

Primljen / Received: 25.10.2019.

Ispravljen / Corrected: 31.1.2020.

Prihvaćen / Accepted: 26.6.2020.

Dostupno online / Available online: 10.10.2020.

Utjecaj otvora na hladno oblikovane čelične posmične zidne panele

Autori:

Dr. sc. **Idriss Rouaz**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Blida, Alžir

Odjel za građevinarstvo

Geotehnički i građevinski laboratorij

Državni centar za izradu studija i integralna

istraživanja u građevinarstvu (CNERIB), Alžir

Rouaz.Idriss@gmail.com

Autor za korespondenciju

Prof. dr. sc. **Nouredine Bourahla**, dipl.ing.građ.

Državno tehničko veleučilište ENP, Alžir

Odjel za građevinarstvo

nedbourahla@gmail.comDr. sc. **Smail Kechidi**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Portu, Portugal

Fakultet tehničkih znanosti

kechidi@fe.up.pt

Prethodno priopćenje

Idriss Rouaz, Nouredine Bourahla, Smail Kechidi

Utjecaj otvora na hladno oblikovane čelične posmične zidne panele

U radu se numeričkim postupkom istražuje utjecaj otvora na cjelokupno ponašanje hladno oblikovanih čeličnih posmičnih zidnih panela (CFS-SWP) s oblogom od rebrastog lima. Prvo je provedena validacija referentnog numeričkog modela u smislu posmične otpornosti i nelinearnog ponašanja CFS-SWP-a. Definiran je i provjeren način sloma CFS-SWP-a s otvorom. Zatim je provedena parametarska studija o utjecaju veličine i položaja otvora, te je utvrđeno da položaj otvora bitno utječe na učinkovitost CFS-SWP-a. Referentni se model može koristiti u fazi projektiranja za prilično točno ocjenjivanje umanjene krajnje otpornosti pojedinačnih CFS-SWP-a za bilo koju veličinu i položaj otvora.

Ključne riječi:

hladno oblikovani čelični posmični zidni panel, posmična otpornost, nelinearno ponašanje, slom spoja, utjecaj otvora

Research Paper

Idriss Rouaz, Nouredine Bourahla, Smail Kechidi

Effect of openings on cold formed steel shear wall panels

In this paper, the effect of openings on global performance of Cold Formed Steel Shear Wall Panels is investigated numerically using the ABAQUS software. A benchmark model is first validated in terms of lateral shear capacity and nonlinear behaviour of the CFS-SWP. The failure mode of the CFS-SWP with opening is identified and validated. Subsequently, a parametric study on the effect of size and position of openings is conducted, in which the opening position is found to have a significant impact on the CFS-SWP performance. The benchmark model can be used for design purposes to evaluate with good accuracy the reduced ultimate strength of individual CFS-SWPs for any size and position of openings.

Key words:

cold formed steel shear wall panel, shear strength, nonlinear behaviour, connection failure, opening effect

Vorherige Mitteilung

Idriss Rouaz, Nouredine Bourahla, Smail Kechidi

Einfluss von Öffnungen auf kaltgeformte Stahlschiebewandpaneele

Die Arbeit untersucht den Einfluss von Öffnungen auf das Gesamtverhalten von kaltgeformten Stahlschiebewandpaneelen (CFS-SWP). Zunächst wurde die Validierung hinsichtlich Scherfestigkeit und nichtlinearem Verhalten des CFS-SWP durchgeführt. Die Bruchart des CFS-SWP mit Öffnung wurde definiert und verifiziert. Anschließend wurde eine parametrische Untersuchung der Wirkung von Größe und Position der Öffnung durchgeführt, und es wurde festgestellt, dass die Position der Öffnung die Wirksamkeit von CFS-SWP wesentlich beeinflusst. Das Referenzmodell kann in der Planungsphase verwendet werden, um den verringerten Endwiderstand einzelner CFS-SWPs für jede Öffnungsgröße und -position ziemlich genau abzuschätzen.

Schlüsselwörter:

kaltgeformte Stahlschiebewandpaneel, Scherfestigkeit, nichtlineares Verhalten, Fugenversagen, Einfluss der Öffnung

1. Uvod

U novije se vrijeme bilježi sve češća upotreba posmičnih zidnih panela (eng. *Shear Wall Panels* - SWP) od hladno oblikovanog čelika (eng. *Cold Formed Steel* - CFS) jer ti paneli mogu djelotvornije od ostalih obložnih materijala izdržati velika bočna opterećenja u područjima izrazite seizmičke aktivnosti [1]. Osim toga, provode se i eksperimentalni istraživački programi [2-5] kako bi se ocijenilo opće ponašanje i učinkovitost CFS-SWP-a s ovom vrstom obloge u slučaju bočnog opterećenja.

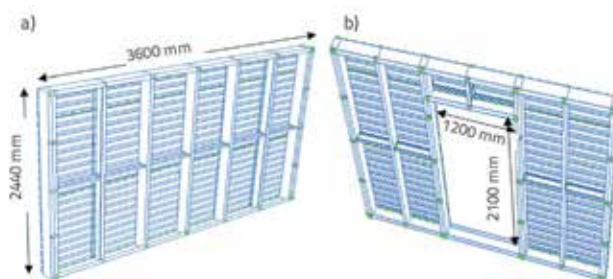
Međutim, zbog arhitektonskih razloga te radi povećanja funkcionalnosti, otvori vrata i/ili prozora trebaju se integrirati u panele SWP, što može utjecati na njihovu učinkovitost. Zbog toga se treba provoditi karakterizacija bočnog ponašanja CFS-SWP-a. Fulop i Dubina [6] proveli su eksperimentalnu analizu CFS-SWP-a kako bi dodatno istražili opće ponašanje i ocijenili utjecaj otvora na ponašanje CFS-SWP-a u slučaju seizmičkog opterećenja. Oni su utvrdili da način sloma ovisi o načinu sloma vijčanih spojeva obloge. Ta je tematika analizirana i u drugim radovima [7-11].

U normi AISI North American Standard for Cold-Formed Steel Framing - Lateral Design -2007 (AISI S213-07), navode se parametri za projektiranje čeličnih i drvenih obloga CFS-SWP-a koji bi se trebali primjenjivati u inženjerskoj praksi. Međutim, zbog razlika u arhitektonskim dimenzijama hladno oblikovanih čeličnih elemenata, navedeni tablično iskazani parametri za projektiranje ipak ne obuhvaćaju čitav raspon mogućih konfiguracija CFS-SWP-a. Zbog toga se pokazala potreba za usvajanjem numeričkog pristupa, a taj se pristup – uz primjenu modela konačnih elemenata (FE) – pokazao kao dobro rješenje za predviđanje ponašanja i ocjenjivanje posmične otpornosti panela SWP raznih geometrijskih i mehaničkih karakteristika. Do sada je razvijeno više modela konačnih elemenata i prikazani su različiti postupci modeliranja. Bahrebar i dr. [12] analizirali su posmičnu otpornost panela SWP obloženih čeličnim limovima, te su pritom istražili izvijanje tankostijenih čeličnih elemenata isto kao i načine na koje dolazi do sloma uslijed izvijanja [13, 14]. U stvari, slom spoja čest je slučaj kod CFS-SWP-a. Kechidi i dr. [15] razvili su histerezne modele u kojima se analizira otpornost i smanjenje krutosti te pojava sužavanja histerezne krivulje kod CFS-SWP panela s oblogom od čelika i drva. Rouaz i dr. [16] uspoređuju dva numerička pristupa za ocjenu posmične otpornosti na bazi posmičnog sloma na spoju. Prema radu koji su objavili Niari i dr. [17], nelinearnost materijala treba se integrirati u model konačnih elemenata kako bi se poboljšala njegova preciznost u pogledu djelovanja vijčanog spoja koji utječe na opće ponašanje CFS-SWP-a. Osim toga, Hosseinzadeh i dr. [18] predložili su uvođenje geometrijske nelinearnosti u numeričku simulaciju bočnog ponašanja CFS-SWP-a, jer se takva nelinearnost može očekivati kod hladno oblikovanih čeličnih konstrukcijskih komponenata. Vigh i dr. [19] i Kalali i dr. [20] prezentirali su na kratkom panelu bez otvora postupak modeliranja za CFS-SWP-e obložene valovitim čeličnim limovima.

Što se tiče djelovanja otvora na cjelokupno ponašanje SWP-a, Farzampour i dr. [21] istražili su ga numeričkim postupkom na posmičnim zidovima s valovitim limom i vruće valjanom elementima čeličnog okvira (nosač i stupovi). Dai [22] je analizirao djelovanje otvora na CFS-SWP s kasetnom oblogom, pri čemu su svi SWP elementi bili izrađeni od hladno oblikovanog čelika. Ipak, treba napomenuti da se postupak kasetnog oblaganja rijetko primjenjuje u inženjerskoj praksi. Isti autor [23] razvio je numerički model CFS-SWP-a za analizu utjecaja obložnih ploča i zadavanja rubnih uvjeta. Valoviti čelični lim modeliran je ravnim elementom s dva ekvivalentna modula elastičnosti u poprečnom i paralelnom smjeru u odnosu na valoviti čelični lim. Osim toga, nelinearnost materijala nije predviđena u modelu konačnih elemenata, iako je ona ključan faktor za određivanje globalnog odziva, [23]. U istom se radu koristi detaljan model konačnih elemenata, izrađen i potvrđen dostupnim eksperimentalnim podacima, kako bi se ocijenio utjecaj otvora na posmičnu otpornost CFS-SWP-a obloženog valovitim čeličnim limom za slučaj bočnog opterećenja. U analizu je uključen i nelinearni odziv te odgovarajući granični pomak. Utjecaj otvora (vrata i prozora) analiziran je u odnosu na promjenu položaja i veličine.

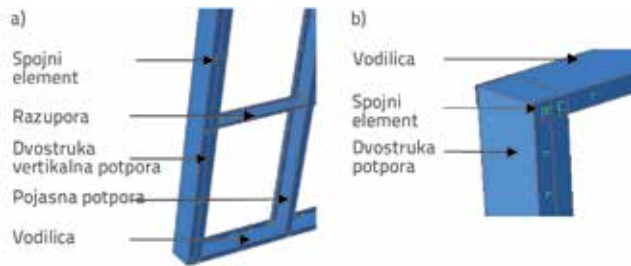
2. Odabir ispitanog CFS-SWP-a

Eksperimentalni program trebao bi biti izuzetno opsežan za dovoljno detaljno istraživanje utjecaja otvora na bočno ponašanje SWP-a. Kako bi se izbjegle poteškoće te vrste, u svrhu provedbe dodatne analize osjetljivosti razvijen je detaljan referentni model konačnih elemenata koji je potvrđen usporedbom s dostupnim eksperimentalnim podacima. U tom smislu, za validaciju numeričkog modela odabran je SWP panel obložen valovitim čeličnim limom koji su ispitali Fulop i Dubina [6] za slučajeve s otvorom i bez otvora. Kao što se može vidjeti na slici 1., odabrani uzorak bez otvora, dužine 3600 mm i visine 2440 mm, sastoji se od dvije vodilice U154/1,5 i devet vertikalnih potpora C150/1,5. Vertikalne su potpore spojene s gornjom i donjom vodilicom na obje strane pomoću dva para samobušičih i samoureznih vijaka SPEDEC SL4-F-4.8x16 ($d = 4,8$ mm). Sastavljeni poprečni presjeci od dvostrukih vertikalnih potpora (jedna uz drugu) postavljene su na krajeve SWP-a.



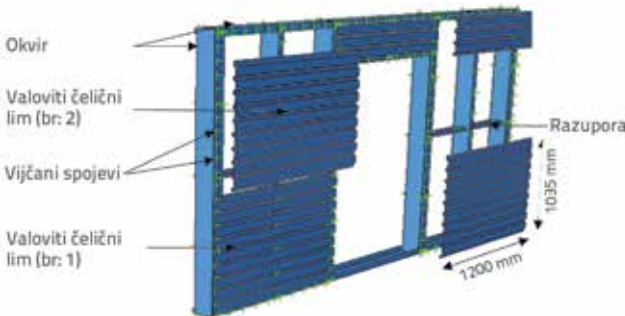
Slika 1. Odabrani ispitanici SWP s oblogom od rebrastog čelika: a) SWP bez otvora; b) SWP s otvorom

Za međupotpore (pojasne potpore) usvojeni su jednodimenzionalni elementi koji su jedan od drugog udaljeni 600 mm (slika 2.).





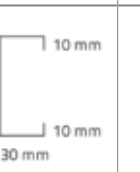
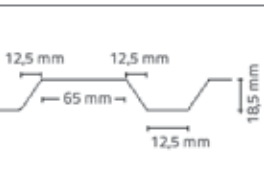
Slika 2. Detalji SWP-a: a) Elementi okvira; b) Spoj pojasne potpore i vodilice

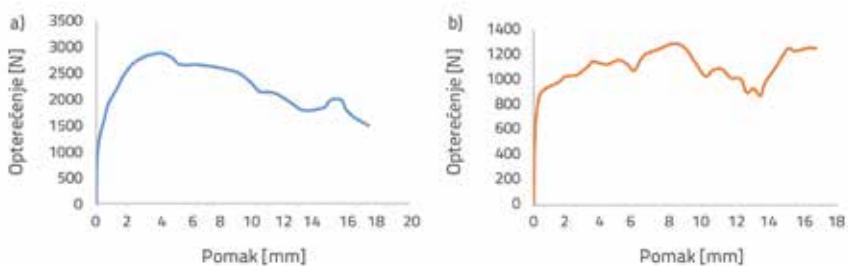
Tri valovita čelična lima širine 1035 mm (slika 3.) pričvršćena su s jedne strane okvira SWP pomoću samoureznih vijaka SD3-T15-4.8-22 na svako rebro, tj. na svako drugo rebro kod vertikalnih međupotpora. Ti su čelični limovi postavljeni u horizontalni položaj, a preklapljeni žlijeb pričvršćen je spojnim elementima SL2-T-A14-4.8 × 20 na svakih 200 mm.



Slika 3. Valoviti lim pričvršćen na elemente okvira

Tablica 1. Osnovne geometrijske karakteristike

	Vertikalna potpora	Vodilica	Razupora	Obloga
Profil s dimenzijama				
Debljina	1,5 mm			0,5 mm



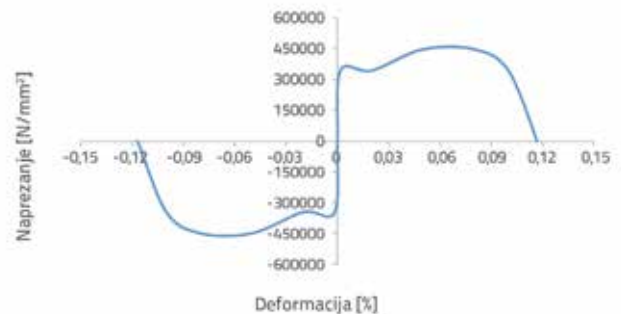
Slika 5. Krivulja opterećenja – pomaka za vijčane spojeve [6]: a) spoj obloge s okvirom; b) spoj obloge s oblogom

Osim toga, horizontalni razuporni elementi postavljeni su po sredini SWP-a kako bi se smanjila mogućnost uvijanja i izvijanja vertikalnih potpora. Šest razupora postavljeno je na SWP bez otvora, a četiri na SWP s otvorom. U tablici 1. prikazane su osnovne geometrijske karakteristike komponenta odabranih SWP panela. Dodatna pojasna potpora postavljena je na svaki kraj otvora SWP-a obloženog valovitim limom. Dimenzije otvora iznosile su 1200 x 2100 mm (širina i visina).

3. Mehaničke karakteristike

3.1. Svojstva materijala

Za karakterizaciju osnovnih svojstava materijala korištenih u ispitivanju SWP-a usvojena su mehanička svojstva čeličnih elemenata koja odgovaraju svojstvima odabranih panela i to prema normaliziranoj krivulji naprezanje-deformacija u skladu s normom ASTM A635 G50 (slika 4.) [25].



Slika 4. Krivulja naprezanje-deformacija

Granica popuštanja f_y iznosila je 344 MPa, a vlačna čvrstoća f_u 448 MPa. Za modul elastičnosti E_s usvojena je vrijednost od $2,1 \cdot 10^5$ MPa. Za valovite čelične limove korišten je čelik kvalitete 70 ($f_y = 483$ MPa i $f_u = 550$ MPa) [26].

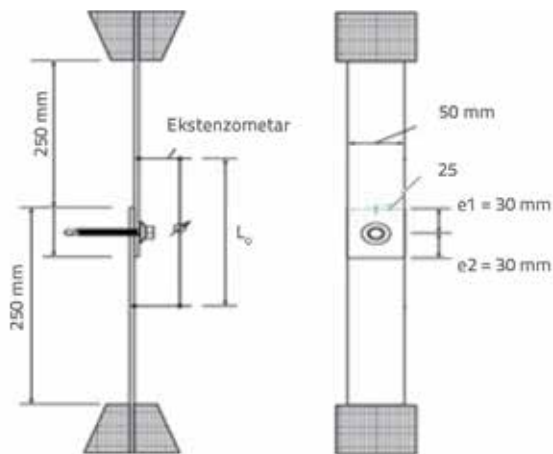
3.2. Vijčani spojevi

Dubina [24] je ispitao spojeve obloge s oblogom i spojeve obloge s okvirom kako bi u obzir uzeo nelinearno ponašanje vijčanih spojeva jer to ponašanje bitno utječe na globalni odziv i načine sloma valovitih čeličnih SWP panela. Odgovarajuće krivulje opterećenja – pomaka prikazane su na slici 5. Zbog nedostatka eksperimentalnih podataka za krivulje sile i pomaka spojeva okvira (spoj vertikalne potpore i vodilice), autor je proveo nekoliko serija eksperimenata u laboratoriju

CNERIB uz iste uvjete glede debljine elemenata, vlačnih karakteristika čeličnog okvira i promjera vijaka [24].

Ispitivanje vijaka provedeno je u skladu sa smjericama ECCS TC7 TWG 7.10 [27], a dimenzije ispitnih uzoraka (slika 6.) odabrane su prema preporukama iz točke 3.2. Minimalni broj ispitivanja definiran je u skladu s točkom 3.1.5 ECCS smjernica za ispitivanje jednostrukog spoja.

Kao što se može vidjeti na slici 7., uzorci su stavljeni u uređaj za vlačna ispitivanja kako bi se odredila posmična otpornost i nelinearno ponašanje spojnih vijaka pod utjecajem monotonog opterećenja.

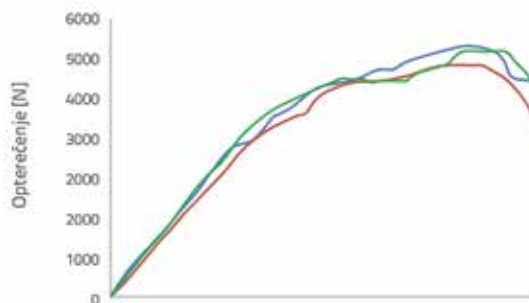


Slika 6. Dimenzije uzoraka



Slika 7. Vlačno ispitivanje uzorka

Dubina i Fulop [24] navode da su zakretanje i izvlačenje vijka dominantni oblici sloma uzoraka spojeva obloge s oblogom, tj. obloge s okvirom, dok je kod spojeva okvira s okvirom ustanovljeno da je posmik dominantan oblik sloma spojnih sredstava. Rezultati opterećenja-pomaka za tri ispitana sklopa prikazani su na slici 8.



Slika 8. Rezultati ispitivanja spoja okvira s okvirom

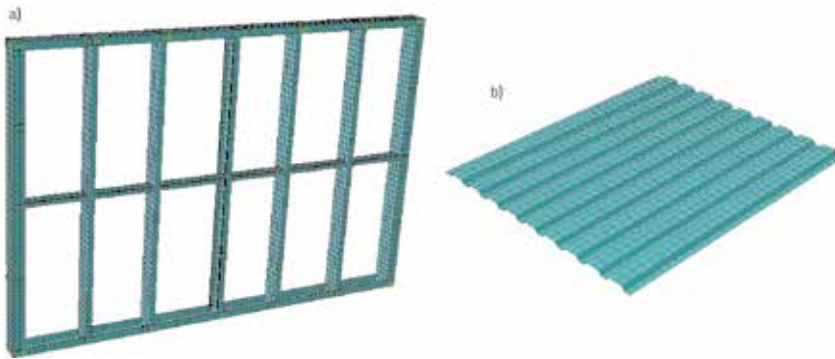
4. Modeliranje konačnih elemenata

Paneli SWP su složeni sklopovi sastavljeni od hladno oblikovanih čeličnih elemenata koji su povezani s oblogom pomoću vijčanih spojeva. Kod modeliranja ovog podsustava, posebno se treba paziti na analizu njegovog sveukupnog ponašanja i učinkovitosti, uzimajući pritom u obzir osnovne oblike sloma kao što su slom vijčanih spojeva, te granična stanja lokalnog ili globalnog izvijanja elemenata okvira. Ovdje će se detaljno opisati postupak modeliranja konačnih elemenata za odabrane panele SWP, a za te se potrebe koristi komercijalni računalni program ABAQUS [28].

4.1. Vrste elemenata i određivanje mreže konačnih elemenata

Kako kod horizontalnih monotonih opterećenja dolazi do velikih deformacija elemenata SWP, u analizi se svakako treba u obzir uzeti geometrijska nelinearnost. Stoga su svi elementi, uključujući oblogu, vodilicu, vertikalnu potporu i bočne razupore, modelirani kao ljuske S4R s reduciranom shemom integracije. Čvor svakog elementa imao je tri translacijska i tri rotacijska stupnja slobode, što se moglo ograničiti ovisno o uvjetima ispitivanja.

Na temelju sličnih prethodnih ispitivanja panela CFS-SWP koja su proveli Dai [22, 23] i Rouaz [16], te u kojima je provedena analiza osjetljivosti na veličinu elemenata mreže konačnih elemenata, utvrđena je dobra podudarnost, u smislu vremena i točnosti, s dimenzijama mreže od približno 50 mm x 50 mm za sve elemente okvira. Što se tiče valovitog lima, širi žljebovi lima koji se ne pričvršćuju vijcima podijeljeni su na dva dijela u horizontalnom smjeru, dok je u vertikalnom smjeru usvojena vrijednost od 40 mm, kao što je prikazano na slici 9.



Slika 9. Mreža konačnih elemenata modela CFS-SWP: a) okvir; b) obloga

Postupak kontakta "površine na površinu" primijenjen je za modeliranje interakcije između elemenata, tj. ostvaren je kontakt između vodilice i pojasa vertikalne potpore te kontakt između obloge i okvira. Prema analizi osjetljivosti koju je proveo Dai [23], koeficijent trenja ne utječe bitno na rezultate. Zato je za potrebe ovog rada usvojen faktor trenja od 0,3.

4.2. Mehanička svojstva elemenata

Za uvođenje nelinearnosti materijala u model konačnih elemenata provedena je konverzija inženjerskih naprezanja (σ) i inženjerskih deformacija (ε) dobivenih iz normaliziranih krivulja kako bi se dobilo takozvano pravo naprezanje (σ_{tru}) i prava deformacija (ε_{tru}) pomoću sljedećih izraza [17]:

$$\sigma_{tru} = \sigma_{nom} (1 + \varepsilon_{nom}) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{tru} = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (2)$$

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{tru} - \frac{\sigma_{tru}}{E} \quad (3)$$

4.3. Konstrukcijska svojstva vijčanih elemenata

4.3.1. Vlačna čvrstoća

Otpornost na izvlačenje vijčanog spoja okvira i obloge ocijenjena je primjenom odredbi za projektiranje iz North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members AISI S100 (točka E.4.4.1) [29]. Spomenuta otpornost može se odrediti pomoću izraza (4):

$$P_{not} = 0,85(t_c \cdot d)F_{u2} \quad (4)$$

gdje je d nominalni promjer vijka, t_c je dubina prodiranja ili debljina (manja od tih dviju vrijednosti), P_{not} je nominalna otpornost na izvlačenje po vijku, a F_{u2} je vlačna čvrstoća elementa koji nije u kontaktu s glavom vijka ili podloškom.

4.3.2. Mehanička otpornost na posmik

Nelinearna otpornost vijčanog elementa na posmik obuhvaćena je primjenom anvelope krivulje odziva sile i pomaka, kao što je prikazano na slici 10.

Kako bi se simuliralo širenje oštećenja iz točke I koja predstavlja krajnju silu, pa do točke D koja predstavlja krajnji pomak, svaka je komponenta definirana pomoću koordinata (\bar{u}_f^{pl} , F_f), gdje je F_f sila oštećenja izračunana

prema postupku prikazanom u ABAQUS-ovim uputama za korištenje [28]:

$$f_i = (1 - d_i) F_{eff} \quad (5)$$

F_{eff} je efektivna sila koja predstavlja graničnu silu dok je d_i varijabla oštećenja određena prema izrazu (6):

$$d_i = \frac{1 - e^{-\alpha \frac{\bar{u}_f^{pl} - \bar{u}_0^{pl}}{\bar{u}_f^{pl} - \bar{u}_0^{pl}}}}{1 - e^{-\alpha}} \quad (6)$$

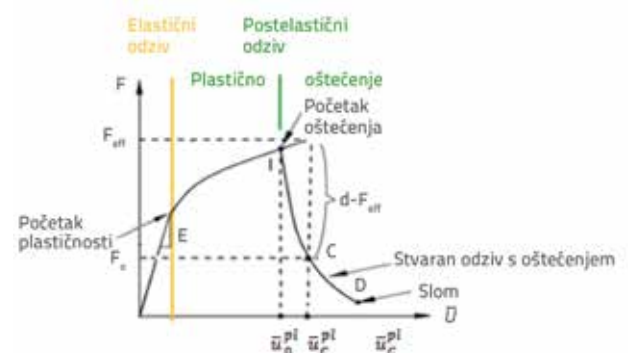
gdje je:

\bar{u}_f^{pl} - ekvivalentni plastični pomak uslijed oštećenja u komponenti i

\bar{u}_0^{pl} - ekvivalentni plastični pomak u inicijalnoj fazi oštećenja

α - eksponencijalni koeficijent baziran na baždarenju pomoću krivulje eksperimentalnih podataka

\bar{u}_f^{pl} - ekvivalentni plastični pomak pri lomu.

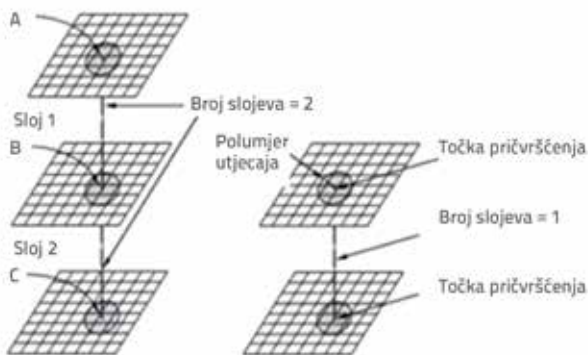


Slika 10. Modeliranje ponašanja spoja [28]

4.4. Modeliranje spoja

Za definiranje spoja između dva ili više elemenata, ABAQUS ima na raspolaganju niz elemenata kojima se definiraju spojevi kao što su točkasti zavari, zakovice, vijci, svornjaci i ostale vrste sredstava za mehaničko spajanje elemenata. Osim toga,

kao što se vidi na slici 11., elementi za učvršćivanje mogu se pozicionirati bilo gdje, neovisno o čvorovima mreže, a tada ih nazivamo "spojnim sredstvima neovisnima o mreži". Fizikalne karakteristike spoja uvode se zatim u "interakcijski" modul te se definiraju kao vijčani elementi pri čemu se u obzir uzima razmak, promjer, orijentacija i utjecaj polumjera vijaka.



Slika 11. Spojni elementi neovisni o mreži [28]

4.5. Rubni uvjet i analiza

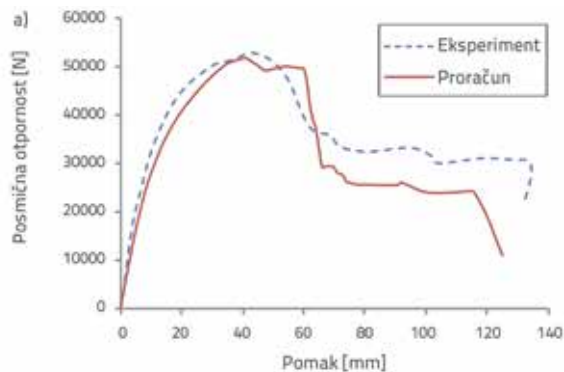
Dvije "Tie Multi Point Control" (MPC) interakcije korištene su za simuliranje eksperimentalnih rubnih uvjeta u ispitivanju SWP pomoću modela konačnih elemenata. Jedna je korištena za učvršćivanje donje vodilice za tlo u svrhu modeliranja sedam vijaka postavljenih u blizini svake vertikalne potpore, a druga je usvojena kako bi se omogućila primjena pomaka na gornjoj vodilici. Ispitni uređaj koji sprečava torzijsko pomicanje zida i translaciju izvan ravnine modeliran je ograničavanjem izvanravninske translacije.

Provedene su kvazistatičke nelinearne analize pri čemu je početni korak iznosio 0,1, a minimalni je korak ograničen na $10 \cdot e^{-8}$. Za rješavanje nelinearnih jednadžbi, u analizi je korištena puna Newton-Raphsonova iteracijska metoda.

5. Validacija numeričkih modela

5.1. Ocjena posmične otpornosti – bočnog pomaka

Usporedba između numeričkih i eksperimentalnih rezultata provedena je za odabrane SWP s otvorom i bez otvora kako bi



se validirao opisani postupak modeliranja. Nelinearna krivulja odziva posmične otpornosti – bočnog pomaka prikazana je na slici 12. za slučaj monotonog opterećenja.

Kao što se može vidjeti u tablici 2., vrijednosti krajnje posmične otpornosti (F) i odgovarajućeg bočnog pomaka (U) prilično su podudarne s odgovarajućim eksperimentalnim rezultatima, a razlika u posmičnoj otpornosti (ΔF) je relativno mala (2,40 % tj. 5,46 %) za SWP s otvorom tj. bez otvora.

Međutim, kod SWP-a s otvorom, razlika u početnoj krutosti i krajnjem pomaku ipak je izraženija. Tome su uglavnom razlog pojednostavljene pretpostavke kojima se u obzir ne uzimaju neka svojstva kao što su stvarna mehanička svojstva sedam vijaka instaliranih na donjoj vodilici uzorka pomoću kojih je panel povezan s tlom.

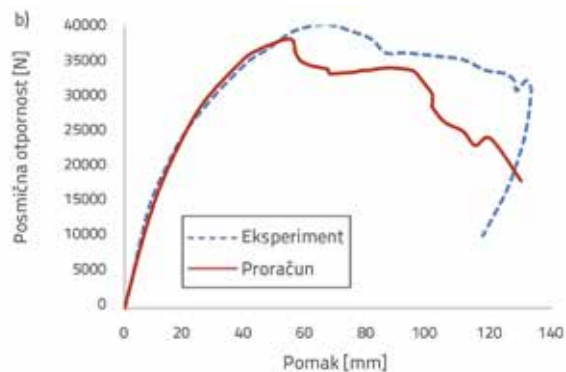
Tablica 2. Usporedba između numeričkih i eksperimentalnih rezultata

	F [N]	U [mm]	K_0 [N/mm]	ΔF [%]	Δu [%]	ΔK_0 [%]
Bez otvorom						
Eksperiment	52876,4	43,80	4500,50	/	/	/
Proračun	51610	40,03	3970,32	2,40	8,68	11,79
S otvorom						
Eksperiment	40220,2	62,69	1643,20	/	/	/
Proračun	38090	55	1423,60	5,46	12,27	13,36

Uvođenjem otvora za vrata u SWP, posmična otpornost definirana eksperimentalno tj. numeričkim modelima smanjena je otprilike za 24 tj. 26 %, a bočni je pomak povećan za 43 %. Pogreška u predviđanju krajnje posmične otpornosti iznosi 2,5 % dok odgovarajući bočni pomak iznosi 5,43 %. Zbog toga će se ovaj model koristiti u istraživanju utjecaja otvora na posmičnu čvrstoću SWP-a.

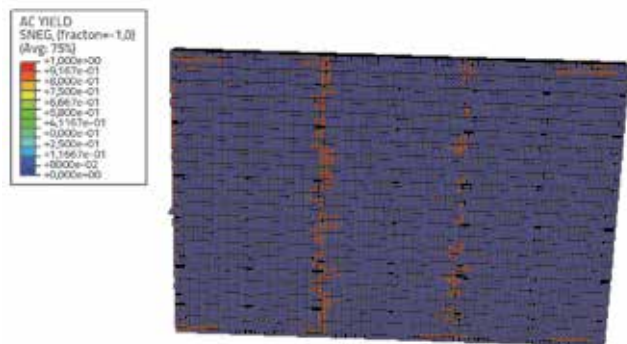
5.2. Ocjenjivanje načina sloma

Na slici 13. prikazano je mjesto sloma rebrastog čeličnog lima, što potvrđuje da je vlačno naprezanje u limu apsorbirano spojem između obloge i okvira. Do sloma (označeno crvenim) je došlo u kutu SWP-a i u pojasnim potporama s malim razmakom između vijaka. Pojava sloma na tim mjestima znači da je vlačno



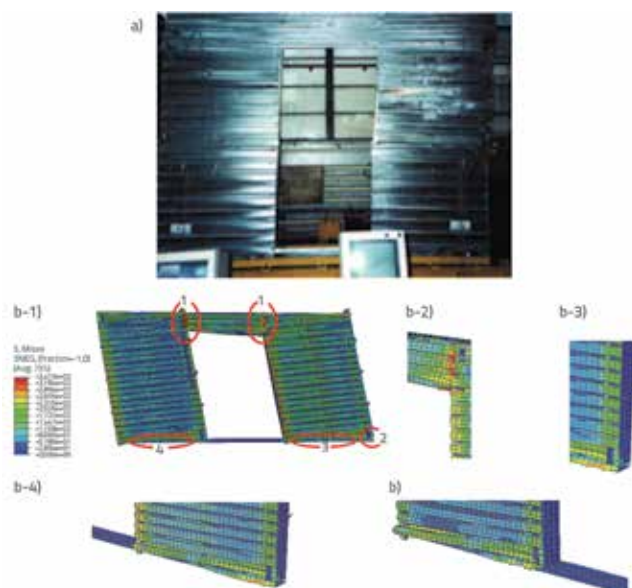
Slika 12. Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata ispitivanja: a) bez otvora; b) s otvorom

naprezanje apsorbirano u tim spojevima. S druge strane, vijčani spojevi između okvira i okvira nisu bili nimalo oštećeni u čitavom rasponu opterećenja. Treba napomenuti da je ovakav trend uočen u većini prijašnjih eksperimentalnih ispitivanja o ponašanju CFS-SWP-a.



Slika 13. Mjesto sloma spojeva u SWP-u bez otvora

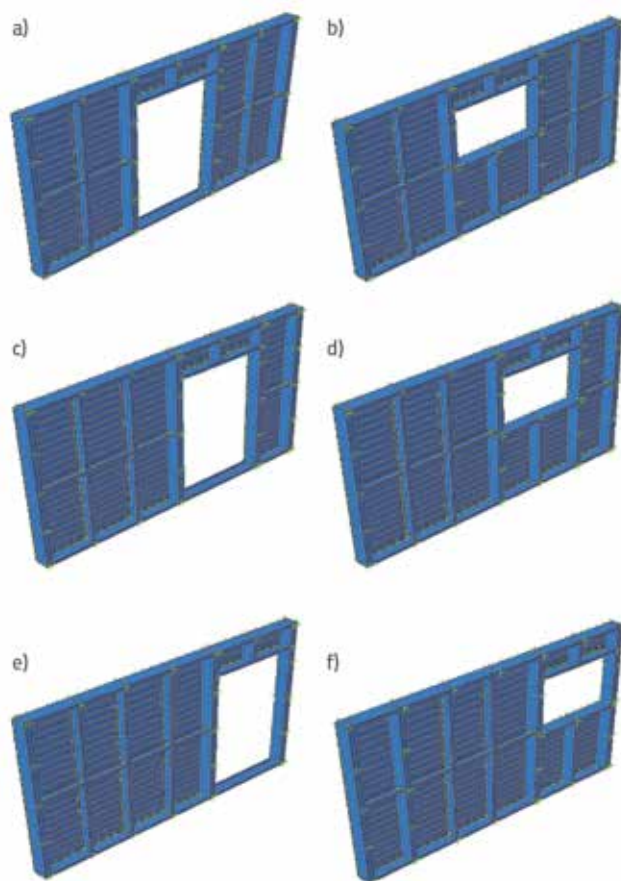
Karakteristike načina sloma SWP-a s otvorom dobivene numeričkom simulacijom prikazane su na slici 14-b. Vidljivo je da do značajnog lokalnog izvijanja valovite obloge dolazi u području nadvoja. Osim toga, koncentracija napona uočena je oko otvora (1), a može se uočiti i uzdizanje u kutovima SWP-a (2). Isto tako, slom vijčanih spojeva (3 i 4) zabilježen je na dva donja spoja. Sličan oblik sloma uočen je i na probnom uzorku.



Slika 14. Oblici sloma SWP-a s otvorom: a) Eksperimentalni rezultati; b) Rezultati dobiveni proračunom, (b-1) čitav SWP, (b-2) koncentracija naprezanja oko otvora (1), (b-3) uzdizanje u kutovima SWP (2), (b-4) do sloma vijčanih spojeva došlo je u dnu SWP-a (3,4)

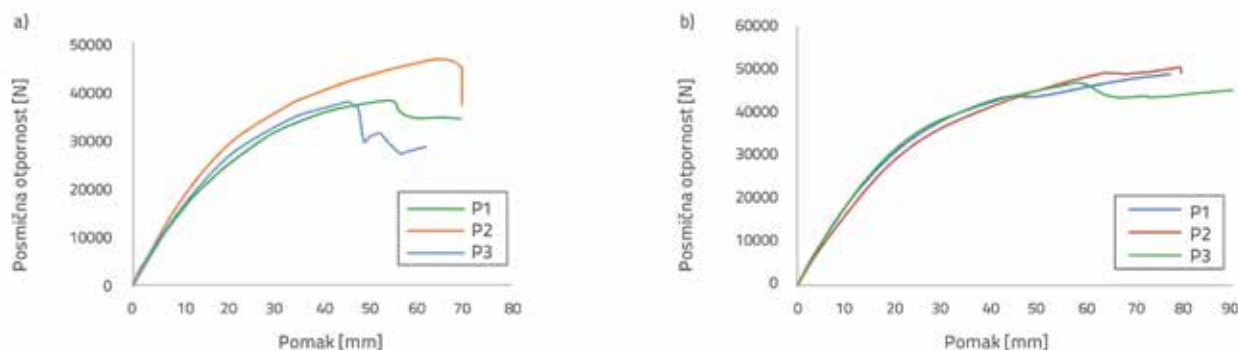
6. Parametarsko ispitivanje

Parametarsko ispitivanje provedeno je primjenom prije opisanog postupka modeliranja kako bi se ocijenio utjecaj otvora i njegove površine na posmičnu otpornost SWP-a. Prema arhitektonskoj praksi, dimenzije otvora za vrata iznose 1200 mm x 2100 mm, a dimenzije otvora za prozore iznose 1200 mm x 800 mm. Tipični položaji tih otvora opisani su na slici 15., pri čemu su dimenzije zidova (dužina je 3600 mm a visina 2440 mm) i svojstva poprečnog presjeka elemenata okvira isti kao i u slučajevima koji su opisani u točki 2.



Slika 15. Položaji otvora: a) Otvor za vrata (položaj 1); b) Otvor za prozor (položaj 1); c) Otvor za vrata (položaj 2); d) Otvor za prozor (položaj 2); e) Otvor za vrata (položaj 3); f) Otvor za prozor (položaj 3)

Krivulje posmične otpornosti – bočnog pomaka za dvije površine u tri razna položaja prikazane su na slici 16.



Slika 16. Odziv SWP-a za razne površine i položaje: a) Otvor za vrata; b) Otvor za prozor

6.1. Utjecaj položaja otvora

Prikazat će se usporedba posmične otpornosti i odgovarajućeg bočnog pomaka za tri položaja otvora vrata i prozora pod monotonim opterećenjem. Referentni otvor je središnji otvor u SWP-u (položaj 1 na slici 15.).

6.1.1. Otvor za vrata

Rezultati prikazani u tablici 3. pokazuju da SWP s otvorom u položaju 2 ima veću krajnju posmičnu otpornost i veći bočni pomak. Ustvari, dva reda vijčanih spojeva nalaze se u središnjoj vertikalnoj potpori i spajaju krajeve valovitog lima s okvirom SWP. U tom se položaju (položaj br. 2) nalazi red više vijčanih spojeva u odnosu na ostale položaje (npr. položaj 1). Ta konfiguracija s dodatnim vijčanim spojevima u usporedbi s položajem br. 3 (zato što nema vijčanih spojeva u pojasnoj potpori u blizini otpora) ostvaruje veću posmičnu otpornost SWP-a.

Osim toga, što se tiče spomenutog broja redova vijčanih spojeva, SWP s otvorom u položaju 3 ima jedan red vijčanih spojeva manje od referentnog slučaja (položaj br. 1), što dovodi do nešto niže krajnje posmične otpornosti i većeg bočnog pomaka zbog smanjenog broja vijčanih spojeva. Uz to, zabilježena je i znatna distorzija na kraju pojasne potpore (slika 17.a) zbog uskog nadvoja obloge iznad vrata.

Tablica 3. Usporedba različitih položaja otvora za vrata

Broj položaja	Utjecaj na posmičnu otpornost [N]	Pomak [mm]	Utjecaj na posmičnu otpornost [%]	Utjecaj na pomak [%]
1	38090	55	-	-
2	45650	66	22,23	20,00
3	36577	45	-2,72	-17,55

6.1.2. Otvor za prozor

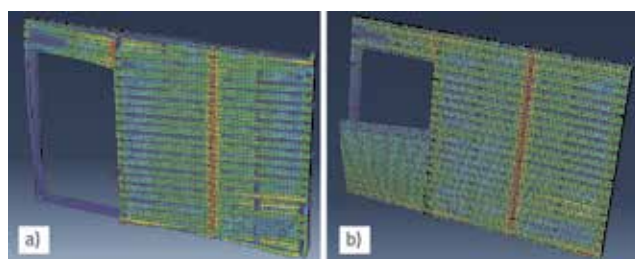
Istraživani su i različiti položaji otvora za prozor i to na isti način kao i položaji otvora za vrata. Tablica 4 pokazuje povećanje krajnje posmične otpornosti i bočnog pomaka kod položaja 2 i 3 u odnosu na referentni slučaj. Osim toga, najbolja učinkovitost

ovog položaja prozora zabilježena je kada se otvor nalazi između sredine i kraja SWP-a (tj. kada je u položaju br. 2), što više utječe na krajnji bočni pomak nego na posmičnu otpornost.

Tablica 4. Usporedba različitih položaja otvora za prozor

Broj položaja	Posmična otpornost [N]	Pomak [mm]	Utjecaj na posmičnu otpornost [%]	Utjecaj na pomak [%]
1	43765	45	-	-
2	49058	64	12.09	42.22
3	46302	57	5.80	28.57

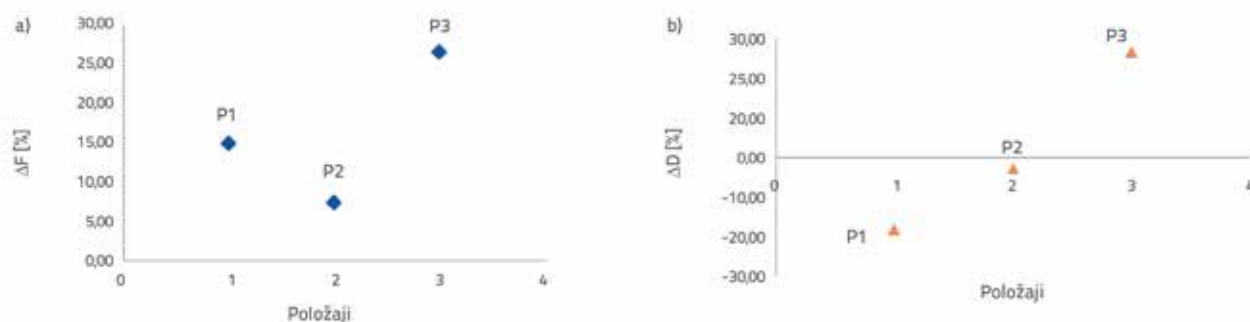
Bez obzira na malu razliku u broju vijčanih spojeva između položaja 1 i položaja 3 (veći je u slučaju položaja 1), posmična otpornost i bočni pomak veći su kod položaja 1 nego što je to slučaj kod položaja 3. To se objašnjava činjenicom da se, za razliku od položaja 3, kod otvora u položaju 1 ne održava kontinuitet dijagonalnog polja naprezanja. Osim toga, može se uočiti da vijčani spojevi koji se nalaze u položaju 3 (slika 17.b) dominantno popuštaju pod utjecajem distorzije lijeve pojasne potpore SWP-a.



Slika 17. Načini sloma SWP-a s otvorom na krajnjem dijelu (položaj 3): a) Otvor za vrata; b) Otvor za prozor

6.2. Utjecaj površine otvora u različitim položajima

Utvrđeno je da se u tri analizirana položaja ne postiže isti učinak kada se površina otvora smanji s vrata na prozor za 2,6 puta. Što se tiče krajnje posmične otpornosti, na slici 18 možemo uočiti da se u ostalim položajima mogu očekivati bolji učinci, a to se naročito odnosi na položaj 3 gdje je zabilježen porast krajnje posmične otpornosti za 26,59 %. Tome je uglavnom razlog



Slika 18. Utjecaj površine otvora u tri položaja: a) posmična otpornost; b) krajnji pomak

doprinos dodatne obloge u donjem uglu SWP-a čime se s otvora eliminira dijagonalno naprezanje.

Iako se u prvom položaju ostvaruje veći kapacitet glede posmične otpornosti u odnosu na drugi položaj (položaj br. 2), u prvom je položaju zabilježen značajan pad krajnjeg pomaka, što nije prikladno u smislu projektiranja. Osim toga, u trećem je položaju zabilježen velik krajnji pomak od 26,26 %.

7. Zaključak

U ovom je radu prikazan razvoj i validacija postupka modeliranja metodom konačnih elemenata za panele CFS-SWP s otvorom i bez otvora, a na osnovi eksperimentalnih rezultata i parametarskog ispitivanja utjecaja otvora na bočno ponašanje CFS-SWP-a. Ustanovljeno je sljedeće:

- S obzirom na nelinearnosti u vezi s materijalom, geometrijom i spojevima, može se reći da je postignuta dobra podudarnost između numeričkih i eksperimentalnih rezultata i to u pogledu nelinearnog ponašanja, početne krutosti, krajnje posmične otpornosti i odgovarajućeg pomaka.
- Razlike između numeričkih i eksperimentalnih rezultata zabilježene na uzorcima s otvorom i bez otvora, a u pogledu krajnje posmične otpornosti i pomaka, iznose 2,40 % tj. 5,46 %. Dakle, postupak numeričkog modeliranja razvijen za SWP s otvorom može se smatrati pouzdanim za potrebe parametarskog istraživanja.

U ovom je radu utvrđeno da se posebno treba usmjeriti prema utjecaju smanjenja površine otvora i položaja otvora na posmičnu otpornost. Stoga vrijedi sljedeće:

- Otvori za vrata i prozori smješteni u središnjem položaju utječu na smanjenje posmične otpornosti SWP-a za do 26 % tj. 15 %, o čemu inženjeri zaposleni u praksi trebaju svakako voditi računa.
- Pozicioniranjem otvora (bilo za vrata ili prozor) između središnjeg dijela i ruba SWP-a postiže se bolja učinkovitost u usporedbi s ostalim položajima.
- Otvor za vrata smješten u središnjem položaju manje utječe na smanjenje posmične otpornosti SWP-a u odnosu na položaj na rubu SWP-a (položaj br. 3). Međutim, u slučaju otvora za prozor, položaj otvora na rubu SWP-a (položaj br. 3) manje utječe na smanjenje posmične otpornosti u odnosu na položaj u središnjem dijelu.
- Što se tiče monotonog opterećenja, utvrđeno je da otvor za vrata na rubu SWP-a inducira dodatni oblik sloma u blizini pojasnih potpora, te više smanjuje krajnji pomak nego posmičnu otpornost.

Ovaj rad upućuje na važnost numeričke analize u ocjenjivanju utjecaja otvora na posmičnu otpornost SWP-a te se stoga smatra moćnim sredstvom koje projektantima može znatno pomoći u preciznom ocjenjivanju smanjenja otpornosti pojedinih panela CFS-SWP za bilo koju veličinu ili položaj otvora.

LITERATURA

- [1] Khaliq, W., Moghis, A.: Shear Capacity of Cold-Formed Light-Gauge Steel Framed Shear-Wall Panels with Fiber Cement Board Sheathing, *International Journal of Steel Structures*, 17 (2017) 4, pp 1404-1414.
- [2] Emami, F., Mofid, M., Vafai, A.: Experimental study on cyclic behaviour of trapezoidally corrugated steel shear walls, *Engineering Structures*, 48 (2013), pp. 750-762, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.11.028>.
- [3] Yu, C., Yu, G.: Experimental Investigation of Cold-Formed Steel Framed Shear Wall Using Corrugated Steel Sheathing with Circular Holes, *J. Struct. Eng.*, 142 (2016) 12, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001609](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001609).
- [4] Yu, C.: Steel Sheet Sheathing Options for Cold-Formed Steel Framed Shear Wall Assemblies Providing Shear Resistance, Report No. UNT-G70752, American Iron and Steel Institute, Washington, DC., 2009.
- [5] Zhang, W., Mahdavian, M., Li, Y., Yu, C.: Experiments and Simulations of Cold-Formed Steel Wall Assemblies Using Corrugated Steel Sheathing Subjected to Shear and Gravity Loads, *J. Struct. Eng.*, 4 (2016) 6, pp. 1-13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001681](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001681).
- [6] Fulop, L.A., Dubina, D.: Performance of wall-stud cold-formed shear panels under monotonic and cyclic loading, *Thin-Walled Structures*, 26 (2004), pp. 321-338. [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(03\)00063-6](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(03)00063-6).

- [7] Fiorino, L., Corte, D.G., Landolfo, R.: Experimental tests on typical screw connections for cold-formed steel housing, *Engineering Structures*, 29 (2007), pp. 1761–1773. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.09.006>.
- [8] DaBreo, J., Balh, N., Ong-Tone, C., Rogers, C.A.: Steel sheathed cold-formed steel framed shear walls subjected to lateral and gravity loading, *Thin-Walled Structures*, 74 (2014), pp. 232–2245, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.10.006>.
- [9] Peterman, K.D., Nakata, N., Schafer, B.W.: Hysteretic characterization of cold-formed steel stud-to-sheathing connections", *Journal of Constructional Steel Research*, 101 (2014) 5, pp. 254–264, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.05.019>.
- [10] Ding, C.: Monotonic and Cyclic Simulation of Screw-Fastened Connections for Cold-Formed Steel Framing, Master of Science in Civil Engineering. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute, Virginia, 2015.
- [11] Mohebbi, S., Mirghaderi R., Sabbagh, A.B., Farahbod, F.: Experimental work on single and double sided steel sheathed cold-formed steel shear walls for seismic actions", *Thin-Walled Structures*, 91 (2015), pp. 50–62, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.02.007>.
- [12] Bahrebar, M., Zaman, M., Kabir, M.H., Zirakian, T., James, B.P.: Structural Performance of Steel Plate Shear Walls with Trapezoidal Corrugations and Centrally-Placed Square Perforations", *International Journal of Steel Structures*, 16 (2016) 3, pp. 845–855, <https://doi.org/10.1007/s13296-015-0116-y>.
- [13] Ghannam, M.: Axial Load Capacity of Cold-formed Steel Built-up Stub Columns", *International Journal of Steel Structures*, 17(2017) 4, pp. 1273–1283.
- [14] Konkong, N., Aramraks, T., Phuvoravan, K.: Buckling Length Analysis for Compression Chord in Cold-Formed Steel Cantilever Truss, *International Journal of Steel Structures*, 17 (2017) 2, pp. 775–787.
- [15] Kechidi, S., Bourahla, N.: Deteriorating hysteresis model for cold-formed steel shear wall panel based on its physical and mechanical characteristics, *Thin-Walled Structures*, 98 (2016), pp. 421–430, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.09.022>.
- [16] Rouaz, I., Bourahla, N.: Numerical evaluation of shear strength for Cold-Formed Steel Shear Wall Panel, *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 10 (2016) 3, pp. 347–351, cholar.waset.org/1999.3/10004074.
- [17] Niari, S.E., Rafezy, B., Abedi, K.: Seismic behaviour of steel-sheathed cold-formed steel shear wall: Experimental investigation and numerical modelling, *Thin-Walled Structures*, 96 (2015), pp. 337–347, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.08.024>.
- [18] Hosseinzadeh, S.A.A., Tehranzadeh, M.: Introduction of stiffened large rectangular openings in steel plate shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, 77 (2012), pp. 180–192, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.05.010>.
- [19] Vigh, L.G., Abbie, B.: Component model calibration for cyclic behaviour of a corrugated shear wall", *Thin-Walled Structures*, 75 (2014), pp. 53–62, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.10.011>.
- [20] Kalali, H., Ghazijahani, T.G., Hajsadeghi, M., Zirakian, T., Alaei, J.F.: Numerical Study on Steel Shear Walls with Sinusoidal Corrugated Plates, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13 (2016), pp. 2502–2514, <https://doi.org/10.1590/1679-78252837>.
- [21] Farzampour, A., Jeffrey, A.: Behaviour prediction of corrugated steel plate shear walls with openings, *Journal of Constructional Steel Research*, 114 (2015), pp. 258–268, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.07.018>.
- [22] Dai, X.: Structural Behaviour of Cold-formed Steel Cassette Wall Panels Subject to In-plane Shear Load, *Journal of Civil Engineering Research*, 3 (2013) 2, pp. 65–74. <https://doi.org/10.5923/j.jce.20130302.01>.
- [23] Dai, X.: Numerical Modelling and Analysis of Structural Behaviour of Wall-stud Cold-formed Steel Shear Wall Panels under In-plane Monotonic Loads, *Journal of Civil Engineering Research*, 2 (2012) 5, pp. 31–41, <https://doi.org/10.5923/j.jce.20120205.02>.
- [24] Dubina, D.: Behaviour and performance of cold-formed steel-framed houses under seismic action, *Journal of Constructional Steel Research*, 64 (2008), pp. 896–913. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.01.029>.
- [25] CSI, SAP2000. Computers and Structures, 2014.
- [26] Fulop, L.A.: Contributions to the optimization of structural systems for one family houses with steel structures, Ph.D. Dissertation, Politehnica University of Timisoara, 2003.
- [27] ECCS TC7 TWG 7.10. The testing of connections with mechanical fasteners in steel sheeting and sections, ECCS-European Convention for Constructional Steel-work. Portugal. 2009.
- [28] Dassault Systems, Prescribed Conditions, Constraints, Interactions, Abaqus analysis user's manual, volume 5, USA. 2010.
- [29] AISI, S100-2007, North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Members, American Iron and Steel Institute, Canada. 2007.