



asist. Nemanja Krtnić, mag. inž. grad.  
nkrtnic@fgg.uni-lj.si



izr. prof. dr. Matija Gams, univ. dipl. inž. grad.  
mgams@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek  
UDK/UDC 531.221:519.62

# RAČUN NOTRANJNH SIL V AB NAVPIČNIH VEZEH Z UPORABO MIKRO- IN MAKRO-MODELOV

## CALCULATION OF INTERNAL FORCES IN RC TIE- COLUMNS USING MICRO- AND MACRO-MODELS

### Povzetek

Predstavljena je numerična študija potresnega odziva slopov, zgrajenih iz sodobnih opečnih zidakov, ki so zlepljeni s poliuretan-skim (PU) lepilom in imajo AB navpične vezi na straneh. Raziskava temelji na eksperimentalnih rezultatih dveh slopov v naravni velikosti, na podlagi katerih so bili razviti in validirani detajlni 3D-mikromodel iz končnih elementov (KE) v programu Abaqus ter 2D-makromodeli z eno ali več nadomestnimi diagonalami (ND) v programu OpenSees. Validacija je bila narejena pri monotono naraščajoči in ciklični vodoravni obtežbi pri konstantni tlačni obremenitvi. Validirani 3D detajlni model je bil v nadaljevanju uporabljen kot referenčni model za oceno natančnosti porazdelitve notranjih sil vzdolž višine armiranobetonskih (AB) navpičnih vezi. Namen študije je ugotoviti, ali so makromodeli z nadomestnimi diagonalami dovolj natančni za račun notranjih sil v vezeh v praksi.

Analiza porazdelitve strižnih in osnih sil ter upogibnih momentov je narejena pri največji nosilnosti slopa in pri padcu nosilnosti na 80 % največje nosilnosti. Rezultati kažejo, da modeli z eno ND zadovoljivo napovedujejo globalni odziv, vendar ne zajamejo ustrezno porazdelitve notranjih sil vzdolž višine AB vezi. Nasprotno model z več ND bistveno bolje reproducira lokalne mehanizme prenosa sil in bolje napove poteke notranjih sil, še posebej strižnih sil in momentov. Kljub temu da tudi ta model ne zajame v celoti kompleksne prerazporeditve osnih sil, predstavlja dobro ravovesje med natančnostjo in računsko učinkovitostjo ter je primeren za praktično uporabo v vsakdanji inženirski praksi.

Ključne besede: navpične vezi, numerično modeliranje, 3D-mikromodel, 2D-makromodel z nadomestnimi diagonalami, porazdelitev notranjih sil

### Summary

This study presents a numerical investigation of the seismic response of masonry piers built from modern clay masonry units bonded with polyurethane (PU) glue and with RC tie-columns at the sides. The research is based on experimental results obtained from two full-scale pier specimens, on the basis of which a three-dimensional (3D) finite element (FE) model in Abaqus and two-dimensional (2D) equivalent strut macro-models (ESM) with one or more multiple struts in OpenSees were developed and validated. The validation was performed under both monotonically increasing and cyclic horizontal loading with constant vertical force. The validated 3D micro-model was subsequently used as a reference model to assess the accuracy of the internal force distribution along the height of reinforced concrete (RC) tie-columns. The objective of the study is to evaluate whether equivalent strut macro-models are sufficiently accurate for the estimation of internal forces in RC tie-columns in practical applications.

The analysis of shear forces, axial forces, and bending moments was carried out at peak strength and at the drop to 80 % strength. The results show that the single-strut model provides a satisfactory prediction of the global response, but fails to capture the distribution of internal forces along the height of RC tie-columns. In contrast, the multi-strut model more accurately reproduces local load-transfer mechanisms and provides improved predictions of internal force distributions, particularly for shear forces and bending moments. Nevertheless, it still does not fully capture the complex redistribution of axial forces. Overall, the multi-strut model is a good balance between accuracy and computational efficiency and is suitable for practical engineering applications.

Key words: tie-columns, numerical modelling, 3D micro-model, 2D equivalent strut macro-model, internal force distribution

## 1 UVOD

Povezano zidovje (PZ) predstavlja učinkovit in široko uporabljen konstrukcijski sistem za nizke in srednje visoke stavbe na območjih s potresno nevarnostjo. Sistem temelji na sodelovanju nosilnega zidovja ter armiranobetonskih (AB) navpičnih in vodoravnih vezi, ki zagotavljajo povezanost konstrukcije za zagotavljanje škatlatega odziva stavb, omejujejo poškodbe zidovja ter izboljšajo nosilnost, togost in duktilnost stavb. Zaradi ugodnega obnašanja v preteklih potresih in razmeroma enostavne izvedbe ostaja gradnja enodružinskih hiš in tudi večstanovanjskih stavb v sistemu PZ učinkovita rešitev za potresno odporno gradnjo doma [Tomaževič, 2009] in po svetu [Brzev, 2018; Meli, 2011]. Pri opisu povezanega zidovja je treba poudariti še, da gradnja poteka tako, da se najprej sezida zidovje in šele zatem zabetonirajo vezi. Tako se zagotovi, da se navpična obtežba prenaša po zidovih in ne po vezeh.

Ob Sloveniji se konstrukcijski sistem PZ uporablja v različnih delih sveta (npr. v Južni Ameriki, jugovzhodni Evropi, na Bližnjem vzhodu, v severni Afriki in vzhodni Aziji), pri čemer obstajajo pomembne razlike v gradbenih praksah [Brzev, 2018]. V regijah brez zahtev po toplotni izolaciji so zidovi pogosto bistveno tanjši. V Mehiki so debeline nosilnih zidov le 12 cm [Perez Gavilan, 2015], v Čilu pa 14 cm [Astroza, 2012]. V takšnih primerih so navpične AB vezi običajno enake debeline kot zid.

Pri nas so zidovi praviloma debelejši, saj je najmanjša dovoljena debelina zidov 19 cm [SIST EN 1998-1:2005/A101:2009, 2009], v praksi pa pogosto 25 cm v primeru gradnje z opečnimi votlaki. Navpične vezi so lahko zabetonirane v opažu in v tem primeru je debelina vezi enaka debelini zidov, če pa se uporabljajo tako imenovani vogalniki, ki služijo kot opaž, imajo vezi manjše dimenzije od debeline zidu. Za zid debeline 25 cm je vez v vogalniku dimenzij približno 17 x 17 cm, a je to odvisno tudi od proizvajalca.

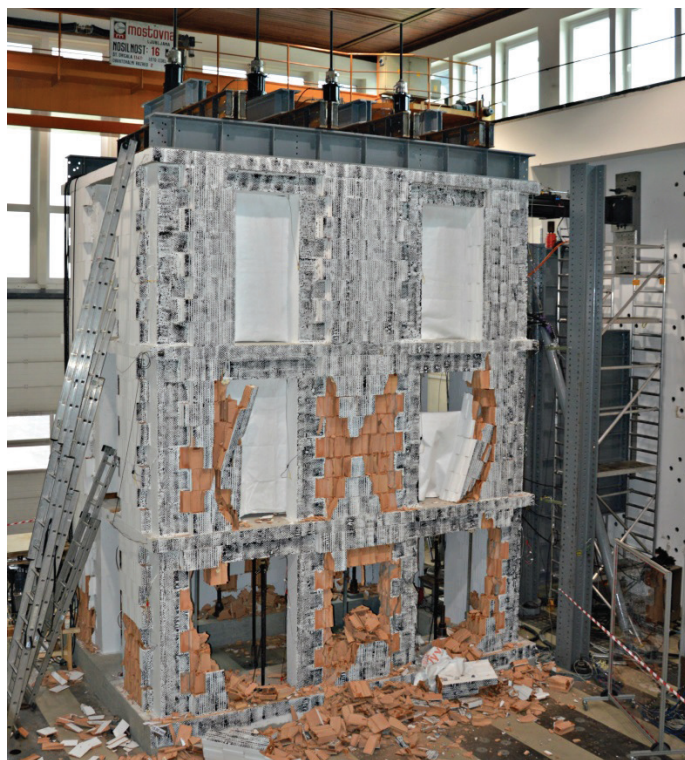
Čeprav se oba sistema imenujeta povezano zidovje, obstaja med njima pomembna razlika. Sistem, kot ga uporabljajo v Južni Ameriki, ima manjše vezi, ki prvenstveno opravljajo povezovalno funkcijo. K nosilnosti zidu prispevajo malo, zato njihov prispevek projektanti zanemarijo. Pri nas so vezi močnejše, zato lahko poleg povezovalne vloge upoštevamo tudi njihov prispevek k nosilnosti. Prispevek vezi k nosilnosti povezanega zidovja v točki 6.9.2 (2) eksplicitno navaja tudi Evrokod 6 [SIST EN 1996-1-1:2006, 2006]. Klasično dojemanje povezanega zidovja je, da vezi opravljajo le povezovalno funkcijo in s tem povezano večjo kapaciteto pomikov in izboljšano disipacijo energije. V zidovju, kot ga zidamo pri nas, pa lahko upoštevamo tudi druge prispevke vezi in tako ne ustreza popolnoma opisu klasičnega povezanega zidovja.

V jugovzhodni Evropi je bil v zadnjih dveh desetletjih razvoj zidarstva pretežno usmerjen k izboljšanju energetske učinkovitosti stavb, optimizacije hitrosti gradnje in izboljšanju bivalnega udobja stanovalcev. K temu je prispeval razvoj sodobnih opečnih zidakov z izboljšanimi toplotnimi karakteristikami in zmanjšano toplotno prevodnostjo, ki imajo večje votline za vgradnjo toplotne izolacije. Posledično imajo takšni zidaki pogosto večje dimenzije in so debeli 38 cm ali celo več. Pomembna inovacija je tudi uporaba poliuretanskega (PU) lepila namesto tradicionalne malte, kar omogoča izvedbo zelo tan-

kih naležnih reg in s tem zmanjšanje toplotnih izgub. Takšen način gradnje poleg izboljšanih toplotnih lastnosti omogoča tudi hitrejšo in enostavnejšo izvedbo zidovja.

V tej raziskavi bomo obravnavali 38 cm debele zidove, ki imajo navpične vezi dimenzij 25 x 25 cm (detajlno so zidaki in tehnologija gradnje opisani v nadaljevanju). Obnašanje stavb iz takih zidov je bilo eksperimentalno preizkušeno ob vstopu te tehnologije gradnje na slovenski trg. V sklopu preiskav so bili preizkušeni zidni slopi pod simulirano potresno obtežbo s t. i. cikličnimi strižnimi testi pri konstantni tlačni obremenitvi [Gams, 2023] in potresni odziv trietažnega modela v naravni velikosti [Gams, 2024]. Raziskave so potrdile, da je odziv zidnih slopov in stavb, zgrajenih v tem sistemu, nekoliko drugačen od klasičnega odziva stavb iz povezanega zidovja. Globalni odziv je bil boljši od pričakovanega, saj so preizkušanci dosegli visoko nosilnost in imeli veliko kapaciteto pomikov. Presenetil pa je nov lokalni porušni mehanizem, v katerem se je 13 cm debel del zidovja, ki ni bil podprt z navpičnimi vezmi, poškodoval prej, kot smo pričakovali. Ena izmed ugotovitev raziskav je bila še, da v tem sistemu vezi s svojo togostjo in nosilnostjo, ki sta relativno visoki v primerjavi z opečnim delom zidu, nezamisljivo vplivajo na odziv. To je bilo najbolj očitno iz odziva trietažnega modela stavbe v laboratoriju (slika 1), ki se ni porušili niti takrat, ko je bilo zidovje že popolnoma uničeno in so vse vodoravne in navpične obremenitve prenašale navpične zidne vezi. V primeru stavb iz klasičnega PZ bi se navpične vezi porušile istočasno kot zid, kar bi vodilo v porušitev stavbe.

Odziv obravnavane stavbe je bil še bolj drugačen od pričakovanega odziva sistema AB okvirov s polnili. Zidovje je namreč tlačno obremenjeno (v polnilih ni), vezi se strižno poškodujejo



**Slika 1.** Model trietažne stavbe iz obravnavanega konstrukcijskega sistema po preizkusu potresne odpornosti

(stebri v okvirih se ne) in pod vodoravno obremenitvijo se zidovje in vezi ne ločijo (to se zgodi v polnilih zunaj območja tlačnih diagonal). Obravnavani sistem zato po odzivu spada v vmesno območje med tema dvema sistemoma, vendar je zaradi načina gradnje in skladnosti z zahtevami Evrokodov za povezano zidovje edino smiselno, da se to imenuje povezano zidovje in se tako tudi obravnava.

Ker je obnašanje obravnavanega sistema drugačno od klasičnega, nas je zanimalo, kako bi lahko izračunali notranje sile v navpičnih vezeh takega zidovja. Za numerično analizo stavb iz povezanega zidovja se uporabljajo različni pristopi. Detajlni 3D-mikromodeli iz končnih elementov (KE) omogočajo natančno reproduciranje lokalnih mehanizmov, poškodb in porazdelitve notranjih sil, vendar so računsko zahtevni in zato uporabni le za raziskave. Po drugi strani pa so 2D-makromodeli, kot so modeli z eno ali več nadomestnimi diagonalami (ND), bistveno učinkovitejši in primerni za praktično uporabo, vendar njihova zmožnost napovedovanja notranjih sil v AB vezeh še ni dovolj raziskana ([Borah, 2022], [Borah, 2024]).

Namen te študije je analizirati potek notranjih sil v AB navpičnih vezeh v zidnih slopih z uporabo različnih numeričnih modelov. Raziskava temelji na primerjavi rezultatov detajlnega 3D-mikromodela, razvitega v programskem okolju Abaqus [Simulia, Abaqus/CAE, 2023], ter 2D-makromodelov z eno in več nadomestnimi diagonalami, implementiranih v programskem okolju OpenSees [McKenna, 2000], ki so validirani na podlagi eksperimentalnih rezultatov obravnavanih slopov [Gams, 2023]. Poseben poudarek je na porazdelitvi notranjih sil vzdolž višine AB vezi ter na oceni sposobnosti makromodelov različne kompleksnosti, da jih napovejo. Na podlagi rezultatov je predlagan računski model, ki omogoča dovolj dobro oceno notranjih sil v navpičnih vezeh objektov, zgrajenih na obravnavani način. Čeprav so postopki uporabljeni le na opisnem načinu gradnje, verjamemo, da bi bili z ustreznimi prilagoditvami uporabni tudi za druge vrste PZ.

## 2 KRATEK POVZETEK REFERENČNE EKSPERIMENTALNE ŠTUDIJE

Vertikalno perforirani zidaki so komercialno dostopni in imajo dimenzije 250 mm × 249 mm × 380 mm (dolžina/višina/debelina), kot je to prikazano na sliki 1a. Prvotno so bili zasnovani

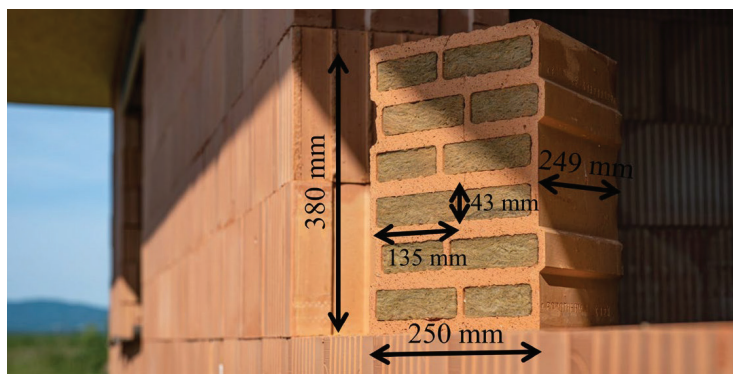
kot zidaki z vgrajeno toplotno izolacijo za gradnjo energetske učinkovitih nosilnih zidov, vendar so bili pri izdelavi preizkušancev uporabljeni brez izolacije, saj ta ne vpliva bistveno na mehanske lastnosti zidovja. Mehanske lastnosti teh zidakov so bile predhodno preizkušene in opisane v študiji Gamsa in sod. [Gams, 2023].

Zidaki so bili med seboj povezani s PU-lepilom namesto tankoslojne malte, zaradi česar imajo stiki zanemarljivo debelino. Lepilo se med gradnjo zidovja nanaša v več pasovih (število pasov je odvisno od širine zidu oz. zidakov) po širini zidakov, kot je to prikazano na sliki 1b.

Geometrijske značilnosti uporabljenih zidakov ne ustrezajo v celoti omejitvam, predpisanim v Evrokodu 6 [SIST EN 1996-1-1:2006, 2006] za zidake skupine 2 za nosilno zidovje, ker skupni delež votlin (približno 59 %) ter največja posamezna luknja (6 %) presegaata priporočeni mejni vrednosti za ta dva kriterija v Evrokodu 6, ki sta 55 % in 2 %. Ta vpliv je deloma kompenziran z debelejšimi zunanji in notranji stenami zidakov (≈12 mm), ki presegajo minimalne zahteve (8 mm in 5 mm).

V laboratoriju ZAG sta bila v okviru omenjenih raziskav [Gams, 2023] preizkušena dva enaka preizkušanca, zgrajena iz omenjenih zidakov in PU-lepila z navpičnimi AB vezmi. Zidova sta imela oznaki W7 in W8 in sta imela dimenzije: dolžina 175 cm, višina 195 cm in debelina 38 cm (slika 2a). Navpične vezi prereza 25 × 25 cm so bile armirane s štirimi palicami Ø14 mm (delež vzdolžnega armiranja 1 %), kar ustreza zahtevam Evrokoda 8 [SIST EN 1998-1:2005, 2005]. Stremena premera Ø8 mm so bila razporejena na razdalji približno 20 cm (slika 2b). Posebnost zidov je, da navpične vezi ne prekrivajo celotne debeline zidu, temveč so poravnane z eno ploskvijo zidu, na drugi strani pa zamaknjene za 13 cm. Na vrhu zidu je bila skupaj z vezmi izvedena AB horizontalna vez, ki je služila za prenos tlačne obtežbe.

Zidova sta bila preizkušena s cikličnim strižnim testom v ravnini zidu pri konstantni tlačni napetosti 0,63 MPa (glede na celotno površino zidu) in s preprečenimi zasuki na zgornjem in spodnjem robu zidu (dvojno vpeti robni pogoji). Vodoravna obtežba je bila nanesena v obliki predpisanih cikličnih pomikov v obe smeri (potiskanje in vlečenje), pri čemer je bila vsaka amplituda pomika ponovljena trikrat, skladno z običajnim postopkom simulacije potresne obtežbe [Tomažević, 1999]. Amplituda pomikov se je postopno povečevala do skorajšnje porušitve preizkušanca.

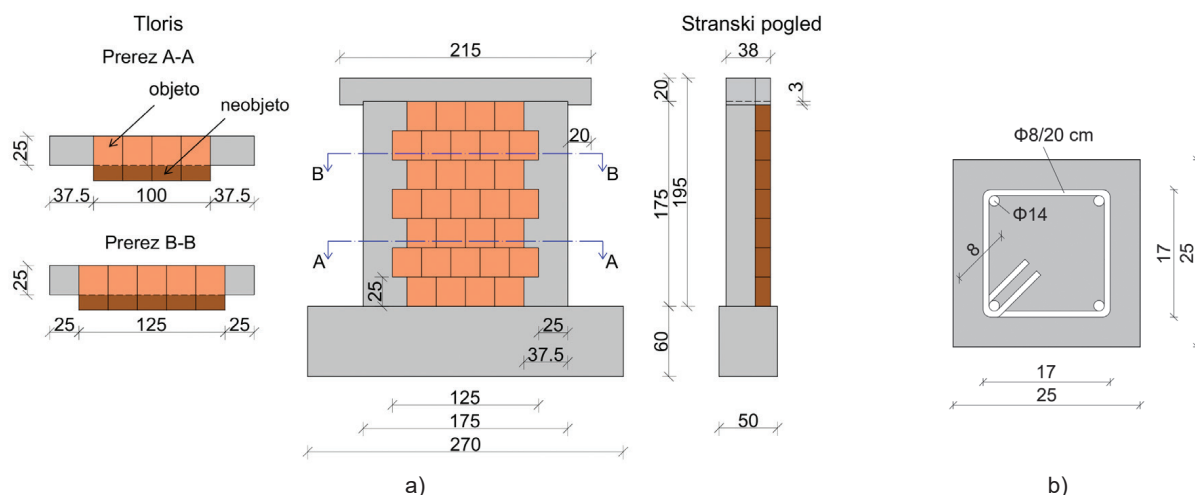


a)



b)

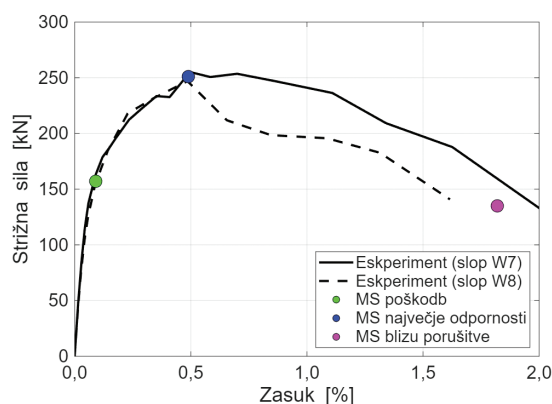
**Slika 2.** a) Zidak s toplotno izolacijo (vir: <https://www.wienerberger.si/porotherm-opeka>); b) aplikacija PU-lepila (vir: <https://www.wienerberger.pl/produkty>)



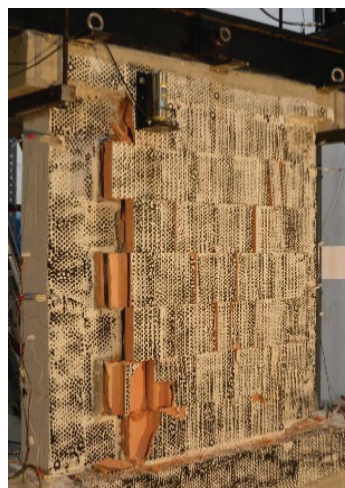
**Slika 3.** a) Geometrija slopov iz PZ; b) geometrija in armatura AB navpične vezi (vse dimenzije so v centimetrih) (privzeto iz [Krtinić, 2026b])

Za merjenje pomikov in deformacijskih polj na površini zidu je bil uporabljen optični sistem merjenja pomikov (angl. digital image correlation, DIC). Na sliki 3a so prikazane ovojnice odziva v ravnini zidu za oba preizkušanca. Te predstavljajo razmerje med strižno silo in zasukom zidu, pri čemer je zasuk definiran kot količnik med vodoravnim pomikom in višino zidu. Ovojnice so bile določene na podlagi povprečnega odziva v obeh

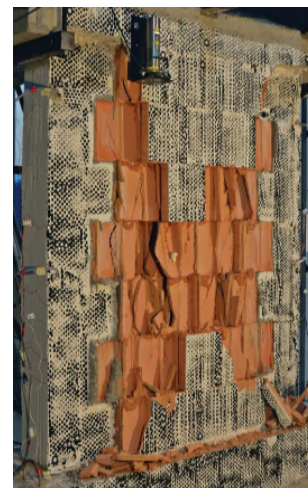
vala že pri MS največje nosilnosti (pri zasuku 0,5 %, slika 3b); pri zasuku 1,3 % (slika 3c) pa se je v celoti odluščila od preostalega dela zidu. Podrobnejši opis razvoja poškodb pri različnih mejnih stanjih (MS) je podan v predhodnih študijah ([Gams, 2023]; [Krtinić, 2025]). Mejno stanje blizu porušitve smo v preiskavah definirali kot stanje, tik preden se preizkušanec podre (zgubi sposobnost prenašanja navpične sile).



a)



b)



c)

**Slika 4.** a) Eksperimentalno izmerjena ovojnica odziva slopov W7 in W8 z označenimi mejnimi stanji (MS); b) drobljenje zidu W7 pri zasuku 0,5 %, in c) drobljenje zidu W7 pri zasuku 1,3 %

smereh obremenjevanja. Na podlagi eksperimentalnih ovojnic in opazovanj med preizkusi so bila določena tri mejna stanja (MS): MS poškodba, MS največje nosilnosti ter MS blizu porušitve. Vrednosti mejnih stanj so bile najprej določene za vsak posamezen preizkušanec, nato pa še povprečene.

Odziv med testi je bil pričakovan, saj je v zidu prevladoval strižni mehanizem. Kljub temu pa so bile poškodbe na stiku med zidovjem in AB navpičnimi vezmi nepričakovane. Plast zidovja, ki ni bila popolnoma podprta z vezmi, se je močno poškodova-

### 3 3D-MIKROMODEL: OPIS IN VALIDACIJA MODELA

Numerične simulacije smo izvedli z detajlnim 3D-mikromodelom iz KE v programu Abaqus/Explicit [Simulia, Abaqus/CAE, 2023]. Model je bil zasnovan tako, da so bile upoštevane dejanske geometrijske in materialne značilnosti preizkušancev, opisane v poglavju 2, kar je omogočilo simulacijo lokalnih mehanizmov poškodb na stiku med zidovjem in AB navpičnimi vezmi (angl. *shear-off effect*).

Čeprav so bili zidaki v eksperimentalni študiji votli, smo jih v modelu obravnavali kot polne, pri čemer smo vpliv votlin upoštevali z ustrezno prilagoditvijo materialnih lastnosti (prilagojen modul elastičnosti in tlačna trdnost zidovja) v skladu s priporočili iz literature [Stavridis, 2009]. Takšen pristop omogoča ustrezno ravnovesje med natančnostjo modela in računsko učinkovitostjo. Vertikalna obtežba je bila enaka kot v eksperimentih, medtem ko je bila vodoravna obtežba namesto ciklično nanešana monotono naraščajoče (angl. pushover).

Primarni cilj detajlnega 3D-mikromodela je bil natančno zajeti nosilnost, togost, deformacijsko kapaciteto ter prevladujoče mehanizme poškodb (predvsem interakcijo med zidovjem in vezmi). Zato ciklični učinki, kot so »pinching«, degradacija togosti ter degradacija nosilnosti, niso bili eksplicitno modelirani. Takšna poenostavitev je pogosta v numeričnih študijah povezanega zidovja in omogoča neposredno primerjavo z eksperimentalno določenimi ovojnicami odziva ([Marques, 2020; Medeiros, 2013; Yacila, 2019]).

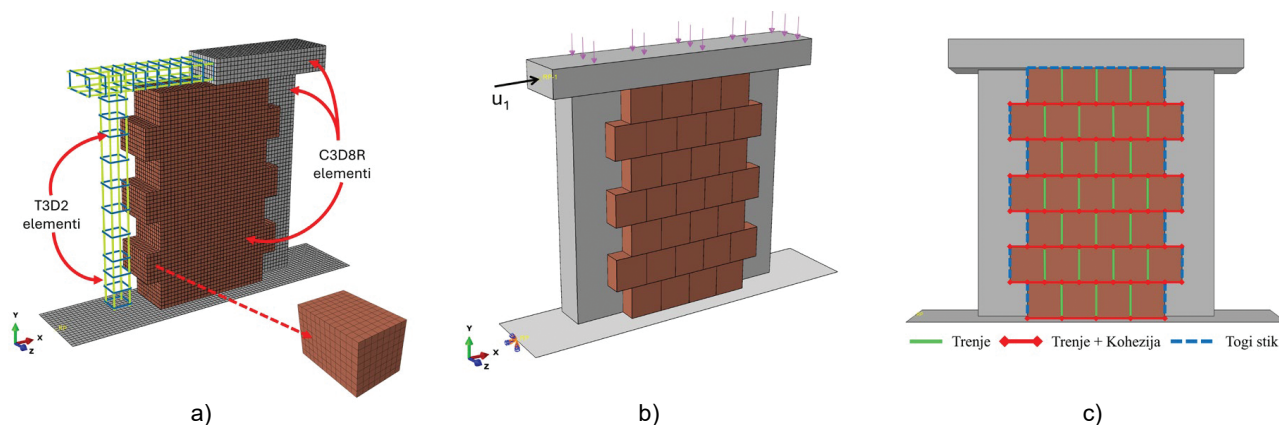
### 3.1 Opis detajlnega 3D-mikromodela

Zidovje in AB vezi so bili modelirani z osemvozliščnimi 3D heksaedrskimi prostorskimi elementi z reducirano integracijo (C3D8R-elementi), ki so primerni za eksplicitno dinamično analizo [Simulia, Abaqus/CAE, 2023]. Vzdržna in strižna armatura AB vezi je bila modelirana s 3D paličnimi elementi z dvema vozliščema (T3D2-elementi), kot je to prikazano na sliki 4a. Interakcija med betonom in armaturo je bila modelirana z

zagotavljanju numerične stabilnosti. Ugotovili smo, da je najboljši način reševanja tak, da vertikalno obtežbo nanašamo 1 s, 12,5 s pa nanašamo vodoravno obtežbo. Na začetku analiz je bila izvedena tudi serija testnih simulacij za določitev optimalne mreže KE. Izbrana velikost elementa 32,5 mm predstavlja ustrezno razmerje med natančnostjo rezultatov in računskim časom ter omogoča zadostno gostoto mreže v območju stika med zidovjem in vezmi, kar je ključno za obravnavani problem (slika 4a).

Posebna pozornost je bila namenjena modeliranju kontaktov med posameznimi elementi in materiali v programu Abaqus/Explicit. Stiki med zidaki v nezapolnjenih čelnih regah (zelena črta, slika 4c) so bili modelirani kot trenjski kontakti brez natezne trdnosti, s koeficientom trenja 0,57, določenim na podlagi eksperimentalnih testov [Gams, 2023]. Naležne rege (rdeča črta, slika 4c), zlepljene s PU-lepilom, so bile modelirane s površinsko interakcijo, ki omogoča kombinacijo kohezije in trenja ter s tem realistično simulacijo mehanskega obnašanja stikov. Stik med zidovjem in AB vezmi je bil modeliran kot tog (z uporabo funkcije »Tie-Constraint«, modra črtkana črta na sliki 4c), kar odraža dejansko tehnologijo izvedbe konstrukcijskega sistema, pri kateri se zidne vezi betonirajo naknadno in se vzpostavi močna mehanska povezava z zidovjem (kot v študijah [Gupta, 2024; Tripathy, 2019]). [Krtinić, 2026b]

Za simulacijo nelinearnega obnašanja betona ter zidakov je bil uporabljen materialni model *Concrete Damaged Plasti-*



**Slika 5.** Detajlni 3D numerični mikromodel v programu Abaqus: a) mreža KE, b) obtežba in c) kontakti

uporabo funkcije »Embedded Constraint«, ki zagotavlja enake pomike armaturnih palic in okoliškega betona. AB navpične vezi so bile togo povezane (»Encastre«) s togo ploščo, ki je predstavljala temelj zidu.

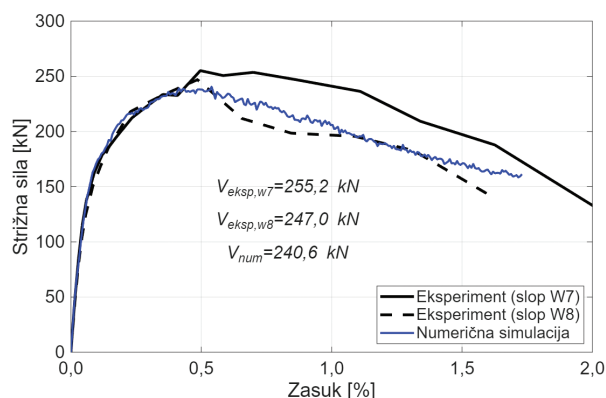
Obtežba je bila na model nanešana v treh korakih: (1) lastna teža preizkušanca, (2) dodatna konstantna tlačna obtežba v višini 0,63 MPa na zgornji površini AB horizontalne vezi ter (3) vsiljen vodoravni pomik na sredini višine horizontalne vezi. Pomik je bil definiran preko referenčne točke kot robni pogoj (U1 pomik) in je deloval v vodoravni smeri (slika 4b).

Hitrost nanašanja vertikalne in horizontalne obtežbe je bila določena na podlagi študije občutljivosti [Krtinić, 2026a], s katero smo iskali najkrajši čas brez vpliva dinamičnih učinkov ob

city (CDP) v programu Abaqus. Ta model se pogosto uporablja za opis obnašanja betona in drugih krhkih materialov pri monotoni ali ciklični obremenitvi ter upošteva plastičnost in degradacijo togosti (poškodovanost) materiala. Celovit opis uporabljenih enačb in parametrov za materialni model betona, zidakov in armature, vključno z definicijo krivulj poškodovanosti ter mehanskimi lastnostmi, je podrobno podan v študiji Krtinić in sod. [Krtinić, 2026b].

### 3.2 Validacija detajlnega 3D- mikromodela

Numerični 3D-mikromodel je bil validiran na globalni ravni (primerjava »pushover« krivulj) in na lokalni ravni (primerjava razvoja poškodb). Validacija je bila izvedena s primerjavo



**Slika 6.** Primerjava rezultatov numerične simulacije in eksperimentov

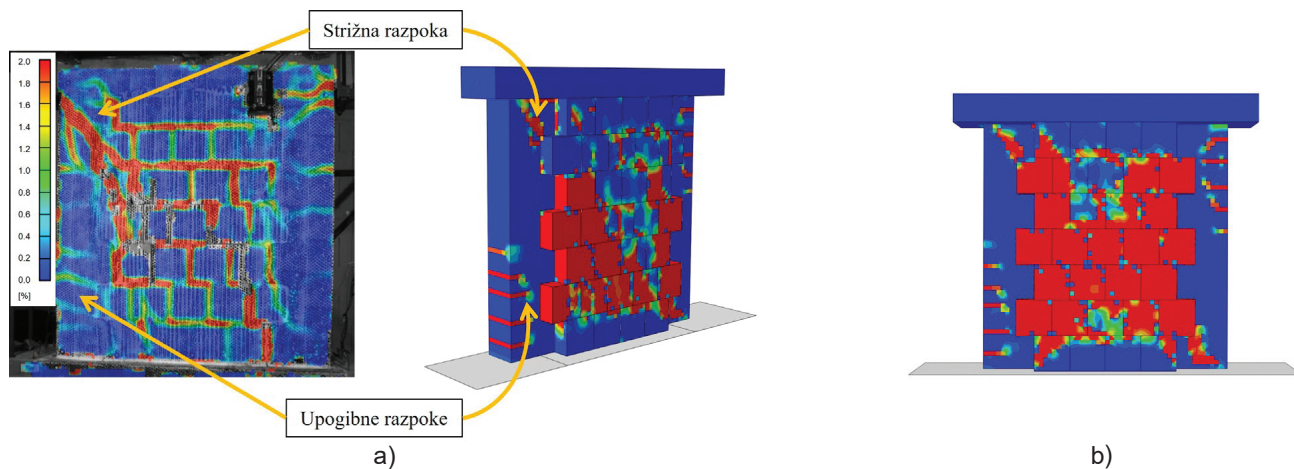
rezultatov numerične simulacije in eksperimentalnih preizkusov na dveh slopih v naravni velikosti (oznaki W7 in W8). Na sliki 5 je prikazana primerjava eksperimentalnih ovojnic histereznih zank ter numerične krivulje striznega odziva. Rezultati numeričnega modela (modra krivulja) se dobro ujemajo z eksperimentalnimi rezultati (črni krivulji) z vidika začetne togosti, največje nosilnosti kot tudi degradacije togosti. Ujemanje je še posebej dobro, če se upošteva povprečna ovojnica odziva obeh preizkušancev. Največja nosilnost numeričnega modela je bila dosežena pri zasuku 0,54 %, kar je zelo blizu eksperi-

mentalno izmerjeni vrednosti približno 0,5 %. Razlika v strizni nosilnosti med numeričnim modelom in eksperimentalnimi rezultati znaša 6 % za slop W7 in 3 % za slop W8, kar potrjuje dobro ujemanje globalnega odziva.

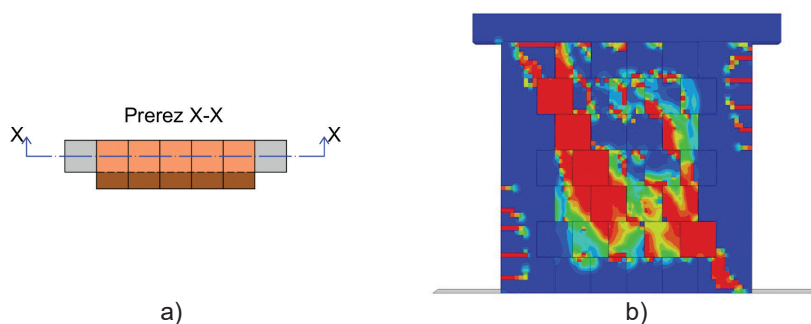
Na lokalni ravni je bila izvedena primerjava glavnih deformacijskih polj, izmerjenih z optičnim sistemom (DIC) med eksperimenti, ter poškodb, napovedanih z numeričnim modelom. Na sliki 6a in 6b je prikazana primerjava pri zasuku 1,0 %, iz katere je razvidno zelo dobro ujemanje poškodb. V AB navpičnih vezeh se pojavijo upogibne razpoke v spodnjem delu vezi ter razvoj diagonalne razpoke na zgornjem delu navpične vezi, kar vodi do njene strizne porušitve.

Kot je bilo že omenjeno, so se lokalne poškodbe v zidovju pojavile v obliki »odluščenja« plastil zidovja, tj. dela zidu, ki ni bil podprt z AB navpično vezjo. Te poškodbe so se najprej razvile v območju stika med zidovjem in AB vezmi, nato pa so se postopno širile proti sredini zidu. Numerični model je ta mehanizem uspešno zajel ter pravilno opisal njegovo napredovanje pri zasuku približno 1,3 % (glej sliko 3c), kar je razvidno iz porazdelitve poškodb na sliki 6c.

Na sliki 7 je prikazana porazdelitev poškodb v prerezu X-X pri zasuku 1,3 %. Razvidno je, da so poškodbe koncentrirane v krajnih delih zidu (ob stikih z AB vezmi), medtem ko je notranji del panela manj poškodovan.



**Slika 7.** Primerjava poškodb v zidnih vezeh med eksperimentom in simulacijo pri 1,0 % zasuka in b) poškodbe pri 1,3 % zasuka iz numerične simulacije



**Slika 8.** a) Obravnavani prerez X-X in b) poškodbe iz numerične simulacije v prerezu X-X pri 1,3 % zasuka

Primerjava numeričnih in eksperimentalnih rezultatov kaže, da razviti detajlni 3D-mikromodel v programu Abaqus zanesljivo opiše tako globalni odziv (začetna togost, največja nosilnost in degradacija togosti) kot lokalne mehanizme poškodb (porazdelitev poškodb in »odlučenje« plasti zidovja). Tako validirani 3D-mikromodel predstavlja referenčni model za nadaljne analize.

## 4 2D-MAKROMODELI: OPIS IN VALIDACIJA MODELA

### 4.1 Modeli z nadomestnimi diagonalami

V tem poglavju obravnavamo uporabo klasičnih makromodelov z eno ali več nadomestnimi diagonalami (ND) [Torque, 2015] za simulacijo globalnega potresnega odziva zidov iz PZ. Model z ND (angl. equivalent strut model, ESM), ki je bil prvotno razvit za okvirne AB konstrukcije z zidanimi polnili, se lahko z ustreznimi prilagoditvami učinkovito uporablja tudi za povezano zidovje, kjer se razvijajo podobni mehanizmi prenosa obtežbe med zidovjem in AB vezmi. Takšen pristop je posebej primeren za obravnavani sistem PZ z razmeroma togimi in močnimi vezmi (25 × 25 cm). Zaradi svoje preprostosti in

računske učinkovitosti je takšen pristop primeren tudi za praktično inženirsko uporabo.

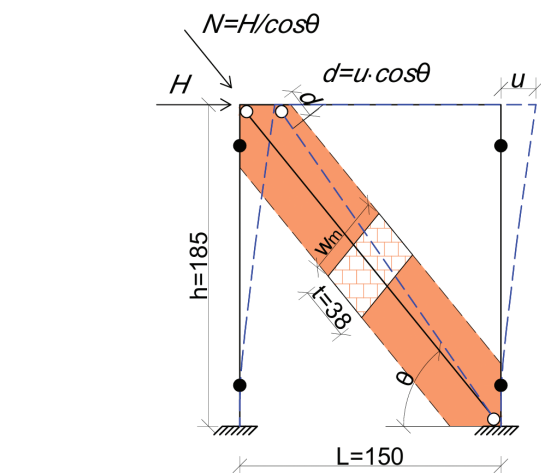
Numerični model slopa tako sestavljajo AB navpične in vodoravne vezi ter ND za simuliranje odziva zidovja (slika 9). Geometrija ND sledi geometriji nadomestne diagonale zidovja, medtem ko je njena efektivna širina odvisna od izbranega konstitutivnega modela in ustreznih enačb iz literature. Model z eno ND je za posamezen zidni slop prikazan na sliki 8, kjer je  $L$  dolžina zidu med osema navpičnimi vezmi,  $L_m$  dolžina zidovja med vezema,  $h$  višina do težišča vodoravne vezi,  $h_m$  višina zidovja,  $w_m$  širina ND,  $d_m$  dolžina ND,  $t_m$  debelina zidovja in  $\theta$  naklon ND.

Čeprav modeli z eno ND zadovoljivo opisujejo globalni odziv PZ, ne omogočajo zajema lokalnih mehanizmov interakcije niti zajema notranjih sil v AB navpičnih vezeh. Za odpravo teh pomanjkljivosti je bil uporabljen makromodel z več ND. V tej raziskavi uporabljeni model temelji na makroelementu, ki ga je predlagal Torrisi [Torrisi, 2012a] in implementiral v programsko okolje OpenSeesPy (kot element *MasonPan12*) skupaj s Crisafullijem [Torrisi, 2017]. V tej formulaciji je zidni panel predstavljen s tremi ND v vsaki smeri, kot je to prikazano na sliki 9a. Ena glavnih prednosti takšnega pristopa je, da omogoča hkratno napoved globalnega odziva (togost in nosilnost) ter porazdelitve notranjih sil v AB vezeh [Torrisi, 2012b, 2012a].

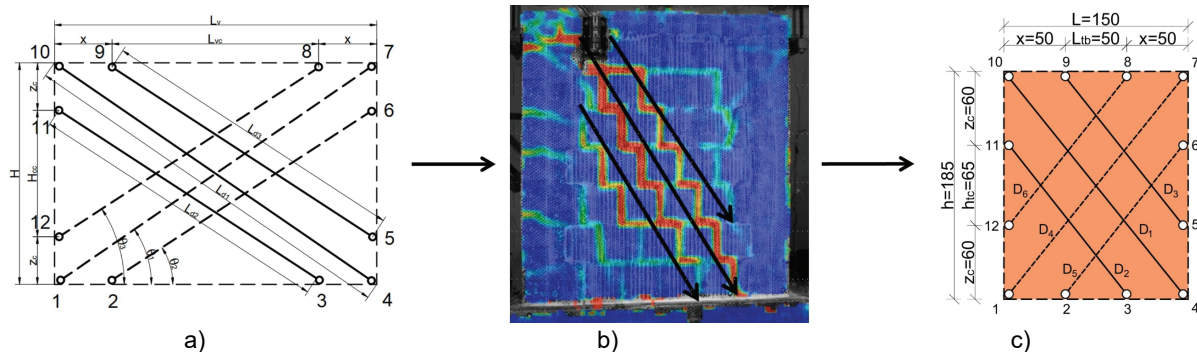
V skladu s priporočili iz literature [Torrisi, 2012a] se (diagonalno) tlačeno območje razdeli med glavno ND (označeno z D1 na sliki 10), ki prevzema polovico celotne efektivne površine, preostali del pa je enakomerno porazdeljen med stranski ND (označeni z D2 in D3). Efektivna širina diagonal je določena na podlagi enačbe po Decaniniju s sod. [Decanini, 2004], medtem ko sta dolžini stika med zidnim makroelementom in AB vezmi ( $x = 50$  cm ter  $z_c = 60$  cm) določeni na podlagi rezultatov pridobljenih z optičnimi meritvami (slika 10c). V formulaciji makromodela s tremi ND je nelinearno obnašanje ND opisano s histereznim modelom po Crisafulliju [Crisafulli, 1997], ki upošteva degradacijo togosti, zmanjšanje nosilnosti, »pinching« efekt ter degradacijo materiala pri cikličnih obremenitvah.

### 4.2 Opis numeričnega 2D-makromodela

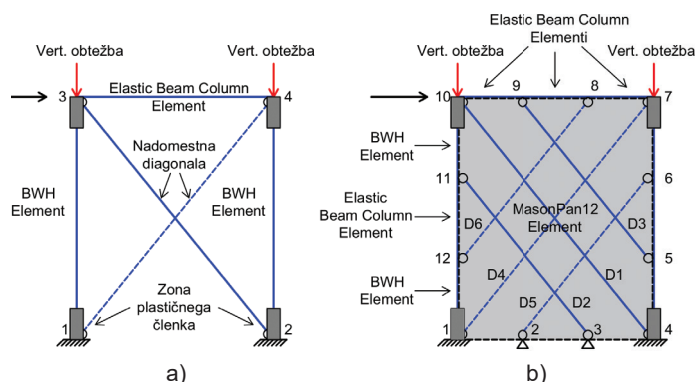
Numerični makromodel slopa z eno ali več ND je bil razvit v programskem okolju OpenSees [McKenna, 2000]. Geometrija



**Slika 9.** Makromodel zidnega slopa z vezmi z eno ND in osnovnimi količinami

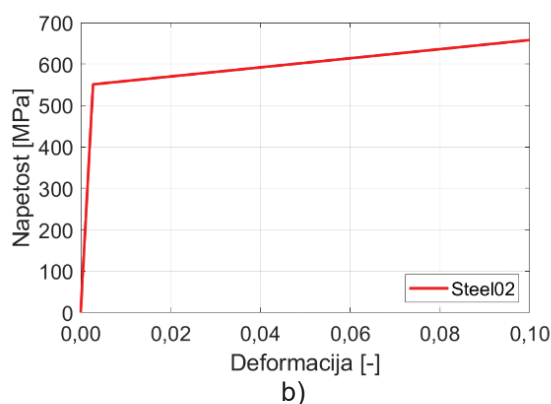
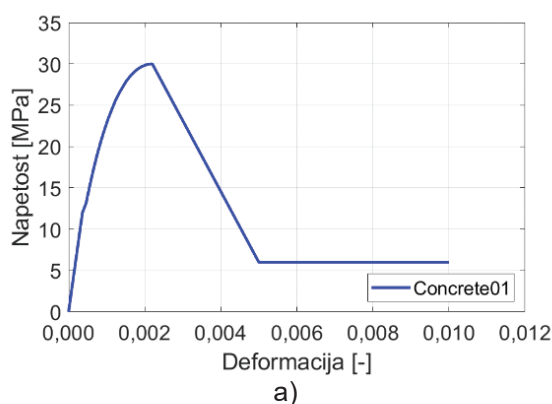


**Slika 10.** a) Geometrijska konfiguracija makroelementa, ki ga je predlagal Torrisi [Torrisi, 2012a]; b) polje glavnih deformacij, pridobljeno z optičnimi meritvami, ki prikazuje širjenje razpok – tlačnih diagonal, označenih s črnimi puščicami pri MS največje nosilnosti [Krtnić, 2026c]; c) geometrijska konfiguracija makroelementa za slope obravnavane v tej študiji (vse dimenzije so v cm)



**Slika 11.** Numerični 2D-makromodel: a) model z eno ND in b) model z več ND, z uporabljenimi elementi in obtežbami (privzeto iz [Krtinić, 2026c])

preizkušene sile je prikazana na sliki 2a, medtem ko sta uporabljena modela z eno in več ND prikazana na sliki 10a in 10b. V nadaljevanju so podane le ključne predpostavke uporabljenega pristopa modeliranja, medtem ko je podrobnejši opis podan v študiji [Krtinić, 2026c].



**Slika 12.** Enosni materialni odziv: a) betona in b) jekla

Nelinearno obnašanje ND je bilo določeno na podlagi izbranih konstitutivnih modelov, podrobno opisanih v študiji Krtinić in sod. [Krtinić, 2026c]. Za model z eno ND sta bila uporabljena modela Decaninija s sod. [Decanini, 2004] ter Liberatoreja s sod. [Liberatore, 2018], pri čemer je bil nelinearni odziv ND v obliki sila-deformacija v programu OpenSees [McKenna, 2000] modeliran z uporabo modela *Pinching4* [McKenna, 2000]. Za model z več ND pa je bil uporabljen histerezni model po Crisafulliju [Crisafulli, 1997].

Ker so opazovanja med testi pokazala očitno upogibno obnašanje vezi, kot je to prikazano na sliki 7a, smo AB navpične vezi modelirali z linijskimi elementi z lokaliziranimi plastičnimi členki na koncih (element *BeamWithHinges*, BWH, slika 11). Vodoravna AB vez pa je bila modelirana kot elastični nosilec (element *Elastic Beam Column*, slika 11), saj med eksperimenti v njej niso bile opažene poškodbe, hkrati pa so bili njeni pomiki omejeni z zidovjem na spodnji strani in jeklenim nosilecem na zgornji strani.

V uporabljenem numeričnem modelu je zidni panel modeliran bodisi z eno bodisi z več med seboj členkasto povezanimi ND, ki smo jih modelirali s paličnimi elementi (element *Truss*, slika 11). AB navpične vezi so bile na spodnjem robu tega vpete, medtem ko je bila vertikalna obtežba uvedena kot koncentrirana sila v višini 207 kN na posamezno AB vez, skladno z eksperimentom. Vodoravna obtežba je podana kot vsiljeni pomik na vrhu modela, pri čemer je bil uporabljen enak protokol obremenjevanja kot v eksperimentu. Za zagotovitev ustreznih robnih pogojev (dvojno vpeti robni pogoji) so bile v model vključene tudi rotacijske omejitve v vozliščih 3 in 4 pri modelu z eno ND ter vozliščih 7 do 10 pri modelu z več ND.

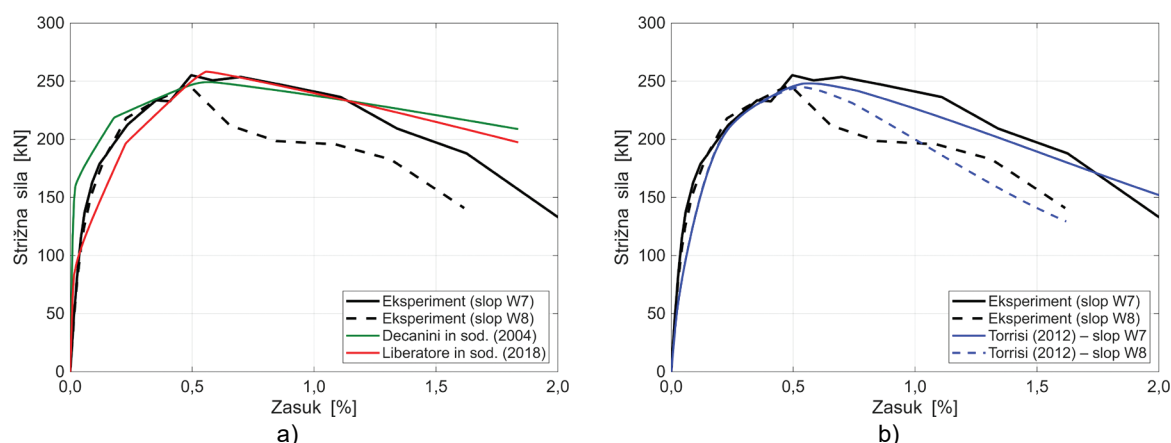
Prečni prerezi navpičnih vezi so bili modelirani z vlaknastimi prerezi (»fiber sections«), ki omogočajo ločeno upoštevanje betona in armature. Beton je bil modeliran z materialnim modelom *Concrete01* brez natezne trdnosti [McKenna, 2000], medtem ko so bile armaturne palice opisane z modelom *Steel02* s stopnjo utrjevanja 0,55 % [McKenna, 2000]. Zaradi relativno velikega razmika stremen (približno 20 cm) so bili učinki objetja zanemarljivi, prerez pa je bil obravnavan kot neobjet. Predpostavljena materialna odziva betona in jekla v obliki diagrama napetost-deformacija sta prikazana na sliki 12a in 12b.

### 4.3 Validacija numeričnega makromodela pri monotoni obtežbi

Validacija numeričnih 2D-makromodelov z ND je bila izvedena v dveh fazah. Najprej je bil ocenjen monotoni odziv s primerjavo numeričnih krivulj z eksperimentalnimi ovojnicami za oba preizkušena slopa. V drugem koraku pa so bile izvedene ciklične analize z namenom ovrednotenja sposobnosti numeričnih modelov za reprodukcijo ključnih histereznih značilnosti, kot so degradacija togosti, »pinching« efekt in degradacija nosilnosti. Pri tem so bili analizirani tako modeli z eno kot z več ND.

Na sliki 13a je prikazana primerjava med eksperimentalnimi ovojnicami in krivuljami odziva numeričnih modelov z eno ND, pri katerih sta bila uporabljena dva različna konstitutivna modela za opis nelinearnega obnašanja ND.

Oba modela z eno ND [Decanini, 2004] [Liberatore, 2018] izkazujeta dobro ujemanje z odzivom slopa W7, pri čemer



**Slika 13.** Primerjava eksperimentalnih ovojnic in krivulj sila-zasuk z uporabo modelov z različnimi konstitutivnimi modeli: a) modela z eno ND in b) modela z več ND

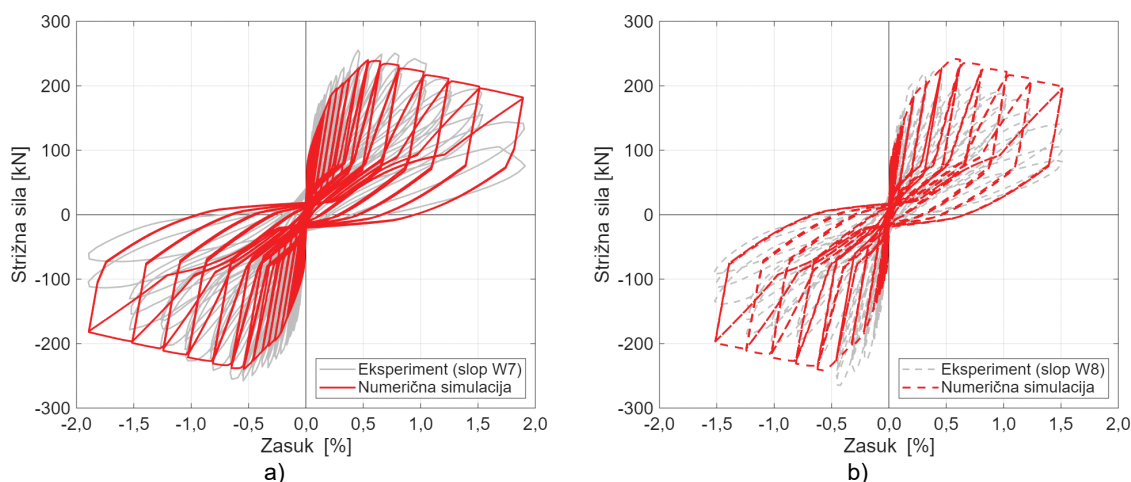
je nekoliko precenjena začetna togost, manjše odstopanje od prvih poškodb do največje nosilnosti in razmeroma dobro ujemanje po doseženi največji nosilnosti. Ujemanje obeh modelov z odzivom slopa W8 je slabše po doseženi največji nosilnosti. Model Liberatoreja s sod. [Liberatore, 2018] doseže največjo nosilnost pri zasuku približno 0,56 %, kar se dobro ujema z eksperimentalno vrednostjo okoli 0,5 %.

V primeru makromodelov z več ND po Torrisiju [Torrisi, 2012a] smo naredili ločena modela za slopa W7 in W8. Razlog za ločena modela je, da smo ju v nadaljevanju uporabili za simulacijo histereznega (cikličnega) odziva, ki zahteva več in bolj natančno določitev parametrov. Materialni parametri so se zato za zidova malo razlikovali, kot je to podrobneje predstavljeno v raziskavi [Krtinić, 2026c]. Oba modela (modri krivulji na sliki 13b) kažeta zelo dobro ujemanje z eksperimentalnimi ovojnicami za oba preizkušena slopa W7 in W8. Razlike v največjih strižnih silah so manjše od 3 %, pri čemer je tudi obnašanje po doseženi največji nosilnosti zadovoljivo simulirano.

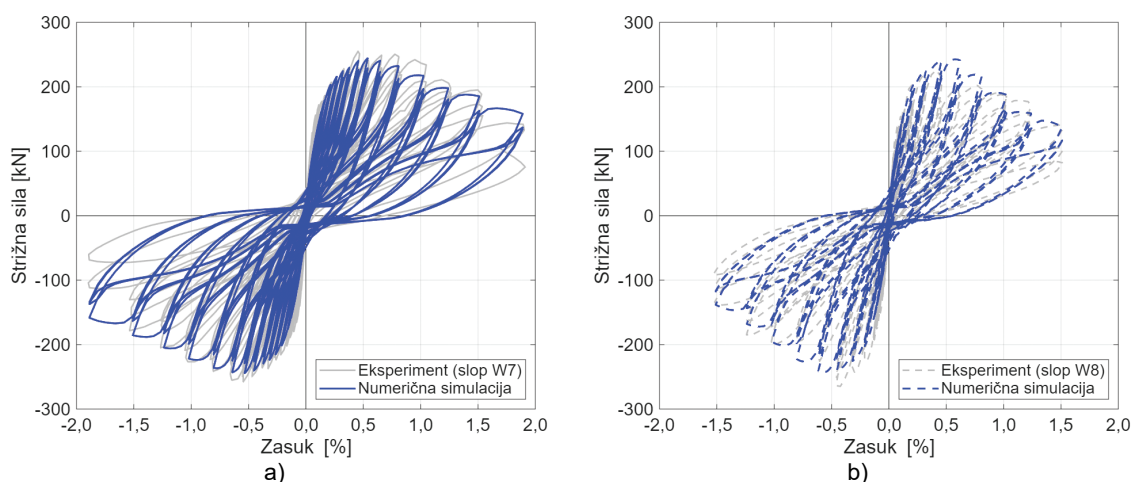
#### 4.4 Validacija numeričnega makromodela pri ciklični obtežbi

Histerezni odziv numeričnih 2D-makromodelov z ND je bil najprej ovrednoten z uporabo modela z eno ND, pri katerem je bil uporabljen konstitutivni model po Liberatoreju s sod. [Liberatore, 2018]. Kot je prikazano na sliki 14, numerični model razmeroma dobro reproducira splošno obliko histereznih zank, vključno z največjo nosilnostjo in togostjo pri razbremenjevanju.

Za slop W7 (slika 14a) se največje dosežene strižne sile razlikujejo za približno 6–7 %, medtem ko je zasuk pri doseženi največji nosilnosti precenjen za približno 19 % in 1 % v pozitivni oz. negativni smeri obremenjevanja. Pri slopu W8 (slika 14b) so razlike nekoliko večje, saj razlike v največjih strižnih silah dosežejo do 10 %, pripadajoči zasuki pa so precenjeni za približno 35 % v obeh smereh. Numerični odziv izkazuje izrazitejši »pinching« efekt ter hitrejšo degradacijo togosti v primerjavi z eksperimentalnimi krivuljami.



**Slika 14.** Primerjava eksperimentalnega in numeričnega histereznega odziva z uporabo modela z eno ND po Liberatoreju s sod. [Liberatore, 2018]: a) slop W7 and b) slop W8



**Slika 15.** Primerjava eksperimentalnega in numeričnega histereznega odziva z uporabo modela z več ND po Torrisiju [Torrisi, 2012a]: a) slop W7 and b) slop W8

Za dodatno validacijo modela z več ND pri ciklični obtežbi so bili numerični rezultati primerjani z eksperimentalnimi histereznimi krivuljami, kot je to prikazano na sliki 15. Za slop W7 (slika 15a) je ujemanje med odzivi zelo dobro, pri čemer razlike v največjih strižnih silah znašajo približno 4–5 %, pripadajoči zasuki pa so precenjeni za približno 19 % in 2 % v pozitivni oz. negativni smeri. Za slop W8 (slika 15b) je doseženo podobno dobro ujemanje glede največjih strižnih sil v obe smeri obremenjevanja (+7 % in –8 %), medtem ko so zasuki pri največji nosilnosti precenjeni za približno 38 % in 33,5 %.

Kljub tem razlikam model z več ND zelo dobro reproducira glavne histerezne značilnosti odziva, kot so »pinching« efekt, togost pri razbremenjevanju in ponovnem obremenjevanju ter degradacija nosilnosti. Doseženo je tudi bistveno boljše ujemanje oblik numerično in eksperimentalno določenih histereznih krivulj kot pri modelih z eno ND, zlasti pri večjih zasukih (primerjava slik 13 in 14).

## 5 NOTRANJE SILE V AB NAVPIČNIH VEZEH – PRIMERJAVA NUMERIČNIH REZULTATOV

Kljub temu da je vpliv AB navpičnih vezi na potresni odziv povezanega zidovja dobro poznan na podlagi opazovanj po preteklih močnih potresih in iz eksperimentalnih raziskav, so notranje sile v teh elementih v numeričnih analizah redko ovrednotene ali eksplicitno upoštevane pri projektiranju. Glede na njihovo aktivno vlogo pri prevzemu horizontalnih sil v obravnavanem konstrukcijskem sistemu je natančna ocena notranjih sil (osnih sil, strižnih sil in upogibnih momentov) pomembna za razumevanje sistema in morebitno izboljšanje postopkov dimenzioniranja.

V tej študiji so notranje sile, pridobljene iz predhodno validiranega detajlnega 3D-mikromodela iz KE, primerjane z rezultati validiranih 2D-makromodelov z nadomestnimi diagonalami. Primerjava je izvedena v dveh značilnih fazah potresnega odziva: (1) pri največji nosilnosti  $F_{\max}$  in (2) pri padcu nosilnosti za 20 %, tj. pri mejni nosilnosti  $0,8 F_{\max}$ , z namenom ovrednotenja sposobnosti posameznih numeričnih modelov za oceno notranjih sil vzdolž višine AB navpičnih vezi.

### 5.1 Način določanja notranjih sil v AB navpičnih vezeh

Obravnavani numerični modeli se razlikujejo po stopnji kompleksnosti, zato so bili uporabljeni različni pristopi za določanje notranjih sil vzdolž višine AB navpičnih vezi.

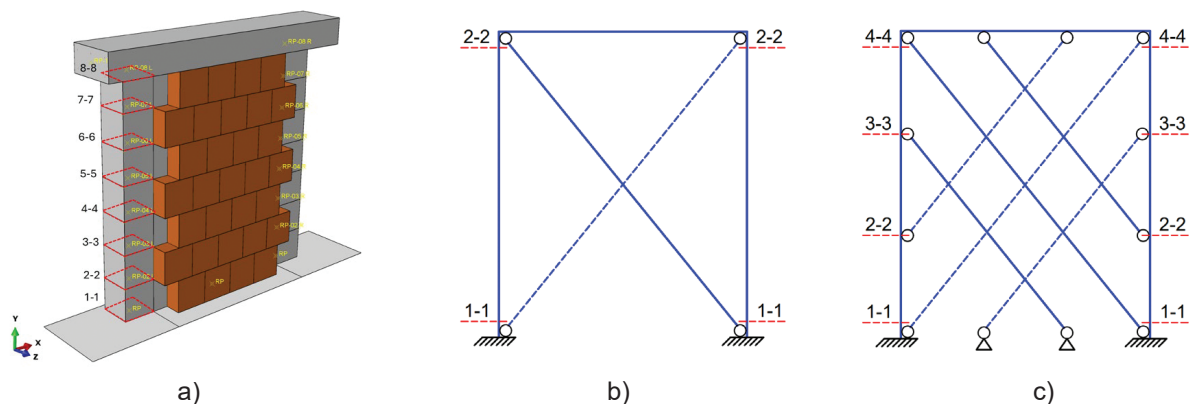
V 3D-mikromodelu iz KE so bile notranje sile [Simulia, Abaqus/CAE, 2023] izračunane v osmih vnaprej definiranih prečnih prerezih vzdolž višine vezi (označenih z rdečimi pravokotniki na sliki 16a). Takšen pristop omogoča zajem porazdelitve osnih sil, strižnih sil in upogibnih momentov ter identifikacijo morebitnih koncentracij napetosti, povezanih z interakcijo med zidovjem in AB vezmi. Poleg tega je bilo vpetje numeričnega modela razdeljeno na tri segmente, ki ustrezajo območju zidovja in obeh AB navpičnih vezi, kar omogoča neposredno ovrednotenje porazdelitve strižnih sil med posameznimi elementi konstrukcijskega sistema.

V 2D-makromodelih z ND so bile notranje sile določene na koncih linijskih elementov, ki predstavljajo AB navpične vezi. Pri modelu z eno ND so bile sile ovrednotene v dveh točkah vzdolž višine vezi (slika 16b), medtem ko so bile pri modelu z več ND določene v štirih točkah vzdolž višine vezi (slika 16c).

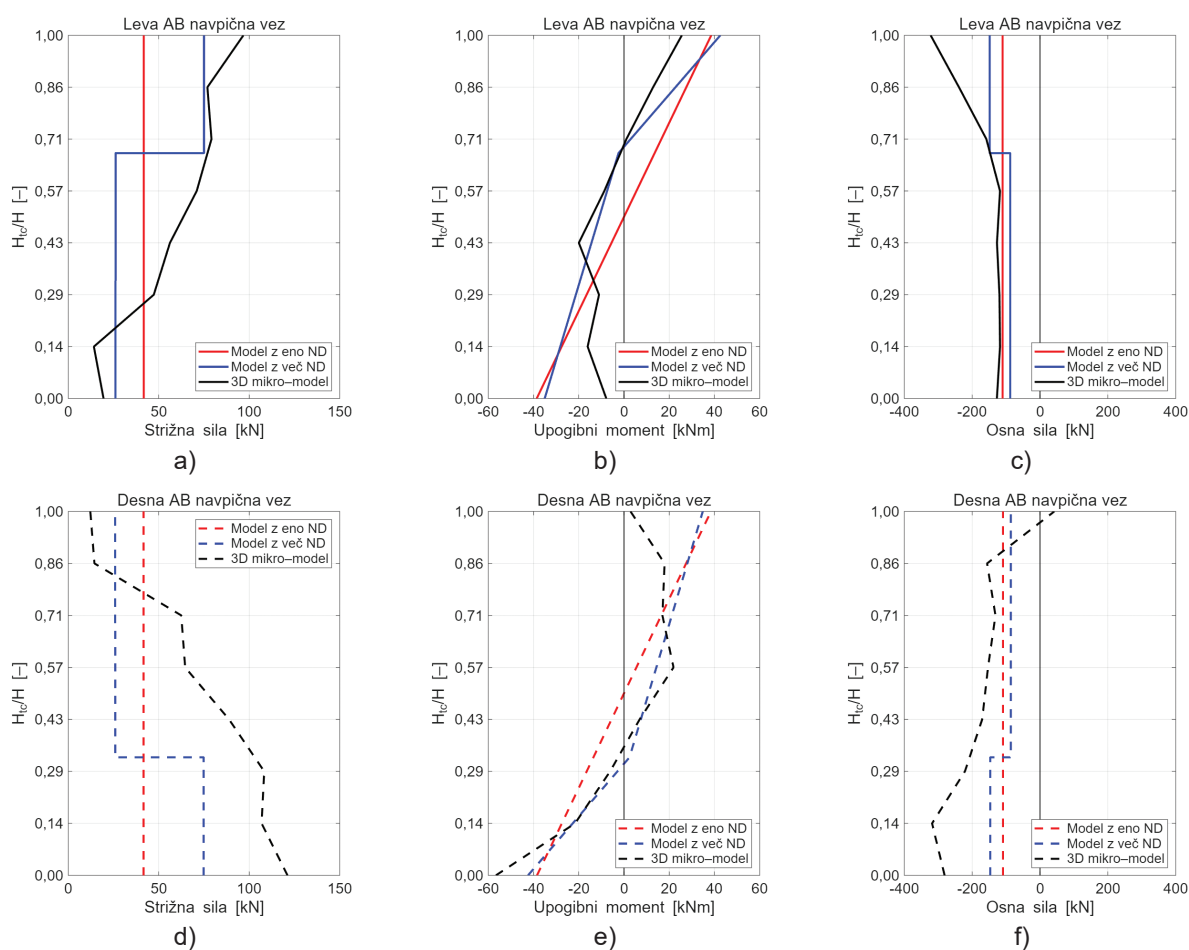
### 5.2 Porazdelitev notranjih sil pri največji nosilnosti $F_{\max}$

Na sliki 17 je prikazana porazdelitev notranjih sil vzdolž višine AB navpičnih vezi slopa W7 pri največji nosilnosti  $F_{\max}$ . Rezultati modela z eno ND kažejo konstantne oziroma linearne poteke notranjih sil vzdolž višine vezi. Model z več ND in tudi 3D-mikromodel zajameta bistveno bolj realistično porazdelitev notranjih sil. Model z več ND kaže stopničaste spremembe notranjih sil na mestih stikov med ND in navpičnimi vezmi, kar odraža lokaliziran prenos sil iz zidovja, medtem ko 3D-mikromodel podaja zvezne in gladke porazdelitve z manjšimi odstopanji v bližini spodnjega in zgornjega dela vezi.

Porazdelitve strižnih sil (slika 17a, d) kažejo izrazite razlike med posameznimi modeli. 3D-mikromodel napove največje strižne



**Slika 16.** Točke vrednotenja notranjih sil v različnih numeričnih modelih: a) 3D-mikromodel iz KE, b) 2D-makromodel z eno ND in c) 2D-makromodel z več ND



**Slika 17.** Porazdelitev notranjih sil v slopu W7 (strižna sila, upogibni moment in osna sila) pri največji nosilnosti  $F_{max}$  vzdolž višine: a)–c) leve navpične vezi; in d)–f) desne navpične vezi (prilagojeno iz [Krtinić, 2026c])

sile približno 97 kN in 121 kN v levi oziroma desni vezi. Model z eno ND te vrednosti bistveno podceni (napove 42 kN v obeh vezeh), medtem ko model z več ND izboljša napoved na 75 kN (v obeh vezeh), kar kaže na bolj realistično zajemanje lokalnega prenosa strižnih sil iz zidovja v vez. Podobni trendi so opazni tudi pri desni vezi, kar dodatno potrjuje izboljšano napovedno sposobnost modela z več ND.

Porazdelitve upogibnih momentov (slika 17b, e) so v obeh makromodelih zajete z zadovoljivo natančnostjo in pravilno napovedo maksimalne vrednosti na vrhu in dnu vezi. Kljub temu so opazna odstopanja v absolutnih vrednostih. Na vrhu leve vezi 3D-mikromodel napove upogibni moment približno 26 kNm, medtem ko model z več ND poda vrednost okoli 43 kNm, model z eno ND pa približno 38 kNm. Oba makromo-

dela praviloma prečenjujeta momente v kritičnih območjih, kar je najbolj očitno na dnu leve vezi in vrhu desne vezi (okoli 35 kNm). Vrednosti, ki jih napove 3D-mikromodel (5–8 kNm), so bistveno nižje.

Porazdelitve osnih sil (slika 17c, f) kažejo, da sta obe vezi v mejnem stanju največje nosilnosti tlačno obremenjeni zaradi dvojno vpetih robnih pogojev, razen čisto na vrhu desne vezi, kjer 3D-mikromodel napove nateg. Rezultati 3D-mikromodela kažejo še izrazito variacijo vzdolž višine: v levi AB navpični vezi tlačna sila narašča od približno 120 kN na sredini višine do skoraj 320 kN na vrhu. Nasprotno pa desna vez izkazuje visoko tlačno silo pri spodnjem delu vezi (okoli 280 kN), ki se postopno zmanjšuje proti vrhu, kjer se pojavijo natezne sile velikosti približno 40 kN. Medtem ko makromodeli podajo zadovoljivo oceno do sredine višine, jim ne uspe zajeti te prerazporeditve sil v zgornjem delu vezi.

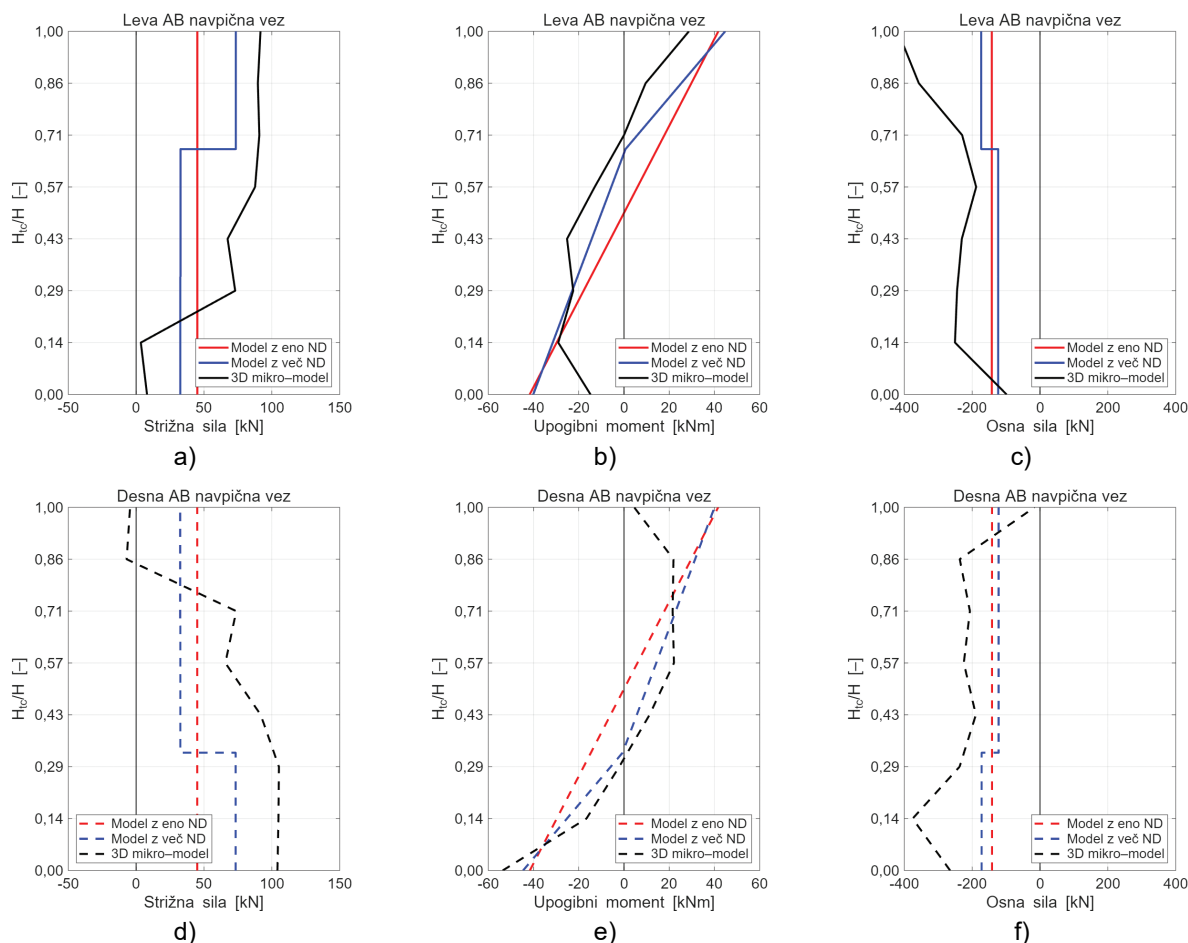
### 5.3 Porazdelitev notranjih sil pri padcu nosilnosti na $0,8 F_{max}$

Na sliki 18 je prikazana porazdelitev notranjih sil vzdolž višine AB navpičnih vezi pri padcu nosilnosti slopa za 20 % z največje nosilnosti. V primerjavi s stanjem največje nosilnosti ( $F_{max}$ ) 3D-mikroumodel izkazuje bolj neenakomerne in lokalno spre-

menljive poteke notranjih sil, kar je posledica razpokanosti in degradacije togosti v postkritičnem območju. Nasprotno pa makromodeli ohranjajo poenostavljene porazdelitve notranjih sil vzdolž višine AB vezi.

Porazdelitve strižnih sil (slika 18a, d) kažejo, da 3D-mikromodel napove največje vrednosti približno 90 kN na vrhu leve navpične vezi in približno 105 kN na dnu desne navpične vezi. Model z eno ND te vrednosti ponovno bistveno podcenjuje (45 kN) in podaja konstantno porazdelitev, medtem ko model z več ND izboljša napoved (75 kN), kar ustreza podcenitvi velikosti za 20–30 %. Čeprav stopničasta porazdelitev v modelu z več ND bolje prikaže lokalni prenos strižnih sil iz zidovja v navpične vezi, ostajajo razlike glede na rezultate 3D-mikromodela še vedno opazne.

Porazdelitve upogibnih momentov (slika 18b, e) so v spodnjem delu vezi na splošno dobro zajete z vsemi numeričnimi modeli. Za levo navpično vez modeli napovejo vrednosti med 35 in 40 kNm, pri čemer 3D-mikromodel kaže manjša lokalna odstopanja med posameznimi prerezi (prerezi 1-1 in 2-2 v bližini vpetja). Podobno so pri desni navpični vezi momenti na dnu vezi od 45 do 50 kNm. Večja odstopanja se pojavijo proti vrhu navpične vezi, zlasti pri desni navpični vezi, kjer 3D-mikromodel zaradi interakcije z zidovjem pokaže izrazito zmanjšanje momentov na skoraj nič, medtem ko oba makromodela te vrednosti bistveno prečenjujeta.



**Slika 18.** Porazdelitev notranjih sil v slopu W7 (strižna sila, upogibni moment in osna sila) pri mejni nosilnosti ( $0,8 F_{max}$ ) vzdolž višine: a)–c) leve navpične vezi; in d)–f) desne navpične vezi (prilagojeno iz [Krtinić, 2026c])

Porazdelitve osnih sil (slika 18c, f) dodatno poudarjajo omejitve 2D-makromodelov. Najprej 3D-mikromodel pokaže izrazito naraščanje tlačne sile v levi navpični vezi, od približno 200 kN na sredini višine do skoraj 400 kN na vrhu, medtem ko se pri desni navpični vezi tlačna sila proti vrhu zmanjšuje. Model z eno ND kaže konstantno porazdelitev z razmeroma slabim ujemanjem (okoli 140 kN), medtem ko model z več ND izboljša napoved (okoli 175 kN), vendar še vedno podcenjuje tlačne sile v navpični vezi. Ti rezultati kažejo na večjo kompleksnost prerazporeditve notranjih sil v postkritičnem območju, ki je 2D-makromodeli z ND ne morejo v celoti zajeti.

## 6 SKLEP

V študiji je predstavljena celovita analiza potresnega odziva povezanega zidovja, zgrajenega iz perforiranih opečnih zidakov, zlepljenih s PU-lepilom. Najprej so povzeti rezultati eksperimentalnih preskusov dveh slopov v naravni velikosti, na podlagi katerih je bil razvit in validiran detajlni 3D-mikromodel iz končnih elementov v programu Abaqus/Explicit. Primerjava numeričnih in eksperimentalnih rezultatov je pokazala dobro ujemanje globalnega odziva glede začetne togosti, največje nosilnosti in deformacijskih kapacitet, pri čemer so bila odstopanja manjša od 6 %. Nekoliko večje odstopanje je bilo le v območju po doseženi največji nosilnosti. Model je uspešno zajel tudi lokalne mehanizme poškodb, vključno z značilnim odlučenjem plasti zidovja zaradi interakcije z AB vezmi. Validiran 3D-mikromodel je bil zato uporabljen kot referenčni model za oceno natančnosti notranjih sil vzdolž višine AB navpičnih vezí, dobljenih z uporabo 2D-makromodelov z nadomestnimi diagonalami.

2D-makromodeli z nadomestnimi diagonalami so bili validirani pri monotoni in ciklični obtežbi. Rezultati kažejo, da modeli z eno ND omogočajo zadovoljivo napoved globalnega odziva, pri čemer model ND po Liberatoreju s sod. [Liberatore, 2018] izkazuje najboljše ujemanje z eksperimentalnimi rezultati. Kljub temu se pri ciklični obtežbi pojavijo pomembna odstopanja, kot so izrazitejši »pinching« in precenjeni zasuki. To kaže na omejitve enostavnih 2D-modelov pri zajemu interakcije med vezjo in zidnim panelom. Nasprotno model z več ND izkazuje bistveno izboljšano napoved, saj bolje reproducira ovojnice vodovna sila-pomik in histerezni odziv, pri čemer odstopanja največjih strižnih sil ostajajo v območju 4–8 %, pri monotoni obtežbi pa dosegajo tudi manj kot 3 %.

Primerjava porazdelitev notranjih sil vzdolž višine AB navpičnih vezí pokaže, da model z več ND bistveno bolje zajame lokalne učinke prenosa sil iz zidovja, zlasti za strižne sile in upogibne momente, medtem ko model z eno ND te vplive sistematično podcenjuje. Kljub temu tudi model z več ND ne zajame v celoti prerazporeditve osnih sil, kar kaže na kompleksnost obnašanja v postkritičnem območju. Ne glede na to pa zaradi bistveno manjše računske zahtevnosti (par minut v primerjavi z večurnimi analizami 3D-mikromodela) predstavlja model z več ND zanimivo in obetajoče orodje za inženirsko prakso, zlasti za oceno globalnega odziva in notranjih sil v AB navpičnih vezeh.

Poudariti je treba, da ugotovitve, predstavljene v tej študiji, veljajo za obravnavane slope in temeljijo na numeričnih analizah. Nadaljnje delo bo usmerjeno v izboljšanje 2D-makromo-

delov z več ND, predvsem z vidika natančnejšega zajema prerazporeditve osnih sil v AB navpičnih vezeh, ter uporabo teh modelov za projektiranje.

## 7 ZAHVALA

Raziskave so bile opravljene v okviru programske skupine Potresno inženirstvo (P2-0185), ki jo financira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije. Za finančno podporo se iskreno zahvaljujemo.

## 8 LITERATURA

Astroza, M., Moroni, O., Brzev, S., Tanner, J., Seismic Performance of Engineered Masonry Buildings in the 2010 Maule Earthquake, *Earthquake Spectra*, 28(1\_suppl1), 385–406, <https://doi.org/10.1193/1.4000040>, 2012.

Brzev, S., Mitra, K., Earthquake-resistant confined masonry construction. National Information Centre of Earthquake Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur, 2018.

Crisafulli, F. J., Seismic Behaviour of Reinforced Concrete Structures with Masonry Infills. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1997.

Decanini, L., Mollaioli, F., Mura, A., Saragoni, R., Seismic Performance of Masonry Infilled R/C Frames, In *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, BC, Canada, 2004.

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, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105528>, 2023.

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, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109696>, 2024.

Gupta, A., Singh, A. K., Singhal, V., Fayaz Ahmed, K. K., Numerical simulation of interaction properties at wall-to-tie-column interface for confined masonry walls, *Construction and Building Materials*, 411, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134139>, 2024.

Krtinić, N., (a), The influence of tie-columns on seismic response of confined masonry walls (PhD thesis). Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Ljubljana, Slovenia, 2026.

Krtinić, N., Marinković, M., Gams, M., Finite Element Method Analysis of Seismic Response of Confined Masonry Walls with Openings Built Using Polyurethane Glue, *Buildings*, 15(3), <https://doi.org/10.3390/buildings15030424>, 2025.

Krtinić, N., Marinković, M., Gams, M., (b), Numerical analysis of the seismic response of a confined masonry system, *Engineering Structures*, 353, 122288, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2026.122288>, 2026.

Krtinić, N., Marinković, M., Gams, M., (c), Numerical Macro-and Micro-Modeling of Confined Masonry Walls with Emphasis on Seismic Forces in Tie-Columns, *Journal of Earthquake Engineering*, <https://doi.org/10.1080/13632469.2026.2625130>, 2026.

Liberatore, L., Noto, F., Mollaioli, F., Franchin, P., In-plane response of masonry infill walls: Comprehensive experimentally-based equivalent strut model for deterministic and probabilistic analysis, *Engineering Structures*, 167, 533–548, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.057>, 2018.

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, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111098>, 2020.

McKenna, F., Fenves, G. F., Scott, M. H., Jeremić, B., Open system for earthquake engineering simulation (OpenSees). Berkeley, CA, USA: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 2000.

Medeiros, P., Vasconcelos, G., Lourenço, P. B., Gouveia, J., Numerical modelling of non-confined and confined masonry walls, *Construction and Building Materials*, 41, 968–976, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.013>, 2013.

Meli, R., Brzev, S., Astroza, M., Boen, T., Crisafulli, F., Dai, J., ... Yamin, L., Seismic design guide for low-rise confined masonry buildings, *A Project of the World Housing Encyclopedia*, EERI & IAEE. Oakland, California, USA: Earthquake Engineering Research Institute (EERI), 2011.

Perez Gavilan, J. J., Flores, L. E., Alcocer, S. M., An experimental study of confined masonry walls with varying aspect ratios, *Earthquake Spectra*, 31(2), 945–968, <https://doi.org/10.1193/090712EQS284M>, 2015.

Simulia, Abaqus/CAE. Johnston, RI, USA: Dassault Systemes Simulia Corporation, 2023.

SIST EN 1996-1-1:2006, Evrokod 6: Projektiranje zidanih konstrukcij – 1.del: Splošna pravila za armirano in nearmirano zidovje. Ljubljana: Slovenski inštitut za standardizacijo, 2006.

SIST EN 1998-1:2005, Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 1.del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe. Ljubljana: Slovenski inštitut za standardizacijo, 2005.

SIST EN 1998-1:2005/A101:2009, Evrokod 8 - Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij - 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe – Nacionalni dodatek. Ljubljana, Slovenija: Slovenski inštitut za standardizacijo, 2009.

Stavridis, A., Shing, P. B., Finite Element Modeling of Non-linear Behavior of Masonry-Infilled RC Frames, *Journal of Structural Engineering*, 62, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000116](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000116), 2009.

Tarque, N., Candido, L., Camata, G., Spacone, E., Masonry infilled frame structures: state-of-the-art review of numerical modelling, *Earthquakes and Structures*, 8(3), 733–759, <https://doi.org/10.12989/eas.2015.8.3.733>, 2015.

Tomažević, M., *Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings*, (A. S. Elnashai & P. J. Dowling, Eds.) (Vol. Volume 1). London: Imperial College Press, 1999.

Tomažević, M., *Potresno odporne zidane stavbe*. Ljubljana: ehni, 2009.

Torrisi, G. S., (a), *Diseño y Análisis de Estructuras de Hormigón Armado y Mampostería (Analysis and Design of Reinforced Concrete and Masonry Structures)* (PhD Thesis). Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina, Mendoza, Argentina, 2012.

Torrisi, G. S., Crisafulli, F. J., Computational Implementation of an Improved Masonry Panel Element, In *Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering*. Santiago, Chile, 2017.

Torrisi, G. S., Crisafulli, F. J., Pavese, A., (b), An Innovative Model for the In-Plane Nonlinear Analysis of Confined Masonry and Infilled Frame Structures, In *Proceedings of the Fifteenth World Conference on Earthquake Engineering*. Lisbon, Portugal, 2012.

Tripathy, D., Singhal, V., Estimation of in-plane shear capacity of confined masonry walls with and without openings using strut-and-tie analysis, *Engineering Structures*, 188, 290–304, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.002>, 2019.

Yacila, J., Camata, G., Salsavilca, J., Tarque, N., Pushover analysis of confined masonry walls using a 3D macro-modelling approach, *Engineering Structures*, 201, 109731, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109731>, 2019.