

Primljen / Received: 27.7.2014.
 Ispravljen / Corrected: 20.10.2014.
 Prihvaćen / Accepted: 29.12.2014.

Dostupno online / Available online: 10.4.2015.

Eksperimentalno ispitivanje spregnute ploče od valovitog čeličnog lima i betona

Autori:



Hajir Satih Abbas, dipl.ing.građ.
 Tehničko sveučilište u Maleziji
 Građevinski fakultet
hajir87m@yahoo.com



Izv.prof.dr.sc. **Sohaimi Abu Bakar**, dipl.ing.građ.
 Tehničko sveučilište u Maleziji
 Građevinski fakultet
suhaimibakar@utm.my



Mohammad Ahmadi, dipl.ing.građ.
 Tehničko sveučilište u Maleziji
 Građevinski fakultet
mfp_ahmadi@yahoo.co



Dr.sc. **Zaiton Haron**, dipl.ing.građ.
 Tehničko sveučilište u Maleziji
 Građevinski fakultet
zaitonharon@utm.my

Prethodno priopćenje

Hajir Satih Abbas, Sohaimi Abu Bakar, Mohammad Ahmadi, Zaiton Haron

Eksperimentalno ispitivanje spregnute ploče od valovitog čeličnog lima i betona

Spregnute ploče s čeličnim limovima sastavljene su od običnog betona i valovitog čeličnog lima. Čvrstoća spregnute ploče ovisi o djelovanju posmika između betona i čeličnog lima. Ovo međudjelovanje ovisi o nekoliko čimbenika, a kriteriji odnosa za svojstva međudjelovanja nisu definirani u analitičkom smislu. Stoga se proračunske metode provode pomoću empirijske analize. U ovom radu prikazano je eksperimentalno ispitivanje kako bi se razvila nova metodologija ispitivanja posmične otpornosti spregnute ploče.

Ključne riječi:

spregnuta ploča, moždanik, trapezni čelični lim, otkazivanje posmične veze, eksperimentalno ispitivanje

Scientific paper - Preliminary report

Hajir Satih Abbas, Sohaimi Abu Bakar, Mohammad Ahmadi, Zaiton Haron

Experimental studies on corrugated steel-concrete composite slab

Composite deck slabs are composed of normal concrete and corrugated steel sheet. The strength of composite slabs is governed by shear interaction between the concrete and the steel deck. This interaction depends on several factors and no relationship criteria can be found for interaction property from analytical basis. Therefore, the analysis and design methods are used by means of empirical analysis. In this paper, the experimental work is conducted to develop a new scale test method by using two lines of shear connectors welded onto the corrugated plate and lateral beam, in order to increase the shear bond resistance of a composite slab.

Key words:

composite slab, shear connector, corrugated steel plate, longitudinal failure and experimental test

Vorherige Mitteilung

Hajir Satih Abbas, Sohaimi Abu Bakar, Mohammad Ahmadi, Zaiton Haron

Entscheidungsunterstützung zur Verwaltung von Verkehrsprojekten in städtischen Gebieten

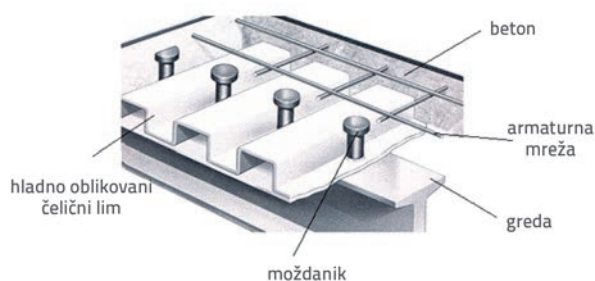
Verbundplatten können aus gewellten Stahlblechelementen und herkömmlichem Beton zusammengesetzt sein. Die Festigkeit von Verbundplatten wird durch das Scherverhalten aufgrund der Wechselwirkung von Beton und Stahlblech bestimmt. Diese Interaktion hängt von einigen Faktoren ab und die entsprechenden Kriterien sind derzeit nicht in analytischer Form definiert. Daher beruhen Berechnungs- und Bemessungsverfahren auf empirischen Analysen. In dieser Arbeit sind experimentelle Untersuchungen dargestellt, die zur Entwicklung eines neuen Testverfahrens zur Untersuchung des Scherverhaltens von Verbundplatten beitragen sollen.

Schlüsselwörter:

Verbundplatte, Dübel, Trapezblech, Scherversagen, experimentelle Versuche

1. Uvod

Spregnute ploče smatraju se jednim od najboljih načina za pojačanje stropnih ploča. Dosadašnja iskustva pokazuju da takva vrsta ploča ima općenito manju debljinu ploče (manji utrošak betona), veću nosivost i manje dimenzije sastavnih dijelova konstrukcije (stupova, greda, temelja). Ova je tehnika također korisna u primjeni spuštenih stropova te poboljšava planiranje u različitim fazama izvršenja projekta. Osim toga, zadovoljava bitne zahtjeve vezane za teoretsku analizu i mehaničku učinkovitost. Kao što je vidljivo na slici 1., hladno oblikovani čelični limovi su upotrijebljeni u spregnutoj ploči kao sastavni dio međukatnog sustava koji ima dvije funkcije: ponaša se kao vlačna armatura i kao oplata pri ugradnji betona. Štoviše, služi kao zaštita od utjecaja temperature i skupljanja betona.



Slika 1. Sastavni dijelovi spregnute ploče od čeličnog lima i betona

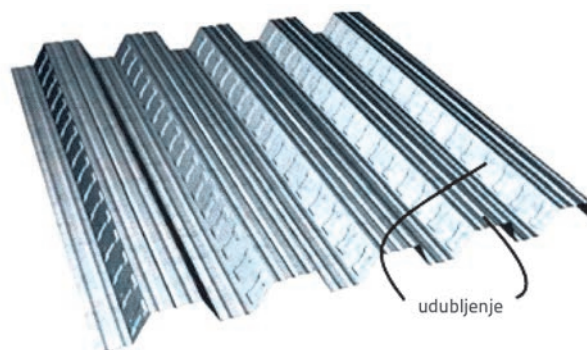
Treba napomenuti da primjena spregnute ploče od valovitog čeličnog lima i betona ima mnoge prednosti, od kojih su najvažnije:

- poboljšava se kvaliteta konstrukcije, ekonomična je i ugradnja je jednostavna,
- kada beton očvrstne, ostvaruje se sprezanje kako bi se postigla otpornost na korisna opterećenja,
- stabilizira nosače protiv bočnog torzijskog izvijanja djelujući kao bočno pridržanje,
- prenosi ravninska opterećenja djelovanjem ploče, na vertikalne ukrute ili na zidove,
- sprječava pucanje betona kroz distribuciju deformacija skupljanja,
- ugradnja takvog sustava je jednostavna te se lako mogu ugraditi otvori,
- valoviti čelični lim se proizvodi u tvornici pri visokim zahtjevima na kvalitetu, odakle ga se može jednostavno transportirati, rukovati njime i rezati na gradilištu, bez većih odstupanja i poteškoća,
- moždanici su zavareni za potporni gredni nosač duž cijele ploče.

S obzirom na sve navedene prednosti, spregnuta ploča je široko primjenjivana u projektiranju komercijalnih zgrada i industrijskih postrojenja. S druge strane, treba spomenuti i neke nedostatke, poput osjetljivosti na visoke požarne temperature. Osim toga, posebnu pažnju treba obratiti na prijanjanje betona i čeličnog

lima i treba osigurati zaštitu od oštećenja uslijed izloženosti velikim lokalnim opterećenjima [1]. Iako je čelični lim pocinčan, preporučuje se primjena antikoroziivnog premaza na izloženoj strani lima. Na slici 2. su prikazana udubljenja čeličnog lima koja povećavaju učinkovitost spregnute ploče iz sljedećih razloga [2]:

- sile međudjelovanja (mehanizmi otpornosti) djeluju na oba kraja udubljenja,
- smanjen je utjecaj smjera nagiba na otpornost na klizanje pa čvrstoća susjednih rebara postaje ujednačena,
- povećana je lokalna krutost lima na savijanje, stoga je poboljšana i ukupna otpornost na klizanje ploče.



Slika 2. Čelični lim s udubljenjima

Cilj primjene spregnute konstrukcije jest pomoću različitih pojedinačnih svojstava materijala postići najbolju izvedbu stropne ploče. Spregnuta stropna ploča je projektirana kako bi se postigla ušteda sustava zbog povećanja posmične otpornosti primjenom odgovarajućih sredstava. Takva sredstva omogućuju otpornost na horizontalno klizanje i vertikalno razdvajanje kontaktnih površina betona i čeličnog lima. Sredstva za sprezanje s odgovarajućim oblikom posmičnog spoja, primjerice moždanici, trebaju se dimenzionirati tako da mogu prenijeti horizontalne sile posmika na povezani sklop čelik-beton spregnute ploče. S obzirom na to da postoji mnogo vrsta sredstava za sprezanje koja se mogu koristiti samostalno ili u kombinaciji, nosivost posmične veze obično se određuje eksperimentalno. Najčešće se primjenjuju valjkasti moždanici s glavom (slika 1.) pomoću kojih se obično povezuje pojasnica nosača kroz ploču zavarivanjem. Postoje moždanici veće nosivosti (šipke, cijevi) koji se primjenjuju uglavnom na mostovima.

Moždanici mogu biti kruti ili popustljivi. Potpuno sprezanje postiže se kada se proračunska otpornost potpurnoga grednog nosača na savijanje ne povećava uslijed povećanja otpornosti na uzdužno smicanje na spoju.

Ako ovaj uvjet nije ispunjen, tada se radi o djelomičnom sprezanju, a glavni parametar koji se traži pri proračunu moždanika je odnos opterećenje-proklizivanje spoja [3].

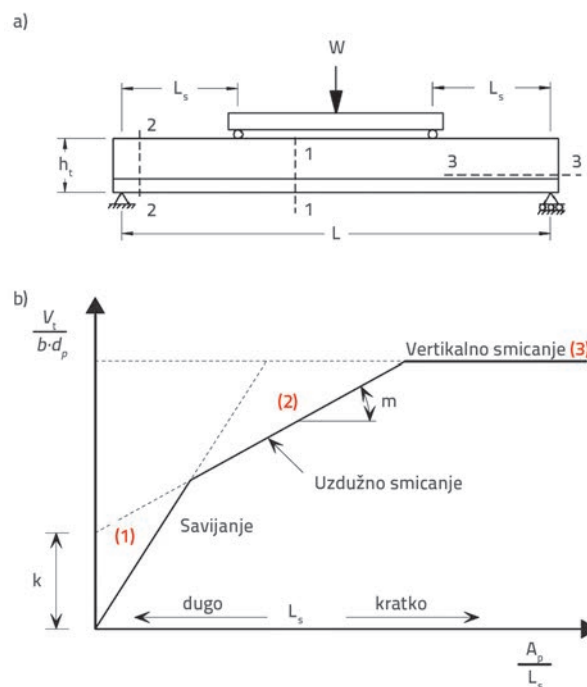
Svojstva posmične veze u profiliranim limovima određuju se primjenom dvaju empirijskih parametara "k" i "m", gdje "k" označava trenje među njima, a "m" predstavlja mehaničko uklještenje između čelika i betona (slika 3.).

U ovom se radu prikazuje eksperimentalno ispitivanje spregnute ploče koja se sastoji od betona i hladnooblikovanih profiliranih čeličnih limova s udubljenjima. Tlačna čvrstoća betona je 35 MPa, a koriste se moždanici koji su zavareni u dva reda kroz čelični lim na bočni nosač. Pomoću ovog ispitivanja moguće je izračunati nosivost spregnute ploče kako bi se odredilo proklizavanje i progib spregnute ploče uslijed opterećenja te učinci nastali korištenjem moždanika.

2. Načini otkazivanja nosivosti spregnute ploče

Nakon što betonska ploča očvrstne, dolazi do njenog spreznja s profiliranim čeličnim valovitim limom te tada može podnijeti korisna pokretna opterećenja. Spreznje se postiže adekvatnim prijenosom horizontalnih posmičnih sila između čeličnog lima i betonske ploče, a čelični lim ponaša se tada kao vlačna armatura. Osim horizontalne posmične sile, i savijanje dovodi do vertikalnog razdvajanja betona i čelika. Stoga profilirani lim treba projektirati na način da može podnijeti vertikalno razdvajanje i prijenos horizontalnih posmičnih sila. Profil trapeznog lima, kao i udubljena na limu, osiguravaju otpornost na vertikalno razdvajanje. Slijedi pobliži opis svih načina otkazivanja koji se mogu dogoditi kada je spregnuta ploča opterećena na savijanje (slika 3.).

- Otkazivanje uslijed savijanja u presjeku 1-1: događa se kada se prekorači projektirana otpornost na savijanje u sredini raspona (maksimalni M) koju predstavlja moment nosivosti spregnute ploče, na temelju nepopustljive krute posmične veze u presjeku 2-2. Ovaj način otkazivanja se najčešće pojavljuje u srednjim i dugim pločama s visokim stupnjem interakcije čelika i betona. Ova vrsta otkazivanja se ne uzima kao kontrolni kriterij za projektiranje budući da je za takvo otkazivanje potrebna potpuna kontaktna veza čelika i betona, što inače nije slučaj.
- Vertikalno posmično otkazivanje u presjeku 2-2: događa se uglavnom u debelim pločama male duljine u kojima je veliko opterećenje koncentrirano u blizini ležajeva. Događa se kada je vertikalna posmična sila u blizini ležaja veća nego posmična nosivost spregnute ploče. Ta vrsta loma je rijetko kritična.
- Otkazivanje uslijed horizontalne posmične sile u presjeku 3-3. Ovo je najčešći način otkazivanja u spregnutim pločama, a privukao je i najviše istraživanja. Nastupa kada se prekorači maksimalna uzdužna vrijednost otpornosti na smicanje na kontaktu čelika i betona. Ovisi o nosivosti posmične veze, a određena je posmičnom vezom u presjeku 3-3. U blizini koncentriranog opterećenja, netom prije otkazivanja, nastaje dijagonalna pukotina, a slijedi uzdužno proklizavanje (eng. *Longitudinal slip* - Ls) između dvaju materijala što je vidljivo na krajevima ploče. Ponašanje ploče pri ovakvom otkazivanju ovisi o mnogim faktorima kao što su: sredstva za spreznje, debljina čelika i vitkost.



Slika 3. a) načini otkazivanja nosivosti spregnute ploče [3]; b) definicija parametara m i k

Izraz V_t predstavlja maksimalno vertikalno spreznje, b je širina uzorka, koja uključuje broj ukupnih duljina valova limova, dok A_p predstavlja ukupni poprečni presjek limova.

Očekivani način otkazivanja se uglavnom kontrolira pokazateljem vitkosti (raspon spreznja L_s / d_p , gdje d_p (efektivna duljina) predstavlja udaljenost od sredine lima do gornje površine betona). Pri velikom omjeru L_s / d_p dolazi do otkazivanja uslijed savijanja, dok se pri malom omjeru L_s / d_p događa vertikalno smicanje. Uzdužno smicanje se pojavljuje pri srednjim vrijednostima. Lom može biti krto ili duktilni. Kod krto loma, nosivost naglo opada zbog relativnog klizanja između čelika i betona, što uzrokuje lom na kontaktnoj površini. S druge strane, posmična veza u duktilnom stanju može prenijeti posmičnu silu dok ne nastupi otkazivanje uslijed savijanja ili uzdužnog smicanja. Norma EC4 klasificira lom duktilnim ako vrijednost opterećenja otkazivanja prekoračuje vrijednost opterećenja koje uzrokuje prvo zabilježeno proklizavanje (veće od 0,1 mm) za više od 10 %. Vrijednost opterećenja uslijed otkazivanja odgovara progibu od $L/50$ na sredini raspona, osim ako se otkazivanje nije dogodio već negdje drugdje.

Postoje tri različite faze u djelovanju spregnutog podnog pločastog sustava [1]. U prvoj fazi, primjerice tijekom faze izgradnje (tijekom izlivanja betona), čelični trapezni lim se ponaša kao oplata za svježi beton. U drugoj fazi (faza djelovanja spreznja ploče), spregnuta betonska ploča s čeličnim trapeznim limom trebala bi podnijeti zadano korisno opterećenje. Čelični nosači koji su s betonskom pločom spojeni moždanicama, također trebaju podnijeti korisno pokretno opterećenje u

poprečnom smjeru. Ovaj rad proučava fazu u sprezanju ploče u kojoj se analizira ponašanje valovitog čeličnog lima pri sprezanju i betona koji ga prekriva, kao i analiza otkazivanja posmične veze spregnute ploče.

3. Pregled literature

Marimon i Crisinel [4] predložili su novi pristup za predviđanje ponašanja spregnute ploče. Taj pristup temelji se na određivanju odnosa momenta i zakrivljenosti u kritičnom presjeku spregnute kolničke ploče primjenom jednostavnog proračunskog modela uz pomoć kombinacije rezultata ispitivanja malih razmjera i standardnih ispitivanja materijala.

Ova nova pojednostavljena metoda donosi izračun kapaciteta nosivosti spregnutih ploča u njenim kritičnim presjecima, tijekom triju različitih faza ponašanja ploče vidljivim u odnosu $M-\theta$ dijagrama.

Oehlers i Burnet [5] predstavili su novu vrstu *push testa* koji simulira karakteristike spoja te su u svojem istraživanju proveli ukupno 33 ispitivanja. Autori u svom eksperimentu određuju parametre koji utječu na čvrstoću mehaničkog prijanjanja i kemijskog prijanjanja trapeznih i rebrastih sredstava za sprezanje. Utjecaj geometrije u poprečnom presjeku, debljina lima, udubljenja i obrada površine lima mogu biti dobre smjernice za razvoj novih tipova profila valovitih čeličnih limova za ploče, nosače i zidove.

Chen [6] je analizirao sedam slobodno oslonjenih spregnutih kolničkih ploča te dvije kontinuirane spregnute ploče primjenom različitih rubnih uvjeta oslanjanja kako bi ispitao ponašanje posmične veze u spregnutim pločama. Ploče koje su upete na krajevima pomoću moždanika, imale su veću čvrstoću posmične veze u usporedbi s pločama koje nisu upete. Također je smanjeno proklizavanje između betona i čelika.

Svrha elementarnih testova (*push testova*) koji su se primjenjivali ranije jest dvostruka. Kao prvo, elementarna ispitivanja koriste se za procjenu mnogih parametara koji utječu na izvedbu spregnute ploče. Te procjene su promijenile način projektiranja te su potaknule razvoj učinkovitijih profila i vrsta udubljenja na čeličnom limu (Shen, [22] i Tremblay i sur. [23]). Druga svrha bila je određivanje projektnih parametara kao što su svojstva posmične veze, koeficijent trenja, duktilna svojstva itd. za primjenu u projektiranju i analizama (Burnet, [10]; Patrick, [7] i Veljkovic, [8]).

Leskela i Tenhovuori [9] ispitivali su utjecaj otkazivanja posmične veze u uzdužnom spoju na ponašanje spregnute ploče s profiliranim čeličnim limom. U obzir su uzeti različiti važni parametri, a kritični faktori su provjereni pomoću numeričkih podataka koji su dobiveni iz nelinearnih proračuna primjenom metode konačnih elemenata. Sveobuhvatno ispitivanje je provedeno kako bi se usporedile sadašnje analitičke metode za analizu uzdužnog otkazivanja nosivosti prema normi Eurocode 4 [17], a one se mogu pojednostavniti, poboljšati i ujednačiti kako bi se dobio jasno razumljivi sustav koji prikazuje moguću pojavu uzdužnog otkazivanja u spregnutoj ploči i što se može učiniti u tom pogledu.

Sun i Makelainen [11] proučavali su ponašanje posmične veze spregnute ploče s profiliranim valovitim čeličnim limom. U dvije serije ispitivanja ispitano je dvadeset sedam uzoraka različitih veličina, oblika, položaja udubljenja i s različitom debljinom lima. Utvrđeno je da veličina udubljenja značajno utječe na ponašanje posmične veze u spregnutim pločama i na smanjenje Youngova modula elastičnosti.

Calixto i suradnici [12] proveli su eksperimentalno ispitivanje o ponašanju i čvrstoći slobodno oslonjene spregnute kolničke ploče s rebrastim limom. Proučavani su mnogi parametri, uključujući duljinu smicanja, različite debljine čeličnih limova, ukupnu visinu ploče te utjecaj moždanika usidrenih na krajevima ploče. Monotonim opterećivanjem spregnute ploče s čeličnim limom izmjerene su vrijednosti proklizavanja na krajevima, progibi na sredini raspona i naprezanja u čeličnim pločama. Rezultati ispitivanja pokazali su da najbolja svojstva ima spregnuta ploča s moždanicima.

Wright i suradnici [13] proučavali su rezultate više od 200 ispitivanja na spregnutoj ploči i usporedili rezultate primjenom dostupnih analitičkih metoda. Promatrali su tri različite faze djelovanja spregnutog konstrukcijskog sustava. Eksperimentalni rezultati su pokazali da nosivost ima mali utjecaj na razliku u čvrstoći betona. Ključni parametar koji utječe na konačnu čvrstoću je veličina udubljenja u limu.

Ekberg i Porter [14] proveli su velik broj eksperimentalnih ispitivanja na podnim pločama s hladnooblikovanim valovitim čeličnim limom. Ispitivanje je uključivalo pločaste elemente nosive u jednom smjeru koji su ispitivani do otkazivanja, a naglasak je bio na graničnoj projektiranoj čvrstoći. Porter i suradnici [15] proveli su eksperimentalna ispitivanja svojstava uzdužnog otkazivanja ploča nosivih u jednom smjeru, te su naveli mnoga zapažanja o značajnim parametrima koji utječu na ponašanje ploča.

Porter i Ekberg [16] preporučili su smjernice za projektiranje spregnutih ploča s čeličnim limom koje se temelje na konceptu granične čvrstoće. Nosivost se temelji na kontaktnoj čvrstoći između betona i čelika.

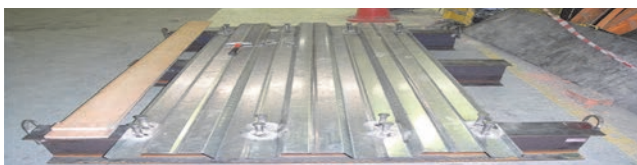
Porter i suradnici [15] izveli su jednadžbe za projektiranje nosivosti posmične veze iz podataka prikupljenih iz ispitivanja o pločama, a temelje se na uspostavljanju odnosa primjenom linearne regresije. Odvojena regresija se preporučuje za svaki profil čeličnog lima, kao i premaz lima, debljinu lima i čvrstoću betona. U fazi gradnje trapezni je čelični lim projektiran na opterećenja betona u svježem stanju i na njegovu vlastitu težinu. Hector i Fernando [21] ispitivali su 30 spregnutih ploča s različitim eksperimentalnim zahtjevima kako bi procijenili utjecaj prethodnih cikličnih opterećenja i položaj početnih pukotina na uzdužnu posmičnu čvrstoću. Tsalkatidis i Avdelas [24] proučavali su posmični spoj između betona i profiliranog čeličnog lima u spregnutoj ploči s velikim nelinearnim problemima s obzirom na rubne uvjete. Holomek i Bajer [25] su ponudili novi projektni pristup za hladnooblikovane tankostijene valovite čelične limove s udubljenjima koji se primjenjuju u spregnutim betonskim pločama. Također su proučavali djelovanje sprezanja pomoću

posmičnog spoja i ponašanje spoja kada je izložen različitim vrstama opterećenja. Iz pregleda literature možemo zaključiti da je analiza ponašanja spregnute ploče vrlo kompleksna. Treba uzeti u obzir mnogo parametara da bi se moglo ispitati utjecaj svojstava posmične veze, kao što su oblik, visina, frekvencija i orijentacija udubljenja uzorka, fleksibilnost i geometrija samog profiliranog čeličnog lima. Danas je moguće precizno odrediti čvrstoću samo primjenom eksperimentalnih ispitivanja, koja se trebaju provesti jer svaki čelični limeni profil ima svoj jedinstveni posmični prijenosni mehanizam. Rezultati ispitivanja izloženi u ovom radu predstavljaju doprinos novim eksperimentalnim otkrićima o mehaničkom ponašanju novih tipova spregnutih ploča, te doprinos analizi ponašanja posmične veze spregnutih ploča od valovitog čeličnog lima i betona primjenom moždanika u dva reda na svakom bočnom pridržanju nosača.

4. Eksperimentalna ispitivanja spregnutih ploča od valovitog čeličnog lima i betona

4.1. Priprema uzorka za ispitivanje

Spregnuta ploča se dobiva ugradnjom betona na trapezni čelični lim koji služi kao oplata. Prije ugradnje betona lim se treba potpuno očistiti. Ugradnja betona provodi se u strogo kontroliranim uvjetima. Duljina ploče iznosi 2000 mm, širina je 1000 mm, a debljina 140 mm. Prvi korak u proizvodnji spregnute ploče s krutim spojevima je zavarivanje valovitog čeličnog lima za nosač (dimenzije presjeka nosača su W 254 x 146 x 43), kao što je prikazano na slici 4. Čelični valoviti lim spojen je s gornjom pojasnicom nosača pomoću moždanika. Promjer moždanika je 19 mm, visina 100 mm prije zavarivanja te 95 mm nakon zavarivanja kako bi se smanjili horizontalni pomaci čelične valovite ploče. U svakom nizu postavljena su 4 moždanika (dužinom grede), razmak između njih je 320 mm, a prema propisima mora biti manji od 600 mm. Udaljenost između redova je 80 mm (standardna udaljenost mora biti najmanje četiri puta veća od promjera moždanika) prema normi EC-4 [17].

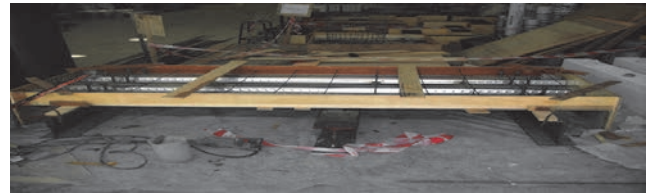


Slika 4. Prikaz povezivanja čeličnih nosača, trapeznih limova i moždanika

Tablica 1. Dimenzije i svojstva valovitog čeličnog lima

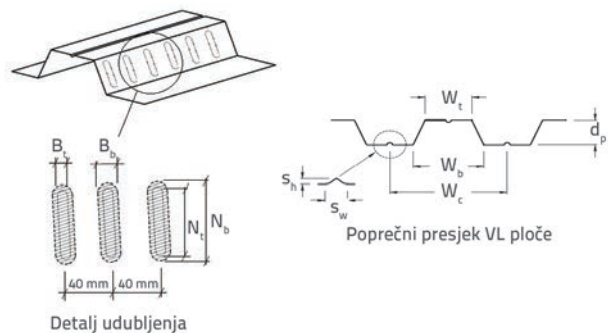
Svojstva Vrsta lima	W_t [mm]	W_b [mm]	W_c [mm]	T [mm]	Težina [kN/m ²]	B_b [mm]	B_t [mm]	N_t [mm]	d_p [mm]	N_b [mm]	F_y [kN/mm ²]	F_u [kN/mm ²]	A_s [mm ² /m]
2VL20	140	180	320	1	1	10,9	9,1	29	58	36	460	500	1056

Kako bi se smanjilo skupljanje betona i promjena temperature, postavljena je armaturna mreža (promjer šipki je 6 mm, a osni razmak šipki je 200 mm u oba smjera). Mreže su postavljene 30 mm od lica profiliranog čeličnog lima, kao što je prikazano na slici 5.



Slika 5. Prikaz armature u spregnutoj ploči te udubljenja na limu

Detaljni prikaz valovitog čeličnog lima i presjek udubljenog čeličnog lima prikazani su na slici 6. Sva svojstva eksperimentalnog uzorka prikazana su u tablici 1. Beton je dopremljen u mikseru za beton (gotova betonska mješavina), omjer cementa, vode i agregata je 1 : 0,45 : 4. Upotrijebljen je portland cement (PC) tipa II-42.5R, dok je za agregat korišten kvarcni pijesak i šljunak maksimalne veličine zrna 20 mm.



Slika 6. Presjek čeličnog lima i detalj udubljenja

Tlačna čvrstoća betona određena je ispitivanjem na tlak pri starosti od 28 dana na šest betonskih kocki dimenzija 150 x 150 x 150 mm. Tlačna čvrstoća iznosila je 35 MPa. Nakon izlivanja betona, ploča je njegovana 7 dana (slika 7.). Nakon 28 dana ploča je premještena na mjesto gdje će se ispitivati na odgovarajućim osloncima kako bi se izbjegao progib uslijed savijanja.

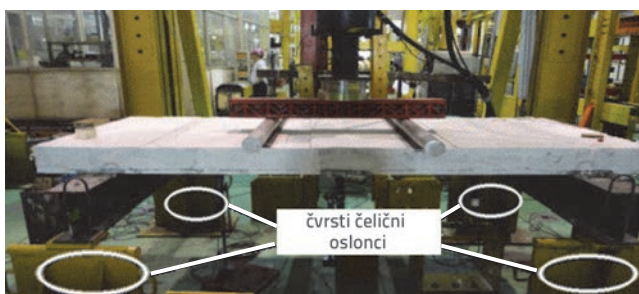
Izraz F_y predstavlja normalnu vlačnu čvrstoću, a F_u je granična vlačna čvrstoća profiliranog čeličnog lima.



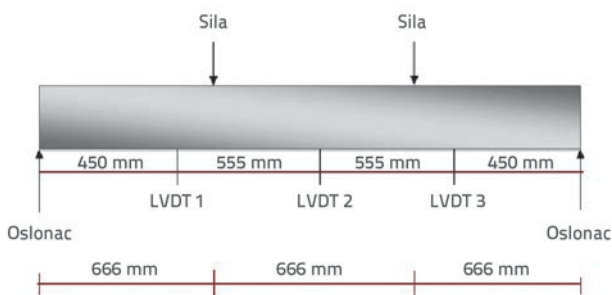
Slika 7. Ugradnja betona u fazi izrade spregnute ploče

4.2. Eksperimentalno ispitivanje

Slike 8. i 9. predstavljaju stvarni prikaz eksperimentalnog ispitivanja spregnute ploče. Grede su na krajevima oslonjene na čvrste čelične oslonce.



Slika 8. Postavljanje spregnute ploče za potrebe ispitivanja



Slika 9. Shematski prikaz opterećenja i oslanjana spregnute ploče



Slika 10. LVDT uređaji postavljeni na sredini i na četvrtinama raspona

Glavni cilj ispitivanja bio je odrediti maksimalnu nosivost spregnute ploče pri graničnom progibu. Stoga su postavljena tri LVDT uređaja (LVDT – linearni varijabilni diferencijalni transformator) ispod ploče,

jedan na sredini raspona, a druga dva na udaljenosti $L/4$ od kraja ploče s lijeve i desne strane, kao što je prikazano na slikama 9. i 10. Proklizavanje između betona i čelika je važno kako bi se odredilo duktilno ili krto ponašanje spojeva. Zbog toga su postavljena dva LVDT-a na svakoj strani spregnute ploče, jedan na betonu i drugi na trapeznom limu, što se može vidjeti na slici 11. LVDT uređaji su spojeni na računalo koje automatski pohranjuje sve podatke u zadanom vremenskom intervalu, a rezultati su prikazani na nekima od sljedećih slika. Računalo je zabilježilo vrijednosti opterećenja u zadanim intervalima (brzina opterećivanja bila je 0,03 kN/s). Po širini spregnute ploče postavljene su dva linijska opterećenja pomoću dva manja uzorka cilindričnog presjeka (promjera 20 mm, duljine 1500 mm, težine 2 kN). Na mjestu koncentriranog opterećenja prijenosni uređaj je mjerio raspodjelu opterećenja (presjek grede: W 245 x 102 x 22). Cilindri su postavljeni na čelične ploče (debljine 10 mm, duljine 1000 mm, težine 0,5 kN), kao što je prikazano na slici 12.



Slika 11. Prikaz mjerenja proklizavanja između valovitog čeličnog lima i betona pomoću LVDT



Slika 12. Prijenos dvaju linijskih opterećenja na ploču

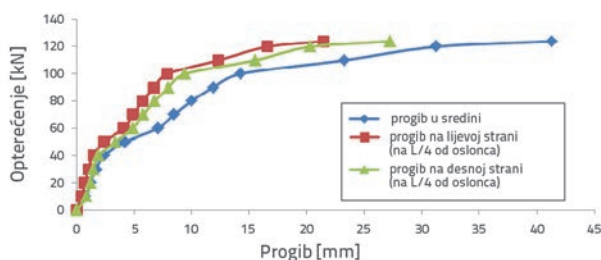
4.3. Statičko ispitivanje

Uzorak je postavljen na krute čelične oslonce, izmjereno je linijsko opterećenje i udaljenost između osi oslonaca i mjesta gdje je primijenjeno linijsko opterećenje. Primijenjena brzina opterećivanja za statičko ispitivanje iznosila je 0,03 kN/s, a do otkazivanja je došlo nakon 70 minuta. Računalo je automatski bilježilo svakih pet sekundi progib na sredini i četvrtinama raspona ploče te proklizavanje armature u betonu na krajevima spregnute ploče. Istodobno, maksimalni progib na sredini raspona je ograničen na 40 mm kako bi se izbjeglo iznenadno otkazivanje uzorka (EN 1994-1-1 [17]).

5. Rezultati i diskusija

5.1. Ponašanje progiba uslijed opterećenja

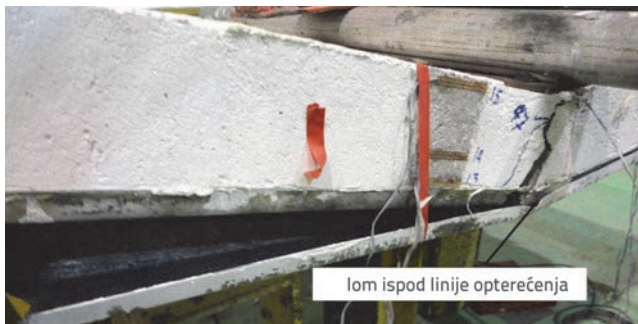
Krivulja ovisnosti progiba i opterećenja tipičnog uzorka prikazana je na slici 13. Došlo je do sloma uzorka uslijed horizontalnog razdvajanja čelične ploče od betona, što je prikazano na slikama 14. i 15. Porter i Ekberg [20] upozoravaju na to da slom betonske ploče armirane čeličnim limom započinje nepravilnom razdiobom naprezanja uslijed savijanja i proklizavanja između betona i čelične ploče, a širi se dok ne prekorači vrijednost čvrstoće prijanjanja te dolazi do lokalnog sloma. Postupno dolazi do slabljenja prijanjanja sve do slobodnih rubova ploče, pojavljuje se proklizavanje čelika i betona sve do konačnog sloma. Sprezanje nije u potpunosti onemogućeno zahvaljujući moždanicima koji su djelovali kao sidra, a kojima su se prenosile sile s betona na čelični lim. Maksimalno opterećenje iznosilo je 120 kN, a maksimalni progib 40 mm (zadovoljavaju prema dopuštenim vrijednostima iz norme EC 4).



Slika 13. Karakteristični progibi uslijed opterećenja



Slika 14. Tipični izgled uzorka nakon sloma

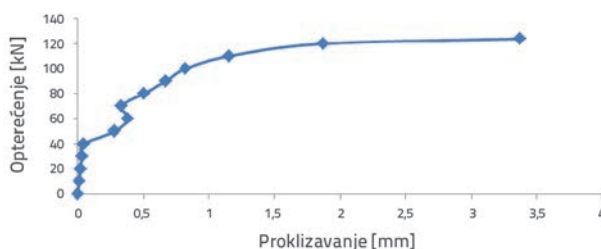


Slika 15. Vertikalno odvajanje čeličnog lima u dijelu ploče

5.2. Ponašanje ploča pri proklizavanju na krajevima

Ispitivanje spregnute ploče rezultiralo je otkazivanjem posmične veze, uz značajno proklizavanje na krajevima, dok su se glavne pukotine pojavile u kritičnim presjecima neposredno ispod jednog od linijskih opterećenja. Pojava proklizavanja posmične veze na kontaktnoj površini betona i čeličnog lima upućuje na manjkavosti međudjelovanja prilikom sprezanja. U slobodno oslonjenim spregnutim pločama, proklizavanje posmične veze razvija se s prirastom opterećenja, nakon čega nastaju pukotine u betonu uslijed savijanja i u konačnici dolazi do sloma spregnute ploče. Proklizavanje (horizontalni pomak) između betona i valovitog trapeznog čeličnog lima izmjeren je pomoću LVDT uređaja smještenih na stranama spregnute ploče. Nakon nanesenog opterećenja, zabilježeni su rezultati na dva LVDT uređaja i razlika između horizontalnog pomaka betona i lima (proklizavanje). Zatim se uzima prosječno proklizavanje za dvije točke, kao što je prikazano na slici 16.

Možemo primijetiti da proklizavanje do opterećenja od 40 kN iznosi 0,04 mm. Nakon 40 kN, proklizavanje se povećava te krivulja opterećenje-progib, koja je do tada imala linearno elastično ponašanje, poprima nelinearno plastične karakteristike, a u istom trenutku se pojavljuju prve pukotine ispod nanesenog linijskog opterećenja, širine 0,1 mm. Dostignuta je nosivost spregnute ploče i dolazi do uzdužnog sloma posmične veze.



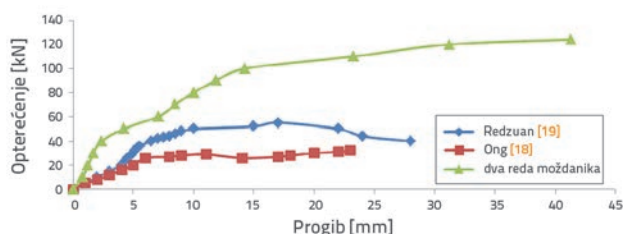
Slika 16. Tipična krivulja opterećenje - proklizavanje

Ispitivanjem ploče pokazano je njezino duktilno ponašanje. Ponašanje ploče je vidljivo iz krivulje opterećenje-progib kada je maksimalno opterećenje (W_t) u trenutku sloma ploče iznosilo 120 kN, opterećenje (W_{1slip}) pri kojemu se najprije pojavilo proklizavanje iznosilo je 15 kN, dok je do proklizavanja veličine 1 mm ($W_{0,1mm}$) došlo pri opterećenju od 45 kN. Kao što je navedeno u normi EC 4, duktilno ponašanje ploče pojavljuje se kada je vrijednost W_t barem 10 % veća od vrijednosti $W_{0,1mm}$ (omjer $W_t/W_{0,1mm} = 2,667$ je veći od 1,1).

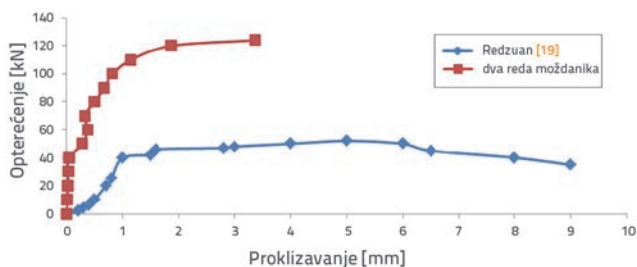
5.3. Učinkovitost spregnute ploče s dva reda moždanika

Spregnute ploče s usidrenim čeličnim moždanicima na krajevima postižu veću čvrstoću posmične veze u usporedbi sa spregnutim pločama bez sidrenja na krajevima. Najučinkovitija i široko primjenjivana sredstva za sprezanje dobivaju se

primjenom ispupčenja na profiliranoj površini čelika [26-27]. Čvrstoća posmične veze na smicanje se provjerava analizom rezultata ispitivanja spregnute ploče s jednim rasponom sa sidrenjem na krajevima primjenom linearne regresije. Sidrenjem moždanika na krajevima, uočeno je gotovo linearno ponašanje na krivulji opterećenje-progib (prije pojave proklizavanja posmične veze, koje je zabilježeno na krajevima ploče). Porastom opterećenja, povećalo se i proklizavanje, pri čemu dolazi do pukotina na spojevima na kontaktu betona i čelika, nakon čega je krivulja opterećenje-progib postala nelinearna. U pločama bez sidrenja na krajevima, proklizavanje je nastupilo neposredno prije maksimalnog opterećenja. Utjecaj usidrenih moždanika na otpornost posmične veze može se promatrati u kombinaciji s vlačnim pridržanjem u čeličnom valovitom limu. Formira se tijekom savijanja u ploči, što će utjecati na posmičnu otpornost. Moždanik je obično fleksibilniji nego površina na kojoj se pojavljuje uzdužno smicanje (koja je uglavnom krhka). Zbog toga nije moguće izravno kombinirati utjecaj posmične veze i moždanika [20].



Slika 17. Opterećenje - progib na sredini raspona



Slika 18. Krivulje opterećenje - proklizavanje

U ovom radu upotrijebljena su dva reda moždanika kako bi se povećala otpornost posmične veze zbog čega se povećala nosivost i duktilnost spregnute ploče, kao što se jasno može vidjeti na slici 17. Rezultat ovog ispitivanja (dva reda moždanika) uspoređen je s rezultatima Omega [18] i Redzuana [19] koji su primjenjivali ista svojstva materijala i dimenzije spregnute ploče kao što je prikazano na slici 17. Ong [18] je ispitivao spregnutu

ploču bez posmičnih spojeva, a Redzuan [19] je ispitivao ploču s jednim redom posmičnih spojeva. Vrijednosti proklizavanja dobivene u ovom radu uspoređene su s rezultatima koje je dobio Redzuan [19], a mogu se vidjeti na slici 18.

Primjenom dva reda moždanika (nosivost svakog moždanika je 91 kN), poboljšava se prionjivost valovitog čeličnog lima i betona. Zbog toga je otpornost posmične veze bila visoka, a proklizavanje između njih je smanjeno. Ploča s moždanicima na krajevima daje dovoljno upozorenje u obliku prekomjernog progiba prije nego što dolazi do sloma, kao što se vidi na slici 19. (pojavljuje se velik broj pukotina prije sloma).



Slika 19. Pukotine u stropnoj ploči prije loma

6. Zaključak

Uspješno je razvijena nova vrsta ispitivanja spregnutih ploča. Metodologija ispitivanja razvijena u ovom istraživanju ubuduće može služiti za procjenu ponašanja i podataka koji se primjenjuju u današnjim metodama projektiranja (poput m-k metode i PSC metode). Ispitivanje je provedeno kako bi se odredila nosivost posmične veze betonske ploče s čeličnim limom nakon dodavanja dva reda moždanika zavarenih na bočnom nosaču s čeličnim limom te su dobiveni očekivani rezultati: maksimalna nosivost iznosila je 120 kN, a pomak uslijed proklizavanja iznosio je 3,5 mm. Iz eksperimentalnih rezultata zaključeno je da spregnuta ploča ima visoku duktilnost te da je proklizavanje vrlo malo u usporedbi sa spregnutom pločom bez moždanika. Krivulja opterećenje-progib prije pojave proklizavanja bila je linearna, no kada se proklizavanje povećalo, ponašanje krivulje postalo je nelinearno, a istodobno se elastično ponašanje spregnute ploče promijenilo u plastično. Pukotine u betonu bile su male zbog armaturne mreže koja sprječava pucanje i skupljanje betona.

Zahvala

Ovo istraživanje je obavljeno u UTM centru za istraživanje i upravljanje (*Research Management Centre - RMC*). Autori zahvaljuju Tehničkom sveučilištu u Maleziji za omogućavanje ispitivanju i gospodinu Mohammadu Ahmadiju na pomoći tijekom eksperimentalnih istraživanja.

LITERATURA

[1] Marimuthu, V., Seetharaman, S., Arul, S., Chellappan, A., Bandyopadhyay, T., Dutta, D.: Experimental studies on composite deck slabs to determine the shear-bond characteristic (m-k) values of the embossed profiled sheet, *Journal of construction steel research*, 63 (2006), pp. 791-803.

[2] Miquel, F., Frederric, M., Michel, C.: Designing cold-formed steel sheets for composite slabs: An Experimentally validated FEM approach to slip failure mechanics, *Journal of construction steel research*, 44 (2007), pp. 1261-1271.

- [3] Johnson, R.: Composite structure of steel and concrete: Beams, slabs, columns and frames for building, *Blackwell Scientific Publication*, 1 (1994).
- [4] Crisinel, M., Marimon, F.: A new simplified method for the design of composite slabs, *Journal of Constructional Steel Research*, 60 (2004), pp. 481-491., doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0143-974X\(03\)00125-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0143-974X(03)00125-1)
- [5] Burnet, M., Oehlers, D.: Rib shear connectors in composite profiled slabs, *Journal of Constructional Steel Research*, 59 (2001), pp. 385-403., doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00038-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00038-4)
- [6] Chen, S.: Load carrying capacity of composite slabs with various end constraints, *Journal of Constructional Steel Research*, 59 (2003), pp. 385-387., doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0143-974X\(02\)00034-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0143-974X(02)00034-2)
- [7] Patrick, M., Bridge, R.: Partial shear connection design of composite slabs, *Engineering Structures*, 16 (1994) 5, pp. 304-322.
- [8] Veljkovic, M.: Longitudinal shear capacity of composite slabs, *Nordic steel construction conference 95*, Malmo- Sweden, 1995.
- [9] Tenhovuori, A., Leskela, M.: Longitudinal shear resistance of composite slab, *Journal of Constructional Steel Research*, 46 (1998), 1-3, pp. 228., doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0143-974X\(98\)00169-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0143-974X(98)00169-2)
- [10] Burnet, M.: Analysis of composite steel and concrete flexural members that exhibit partial shear connection, *PHD Thesis*, University of Adelaide, Australia, (1998).
- [11] Makelainen, P., Sun, Y.: The longitudinal behavior of a new steel sheeting profile for composite floor slabs, *Journal of Constructional Steel Research*, 49 (1999), pp. 117-128., doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0143-974X\(98\)00211-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0143-974X(98)00211-9)
- [12] Calixto, J., Lavall, A.: Behaviour and strength of composite slabs with ribbed decking, *Journal of Constructional Steel Research*, 46 (1998) 1-3, pp. 211-212.
- [13] Wright, H., Evans, H., Harding, P.: The use of profiled sheeting in floor construction, *Journal of Constructional Steel Research*, 7 (1987), pp. 279-295., doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0143-974X\(87\)90003-4](http://dx.doi.org/10.1016/0143-974X(87)90003-4)
- [14] Porter, M., Ekberg, C.: Design recommendation for steel deck floor slabs, *Journal of Structural Division*, 102 (1976) (ST 11), pp. 21-35.
- [15] Porter, M., Ekberg, C., Greimann, L., Elleby, H.: Shear bond analysis of steel deck reinforced slabs, *Journal of the structural Division*, 102 (ST 12), ASCE (1976), pp. 2255-2268.
- [16] Porter, M., Ekberg, C.: Investigation of cold-formed steel-deck-reinforced concrete floor slabs. In: Yu W-W, editor. First specialty conference on cold-formed steel structures. Rolla: University of Missouri-Rolla, (1971) pp.179-85.
- [17] Eurocode 4. Design of composite steel and concrete structures- part 1.1:General rule and rules for building, EN 1994-1-1:2001, Draft No. 3, European committee for standardization, Brussels, 2001.
- [18] Ong, K.C.G., Mansurt, M.A.: Shear-bond capacity of composite slabs made with profile sheeting, *The international journal of cement composite and lightweight concrete*, 1986, 8 (4), pp. 231-237., doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0262-5075\(86\)90050-3](http://dx.doi.org/10.1016/0262-5075(86)90050-3)
- [19] Abdullah, R., Easterling, W. S.: New evaluation and modeling procedure for horizontal shear bond in composite slabs, *Journal of constructional steel research*, 65 (2009), pp. 891-899., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.10.009>
- [20] Porter, M., Ekberg, C.: Design recommendations for steel-deck floor slabs, *Journal of the Structural Division, Proceedings, American Society of Civil Engineers*, Vol.102, No. ST11, November (1976), pp. 2133-2136.
- [21] Hector, C., Fernando, M.: Experimental study on shear bond behaviour of composite slabs according to Eurocode 4, *Journal of construction steel research*, 82 (2013), pp. 99-110.
- [22] Shen, G.: Performance evaluation of new corrugated-type embossments for composite deck, *MSc. Thesis*, Virginia polytechnic institute and state university, Blacksburg, Virginia, (2001).
- [23] Tremblay, R., Rogers, C., Gignac, P., Degrange, G.: Variables effecting the shear-bond resistance of composite floor deck systems, *Proceedings of the 16th international specialty conference on cold-formed steel structures*, Orlando- Florida, pp. 663-676, (2002).
- [24] Tsalkatidis, T., Avdelas, A.: The unilateral contact problem in composite slab: Experimental study and numerical treatment, *Journal of construction steel research*, 66 (2010), pp. 480-486.
- [25] Holomek, J., Bajer, M.: Experimental and numerical investigation of composite action of steel concrete slab, *Steel structures and bridges*, 40 (2012), pp. 143-147.
- [26] Mistakidis, E., Dimitriadis, K.: Bending resistance of composite slabs made with thin-walled steel sheeting with indentations or embossments, *Thin-Walled structure*, 46 (2008), pp. 192-206., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2007.08.001>
- [27] Mohammed, B., Al-Ganad, M., Abdullahi, M.: Analytical and experimental studies on composite slabs utilising palm oil clinker concrete, *Construct build mater*, 25 (2011) 8, pp. 3550-3560.