i različite visine profila ploče. Na temelju istraživanja izvedeni su sljedeći zaključci:

- Otpornost analiziranih uzoraka spregnute ploče uglavnom ovisi o rasponu sprezanja, i to bez obzira na visinu profila lima. Na temelju vrijednosti krajnjih opterećenja, može se zaključiti da je otpornost uzoraka s kraćim rasponom sprezanja veća od otpornosti uzoraka s dužim rasponom sprezanja.
- Uočeno je da je način otkazivanja uzoraka spregnute ploče u plastičnom području duktilan. Indeks duktilnosti pokazuje da je duktilnost uzoraka profila D52 veća za 33 % kod kraćeg raspona sprezanja u odnosu na duži raspon sprezanja.
- Prosječno proklizavanje na krajevima uzoraka s kratkim rasponom sprezanja veće je za 1,27 puta od proklizavanja uzoraka s dugim rasponom sprezanja. Prosječna djelotvornost proklizavanja bitno se smanjuje kod uzoraka s dugim rasponom sprezanja. Veće proklizavanje zabilježeno je kod uzoraka profila D44, gdje je interakcija nešto niža kada u limu nema ukruta.
- Iako je proračunska otpornost posmične veze veća kod uzoraka profila D44 u odnosu na uvjete raspona sprezanja, moguće je da profil s manjom širinom donjih pojasnica popusti pri provjeri otpornosti.
- Na temelju analize pomoću m-k metode utvrđeno je da su vrijednosti posmične veze više kod ploče D52, gdje dolazi to boljeg mehaničkog uklještenja u kontaktnom sloju, nego što je to slučaj kod ploče D44.
- Modificiranom m-k metodom ustanovljeno je da omjer d_p/L_s utječe na uzdužni posmik, pri čemu se uzorci profila D52 ponašaju bolje od uzoraka profila D44.

U istraživanjima koje slijede mogu se provesti dodatna eksperimentalna ispitivanja i simulacije kako bi se utvrdio utjecaj ukruta i udubljenja profiliranih limova i to za različite visine presjeka ploče.

LITERATURA

- [1] Degtyarev, V.V.: Strength of composite slabs with end anchorages, Part I: Analytical model, *J. Constr. Steel Res.*, 94 (2014), pp. 150–162, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.10.005>.
- [2] Molken, T., Dobrić, J., Rossia, B.: Shear resistance of headed shear studs welded on welded plates in composite floors, *Engineering Structures*, 197 (2019), pp. 109412, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109412>.
- [3] Hedao, N.A., Gupta, L.M., Ronghe, G.N.: Design of composite slabs with profiled steel decking: a comparison between experimental and analytical studies, *Int. J. Adv. Struct. Eng.*, 4 (2012) 1, pp. 1, <https://doi.org/10.1186/2008-6695-3-1>.
- [4] Cifuentes, H., Medina, F.: Experimental study on shear bond behaviour of composite slabs according to Eurocode 4, *JCSR*, 82 (2013) March, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.12.009>.
- [5] Rana, M.M., Uy, B., Mirza, O.: Experimental and numerical study of end anchorage in composite slabs, *J. Constr. Steel Res.*, 115 (2015), pp. 372–386, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.08.039>.
- [6] Porter, M.L., Greimann, L.F.: Shear-bond Strength of Studded Steel Deck Slabs, *International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, <https://scholarsmine.mst.edu/isccss/7icfss/7icfss-session6/1> 1984.
- [7] Marimuthu, V., Seetharaman, S., Arul Jayachandran, S., Chellappan, A., Bandyopadhyay, T.K., Dutta, D.: Experimental studies on composite deck slabs to determine the shear-bond characteristic ($m - k$) values of the embossed profiled sheet, *J. Constr. Steel Res.*, 63 (2007) 6, pp. 791–803, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.07.009>.
- [8] Chen, S., Shi, X., Qiu, Z.: Shear bond failure in composite slabs - a detailed experimental study, *Steel Compos. Struct.*, 11 (2011) 3, pp. 233–250, <https://doi.org/10.12989/scs.2011.11.3.233>.
- [9] Ahmed, S.M., Avudaiappan, S., Sheet, I.S., Saavedra Flores, E.I., Pina, J.C., Yanez, S.J., Guzmán, C.F.: Prediction of longitudinal shear resistance of steel-concrete composite slabs, *Eng. Struct.*, 193 (2019) February, pp. 295–300, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.05.010>.
- [10] Lakshmikandhan, K.N., Sivakumar, P., Ravichandran, R., Jayachandran, S.A.: Investigations on Efficiently Interfaced Steel Concrete Composite Deck Slabs, *J. Struct.*, (2013), pp. 1–10, <https://doi.org/10.1155/2013/628759>.
- [11] Hicks, J.S., Smith, L.A.: City: Stud Shear Connectors in Composite Beams that Support Slabs with Profiled Steel Sheeting, *Structural Engineering International* 2/2014, <https://doi.org/10.2749/101686614X13830790993122>.
- [12] EN 1994-1-1: Design of composite steel and concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN; 2004.
- [13] Hedao, N., Raut, N., Gupta, L.: Composite concrete slabs with profiled steel decking: comparison between experimental and simulation study, *American Journal of Civil Engineering*, 3 (2015) 5, pp. 250-261.
- [14] Ong, K.C.G., Mansurt, M.A.: Shear-bond capacity of composite slabs made with profiled sheeting, *Int. J. Cem. Compos. Light. Concr.*, 8 (1986) 4, pp. 231–237, [https://doi.org/10.1016/0262-5075\(86\)90050-3](https://doi.org/10.1016/0262-5075(86)90050-3).
- [15] Gholamhoseini, A., Gilbert, R.I., Bradford, M.A., Chang, Z.T.: Longitudinal shear stress and bond-slip relationships in composite concrete slabs, *Eng. Struct.*, 69 (2014), pp. 37–48, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.03.008>.
- [16] Marčiukaitis, G., Jonaitis, B., Valivonis, J.: Analysis of deflections of composite slabs with profiled sheeting up to the ultimate moment, *J. Constr. Steel Res.*, 62 (2006) 8, pp. 820–830, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2005.11.022>.
- [17] BS 5950, Part 4: Code of Practice for Design of Floors with Profiled Steel Sheeting, British Standards Institution, London, 1994.
- [18] Chen, S.: Shear bond failure in composite slabs-A detailed experimental study, *Steel Compos Struct*, 11 (2011) 3, pp. 233–250.
- [19] ASCE: Specification for the design and construction of composite slabs and commentary on specification for design and construction of composite slabs (ANSI/ASCE 2-84), New York, ASCE, 1985.