

doi: 10.67563/ASESCONF2026103K

Nemanja Krtinić¹, Matija Gams², Marko Marinković³

REGRESSION-BASED PREDICTIVE MODELS FOR SIZING TIE-COLUMNS IN CONFINED MASONRY WALLS

Summary: Current European standards prescribe minimum requirements for tie-columns in confined masonry, while their internal force demands are generally not explicitly evaluated. This study presents a numerical–data-driven methodology aimed at supporting rational sizing of tie-columns according to realistic force demands. A validated 3D simplified micro-model was used to construct a database of 126 numerical analyses, including variations in wall geometry, tie-column dimensions and reinforcement, axial stress level, toothing pattern, and masonry compressive strength. The results were processed using a machine-learning-based regression technique. Predictive models were developed for maximum capacity of CM walls and shear force demand in tie-columns, providing a basis for a demand-driven approach to sizing and bridging the gap between advanced numerical simulations and practical engineering application.

Keywords: confined masonry, tie-columns, predictive models, maximum capacity, shear force demand

REGRESIONI PREDIKTIVNI MODELI ZA DIMENZIONISANJE VERTIKALNIH SERKLAŽA U ZIDOVIMA UOKVIRENIM SERKLAŽIMA

Rezime: Trenutno važeći Evropski standardi propisuju minimalne kriterijume za serklaže u zidovima uokvirenim serklažima, dok se zahtevi u pogledu unutrašnjih sila u njima uglavnom eksplicitno ne određuju. U ovom radu predstavljena je metodologija bazirana na podacima iz numeričkih analiza usmerena ka racionalnom dimenzionisanju serklaža prema realnim vrednostima sila. Validirani pojednostavljeni 3D mikro-model korišćen je za formiranje baze od 126 numeričkih analiza, sa varijacijama geometrije zida, dimenzija i nivoa armiranja serklaža, nivoa aksijalnog opterećenja, načina ostvarivanja veze na zub i čvrstoće zida pri pritisku. Rezultati su obrađeni primenom regresione tehnike zasnovane na mašinskom učenju. Razvijeni su prediktivni modeli za maksimalnu nosivost zidova i smičuću silu u serklažima, čime se postavlja osnova za pristup dimenzionisanju zasnovan na zahtevima i povezivanje naprednih numeričkih simulacija sa praktičnom inženjerskom primenom.

Ključne reči: zidovi uokvireni serklažima, vertikalni serklaži, prediktivni modeli, maksimalna nosivost, smičuća sila

¹ Faculty of Civil and Geodetic Engineering, University of Ljubljana, Slovenia, nkrtinic@fgg.uni-lj.si

² Faculty of Civil and Geodetic Engineering, University of Ljubljana, Slovenia

³ Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Serbia

1. UVOD

Tehnologija gradnje zidanih konstrukcija sa zidovima uokvirenim armiranobetonskim (AB) serklažima široko se primenjuje kod zgrada niže i srednje spratnosti u seizmički aktivnim područjima širom sveta. Njihova rasprostranjena primena rezultat je relativno jednostavnog načina izvođenja, kao i povoljnog seizmičkog ponašanja uočenog tokom prethodnih snažnih zemljotresa u poređenju sa nearmiranim zidanim konstrukcijama [1, 2]. Ovaj konstruktivni sistem sastoji se od nosećih zidanih zidova uokvirenih vertikalnim i horizontalnim AB serklažima, koji zajedno formiraju efikasan mehanizam za prihvatanje horizontalnog opterećenja. Prisustvo AB serklaža značajno doprinosi povećanju nosivosti, krutosti i deformacionog kapaciteta zidova, zbog čega zidarija sa AB serklažima predstavlja pouzdano i ekonomično rešenje za izgradnju objekata u područjima sa izraženom seizmičkom opasnošću.

Poslednjih godina proces gradnje zidanih konstrukcija usmeren je i ka primeni savremenih materijala i tehnologija kojima se, pored odgovarajućih mehaničkih karakteristika, nastoje zadovoljiti sve strožiji zahtevi u pogledu energetske efikasnosti i zahtevi koji se tiču brzine izvođenja građevinskih radova. Jedno od takvih rešenja predstavlja primena vertikalno perforiranih glinenih blokova sa integrisanom termoizolacijom, koji se povezuju poliuretanskim (PU) lepkom umesto tradicionalnim malterom. Ovakva tehnologija sve se više primenjuje u jugoistočnoj Evropi (kao i u regionu Zapadnog Balkana), a njena upotreba omogućava izvođenje horizontalnih spojnica praktično zanemarljive debljine i smanjenje toplotnih gubitaka kroz iste. Prethodna eksperimentalna istraživanja zidova sa AB serklažima u prirodnoj veličini, kao i trospratne zidane konstrukcije izgrađene primenom ove tehnologije [3, 4], pokazala su zadovoljavajuće globalne performanse, dok su istovremeno uočeni i specifični lokalni mehanizmi oštećenja dela zida koji nije bio u ravni sa AB serklažim, usled različite debljine zida i AB serklaža.

Uprkos značajnoj ulozi AB serklaža u seizmičkom odgovoru ovakvih konstrukcija, njihovo dimenzionisanje u savremenoj inženjerskoj praksi i dalje se uglavnom zasniva na jednostavnim zahtevima koji su propisani standardima. Trenutno važeće odredbe evropskih standarda, uključujući Evrokod 6 [5] i Evrokod 8 [6], prvenstveno definišu minimalne dimenzije i zahteve u pogledu armiranja serklaža, dok se unutrašnje sile u njima uglavnom eksplicitno ne određuju. Sa druge strane, rezultati prethodnih numeričkih istraživanja pokazuju da AB vertikalni serklaži aktivno učestvuju u mehanizmu prihvatanja horizontalnog opterećenja i da veličine unutrašnjih sila koje se u njima javljaju mogu značajno zavisiti od karakteristika zida i samih serklaža [7–10]. Među najznačajnijim parametrima izdvajaju se geometrija zida, odnosno odnos njegove visine i dužine, nivo aksijalnog opterećenja na bruto poprečni presek zida, mehaničke karakteristike zidarije, kao i dimenzije i količina armature u AB vertikalnim serklažima. Zbog toga primena isključivo minimalnih geometrijskih i konstruktivnih zahteva ne mora nužno da obezbedi racionalno dimenzionisanje serklaža za različite geometrije zidova i nivoe opterećenja.

U ovom radu predstavljena je metodologija bazirana na podacima numeričkih analiza sa ciljem razvoja regresionih prediktivnih modela za seizmički odgovor zidova uokvirenih AB serklažima. Kao osnova ovog istraživanja korišćen je prethodno razvijen i eksperimentalno validiran pojednostavljeni 3D mikro-model zasnovan na metodi konačnih elemenata u programu Abaqus [11]. Validacija ovog pristupa pokazala je da numerički model može sa zadovoljavajućom tačnošću da reprodukuje globalni odgovor eksperimentalno ispitanih zidova (studija Gams i sar. [3]), uključujući njihovu maksimalnu nosivost, kao i karakteristične lokalne mehanizme oštećenja. Na osnovu ovog modela sprovedena je obimna parametarska studija i formirana baza od ukupno 126 numeričkih analiza, pri čemu su varirani geometrija zida, nivo aksijalnog opterećenja na zid, čvrstoća zida pri pritisku, kao i dimenzije i procenti armiranja AB serklaža. Dobijeni rezultati obrađeni su primenom regresione tehnike zasnovane na mašinskom učenju u programu MATLAB [12]. Razvijeni prediktivni modeli omogućavaju procenu maksimalne nosivosti zidova i smičuće sile u AB serklažima bez potrebe za sprovođenjem

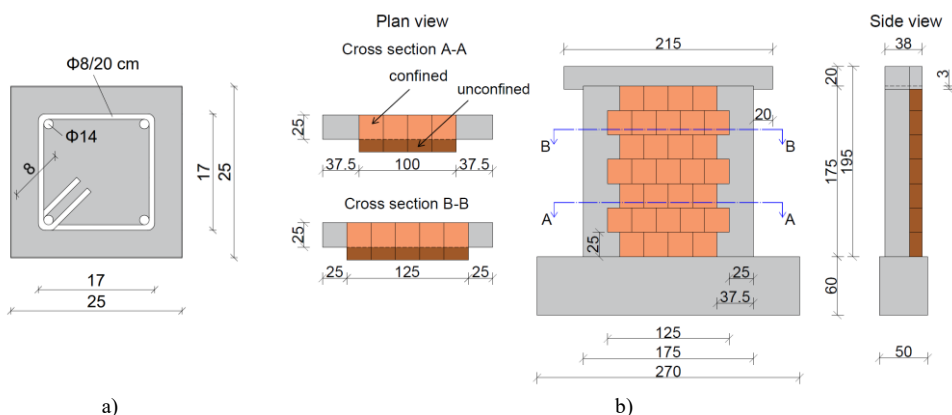
računarski zahtevnih 3D numeričkih analiza za svaki pojedinačni slučaj. Na taj način postavlja se osnova za pristup dimenzionisanju serklaža prema realnim vrednosima unutrašnjih sila, sa krajnjim ciljem njihovog racionalnijeg dimenzionisanja u savremenim zidanim konstrukcijama.

2. KRATAK PREGLED REFERENTNE EKSPERIMENTALNE STUDIJE

U ovom poglavlju predstavljen je kratak pregled eksperimentalnih ispitivanja nedavno testiranih zidova sa AB serklažima, koja su obuhvatila dva identična zida u prirodnoj veličini, izgrađena od savremenih komercijalno dostupnih glinenih blokova sa ugrađenom termoizolacijom i nominalnim dimenzijama $250 \times 249 \times 380$ mm (dužina $\times$ visina $\times$ debljina). Za gradnju zidova korišćen je PU lepak umesto tradicionalnog tankoslojnog maltera. Mehaničke karakteristike svih upotrebljenih materijala određene su eksperimentalnim ispitivanjima i detaljno su prikazane u radu Gamsa i sar. [3].

Ispitivani zidovi, označeni kao W7 i W8, imali su identične dimenzije: dužinu 175 cm, visinu 195 cm i debljinu 38 cm. Zidovi su bili uokvireni AB vertikalnim serklažima kvadratnog poprečnog preseka dimenzija 25×25 cm (Slika 1a). Vertikalni serklaži armirani su sa četiri podužne šipke $\varnothing 14$ mm, što odgovara procentu podužnog armiranja od približno 1%, u skladu sa odredbama Evrokoda 8 [6]. Poprečnu armaturu činile su uzengije $\varnothing 8$ mm na međusobnom razmaku od približno 20 cm. Na vrhu zida izveden je horizontalni serklaž zajedno sa vertikalnim serklažima, čime je obezbeđena celovitost sistema. Geometrija ispitivanih zidova prikazana je na Slici 1b.

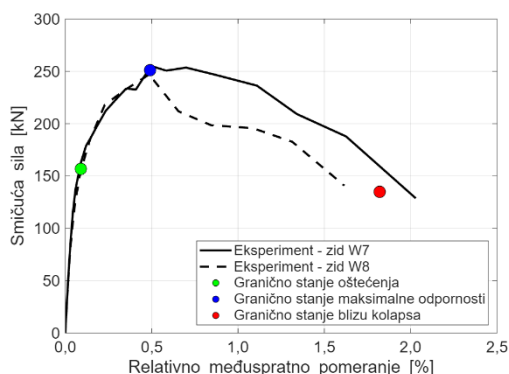
Specifičnost razmatranog sistema ogleda se u tome što AB vertikalni serklaži nisu izvedeni po celoj debljini zida. Sa jedne strane bili su u ravni sa površinom zida, dok su sa suprotne strane bili uvučeni za 13 cm u odnosu na površinu zida, pri čemu je preostali prostor ispunjen termoizolacionim materijalom. Ovakva geometrija direktno je uticala na interakciju između AB vertikalnih serklaža i dela zida koji nije njima uokviren po celoj debljini (Slika 1b).



Slika 1: a) Geometrija AB vertikalnog serklaža; b) Geometrija zidova (sve dimenzije su u cm).

Ispitivanje zidova sprovedeno je cikličnim testom smicanja pri konstantnom vertikalnom pritisku koji je odgovarao vrednosti od 20% karakteristične čvrstoće zida na pritisak, odnosno 0,63 MPa. Tokom ispitivanja sprečene su rotacije gornje i donje ivice zida, odnosno primenjeni su granični uslovi obostranog ukleštenja. Horizontalno opterećenje nanošeno je kontrolisanim cikličnim pomeranjem u nivou gornjeg horizontalnog AB serklaža, sa tri ponavljanja za svaku amplitudu pomeranja i postepenim povećavanjem relativnog međuspratnog pomeranja sve do loma zida. Polja pomeranja i deformacija na površini zida praćena su primenom optičkog sistema (eng. *Digital Image Correlation system*). Detaljniji prikaz razvoja oštećenja tokom eksperimentalnih ispitivanja za zidove W7 i W8 dat je u [9, 11].

Na Slici 2 prikazane su prosečne eksperimentalne ovojnice odgovora zidova W7 i W8 za pozitivan i negativan smer opterećenja. Na osnovu dobijenih histereznih krivih, njihovih ovojnica i razvoja oštećenja tokom ispitivanja, definisana su tri karakteristična granična stanja: granično stanje oštećenja, granično stanje maksimalne otpornosti i granično stanje blizu kolapsa, koje predstavlja poslednje eksperimentalno zabeleženo stanje pre kolapsa zida. Navedena granična stanja označena su na Slici 2 krugovima različitih boja (zelena – granično stanje oštećenja, plava – granično stanje maksimalne otpornosti i magenta – granično stanje blizu kolapsa).



Slika 2: Eksperimentalno dobijene ovojnice odgovora zidova W7 i W8 sa označenim graničnim stanjima.

3. OPIS I VALIDACIJA 3D NUMERIČKOG MODELA

Za simulaciju seizmičkog odgovora ispitivanih zidova sa AB serklažima razvijen je 3D model sa konačnim elementima u programu Abaqus/Explicit [13], primenom pojednostavljenog pristupa mikro-modeliranja. Ovakav pristup odabran je kako bi se adekvatno opisao globalni seizmički odgovor zidova, ali i karakteristični lokalni mehanizmi oštećenja, uključujući efekat „odsecanja“ isturenog dela zida na kontaktu zida i AB serklaža (eng. *shear-off effect*). U ovom radu prikazane su samo osnovne karakteristike 3D numeričkog modela, dok su njegov detaljan opis i validacija na osnovu eksperimentalnih rezultata dati u [10, 11].

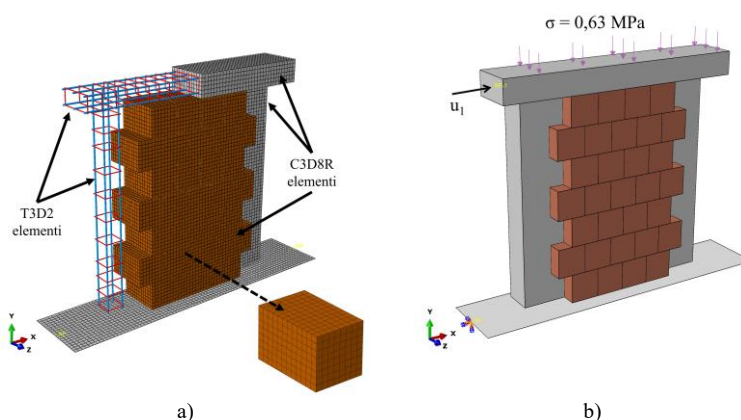
Geometrija ispitivanog zida modelirana je u celosti, sa izuzetkom temeljne AB grede, koja je, zbog svoje velike krutosti i potrebe za smanjenjem ukupnog vremena numeričke analize, predstavljena kao uklještena kruta ploča. Vertikalni AB serklaži povezani su sa krutom pločom primenom funkcije „*Tie Constraint*“ u programu Abaqus. Blokovi i AB elementi (vertikalni i horizontalni serklaži) modelirani su 3D prostornim konačnim elementima sa redukovanom integracijom (C3D8R), dok su podužna i poprečna armatura modelirane sa T3D2 konačnim elementima, kao što je prikazano na Slici 3a.

Validacija 3D numeričkog modela zasnovana je na rezultatima eksperimentalnih ispitivanja dva zida. Pri razvoju numeričkog modela usvojena su određena pojednostavljenja, zasnovana na pristupima prethodno primenjenim u literaturi. Najpre, blokovi sa vertikalnim šupljinama idealizovani su kao puni elementi, pri čemu je uticaj šupljina uzet u obzir odgovarajućom modifikacijom mehaničkih karakteristika materijala blokova, odnosno modula elastičnosti E_m i čvrstoće na pritisak f_m , prema pristupu koji su predložili Stavridis i Shing [14]. Naneto opterećenje u numeričkom modelu odgovaralo je eksperimentalnim uslovima, sa izuzetkom horizontalnog opterećenja, koje je umesto cikličnog zadato kao monotono. Ovakav pristup omogućava adekvatno opisivanje globalnog odgovora i dominantnih mehanizama oštećenja, ali ne omogućava eksplicitno obuhvatanje histereznih efekata, kao što su „*pinching*“ efekat, degradacija krutosti i kumulativno smanjenje nosivosti. Ipak, ovakvo pojednostavljenje često se

primenjuje u numeričkim simulacijama zidova sa serklažima i AB ramova sa zidanom ispunom, jer omogućava direktno poređenje sa eksperimentalno dobijenim obvojnica odgovora tih konstruktivnih sistema [15, 16].

Interakcija između armature i betona definisana je primenom funkcije „*Embedded Constraint*“ u programu Abaqus [13]. Kontakti između pojedinačnih blokova, kao i između blokova i AB elemenata, definisani su odgovarajućim kontaktima koji uključuju trenje, koheziju i kruti kontakt (eng. „*Tie Constraint*“), detaljno opisanim u [11]. Nelinearno ponašanje betona i blokova simulirano je primenom materijalnog modela *Concrete Damaged Plasticity* (CDP).

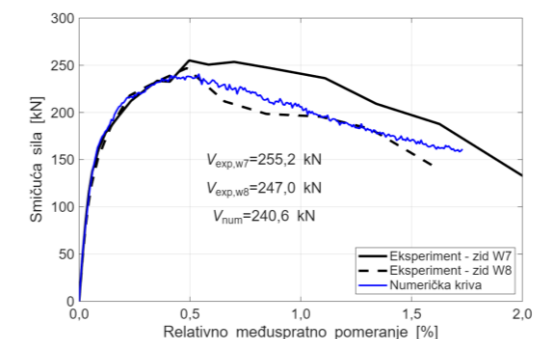
Granični uslovi i naneto opterećenje u numeričkom modelu definisani su tako da odgovaraju uslovima eksperimentalnog ispitivanja (Slika 3b). Opterećenje je naneto u tri uzastopna koraka: a) nanošenje sopstvene težine elemenata, b) nanošenje konstantnog aksijalnog opterećenja u iznosu od 0,63 MPa i c) nanošenje horizontalnog pomeranja u ravni zida (monotono, u pozitivnom smeru), odnosno s leva na desno, u referentnoj tački RP-1 gornjeg horizontalnog serklaža, kao što je prikazano na Slici 3b.



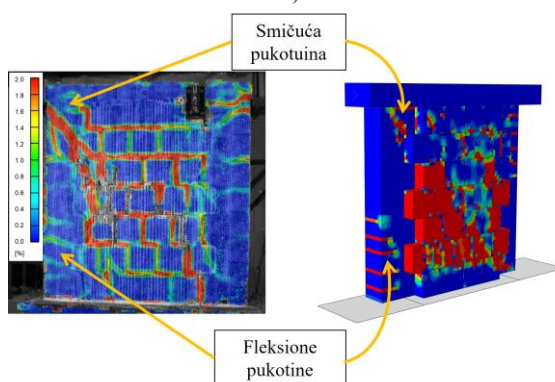
Slika 3: 3D mikro-model u programu Abaqus: a) mreža konačnih elemenata i tipovi korišćenih konačnih elemenata; b) naneto opterećenje (preuzeto iz [10]).

Validacija 3D mikro-modela [11] izvršena je poređenjem numeričkih i eksperimentalnih rezultata. Na Slici 4a prikazano je poređenje globalnog odgovora zida, tj. odnosa smičuće sile i relativnog međuspratnog pomeranja (drift) zida. Numerički model je uspešno reprodukovao ključne karakteristike eksperimentalnog odgovora, uključujući početnu krutost, maksimalnu nosivost i ponašanje nakon dostizanja maksimalne nosivosti. Maksimalna nosivost u numeričkom modelu dostignuta je pri driftu od približno 0,54%, što je veoma blisko eksperimentalno dostignutoj vrednosti od približno 0,5%. Razlike u maksimalnoj smičućoj nosivosti relativno su male i iznose približno 6% i 3% za zidove W7 i W8, redom.

Pored globalnog odgovora, sposobnost numeričkog modela da reprodukuje raspodelu napona i lokalne mehanizme oštećenja detaljno je analizirana u radu Krtinića i sar. [11]. Na Slikama 4b i 4c upoređene su glavne deformacije dobijene iz optičkih merenja upotrebom DIC sistema tokom eksperimenta i raspodela oštećenja dobijena numeričkom simulacijom pri driftu od 1,0%. Uočena je veoma dobra saglasnost, posebno u pogledu razvoja oštećenja u AB vertikalnim serklažima. U oba slučaja najpre se javljaju horizontalne pukotine usled uticaja savijanja pri dnu serklaža, dok se pri većim nivoima relativnog međuspratnog pomeranja razvija dominantna dijagonalna pukotina nastala usled smicanja, koja se iz zida prostire ka gornjem delu levog i donjem delu desnog AB serklaža.



a)



b)

c)

Slika 4: a) Poređenje eksperimentalne i numeričke krive smičuća sila–relativno međuspratno pomeranje; b) glavne deformacije dobijene optičkim DIC sistemom; c) 3D prikaz raspodele pukotina dobijene numeričkom simulacijom (preuzeto iz [10]).

Dobijeni rezultati pokazuju da validirani 3D mikro-model pouzdano reprodukuje globalni i lokalni odgovor ispitanih zidova sa AB serklažima i da se može koristiti kao referentni model za dalje analize i sprovođenje parametarske studije. Ipak, validacija je izvršena na dva eksperimentalno ispitana zida identične geometrije i pri istim uslovima opterećenja, zbog čega je sposobnost modela da reprodukuje odgovor potvrđena prvenstveno za razmatrani sistem. Dodatna validacija na zidovima različitih dimenzija i pri različitim nivoima vertikalnog opterećenja dodatno bi potvrdila primenljivost usvojenog pristupa mikro-modeliranja.

4. REGRESIONI PREDIKTIVNI MODELI ODZIVA ZIDOVA SA SERKLAŽIMA

U ovom odeljku predstavljen je postupak zasnovan na bazi rezultata numeričkih analiza, usmeren ka razvoju regresionih prediktivnih modela za procenu seizmičkog odgovora zidova sa serklažima i racionalnije dimenzionisanje AB vertikalnih serklaža. Razvijeni modeli zasnovani su na bazi od 126 numeričkih analiza [10], formiranih primenom pojednostavljenog pristupa 3D mikro-modeliranja u programu Abaqus/Explicit. Svi modeli razvijeni su na osnovu prethodno validiranog numeričkog modela prikazanog u Poglavlju 3. Parametarskom studijom obuhvaćeni su ključni parametri koji utiču na seizmički odgovor zidova sa serklažima, uključujući dva odnosa visine i dužine zida ($AR = 1,11$ i $AR = 0,65$), sa dužinama zidova od 1,25 m i 2,50 m i konstantnom visinom od 1,95 m, tri nivoa aksijalnog napona (0,30, 0,63 i 0,90 MPa), kao i sistematske varijacije poprečnog preseka serklaža (dimenzije i oblik) i načina armiranja (procenat i raspored podužne i poprečne armature). Odgovor svakog numeričkog modela opisan je ključnim

izlaznim parametrima, od kojih su u ovom radu razmatrani maksimalna nosivost zida $F_{\max}$ i smičuća sila (SF) u AB serklažima pri dostizanju maksimalne nosivosti $F_{\max}$.

U cilju razvoja praktičnih prediktivnih izraza pogodnih za inženjersku primenu, rezultati numeričkih analiza dodatno su obrađeni u programu MATLAB [12], korišćenjem paketa *Statistics and Machine Learning Toolbox*. Primenjena je regresiona analiza u okviru alata *Regression Learner*, pri čemu su odabrani geometrijski, mehanički i parametri armiranja korišćeni kao ulazne prediktorske promenljive. Ciljne promenljive definisane su kao: (a) maksimalna nosivost zida $F_{\max}$ i (b) smičuća sila (SF) u AB serklažima pri dostizanju maksimalne nosivosti $F_{\max}$.

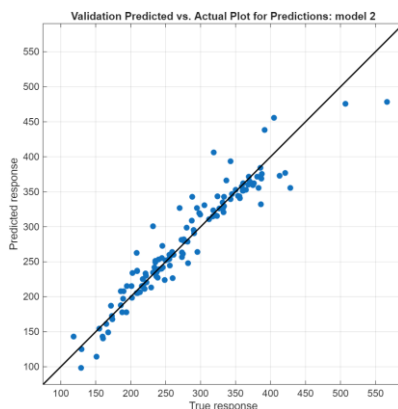
Razmatrano je više regresionih algoritama dostupnih u okviru navedenog paketa, uključujući modele linearne regresije (eng. *Linear regression model*) i regresionog stabla (eng. *Regression tree*). Tačnost razvijenih modela ocenjena je primenom standardnih statističkih pokazatelja, kao što su koeficijent determinacije R^2 i koren srednje kvadratne greške RMSE (eng. *Root Mean Squared Error*). Cilj je bio razviti prediktivne modele koji, pored zadovoljavajuće tačnosti, zadržavaju dovoljnu jednostavnost za formulisanje izraza pogodnih za praktičnu inženjersku primenu.

4.1. PREDIKTIVNI MODEL ZA MAKSIMALNU NOSIVOST ZIDOVA $F_{\max}$

Prvi cilj primenjenog postupka zasnovanog na mašinskom učenju bio je predviđanje maksimalne nosivosti zidova sa serklažima $F_{\max}$. Regresioni postupak prethodno opisan primenjen je na celokupnu bazu rezultata numeričkih analiza (126 modela), pri čemu je korišćeno devet promenljivih kojima su obuhvaćeni geometrija zida, nivo aksijalnog opterećenja zida, mehaničke karakteristike zida i karakteristike AB serklaža.

Model linearne regresije razvijen je primenom petostruke unakrsne validacije, pri čemu je baza podataka podeljena na pet delova koji su naizmenično korišćeni za razvoj i validaciju modela. Dobijena vrednost koeficijenta determinacije R^2 iznosila je 0,91, što pokazuje da se približno 91% varijabilnosti numerički dobijenih vrednosti $F_{\max}$ može objasniti odabranim promenljivim. Vrednost RMSE iznosi 24,0 kN, što predstavlja relativno malu prosečnu grešku predviđanja u odnosu na celokupan opseg dobijenih nosivosti (približno 120–570 kN). Pored toga, vrednost MAPE (eng. *Mean Absolute Percentage Error*) od približno 6% dodatno ukazuje na visoku tačnost predviđanja razvijenog modela.

Na Slici 5 prikazano je poređenje numerički dobijenih vrednosti maksimalne nosivosti zidova i odgovarajućih vrednosti predviđenih modelom linearne regresije. Rezultati pokazuju visok stepen korelacije između rezultata numeričkih analiza i vrednosti dobijenih regresionim modelom.



Slika 5: Poređenje numerički dobijenih i predviđenih vrednosti maksimalne nosivosti zidova sa serklažima primenom modela linearne regresije.

Regresioni koeficijenti prikazani su u Tabeli 1. Kolona “Regresioni koeficijent” predstavlja koeficijente linearnog regresionog modela, koji se množi sa odgovarajućim parametrima u tabeli, izraženim u navedenim jedinicama, kako bi se dobila predviđena vrednost $F_{\max}$ u kN. P-vrednost pruža informaciju o statističkoj značajnosti pojedinačnih prediktorskih promenljivih, pri čemu manje vrednosti ukazuju na veću statističku značajnost.

Tabela 1: Regresioni koeficijenti i statistički pokazatelji za predviđanje maksimalne nosivosti zida $F_{\max}$ u kN (za razmatrane numeričke modele).

Parametar	Regresioni koeficijent	P-vrednost
Dužina zida [mm]	+0.0891	3.44E-53
Visina zida [mm]	-0.2005	6.25E-18
Širina AB serklaža [mm]	+0.8838	1.43E-38
Visina AB serklaža [mm]	+0.3046	5.48E-06
Aksijalno opterećenje [MPa]	+72.2328	6.95E-15
Koeficijent armiranja poprečnom armaturom [%]	+65.6262	0.0239
Koeficijent armiranja podužnom armaturom [%]	+25.798	0.0459
Veza na zub [da/ne]	+35.4164	5.06E-04
Čvrstoća na pritisak zida [MPa]	+15.583	6.97E-10

Rezultati pokazuju da razmatrani parametri imaju statistički značajan uticaj na predviđanje maksimalne nosivosti zida ($P < 0,05$), uključujući dužinu i visinu zida, širinu i visinu poprečnog preseka serklaža, nivo aksijalnog opterećenja, procenat armiranja serklaža poprečnom i podužnom armaturom, način ostvarivanja veze na zub, kao i čvrstoću zida pri pritisku. Iako su procenti poprečne i podužne armature statistički značajni, njihov uticaj je relativno manji u poređenju sa dominantnim geometrijskim i mehaničkim parametrima.

4.2. PREDIKTIVNI MODEL ZA SMIČUĆU SILU U SERKLAŽIMA

Drugi cilj primenjenog postupka bio je predviđanje smičuće sile u AB serklažima (SF) pri dostizanju maksimalne nosivosti zida $F_{\max}$. Model linearne regresije razvijen je primenom istog postupka petostruke unakrsne validacije kao i prethodno opisani model za $F_{\max}$. Dobijena vrednost koeficijenta determinacije R^2 iznosila je 0,88, što pokazuje da se približno 88% varijabilnosti numerički dobijenih vrednosti smičuće sile može objasniti odabranim promenljivim. Vrednost RMSE iznosi 14,61 kN, što predstavlja relativno malu grešku u odnosu na celokupan opseg dobijenih smičućih sila (približno 40–280 kN). Takođe, vrednost MAPE od približno 11,5% dodatno ukazuje na dobru tačnost predviđanja razvijenog modela. Na Slici 6 prikazano je poređenje numerički dobijenih vrednosti smičuće sile u AB serklažima (SF) i odgovarajućih vrednosti predviđenih modelom linearne regresije.

Regresioni koeficijenti i odgovarajući statistički pokazatelj prikazani su u Tabeli 2. Kolona “Regresioni koeficijent” predstavlja koeficijente linearnog regresionog modela koji se koriste za izračunavanje predviđene vrednosti smičuće sile (SF, u kN) na osnovu odgovarajućih ulaznih parametara. Rezultati pokazuju da dužina i visina zida, širina i visina poprečnog preseka serklaža, nivo aksijalnog opterećenja, kao i procenti armiranja serklaža poprečnom i podužnom armaturom imaju statistički značajan uticaj na smičuću silu ($P < 0,05$). Nasuprot tome, način ostvarivanja veze na zub nije pokazao statistički značajan uticaj na smičuću silu u okviru analizirane baze podataka ($P = 0,4033$).



Slika 6: Poređenje numerički dobijenih i predviđenih vrednosti smičuće sile u AB serklažima (SF) primenom modela linearne regresije.

Tabela 2: Regresioni koeficijenti i statistički pokazatelj za predviđanje smičuće sile SF u kN (za razmatrane numeričke modele).

Parametar	Regresioni koeficijent	P-vrednost
Dužina zida [mm]	+0.0145	1.03E-09
Visina zida [mm]	-0.1099	1.13E-14
Širina AB serklaža [mm]	+0.5948	1.62E-37
Visina AB serklaža [mm]	+0.215	5.53E-07
Aksijalno opterećenje [MPa]	+83.5695	1.49E-27
Koeficijent armiranja poprečnom armaturom [%]	+42.4284	0.0293
Koeficijent armiranja podužnom armaturom [%]	+25.9446	0.0022
Veza na zub [da/ne]	+5.2048	0.4033

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu analiziran je seizmički odgovor zidova sa serklažima kombinovanjem naprednog numeričkog modeliranja i regresionih tehnika zasnovanih na mašinskom učenju. Primenom validiranog pojednostavljenog 3D mikro-modela formirana je baza od 126 numeričkih analiza, na osnovu koje su razvijeni regresioni prediktivni modeli za maksimalnu nosivost zida (F_{max}) i smičuću silu u AB serklažima (SF).

Razvijeni modeli linearne regresije pokazali su visoku tačnost predviđanja maksimalne nosivosti zidova ($R^2=0,91$) i smičuće sile u serklažima ($R^2=0,88$). Statistička analiza pokazala je da uticaj pojedinačnih parametara zavisi od razmatrane veličine odgovora. Na maksimalnu nosivost zida (F_{max}) statistički značajno utiču geometrijske karakteristike zida i serklaža, nivo aksijalnog opterećenja i čvrstoća zida pri pritisku, dok su procenat podužne armature i način ostvarivanja veze na zub takođe statistički značajni, ali sa manjim uticajem. Sa druge strane, na smičuću silu u AB serklažima (SF) statistički značajno utiču geometrijske karakteristike zida i serklaža, nivo aksijalnog opterećenja, kao i procenti armiranja poprečnom i podužnom armaturom, dok način ostvarivanja veze na zub nije pokazao statistički značajan uticaj.

Potrebno je naglasiti da su zaključci predstavljeni u ovom radu prvenstveno zasnovani na rezultatima numeričkih analiza specifičnog sistema zidova sa serklažima. Dalja istraživanja treba usmeriti ka proširenju oblasti primene predložene metodologije, uključujući validaciju na većoj bazi eksperimentalnih rezultata, razmatranje dodatnih parametara koji mogu uticati na seizmički odgovor, kao i primenu drugih regresionih modela radi dodatne procene i unapređenja tačnosti predviđanja. Dobijeni regresioni modeli predstavljaju osnovu za racionalnije dimenzionisanje AB

vertikalnih serklaža prema realnim vrednostima smičućih sila, bez potrebe za sprovođenjem složenih 3D numeričkih analiza za svaki pojedinačni slučaj.

ZAHVALNOST

Istraživanje prikazano u ovom radu podržala je Javna agencija za naučno-istraživačku i inovacionu delatnost Republike Slovenije. Autori se zahvaljuju na pruženoj podršci.

REFERENCE

- [1] Brzev S, Mitra K. Earthquake-resistant confined masonry construction, National Information Centre of Earthquake Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur, 2018.
- [2] Meli R, Brzev S, Astroza M, et al. Seismic design guide for low-rise confined masonry buildings, Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Oakland, California, 2011.
- [3] Gams M, Triller P, Jäger A. In-plane seismic behaviour of URM and confined masonry built from vertically perforated blocks and polyurethane glue, *Structures*, 58, 2023, 105528.
- [4] Gams M, Triller P, Tomažević M, Jäger A. Test of three-storey confined masonry structure built from clay blocks and PU glue, *Journal of Building Engineering*, 91, 2024, 109696.
- [5] CEN. Eurocode 6: Design of masonry structures – Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2005.
- [6] CEN. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2004.
- [7] Borah B, Kaushik H. B, Singhal V. Seismic force distribution in members of confined masonry buildings, *Engineering Structures*, 266, 2022, 114605.
- [8] Borah B, Gupta A, Singhal V, Kaushik H. B. Design of tie-columns in confined masonry structures for lateral loads, *Earthquake Spectra*, 40, 2024, 2116-2136.
- [9] Krtinić N, Marinković M, Gams M. Numerical macro- and micro-modeling of confined masonry walls with emphasis on seismic forces in tie-columns, *Journal of Earthquake Engineering*, 2026, 1-38.
- [10] Krtinić N. The influence of tie-columns on seismic response of confined masonry walls, PhD Thesis, University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, 2026.
- [11] Krtinić N, Marinković M, Gams M. Numerical analysis of the seismic response of a confined masonry system, *Engineering Structures*, 353, 2026, 122288.
- [12] MathWorks. MATLAB, The MathWorks, Inc., Version R2025a, 2025.
- [13] Dassault Systèmes Simulia Corporation. Abaqus/Explicit FEA, Version 6.24, 2023.
- [14] Stavridis A, Shing P. B. Finite element modeling of nonlinear behavior of masonry-infilled RC frames, *Journal of Structural Engineering*, 135, 2009, 285-296.
- [15] Yacila J, Camata G, Salsavilca J, Tarque N. Pushover analysis of confined masonry walls using a 3D macro-modelling approach, *Engineering Structures*, 201, 2019, 109731.
- [16] Marques R, Pereira J. M, Lourenço P. B. Lateral in-plane seismic response of confined masonry walls: From numerical to backbone models, *Engineering Structures*, 221, 2020, 111098.