

Primljen / Received: 28.10.2023.

Ispravljen / Corrected: 21.6.2024.

Prihvaćen / Accepted: 27.8.2024.

Dostupno online / Available online: 10.9.2024.

## Numeričko modeliranje reprofiliranja sljubnica ziđa: analiza konačnih elemenata temeljena na eksperimentalnim istraživanjima

### Autori:



Prof.dr.sc. **Sergey Churilov**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Sv. Ćirila i Metoda u Skopju  
Građevinski fakultet  
[curilov@gf.ukim.edu.mk](mailto:curilov@gf.ukim.edu.mk)  
Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Elena Dumova-Jovanoska**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Sv. Ćirila i Metoda u Skopju  
Građevinski fakultet  
[dumova@gf.ukim.edu.mk](mailto:dumova@gf.ukim.edu.mk)

Prethodno priopćenje

**Sergey Churilov, Elena Dumova-Jovanoska**

### Numeričko modeliranje reprofiliranja sljubnica ziđa: analiza konačnih elemenata temeljena na eksperimentalnim istraživanjima

U ovom je istraživanju ispitana učinkovitost reprofiliranja sljubnica kao metode pojačanja za zgrade od običnog ziđa na temelju eksperimentalnih podataka u kombinaciji s naprednim numeričkim modeliranjem. Rezultati numeričkih simulacija dokazali su značajnu usklađenost s eksperimentalnim podacima i potvrdili učinkovitost predloženog pristupa modeliranju. Rezultati analize konačnih elemenata bili su u skladu s odnosima naprezanja i deformacija iz eksperimenta, oblicima otkazivanja nosivostima zidanih panela. Kalibrirani model uspješno je ponovio poboljšano ponašanje pojačanih uzoraka, posebno u smislu povećane tlačne i posmične čvrstoće. Iako parametarske analize nisu provedene izravno u ovom istraživanju, provjereni numerički model osigurava čvrsto polazište za buduća istraživanja. Točno reproduciranje eksperimentalnih rezultata pomoću modeliranja na bazi konačnih elemenata omogućuje provođenje opsežnih parametarskih analiza koje bi se mogle upotrijebiti za istraživanje različitih rasporeda pojačanja i svojstava materijala bez potrebe za skupim i dugotrajnim fizičkim eksperimentima. To je osobito korisno za procjenu i optimizaciju metoda obnove za postojeće zgrade od običnog ziđa, osobito u područjima koja su sklona potresima. Ovo istraživanje značajno pridonosi području građevinskih konstrukcija pokazivanjem mogućih pojednostavljenih metoda mikromodeliranja za bilježenje zamršenosti ponašanja ziđa na mezorazini.

**Ključne riječi:**

pojednostavljeno mikromodeliranje, obično ziđe, reprofiliranje sljubnica, nelinearna analiza konačnih elemenata, modeliranje interakcija u sljubnicama kod ziđa

Research Paper

**Sergey Churilov, Elena Dumova-Jovanoska**

### Numerical modelling of masonry structural joint repointing: finite element analysis based on experimental investigations

This study investigated the efficacy of joint repointing as a strengthening technique for unreinforced masonry (URM) structures via experimental data combined with advanced numerical modelling. The numerical simulations demonstrated remarkable alignment with the experimental data, validating the efficacy of the proposed modelling approach. The finite element analysis results were consistent with the experimentally observed stress–strain relationships, failure modes, and ultimate capacities of the masonry panels. The calibrated model successfully replicated the enhanced performance of the strengthened specimens, particularly in terms of increased compressive and shear strengths. Although parametric studies were not performed directly in this study, the validated numerical model provides a solid foundation for future investigations. The accurate reproduction of experimental results through finite element modelling facilitates the potential for extensive parametric analyses, which could explore various strengthening configurations and material properties without the need for costly and time-consuming physical experiments—particularly valuable for assessing and optimising retrofitting strategies for existing URM buildings, particularly in seismic-prone regions. This research contributes significantly to the field of structural engineering by demonstrating the potential of simplified micromodelling techniques to capture the intricacies of masonry behaviour at the meso-level.

**Key words:**

simplified micro-modelling, unreinforced masonry, joint repointing strengthening, nonlinear finite element analysis, masonry interface modelling

## 1. Uvod

Zidane konstrukcije odavno su temeljni dio građevinske baštine diljem svijeta. Međutim, očuvanje i sigurnost ovih građevina, osobito u seizmičkim uvjetima, i dalje su od najveće važnosti [1-3]. Nepredvidiva priroda seizmičkih događaja zahtijeva napredne analitičke alate koji mogu pomoći u pružanju dubljeg razumijevanja ponašanja zida. Računalno modeliranje upotrebom numeričkih simulacija vrijedan je alat za analizu ponašanja zidanih konstrukcija u različitim uvjetima opterećenja [4-9], što je osobito važno jer mnogi parametri koji utječu na ponašanje simuliranog elementa, dijela ili konstrukcije nisu poznati ili se ne mogu precizno odrediti u eksperimentalnim ispitivanjima. Jedna od značajnih prednosti upotrebe računalnih simulacija je ta što omogućuju analizu složenih i nelinearnih ponašanja koje nije lako simulirati u laboratorijskim eksperimentima. Precizno modeliranje konstrukcije i korištenih materijala može pružiti vrijedan uvid u ponašanje i performanse zidanih konstrukcija.

Računalno modeliranje također može pomoći u projektiranju učinkovitijih metoda pojačanja ispitivanjem i procjenom različitih strategija prije njihove primjene u stvarnoj konstrukciji [10-14], čime se smanjuje vrijeme i trošak povezan s fizičkim ispitivanjem i pruža točniju procjenu performansa različitih metoda reprofiliranja.

Metoda koja se najčešće upotrebljava za numeričku simulaciju zidanih konstrukcija i materijala jest metoda konačnih elemenata (MKE). Radi se o svestranoj metodi koja može podnijeti složene geometrije, nelinearno ponašanje materijala i različite uvjete opterećenja, a također može uzeti u obzir učinke sljubnica, pukotina i druge karakteristike zidanih konstrukcija [15-22]. Međutim, simulacije konačnih elemenata imaju ograničenja. Na primjer, točnost simulacija uvelike ovisi o točnosti ulaznih podataka, kao što su svojstva materijala i uvjeti opterećenja. Osim toga, složenost simulacija može ih učiniti računalno i vremenski zahtjevnima.

Druge računalno potpomognute metode modeliranja također se mogu upotrijebiti za simulaciju određenih aspekata zidanih konstrukcija i materijala. Na primjer, metoda diskretnih elemenata (MDE) može se upotrijebiti za simulaciju ponašanja pojedinačnih zidnih elemenata i njihovih međusobnih interakcija i interakcije s mortom [23-28].

Za razliku od MKE i MDE, metoda primijenjenih elemenata (MPE) nudi jedinstveni pristup koji kombinira prednosti obiju metoda diskretizacijom konstrukcija u male elemente povezane oprugama, omogućujući detaljniju simulaciju nastajanja i širenja pukotine, kao i cjelokupni proces kolapsa [29]. Numeričko modeliranje seizmičkog ponašanja zidanih konstrukcija i eksperimentalno ispitani paneli opterećeni u ravnini i izvan ravnine posjeduju značajan potencijal za procjenu postojećih konstrukcija i omogućuje zadovoljavajuće poklapanje između eksperimentalnih i numeričkih reakcija [30-34].

Unatoč tome, MKE se smatra moćnim alatom koji istraživačima i građevinskim inženjerima omogućuje predviđanje i simulaciju složenih međudjelovanja unutar zidanih konstrukcija pod

različitim scenarijima opterećenja, uključujući seizmičke sile, i ponavljanje eksperimentalnih rezultata, čime se pružaju dragocjeni uvidi u ponašanje zidanih konstrukcija. Pouzdanost takvih predviđanja ključna je za donošenje informiranih odluka u vezi s integritetom konstrukcije, pojačanjem konstrukcije i praksama projektiranja.

Modeliranje zida pomoću konačnih elemenata važno je jer olakšava predviđanje čvrstoće i sposobnosti deformacije pojačanih zidanih zidova [36]. Zidane konstrukcije imaju slabu vlačnu čvrstoću i duktilnost, što otežava modeliranje njihovog mehaničkog ponašanja [37]. Tradicionalna analiza konačnih elemenata suočava se s poteškoćama pri modeliranju zidova zbog svoje kaotične prirode [38]. Međutim, modeli konačnih elemenata mogu nadići ove izazove i precizno simulirati ponašanje zida pod seizmičkim opterećenjem [39]. Osim toga, modeli konačnih elemenata mogu se upotrijebiti za analizu odziva armiranih zidova pod aksijalnim pritiskom, što omogućuje predviđanje oblika izvijanja i načina otkazivanja [40]. Anizotropni konstitutivni modeli mogu se razviti upotrebom detaljnih 3D kontinuiranih prikaza konačnih elemenata za točno bilježenje heterogenih i anizotropnih odgovora zida. Uspješno su primijenjeni jednostavni i poboljšani modeli za zide, uključujući makroskopske modele koji se temelje na pretpostavci da nema vlaka i poboljšani modeli koji uzimaju u obzir mikroskopsku strukturu zida i interakciju između blokova i interakciju u sljubnicama [41]. Različiti prikazi za proučavanje pravilnih zidanih konstrukcija, uključujući mikromodeliranje, makromodeliranje, homogenizaciju i modele konstrukcijskih komponenti, dobro su poznate strategije modeliranja [21, 41-44].

## 2. Nelinearna analiza zidanih konstrukcija

Složeno ponašanje zidanih konstrukcija, posebno pod seizmičkim opterećenjem, zahtijeva upotrebu metoda nelinearne analize. Zide ima izrazito nelinearna svojstva zbog svoje kompozitne prirode i prisutnosti sljubnica koje djeluju kao mjesta slabosti na kompozitno ponašanje zida i mogu kontrolirati ponašanje uslijed posmika, osobito u kombinaciji jakih zidnih elemenata i slabih sljubnica [45] i krhkog ponašanja njegovih sastavnica.

Iako su metode linearne analize jednostavnije, često nisu obuhvaćeni ključni aspekti ponašanja zida kao što su nastanak pukotina, progresivna oštećenja i preraspodjela opterećenja, tako da je obično potrebna primjena sofisticiranijih, nelinearnih konstitutivnih jednadžbi. Međutim, takve konstitutivne jednadžbe zahtijevaju bilježenje nelinearnih svojstava materijala pomoću različitih laboratorijskih ili terenskih ispitivanja [46]. Nelinearna analiza omogućuje točniji prikaz ponašanja zida tijekom cjelokupnog procesa opterećenja, od početnog elastičnog odgovora do otkazivanja – osobito ključnog za analize seizmičnosti, u kojima su konstrukcije podvrgnute cikličnom opterećenju i mogu doživjeti značajne deformacije iznad granice elastičnosti [47]. Ključni aspekti nelinearne analize zidanih konstrukcija uključuju materijalne, geometrijske i kontaktne nelinearnosti.

Materijalna nelinearnost uzima u obzir nelinearne odnose naprezanja i deformacija zidnih komponenti, uključujući vlačno omekšavanje, tlačno otvrdnjavanje i omekšavanje i ponašanje uslijed posmika [48]. Zidni elementi kompozitni su materijali koji pokazuju nelinearno ponašanje zbog svoje heterogene prirode. Djelovanje između sljubnica i zidnih elemenata dovodi do složene raspodjele naprezanja i mehanizama otkazivanja. Nelinearnom analizom moguće je obuhvatiti fenomene kao što su pucanje i drobljenje zidnih elemenata, klizanje i otvaranje sljubnica, tlačno omekšavanje i vlačno omekšavanje. Na primjer, Lourenço [44] je razvio sveobuhvatni kontinuirani model za zide koji uključuje nelinearna ponašanja materijala, pružajući točniji prikaz ponašanja zida pod opterećenjem.

Geometrijska nelinearnost važna je za bilježenje velikih deformacija i učinaka drugoga reda koji mogu biti značajni kod vitkih zidanih konstrukcija [49, 50]. Zidane konstrukcije podvrgnute su značajnim deformacijama, osobito uslijed seizmičkih događaja, a njihova se geometrija značajno mijenja, što može rezultirati P-delta učincima i drugim geometrijskim nelinearnostima i pritom utjecati na ukupni odziv konstrukcije. Nelinearna analiza može objasniti ove učinke, što je osobito važno kada se istražuju vitke konstrukcije ili konstrukcije s nepravilnom geometrijom [51].

Kontaktna nelinearnost ključna je za modeliranje međudjelovanja zidnih elemenata, osobito kod suhozida ili pri razmatranju stvaranja i širenja pukotina [52]. Zidane konstrukcije često se oslanjaju na trenje i kontakt između elemenata za stabilnost. Nelinearna analiza olakšava modeliranje tih interakcija, uključujući klizanje između blokova, otvaranje i zatvaranje sljubnica i ljučenje konstrukcijskih elemenata.

Dostupno je nekoliko konstitutivnih modela i strategija modeliranja za nelinearnu analizu zida, uključujući sljedeće:

- **Modeli temeljeni na plastičnosti:** uključuju nelinearno ponašanje zida uzimajući u obzir plastične deformacije i obično primjenjuju kriterije popuštanja za utvrđivanje početka plastičnog ponašanja. Često korišteni modeli uključuju Drucker–Pragerov model, prilagođen za zide kako bi se uzela u obzir njihova čvrstoća ovisna o pritisku, i Mohr–Coulombov model, koji predstavlja ponašanje sljubnica prilikom trenja. Lourenço i sur. [53] predložili su kompozitni model plastičnosti koji je kombinirao različite granice popuštanja na vlak, tlak i posmik.
- **Modeli oštećenja** imaju ključnu ulogu u bilježenju progresivnog pogoršanja svojstava materijala pripisanog mikropukotinama, čime učinkovito predstavljaju ponašanje uslijed omekšavanja uočnog u zidu. Izotropni modeli oštećenja pretpostavljaju ravnomjerno oštećenje u svim smjerovima, dok anizotropni modeli oštećenja uzimaju u obzir promjene smjera i daju realističniji prikaz ponašanja zida. Papa i sur. [54] razvili su anizotropni model oštećenja za zidane konstrukcije.
- **Kombinirani modeli plastičnosti i oštećenja:** uzimaju u obzir i plastičnu deformaciju i degradaciju materijala te daju sveobuhvatniji prikaz ponašanja zida. Pelà i sur. [48] predložili

su model plastičnog oštećenja za analizu zidanih konstrukcija pod cikličnim opterećenjem.

- U **mikromodeliranju**, sastavni dijelovi zida (zidni elementi i mort) predstavljeni su zasebno, što omogućuje detaljnu analizu lokalnog ponašanja. Detaljno mikromodeliranje predstavlja zidne elemente i mort s kontinuiranim elementima i kontaktima zidni element – mort s diskontinuiranim elementima. Pojednostavljeno mikromodeliranje predstavlja proširene blokove s elementima kontinuuma i sljubnice s međupovršinskim elementima. Lourenço i Rots [55] razvili su sveobuhvatnu strategiju mikromodeliranja za analizu zida.
- **Makromodeliranje** kao pristup promatra zide kao homogeni kontinuum pogodan za analizu velikih razmjera. Ortotropni modeli uzimaju u obzir usmjerena svojstva zida, a primjena tehnika homogenizacije pomaže izvesti ekvivalentna svojstva kontinuuma iz mikrostrukture zida. Zucchini i Lourenço [56] predložili su model homogenizacije koji razmatra međudjelovanje između zidnih komponenti.

Izbor konstitutivnog modela ovisi o razini analize, računalnim resursima i područja interesa. Pristupi mikromodeliranja daju detaljan uvid u lokalno ponašanje, ali su računalno intenzivni. Ti su pristupi prikladniji za veće konstrukcije, ali mogu previše pojednostaviti neke aspekte ponašanja zida. Nedavni trendovi uključuju razvoj višerazinskih modela koji kombiniraju prednosti mikro i makropristupa. Osim toga, postoji sve veći interes za modele koji mogu obuhvatiti ponašanje zida ovisno o vremenu, uključujući puzanje i dugoročno nakupljanje oštećenja. Integracija ovih konstitutivnih modela s naprednim numeričkim metodama, kao što su MKE ili MDE, značajno je poboljšala sposobnost analize složenih zidanih konstrukcija pod različitim uvjetima opterećenja, uključujući seizmička djelovanja. Budući pravci istraživanja uključuju poboljšanje prikaza cikličnog ponašanja, razvoj učinkovitijih računalnih algoritama i uključivanje neizvjesnosti u svojstva materijala i geometrije konstrukcije.

U ovom je istraživanju primijenjen nelinearni pristup konačnih elemenata pomoću 2D pojednostavljene strategije mikromodeliranja. Ova metoda je manje detaljna u usporedbi s 3D modeliranjem, osobito u pogledu debljine zidova i sljubnica, ali omogućuje jasan prikaz opeke i sljubnica morta i bilježi nelinearno ponašanje na razini materijala. Model ukupnih deformacija i rotirajućih pukotina, koji se primjenjuje za opeku i kombinirani model pucanja, posmika i gnječenja za sljubnice omogućuju sveobuhvatan prikaz različitih oblika otkazivanja opaženih u zidu [53]. Nadalje, nelinearna analiza ključna je za procjenu metoda pojačanja jer omogućuje procjenu ponašanja konstrukcije izvan granice elastičnosti, što je posebno važno za ovo ispitivanje vezano uz reprofilaranje sljubnica, gdje promijenjeno ponašanje pojačanih sljubnica može značajno utjecati na ukupni odziv konstrukcije.

Nelinearnim pristupom nastojalo se preciznije razumjeti složene mehanizme otkazivanja, preraspodjelu opterećenja i nosivost zidanih konstrukcija. Ovaj pristup doprinosi boljem

Tablica 1. Usporedba mehaničkih svojstava uzoraka običnog zida (eng. *unreinforced masonry - URM*) i pojačanog zida (eng. *strengthened masonry - SM*)

Svojstvo	URM	SM	Promjena
Tlačna čvrstoća ( $f_c$ )	2,56 N/mm <sup>2</sup>	3,17 N/mm <sup>2</sup>	+24 %
Youngov modul elastičnosti (E)	1059,0 N/mm <sup>2</sup>	1145,3 N/mm <sup>2</sup>	+8 %
Krajnja deformacija (tlak)	0,0130	0,0443	+241 %
Dijagonalna vlačna čvrstoća	0,1012 N/mm <sup>2</sup>	0,316 N/mm <sup>2</sup>	+212 %
Krajnji pomak (dijagonalni tlak)	0,308 %	0,252 %	-18 %
Modul krutosti (pri 5 % maksimalnog posmičnog naprezanja)	2323,99 N/mm <sup>2</sup>	5109,15 N/mm <sup>2</sup>	+120 %
Modul krutosti (pri 30 % maksimalnog posmičnog naprezanja)	1736,89 N/mm <sup>2</sup>	1532,40 N/mm <sup>2</sup>	-12 %
Modul krutosti (pri 70 % maksimalnog posmičnog naprezanja)	734,98 N/mm <sup>2</sup>	822,32 N/mm <sup>2</sup>	+12 %

razumijevanju ponašanja konstrukcije i omogućuje pouzdaniju procjenu i projektiranje mjera pojačanja postojećih zidanih konstrukcija u seizmički aktivnim područjima.

### 3. Sažetak eksperimentalnih rezultata

Ovo istraživanje primjenjuje eksperimentalne rezultate iz prethodnih istraživanja [35] kao temelj za istraživanje nelinearnog modeliranja konačnih elemenata zidanih zidova izloženih tlačnim i dijagonalnim tlačnim opterećenjima. Ovo je istraživanje usredotočeno na učinkovitost reprofilaranja sljubnica kao metode za pojačavanje zidanih konstrukcija, s eksperimentalnim istraživanjima provedenim na nepojačanim i pojačanim zidnim panelima upotrebom cementno-polimerne žbuke i polipropilenskih traka u horizontalnim sljubnicama, nastojeći simulirati zide u starim građevinama i ispitati učinke pojačanja zida pomoću reprofilaranja sljubnica. Cilj je ovog istraživanja razviti novi mort za reprofilaranje sa svojstvima prilagođenim onima zidnih elemenata.

U ovom istraživanju, izraz "stare građevine" odnosi se na građevine izgrađene prije više od 50 godina, prije svega nepojačane (URM) i sa sljubnicama od morta na bazi vapna, koje prethode suvremenim normama za seizmičko projektiranje i nemaju suvremene sustave pojačanja konstrukcije. Ove građevine, često od povijesnog ili kulturnog značaja, obično su osjetljivije na seizmičke događaje zbog načina njihove izgradnje i korištenih materijala, što ih čini fokusom našeg istraživanja reprofilaranja sljubnica kao metode za poboljšanje njihove seizmičke učinkovitosti uz očuvanje njihovog povijesnog integriteta.

Eksperimentalni program sastojao se od tlačnog ispitivanja u ravnini i dijagonalnih tlačnih ispitivanja na dvjema skupinama zida: obično zide (URM) i pojačano zide (SM). Kao metoda pojačanja, SM zidani paneli pojačani su cementno-polimernim mortom za reprofilaranje i polipropilenskih traka u sljubnicama. Uzorci (zidni paneli) za ispitivanje aksijalnim i dijagonalnim tlakom - označeni kao W-AP i W-DP za URM i WS-AP-RPP i WS-DP-RPP za SM - izvedeni su od čvrste glinene opeke i vapnenog morta s potpuno ispunjenim horizontalnim i vertikalnim sljubnicama. Ovaj ciljani pristup omogućio je usporedbu između ponašanja URM i SM zidanih panela pod

određenim uvjetima opterećenja. Detaljnije informacije o eksperimentalnom programu, uključujući pripremu uzoraka, postupke ispitivanja i potpune rezultate dostupni su u prethodnom istraživanju [35].

Eksperimentalni rezultati pokazali su značajne promjene u mehaničkim svojstvima zidanih konstrukcija nakon reprofilaranja sljubnica visokočvrstim vlaknima pojačanim mortom na bazi cementa i polimera i polipropilenskim trakama. Tablica 1. daje usporedni pregled ključnih mehaničkih svojstava URM i SM uzoraka. Podaci su uključivali slučajeve tlačnog i dijagonalnog vlačnog opterećenja i time pružili uvid u složenost utjecaja metode pojačanja. Vrijednosti navedene u tablici 1. su srednje vrijednosti izvedene iz više ispitnih uzoraka. Iako ovi rezultati prikazuju jasne trendove, pri tumačenju podataka treba uzeti u obzir ograničenu veličinu uzorka. Bez obzira na to, dosljedni obrazac poboljšanja višestrukih parametara upućuje na snažan pozitivan učinak metode pojačanja na ponašanje zida.

Kao što je prikazano u tablici 1., tehnika reprofilaranja sljubnica rezultirala je znatnim poboljšanjima u čvrstoći, ali nije poboljšala sposobnost deformacije. Primjetno je da se tlačna čvrstoća povećala za 24 %, a dijagonalna vlačna čvrstoća za 212 %. Omjeri vlačne čvrstoće i tlačne čvrstoće za URM i SM uzorke (zidne panele) iznose 0,04 odnosno 0,1. U svom radu, Lourenço i Gaetani [43] objavili su da se vlačna čvrstoća zida kreće od (0,03 – 0,16)  $f_c$  za tlačnu čvrstoću u rasponu od 1–100 N/mm<sup>2</sup>. Međutim, za materijale visoke čvrstoće potrebno je provesti daljnja istraživanja jer su krhkiji od materijala niske čvrstoće. Kapacitet deformacije pri tlaku, na temelju krajnje deformacije, pokazao je značajno povećanje od 241 %. Međutim, krajnji pomak uslijed dijagonalnog tlaka blago se smanjio, što pokazuje na moguću kompromis između čvrstoće i duktilnosti. Rezultati su pokazali da je reprofilaranje sljubnica značajno poboljšalo čvrstoću zida, osobito pri svojstvima niske čvrstoće izvornog morta. Rezultati ispitivanja daju vrijedne podatke za ovo istraživanje.

### 4. Strategija modeliranja i model za materijal

Predložene su četiri glavne kategorije pristupa modeliranju zida i zidanih konstrukcija na temelju različitih pristupa analizi,

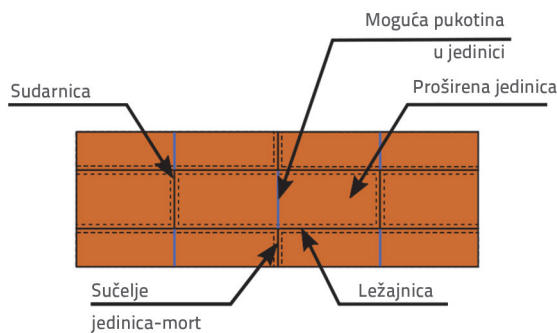
količini ispitivanja materijala i željenim razinama točnosti i jednostavnosti: modeli temeljeni na blokovima, modeli kontinuuma, modeli makroelemenata i modeli temeljeni na geometriji [42].

Obično se primjenjuju tri strategije modeliranja: detaljno mikromodeliranje, pojednostavljeno mikromodeliranje i makromodeliranje [43, 44]. U ovom je istraživanju primijenjen pojednostavljeni pristup mikromodeliranja (model temeljen na blokovima) (slika 1.). U slučaju zidanih opeka, mjesto potencijalnih pukotina može se odrediti unaprijed; stoga se ova strategija čini izvedivom za simulaciju eksperimentalnih ispitivanja. Međutim, za praktične primjene u građevinskoj praksi, razmazani modeli ili strategije makromodeliranja čine se poželjnijima zbog svoje jednostavnosti i razumnog i preciznog predviđanja ponašanja zidova u ravnini i izvan ravnine [43, 57, 58]. Primijenjena metodologija modeliranja primjenjuje MKE i nelinearni model prilagođen parametrima za simulaciju i validaciju eksperimentalnih rezultata u vidu krivulja opterećenja i deformacije i uzoraka oštećenja.

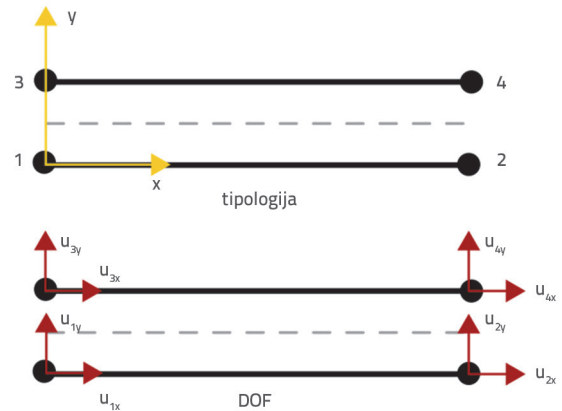
#### 4.1. Model za materijal za pojednostavljeni mikromodel (SMM)

Dvodimenzionalni (2D) pojednostavljeni mikromodel razvijen je pomoću programskog paketa DIANA za analizu konačnih elemenata [59]. Veličina čvrste glinene opeke uvećana je za pola debljine sljubnice morta u oba smjera i predstavljene su elementima kontinuuma. Odzivi sljubnica i kontakta između opeke i sljubnice grupirani su u koncentrirane elemente kontakata bez debljine. Modeliranje uzima u obzir materijalne nelinearnosti u elementima i sljubnicama. Svi oblici otkazivanja bili su koncentrirani na kontaktima opeke te horizontalnih i vertikalnih sljubnica. Kako bi se uzela u obzir moguća pojava pukotina unutar opeke i reproduciralo širenje pukotine od jedne do druge sljubnice, opeke su podijeljene na dvije polovice uvođenjem kontakta bez debljine, kao što je prikazano na slikama 1. i 2.

Opeke su modelirane upotrebom konstitutivnog nelinearnog modela koji se temelji na modelu pukotina uslijed krajnje deformacije razvijenom prema modificiranoj teoriji tlačnog polja koju su izvorno predložili Vecchio i Collins [60].



Slika 1. Primijenjena strategija modeliranja (prilagođeno iz [43])

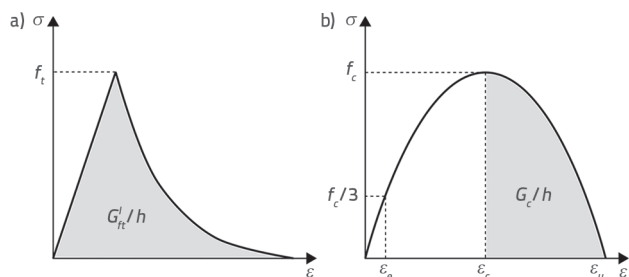


Slika 2. Element kontakta L8IF (prilagođeno iz [59])

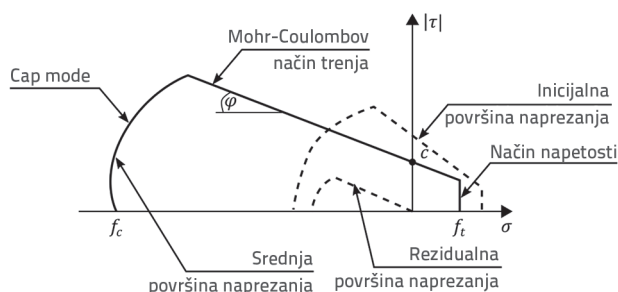
U ovom istraživanju primijenjen je model ukupne deformacije i rotirajućih pukotina. U modelu rotirajućih pukotina, posmično omekšavanje događa se implicitno zbog koaksijalnosti glavnog napreznja i deformacije. Vlačno ponašanje predstavljeno je eksponencijalnom krivuljom vlaka i omekšavanja, kao što je prikazano na slici 3.a. Za razliku od toga, parabolički odnos napreznja i deformacije upotrijebljen je za modeliranje tlačnog ponašanja, kao što je prikazano na slici 3.b. Vlačno ponašanje izravno je povezano s energijom loma u vlaku,  $G_{ft}^o$ , i karakterističnom duljinom elementa  $h$ . Energija loma u modulu  $l$  označava količinu energije potrebnu za stvaranje jedinične površine potpuno razvijene pukotine. Tijekom tlačnog djelovanja energija loma  $G_c$  i karakteristična duljina elementa  $h$  upravljaju omekšavajućim dijelom krivulje. Za smanjenje Poissonovog omjera primijenjen je model temeljen na oštećenjima koji nije uzeo u obzir smanjenje ili povećanje tlačne čvrstoće zbog bočnog ograničavanja ili pukotina. Pojednostosti o primijenjenim modelima dostupne su dokumentaciji softvera [59].

Kompozitni model kontakta, također poznat kao kombinirani model pucanja, posmika i gnječnja, primijenjen je za modeliranje kontakta opeke i morta. Taj je model prikladan za modeliranje pukotina, klizanja uslijed trenja i drobljenja duž kontakata materijala kao što su horizontalne i vertikalne sljubnice. Upotrijebljen je model kontakta ravninskog napreznja koji su formulirali Lourenço i Rots [61], a poboljšao Van Zijl [62] na temelju višepovršinske plastičnosti, koji kombinira Coulombov model trenja s prekidom vlaka i eliptičnom tlačnom granicom, kao što je prikazano na slici 4.

Za vlačni i tlačni mod pretpostavljena su pravila pripadajućih tokova, a za posmični mod općenito pretpostavljeno je nepovezano strujanje. Shematski prikaz prikazuje razvoj triju površina sloma: ravni vlačni prekid za otkazivanje u modulu I, Mohr-Coulombov zakon trenja za otkazivanje u modulu II i eliptični način otkazivanja za interakciju posmika i tlaka. Osim toga, slika prikazuje da tri pojedinačne površine otkazivanja napreduju od početne ili maksimalne srednje do rezidualne anvelope.



Slika 3. Vlačno i tlačno ponašanje u modelu pukotine uslijed krajnje deformacije (prilagođeno iz [59]): a) Krivulja eksponencijalnog vlakla; b) Parabolična tlačna krivulja



Slika 4. Dvdimenzionalni model kontakata (prilagođeno iz [59])

Tijekom analize, vlačna čvrstoća, kohezija i kut trenja su se smanjivali (omekšavanje), a tlačna je čvrstoća povećana i potom je opet pala (otvrdnjavanje-omekšavanje). Za vlačni i tlačni mod pretpostavljena su pravila pripadajućih tokova, dok je za posmični mod općenito pretpostavljeno nepovezano strujanje.

### 4.2. Primjena strategije modeliranja

Dimenzije čvrste glinene opeke proširene su na 250 × 120 × 60 mm i 260 × 120 × 70 mm kako bi se uzela u obzir debljina morta (pretpostavljena debljina je 10 mm). Opeke su modelirane četverokutnim konačnim elementima s pravilnim ravninskim naprezanjem s 4 čvora (Q8MEM), a horizontalne i vertikalne sljubnice predstavljene su elementima kontakata strukturnih linija (L8IF) s 2+2 čvora. Ovi elementi karakteriziraju ponašanje kontakata u smislu odnosa između normalnih i posmičnih sila, kao i normalnih i posmičnih relativnih pomaka duž kontakta. U 2D konfiguraciji, element kontakta nalazi se između dvije linije s topologijom lokalne osi i dva stupnja slobode po čvoru, kao što je prikazano na slici 2. Tako su sljubnice morta modelirane bez debljine. Kako bi se uzete u obzir moguće pukotine u ciglama, upotrijebljena je ista vrsta strukturnih elemenata kontakata koji povezuju dvije polovice svake cigle.

PP trake bile su uključene u modele s reprofiliranim sljubnicama pomoću

ugrađenih šipki armature. Ta su pojačanja ugrađena u strukturne (matične) elemente i ne pridonose njihovoj masi ili krutosti. Osim toga, ugrađena armatura nema vlastite stupnjeve slobode. Deformacije u armaturi izračunane su iz polja pomaka matičnih elemenata, što je osiguralo savršenu vezu između armature i okolnog materijala. Međutim, pojačanja su utjecala na krutost matičnih elemenata.

U ovom istraživanju ugrađene armaturene šipke nalaze se na kontaktima unutar sljubnica. Stoga, krutosti u normalnim smjerovima,  $k_n$ , i posmičnim smjerovima,  $k_s$  i  $k_t$  izračunane su na temelju slobodne duljine kontakta na sljedeći način:

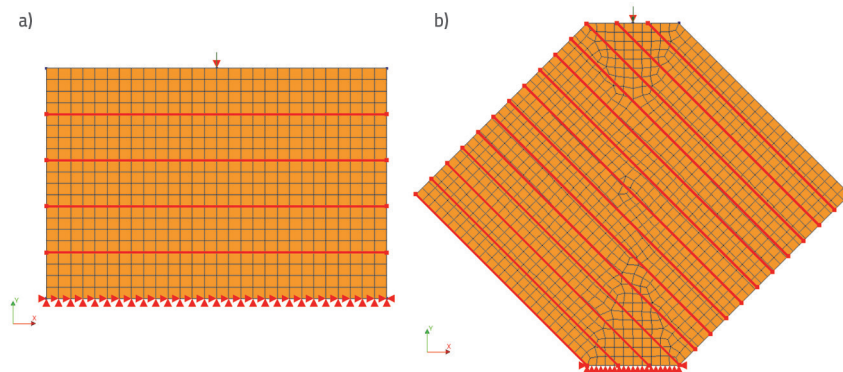
$$k_n = \frac{E}{l_{fr}}, \quad k_s = k_t = \frac{E}{2l_{fr}} \tag{1}$$

pri čemu  $E$  označava Youngov modul elastičnosti armaturene šipke, a  $l_{fr}$  slobodnu duljinu kontakta. U ovom slučaju primijenjen je kontakt bez debljine, te je stoga pretpostavljena virtualna debljina  $10^{-5}$  × udaljenost od prvog i drugog čvora elementa kontakta.

PP trake su modelirane primjenom linearnog elastičnog, savršeno plastičnog modela materijala s Von Misesovim kriterijem popuštanja, Youngovim modulom elastičnosti od 2000 N/mm<sup>2</sup>, te granicom naprezanja od 150 N/mm<sup>2</sup> bez plastičnog stvrdnjavanja. Ovi parametri usvojeni su prema uputama proizvođača [35].

Grafični uvjeti modelirani su ograničavanjem translacija donjih rubova zidnih elemenata u oba ortogonalna smjera. Prijenosni čelični elementi postavljeni na vrhu eksperimentalno ispitanih zidova nisu uključeni u razvijene modele jer se smatralo da njihov kontaktni učinak i trenje imaju zanemarive učinke na prijenos opterećenja s preša na same zidove.

Opterećenje je primjenjivano postupno na vrhove zidova u malim pomacima sve dok nije postignut krajnji pomak. Stoga su vertikalno ograničeni čvorovi na vrhu zidova odabrani kao referentni čvorovi za primjenu propisanih pomaka. Propisana deformacija (0,01 mm) primijenjena je kao pojedinačni korak opterećenja.



Slika 5. FE modeli SM uzorka za simulaciju eksperimentalnih testova: a) Konfiguracija za ispitivanje tlačne čvrstoće; b) Konfiguracija za ispitivanje dijagonalne vlačne čvrstoće

Tablica 2. Prosječna svojstva materijala za pune glinene opeke, vapno i mort za reprofiliranje

Materijal	Duljina [mm]	Širina [mm]	Visina [mm]	Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	Tlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	Vlačna savojna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]
Čvrsta glinena opeka	249,8	122,8	57,8	1977,0	10,64	3,04
CoV [%]	--	--	--	1,0	19,7	19,3
Vapnena žbuka	159,4	40,0	39,8	1650,2	0,94	0,73
CoV [%]	--	--	--	1,9	5,4	9,3
Mort za reprofiliranje	159,6	39,9	39,8	2200,1	32,86	12,0
CoV [%]	--	--	--	2,3	4,5	7,8

Tablica 3. Sinteza ulaznih parametara za modeliranje opeke i pucanja opeke u sredini

Opeka: Model pukotine uslijed krajnje deformacije (TSBC)							
Youngov modul elastičnosti E <sub>b</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Poissonov omjer ν <sub>b</sub> [-]	Gustoća ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	Vlačna čvrstoća f <sub>t</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Tlačna čvrstoća f <sub>c</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Energija loma u modulu I G <sub>ft</sub> <sup>I</sup> [N/mm]	Tlačna energija loma G <sub>c</sub> <sup>ε</sup> [N/mm]	Savojna pukotina
6,384	0,15	2·10 <sup>-9</sup>	1,0	10,64	0,072	16,5	Trulež
Pukotine na opeci: Diskretne pukotine							
Normalna krutost k <sub>n</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]	Posmična krutost k <sub>t</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]	Vlačna čvrstoća f <sub>t</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Kriterij za vlačno omekšavanje pri opterećenju u Modulu I	Energija loma G <sub>ft</sub> <sup>I</sup> [N/mm]	Posmični kriterij za razvoj pukotine u Modulu II		
1·10 <sup>6</sup>	1·10 <sup>6</sup>	1,0	Hordijk	0,01	Nulta trakcija posmika		

Tablica 4. Sinteza ulaznih parametara za modeliranje kontakta opeke i sljubnice

Kombinirani model pucanja, posmika i gnječenja							
Normalna krutost k <sub>n</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]	Posmična krutost k <sub>t</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]	Vlačna čvrstoća f <sub>t</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Vlačna energija loma G <sub>ft</sub> <sup>I</sup> [N/mm]	Kohezija c [N/mm <sup>2</sup> ]	Kut trenja μ [rad]	Kut dilatacije Ψ [rad]	Rez. kut trenja [rad]
120 [200,0]	60 [80,0]	0,04 [0,14]	0,01 [0,08]	0,05 [0,15]	0,523599	0,349066	0,523599
Ograničenje normalnog opterećenja [N/mm <sup>2</sup> ]	Koeficijent eksp. degradacije	Energija loma u modulu II G <sub>ft</sub> <sup>II</sup> [N/mm]		Tlačna čvrstoća f <sub>c</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Tlačna energija loma G <sub>c</sub> <sup>ε</sup> [N/mm]	Faktor trkacije posmika C <sub>s</sub>	Jedn. plast. relat. pomaka κ <sub>p</sub>
		Par. (a)	Par. (b)				
-1,0	5	-0,01 [0,8]	0,009 [0,09]	2,77 [3,2]	6,25 [35]	9	0,01

Relativno gusta mreža konačnih elemenata implementirana je zadavanjem veličine elementa od 20 mm. Modeli konačnih elemenata prikazani su na slici 5. Dodatni čelični elementi upotrijebljeni u eksperimentima zanemareni su u FE modelima zbog zanemarivih učinaka težine. Početnim opterećenjem smatrala se vlastita težina. Kako bismo osigurali ravnomjerno opterećenje gornjih rubova zidova, upotrijebili smo komplete za vezivanje koji su stvorili jednake linearne ovisnosti između čvorova u FE mreži. Nelinearna strukturalna analiza, uzimajući u obzir fizičke i geometrijske nelinearne učinke, provedena je upotrebom zadanih postavki učinka. Primijenjena je kvaziNewtonova (sekantna) metoda s BFGS iteracijama. Norma konvergencije pomaka kontrolira proces ponavljanja s

tolerancijom konvergencije od 0,01. Za predviđanje povećanja pomaka primijenjena je kontrola duljine luka sa zadanim postavkama.

Zbog ograničenih podataka dobivenih eksperimentalnim ispitivanjima, parametri materijala potrebni za simulacije izvedeni su kombiniranjem vrijednosti dobivenih eksperimentalnim ispitivanjima i kalibracijom parametara potrebnih za primijenjeni model materijala. Tlačna čvrstoća, vlačna savojna čvrstoća i gustoća opeke i morta prikazanih u tablici 2. i dobiveni su iz eksperimentalnih rezultata [35].

Odnosi navedeni u Muhita i sur. [16] te u Lourenço i Gaetani [43] primjenjeni su za povezivanje vrijednosti ostalih parametara materijala potrebnih za upotrijebljene nelinearne modele

materijala. Tablice 3. i 4. prikazuju ulazne parametre opeka i kontakata za URM uzorak; vrijednosti u zagradama odnose se na SM uzorak.

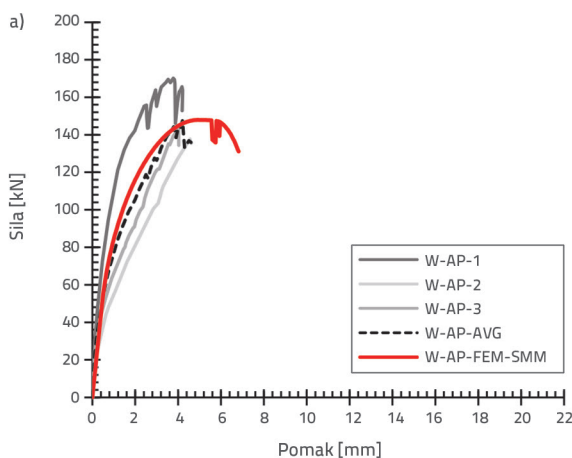
Ako rezultati ispitivanja nisu dostupni, modul elastičnosti opeke može se povezati s njihovom tlačnom čvrstoćom  $f_c$  i, ovisno o materijalu i smjeru opterećenja [43, 63], može se pretpostaviti da iznosi  $(200-1000)f_c$ ; u ovoj simulaciji utvrđena je vrijednost od  $600f_c$ . Energija tlačnog loma izračunana je pomoću jednadžbe (2). Poissonov omjer varira između 0,15 i 0,25, a odabrana je najniža vrijednost u rasponu.

Aksijalna vlačna čvrstoća  $f_t$  nije izričito ispitana, a vrijednost vlačne čvrstoće na savijanje  $f_{sp}$  dobivena je eksperimentalno. Prema izrazima (3) [43], visina opeke ( $h_b$ ) primijenjena je za određivanje odnosa između savojne čvrstoće i vlačne čvrstoće i dajući vrijednost od 0,15 $f_c$ . Uzimajući u obzir da preporučene vrijednosti za  $f_t$  iznose (0,03 - 0,12)  $f_c$  [43, 64], utvrđena je vrijednost od 0,1 $f_c$ . Vlačna energija loma,  $G_{ft}'$  izračunana je na temelju tlačne čvrstoće opeke prema izrazu (4).

Za proširene sljubnice upotrijebljen je kombinirani model pucanja, posmika i gnječenja. Zahtijevana mehanička svojstva sljubnica podvrgnuta su brojnim pokušajima kalibracije izračunanih rezultata. Međutim, raspon vrijednosti je u skladu s preporukama Lourença i Gaetanija [43]. Vrijednosti izračunane pomoću predloženih jednadžbi primijenjene su kao približne vrijednosti da bi odgovarale rezultatima. Kako bi se reproduciralo širenje pukotine od jedne vertikalne sljubnice do druge, pretpostavljen je određeni kontinuitet između vertikalnih sljubnica i vertikalnih pukotina u opekama.

Kako bi se izbjeglo međusobno prodiranje, dvije polovice opeke spojene su kontaktnim elementima s lažnom normalnom i posmičnom krutošću od  $10^6$  N/mm<sup>3</sup>.

$$G_c = \frac{32f_c}{10 + f_c} \quad (2)$$



$$f_t = \frac{0.06h_b^{0.7}}{1 + 0.06h_b^{0.7}} f_{ft} \quad (3)$$

$$G_{ft}' = 0.07 \ln(1 + 0.17f_c) \quad (4)$$

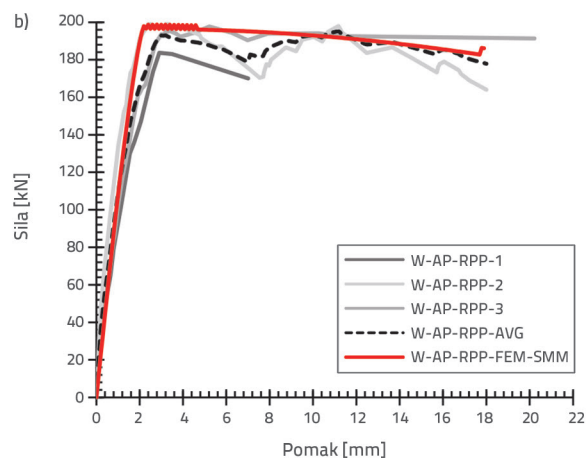
## 5. Rezultati i rasprava

Zbog ograničenih podataka dobivenih eksperimentalnim ispitivanjima, parametri materijala potrebni za simulacije izvedeni su kombiniranjem vrijednosti dobivenih eksperimentalnim ispitivanjima i kalibracijom parametara potrebnih za upotrijebljeni model materijala. Vrijednosti tlačne čvrstoće, vlačne savojne čvrstoće i gustoće opeke i morta prikazanih u tablici 2. dobiveni su iz eksperimentalnih rezultata [35]. Tablice 3. i 4. prikazuju rezultate opsežnog testiranja i kalibracije razvijenog FE modela s obzirom na eksperimentalne krivulje sile i pomaka i mehanizme otkazivanja. Izračunani rezultati uspoređeni su s eksperimentalnim rezultatima kako bi se odredilo najbolje prilagođavanje parametara. Rezultati su uspoređeni pregledom prosječnih eksperimentalnih krivulja sile i pomaka u odnosu na izračunane krivulje sile i pomaka.

### 5.1. Tlačna čvrstoća

Slika 6. prikazuje usporedbu krivulja sile i pomaka za URM i SM uzorke dobivene eksperimentalnim ispitivanjem i numeričkim izračunima (MKE-SMM). Osnova za modeliranje pomoću konačnih elemenata i kalibraciju materijalnog modela bile su prosječne krivulje (AVG) i mehanizmi otkazivanja.

U usporedbi s prosječnom krivuljom sile i pomaka, linearno elastično ponašanje u rasponu 0–40 kN (za URM uzorke) i 0–150 kN (za SM uzorke) bilo je adekvatno predstavljeno primijenjenim pristupom modeliranja. Nakon stvaranja prvih

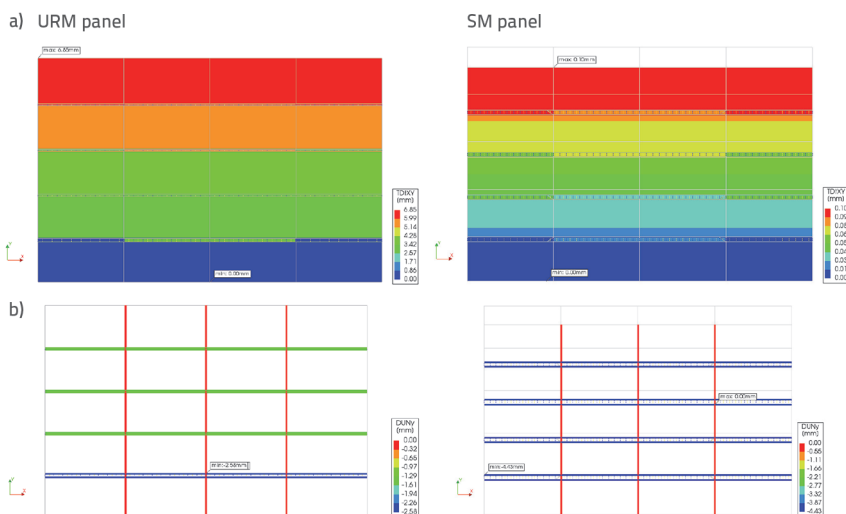


Slika 6. Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata za tlačnu čvrstoću: a) URM uzorci (W-AP-1÷3 = aksijalni tlak običnih zidova, W-AP-AVG = prosječni aksijalni tlak, W-AP-MKE-SMM = rezultati MKE za aksijalni tlak, pojednostavljeni mikromodel); b) SM uzorci (WS-AP-RPP-1÷3 = aksijalni tlak pojačanih zidova, WS-AP-RPP-AVG = prosječni aksijalni tlak, WS-AP-RPP-MKE-SMM = rezultati MKE za aksijalni tlak, pojednostavljeni mikromodel)



Tablica 5. Usporedba eksperimentalnih rezultata i rezultata MKE za ispitivanja aksijalnog tlaka

Parametar	Jedinica	URM			SM		
		Eksperiment	MKE	Razl. [%]	Eksperiment	MKE	Razl. [%]
Opterećenje pri prvoj pukotini	kN	35,68	62,48	<b>54,6</b>	65,11	168,9	<b>88,7</b>
Pomak pri prvoj pukotini	mm	0,25	0,59	<b>81,0</b>	0,50	1,7	<b>109,1</b>
Početna krutost	kN/mm	142,72	105,89	<b>-29,6</b>	130,22	99,35	<b>-26,9</b>
Vršno opterećenje	kN	156,72	147,91	<b>-5,8</b>	194,32	198,68	<b>2,2</b>
Pomak pri vršnom opterećenju	mm	4,2	4,96	<b>16,6</b>	10,8	2,59	<b>-122,6</b>
Tlačno naprezanje	N/mm <sup>2</sup>	2,56	2,42	<b>-5,6</b>	3,17	3,25	<b>2,5</b>
Krajnji pomak	mm	4,6	6,82	<b>38,9</b>	18,0	17,89	<b>-0,6</b>



Slika 7. Numerički rezultati tlačnih ispitivanja u završnom koraku izračuna: a) Polje pomaka (mm); b) Relativni pomak kontakta u okomitom smjeru DUNY (mm)

pukotina, utvrđeno je nelinearno ponašanje dok nije izračunan stabilan krajnji pomak. Vršna sila bila je dobro približno određena, a u slučaju URM uzoraka izračunani krajnji pomaci bili su veći od eksperimentalno dobivenih pomaka.

Nakon postizanja vršne čvrstoće, primijećeno je postupno omekšavanje za URM uzorke, dok je za SM uzorke, izračunano ponašanje pokazalo gotovo savršeno plastično ponašanje bez ikakvog značajnog stvrdnjavanja ili omekšavanja.

Sažetak ključnih rezultata iz oba ispitivanja aksijalnog tlaka u pogledu prosječne krivulje iz tri ispitana obična zida (URM, W-AP-AVG) i pojačana zida (SM, W-AP-RPP-AVG) i odgovarajuće simulacije MKE prikazane su u tablici 5.

Rezultati za polje pomaka i relativnog pomaka kontakata za krajnje opterećenje za tlačno ponašanje dobiveno za nepojačanje i pojačane zidne panele prikazani su na slici 7. Zbog okomitog povezivanja svih čvorova sa gornjim rubom zida i prividne normalne krutosti kontakta, nije primijećen naglašen uzorak pukotina u opekama dok su kontakti doživjeli relativno vertikalno pomicanje. S povećanjem opterećenja rezultati su pokazali postupno povećanje pomaka i vlačnih sila na

kontaktima, što je rezultiralo gnječenjem zidnih elemenata i pukotinama na kontaktima (slika 7.b), što je slično uzorcima oštećenja iz eksperimentalnih ispitivanja. Međutim, eksperimentalna ispitivanja su pokazala da je došlo do nekoliko pukotina u ciglama, no metoda modela konačnih elemenata nije uspjela zabilježiti taj učinak.

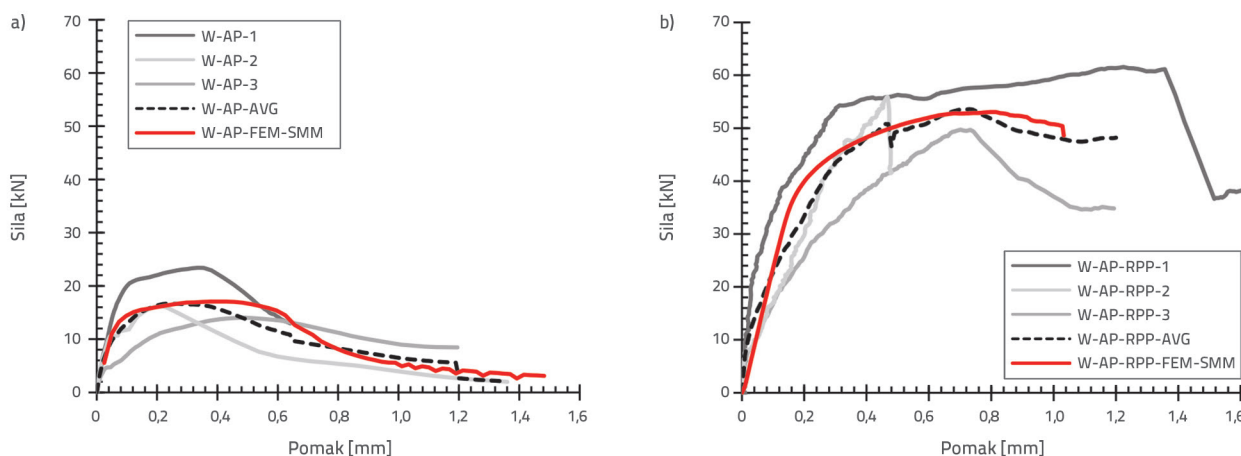
## 5.2. Dijagonalna vlačna čvrstoća

Slika 8. prikazuje usporedbu krivulja sile i pomaka za obje vrste panela. Nepojačani paneli su u početku pokazali točnu simuliranu elastičnu krutost koja je kasnije bila ugrožena pojavom prve pukotine. Suprotno tome, pojačani paneli malo su podcijenili izvorne vrijednosti krutosti. Vršna posmična sila uspješno je simulirana, s manjim odstupanjima u pomacima pri vršnom naprezanju za nepojačane panele, koja su bila blago povišena, dok je pojačani panel bio blisko povezan s prosječnim eksperimentalnim krivuljama. Tablica 6. predstavlja sažetak ključnih rezultata, uspoređujući prosječne krivulje dijagonalno tlačnog ispitivanja tri zidna panela: jednog običnog zida tj. nepojačanog (URM, W-AP-AVG) i dva pojačana (SM, W-AP-RPP-AVG) slučajeve, zajedno s odgovarajućim rezultatima simulacije MKE-a.

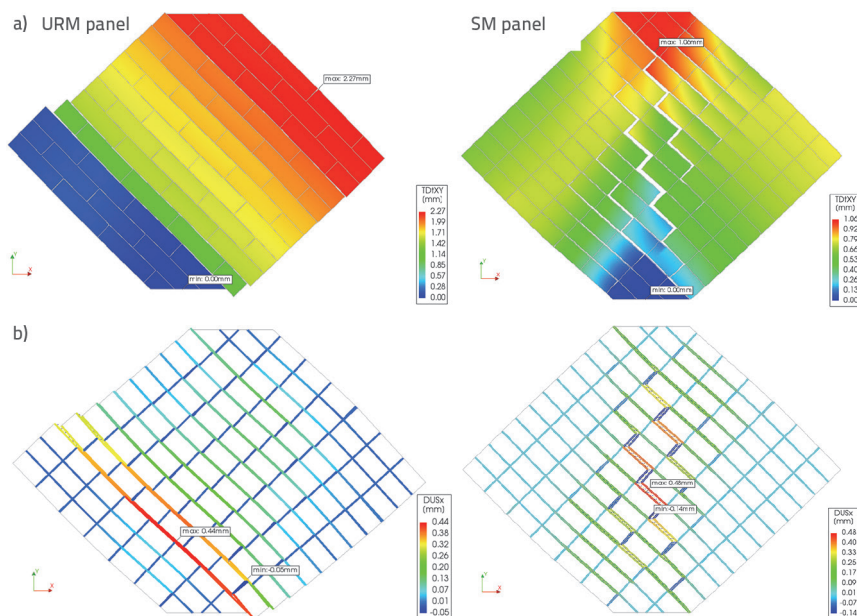
Obrasci pukotina za oba panela bili su dobro zastupljeni, kako je prikazano na slici 9.a. U nepojačanom zidnom panelu uočeno je značajno pucanje i klizanje horizontalnih sljubnica. Međutim, u središnjem dijelu pojačanih zidnih panela pojavile su se stepeničaste pukotine duž horizontalnih i vertikalnih sljubnica. Ovo ponašanje bilo je u skladu s oštećenjima dobivenim eksperimentalnim ispitivanjima, iako dijagonalni posmični slom klizanjem na nepojačanom zidnom panelu nije bio očit. Oštećenja su se pretežno pojavila u horizontalnim sljubnicama nepojačanih zidnih panela te na horizontalnim i vertikalnim sljubnicama pojačanih zidnih panela.

Tablica 6. Usporedba eksperimentalnih i rezultata metode konačnih elemenata za dijagonalno tlačno ispitivanje

Parametar	Jedinica	URM			SM		
		Eksperiment	MKE	Razl. [%]	Eksperiment	MKE	Razl. [%]
Opterećenje pri prvoj pukotini	kN	8,64	9,74	12,0	15,67	35,49	77,5
Pomak pri prvoj pukotini	mm	0,04	0,05	22,2	0,05	0,16	104,8
Početna krutost	kN/mm	216,0	194,8	-10,3	313,4	221,81	-34,2
Vršno opterećenje	kN	16,64	17,64	5,8	53,59	53,06	-1,0
Pomak pri vršnom opterećenju	mm	0,24	0,43	56,7	0,73	0,81	10,4
Posmično naprezanje	N/mm <sup>2</sup>	0,101	0,1	-1,0	0,316	0,301	-4,9
Krajnji pomak	mm	1,36	0,85	-46,2	1,20	1,03	-15,2



Slika 8. Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata za dijagonalnu tlačnu čvrstoću: a) URM uzorci (W-DP-1+3 = dijagonalni tlak običnog zida tj. nepojačanih zidova, W-DP-AVG = prosječni dijagonalni tlak, W-DP-MKE-SMM = rezultati MKE za dijagonalni tlak, pojednostavljeni mikromodel); b) SM uzorci (WS-DP-RPP-1+3 = dijagonalni tlak pojačanih zidova, WS-DP-RPP-AVG = prosječni dijagonalni tlak, WS-DP-RPP-FEM-SMM = rezultati MKE za dijagonalni tlak, pojednostavljeni mikromodel)

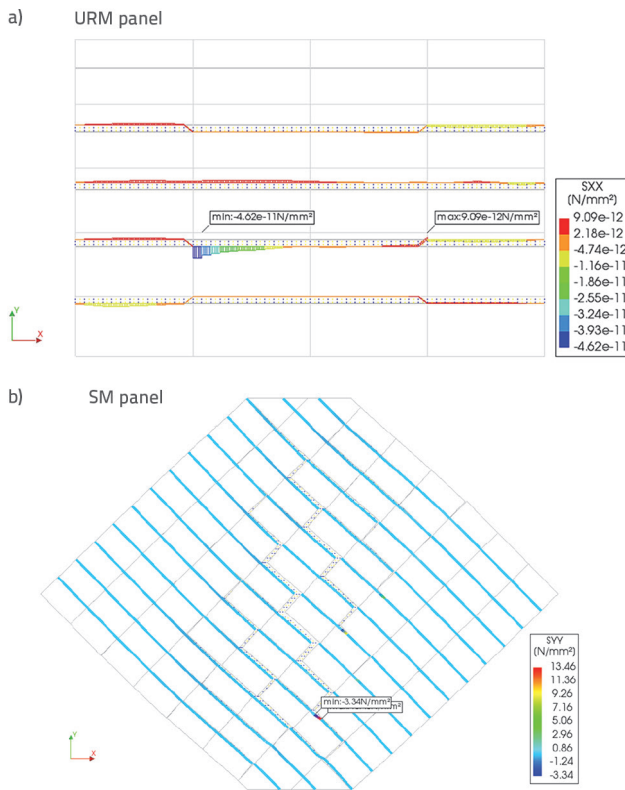


Slika 10. Numerički rezultati u posljednjem koraku izračuna: a) Polje pomaka (mm); b) Relativni pomak kontakta u poprečnom smjeru DUSx (mm)

Relativni pomaci kontakta u posmičnom smjeru prikazani su na slici 10.b. Kao što se očekivalo, naprezanja u PP trakama modeliranim kao ugrađena armatura bila su prilično niska i znatno ispod njihove granice popuštanja.

Slika 10. prikazuje relevantna ukupna Cauchyjeva naprezanja za oba panela opterećena tlakom i dijagonalnim vlakom. Sve PP trake imale su vrlo niske vrijednosti vlačnog naprezanja od približno 1 N/mm<sup>2</sup>. U slučaju pojačanog panela, naprezanja od najviše 13,5 N/mm<sup>2</sup> nastala su samo na nekoliko mjesta uzduž vertikale stepeničastih pukotina. Zbog ovih niskih vrijednosti naprezanja, PP trake nisu pridonijele ukupnoj tlačnoj ili dijagonalnoj vlačnoj čvrstoći testiranih panela, vjerojatno zato što su se PP trake mogle slobodno kretati u horizontalnim sljubicama bez

ograničavanja za zidove. Zahvaljujući svojstvima čvrstoće morta upotrijebljenog za reprofiliranje zidova, ukupna nosivost panela se povećala u oba slučaja opterećenja.



Slika 10. Relevantna Cauchyjeva ukupna naprezanja u PP trakama

## 6. Zaključak

U ovom je istraživanju prikazana primjena modeliranja i kalibracije pomoću konačnih elemenata s obzirom na eksperimentalne rezultate. Primjenom nekih od ulaznih parametara dobivenih testovima i kalibracijom ostalih potrebnih parametara za materijalne modele, ovo je istraživanje dokazalo učinkovitost nelinearnih izračuna za točnu simulaciju stvarnog ponašanja zidova od opeke, što je potvrđena bliskom korelacijom između numeričkih rezultata i eksperimentalnih podataka, čime je potvrđena učinkovitost pristupa modeliranju i materijalnih modela za analizu zidova od opeke.

Pojednostavljeni pristup mikromodeliranja usvojen u ovom istraživanju, koji kombinira model ukupne deformacije i rotirajućih pukotina za opeke i kombinirani model pucanja, posmika i gnječenja za sljubnice, pokazao se vrlo učinkovitim u bilježenju složenog nelinearnog ponašanja zida, posebno vidljivog u simulacijama nepojačanih i pojačanih zidnih panela pod tlačnim i dijagonalnim tlačnim opterećenjima.

Za ispitivanja tlačne čvrstoće, nelinearni model konačnih elemenata učinkovito je reproducirao ukupne eksperimentalne krivulje sile i pomaka za nepojačane i pojačane uzorke. MKE je pokazala visoku točnost u predviđanju vršnih opterećenja i

tlačnih naprezanja s odstupanjima unutar 6 % i za nepojačane i za pojačane uzorke, što potvrđuje pouzdanost modela u procjeni parametara čvrstoće loma pod aksijalnim tlakom. Dok je model točno zabilježio početak nelinearnosti zbog formiranja pukotine i krstog odgovora, značajno je precijenio opterećenje pri prvoj pukotini (54,6 % za obične, tj. nepojačane i 88,7 % za pojačane zidove) i pomak pri prvoj pukotini (81,0 % za nepojačane i 109,1 % za pojačane zidove). Ova odstupanja sugeriraju da je model potrebno poboljšati kako bi se zabilježio početak pucanja, posebno za pojačane zidove pod aksijalnim opterećenjima. Za nepojačane konstrukcije, MKE je pokazao razumno slaganje u predviđanju pomaka, precijenjujući pomak pri vršnom opterećenju za 16,6 % i konačni pomak za 38,9 %. Nasuprot tome, za pojačane konstrukcije, MKE je pokazao značajno podcjenjivanje pomaka pri vršnom opterećenju (122,6 % niže), ali izvrsno slaganje za konačni pomak (0,6 % razlika). Ove varijacije naglašavaju složenost modeliranja deformacije zida pod aksijalnim opterećenjima, posebno za pojačane uzorke.

U slučaju ispitivanja dijagonalne vlačne čvrstoće, simulirane krivulje sile i pomaka za nepojačane i pojačane uzorke zida bile su u skladu s eksperimentalnim rezultatima, posebno u pogledu bilježenja vršnih sila, posmičnog naprezanja i sveukupnog ponašanja, s razlikama unutar 6 % i za nepojačane i pojačane uzorke zida, pokazujući tako učinkovitost modela u predviđanju krajnje posmične čvrstoće. MKE simulacija precijenjuje opterećenje i pomak na prvoj pukotini u različitim mjerama, s precijenjenim opterećenjem od 12,0 % za nepojačane i 77,5 % za pojačane zidove; precijenjeni pomak je 22,2 % za nepojačane i 104,8 % za pojačane zidove. Veća odstupanja za pojačane konstrukcije dokazuju da je potrebno daljnje usavršavanje modela za pojačano zide pod dijagonalnom tlakom. MKE model precijenio je pomak pri vršnom opterećenju za oba uzorka: 56,7 % za nepojačane i 10,4 % za pojačane zidove. Nasuprot tome, krajnji pomak je podcijenjen za oba zida: 46,2 % za nepojačane i 15,2 % za pojačane zidove. Sposobnost modela da predstavi različite mehanizme otkazivanja uočene u nepojačanim i pojačanim panelima, značajna pucanja i klizanje u horizontalnim sljubnicama nepojačanih panela i stepeničasta pucanja duž horizontalnih i vertikalnih sljubnica pojačanih panela dodatno naglašavaju njegove mogućnosti predviđanja. Sveukupno, numerička simulacija pokazala je visoku pouzdanost u predviđanju vršnih opterećenja i naprezanja za ispitivanja aksijalnog i dijagonalnog tlaka. Međutim, model je pokazao ograničenja, osobito na početku pucanja i u području nakon vršnog opterećenja. Odstupanja su općenito bila izraženija za uzorke pojačanog zida, što sugerira da je potrebno daljnje usavršavanje kako bi se točno modeliralo ponašanje pojačanih sustava. Štoviše, nelinearna analiza konačnih elemenata pruža vrijedan uvid u raspodjelu naprezanja i mehanizme otkazivanja, koje je teško ili nemoguće razmatrati izravno u eksperimentima. Na primjer, model je otkrio relativne pomake na kontaktima i razine naprezanja u polipropilenskim trakama koje se primjenjuju za pojačavanje,

nudeći dublje razumijevanje mehanizma pojačanja. Ispravnim predviđanjem ponašanja zidova od opeke pod različitim uvjetima opterećenja, ovaj pristup nelinearnog modeliranja služi kao moćan alat za procjenu postojećih konstrukcija i projektiranje učinkovitih intervencija pojačanja. Dakle, ovaj pristup olakšava procjenu različitih strategija pojačanja bez potrebe za opsežnim i skupim eksperimentalnim ispitivanjima, potencijalno dovodeći do učinkovitijih i ekonomičnijih rješenja za očuvanje i poboljšanje zidanih konstrukcija.

Zaključno, ovo je istraživanje naglasilo ključnu ulogu nelinearnog modeliranja konačnih elemenata u premošćivanju jaza između teorijskog razumijevanja i stvarnog konstrukcijskog ponašanja zida. Međutim, modeli se mogu poboljšati određivanjem potrebnih parametara materijala putem eksperimentalnih ispitivanja umjesto procjene vrijednosti iz literature ili metodom pokušaja i pogreške. Ti modeli mogu biti korisni ako se vrijednosti vlačne

i vezne čvrstoće, kohezije i energije loma (moduli I i II) odrede putem ispitivanja.

## Zahvala

Ovo se istraživanje temelji na rezultatima projekta "Pojačavanje zida reprofiliranjem sljubnica" (Strengthening Masonry with Joint Repointing, STREP), koje je ostvareno u suradnji triju partnerskih institucija: Građevinskog fakulteta u Skoplju, Katedrom za teoriju konstrukcija i računsku analizu i Institutom za potresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju. Te institucije dijelom pripadaju Sveučilištu Sv. Ćirila i Metoda u Skoplju i provela su eksperimentalna ispitivanja i numeričke simulacije. Tvrtka ADING A.D. iz Skoplja bila je odgovorna za proizvodnju posebnog modificiranog materijala za reprofiliranje sljubnica i njegovu primjenu u ispitnim modelima. Zahvaljujemo osoblju laboratorija na tehničkoj pomoći tijekom ovog projekta.

## LITERATURA

- [1] Uroš, M., Šavor Novak, M., Atalić, J., Sigmund, Z., Baniček, M., Demšić, M., Hak, S.: Post-earthquake damage assessment of buildings – procedure for conducting building inspections, *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 12, pp. 1089–1115, <https://doi.org/10.14256/JCE.2969.2020>.
- [2] Radnić, J., Grgić, N., Buzov, A., Banović, I., Smilović Zulim, M., Baloević, G., Sunara, M.: Mw6.4 Petrinja earthquake in Croatia: Main earthquake parameters, impact on buildings and recommendation for their structural strengthening, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 11, pp. 1109–1128, <https://doi.org/10.14256/JCE.3243.2021>.
- [3] Šavor Novak, M., Uroš, M., Atalić, J., Herak, M., Demšić, M., Baniček, M., Lazarević, D., Bijelić, N., Crnogorac, M., Todorčić, M.: Zagreb earthquake of 22 March 2020 – preliminary report on seismologic aspects and damage to buildings, *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 10, pp. 843–867, <https://doi.org/10.14256/JCE.2966.2020>.
- [4] D'Altri, A.M., Cannizzaro, F., Petracca, M., Talledo, D.A.: Nonlinear modelling of the seismic response of masonry structures: Calibration strategies, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20 (2022), pp. 1999–2043, <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01104-1>.
- [5] Chang, L., Rots, J.G., Esposito, R.: Influence of aspect ratio and pre-compression on force capacity of unreinforced masonry walls in out-of-plane two-way bending, *Engineering Structures*, 249 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113350>.
- [6] Di Re, P., Greco, M., Lofrano, E., Paolone, A.: Finite element modelling of masonry elements reinforced with the CAM system, *Structures*, 44 (2022), pp. 740–754, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.028>.
- [7] Chisari, C., Macorini, L., Izzuddin, B.A.: An anisotropic plastic-damage model for 3D nonlinear simulation of masonry structures, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 13 (2022) 6, <https://doi.org/10.1002/nme.7162>.
- [8] Ademović, N., Hrasnica, M.: Capacity degradation and crack pattern development in a multi-storey unreinforced masonry building, *GRAĐEVINAR*, 67 (2015) 4, pp. 351–361, <https://doi.org/10.14256/JCE.1191.2014>.
- [9] Cakir, F., Seker, B.S., Dogangun, A.: Assessment of structural performance of historical Ishan church, *GRAĐEVINAR*, 66 (2014) 5, pp. 433–443, <https://doi.org/10.14256/JCE.1015.2014>.
- [10] Boem, I.: Multi-layer modelling of masonry structures strengthened through textile-reinforced mortar [version 2; Peer review: 4 approved], *Open. Res. Europe* 2023, 2 (2023) 132, <https://doi.org/10.12688/openreseurope.15233.2>.
- [11] Boem, I.: Masonry elements strengthened with TRM: A Review of experimental, design and numerical methods, *Buildings*, 12 (2022) 9, p.1307, <https://doi.org/10.3390/buildings12091307>.
- [12] Hernoune, H., Benabed, B., Alshugaa, M., Abousnina, R., Guettala, A.: Strengthening of masonry walls with CFRP composite: experiments and numerical modelling, *Journal of Silicate Based and Composite Materials*, 2019., <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2020.1>.
- [13] Bernat-Maso, E., Gil, L., Roca, P.: Numerical analysis of the load-bearing capacity of brick masonry walls strengthened with textile reinforced mortar and subjected to eccentric compressive loading, *Engineering Structures*, 91 (2015), pp. 96–111, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.02.032>.
- [14] Lignola, G.P., Prota, A., Manfredi, G.: Numerical investigation on the influence of FRP retrofit layout and geometry on the in-plane behavior of masonry walls, *Journal of composites for construction*, 16 (2012) 6, pp. 712–723, [10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000297](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000297).
- [15] D'Altri, A.M., Cannizzaro, F., Petracca, M., Talledo, D.A.: Nonlinear modelling of the seismic response of masonry structures: Calibration strategies, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20 (2022), pp. 1999–2043.
- [16] Muhita, I.B., Masia, M.J., Stewart, M.G., Isfeld, A.C.: Spatial variability and stochastic finite element model of unreinforced masonry veneer wall system under Out-of-plane loading, *Engineering Structures*, 267 (2022).
- [17] Pari, M., Van de Graaf, A.V., Hendriks, M.A.N., Rots, J.G.: A multi-surface interface model for sequentially linear methods to analyse masonry structures, *Engineering Structures*, 238 (2021).

- [18] Chang, L., Rots, J.G., Esposito, R.: Influence of aspect ratio and pre-compression on force capacity of unreinforced masonry walls in out-of-plane two-way bending, *Engineering Structures*, 249 (2021).
- [19] Campbell, J., Silva, V., Balboa, R., Durán, M.: Numerical approach to determine the capacity curves of clay masonry walls with openings, *Rev. int. métodos numér. cálc. diseño ing*, 36 (2019) 1, p. 12
- [20] Vemuri, J., Ehteshamuddin, S., Ravula, M., Kolluru, S.: Pushover analysis of soft brick unreinforced masonry walls using analytical and numerical approaches, *Materials Today: Proceedings*, 28 (2020), Part 2, pp. 420-425
- [21] Medić, S.: Experimental and numerical analysis of solid brick masonry walls exposed to seismic loading, PhD thesis, Faculty of Civil Engineering, University of Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2018.
- [22] Haach, V.G., Vasconcelos, G., Lourenço, P.B.: Study of the behaviour of reinforced masonry wallets subjected to diagonal compression through numerical modelling, *Proceedings of 9th International Masonry Conference in Guimarães, Portugal, July 7-9, 2014*.
- [23] Lemos, J.V., Sarhosis, V.: Discrete element bonded-block models for detailed analysis of masonry, *Infrastructures* 2022, 7 (2022) 3, p. 31, doi: <https://doi.org/10.3390/infrastructures7030031>.
- [24] Pulatsu, B., Gencer, F., Erdogmus, E.: Study of the effect of construction techniques on the seismic capacity of ancient dry-joint masonry towers through DEM, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26 (2020) 9, pp. 3913-3930, <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1824823>.
- [25] Masi, F., Stefanou, I., Maffi-Berthier, V., Vannucci, P.: A Discrete Element Method based-approach for arched masonry structures under blast loads, *Engineering Structures*, 216 (2020), p. 110721, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110721>.
- [26] Pulatsu, B., Bretas, E.M., Lourenço, P.B.: Discrete element modelling of masonry structures: Validation and application, *Universidade do Minho: RepositoriUM, Techno-Press*, 2016.
- [27] Sarhosis, V., Bagi, K., Lemos, J., Milani, G.: Computational modelling of masonry structures using the discrete element method, *IGI Global*, 2016.
- [28] Churilov, S., Dumova-Jovanoska, E.: Calibration of a numerical model for masonry with application to experimental results, *Architecture, Civil Engineering, Environment*, 3 (2008), pp. 41-48
- [29] Meguro K, Tagel-Din H.: Applied element method for structural analysis: Theory and application for linear materials, *Structural Engineering/Earthquake Engineering*, (2000).
- [30] Khattak, N., Derakhshan, H., Thambiratnam, D.P., Malomo, D., Perera, N.J.: Modelling the in-plane/out-of-plane interaction of brick and stone masonry structures using Applied Element Method, *Journal of Building Engineering*, 76 (2023), p. 107175, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107175>.
- [31] Adhikari, R.K.; Parammal Vatter, A.; D'Ayala, D.: Seismic performance assessment of low-rise unreinforced and confined brick masonry school buildings using the Applied Element Method, *Buildings*, 13 (2023), p. 159. <https://doi.org/10.3390/buildings13010159>.
- [32] Sharma, S., Marasca, A., Ponte, M., Bento, R.: Modelling the in-plane cyclic behaviour of typical Portuguese rubble stone masonry using the applied element method, *Structures*, 46 (2022), pp. 1224-1242, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.10.107>.
- [33] Adhikari, R., D'Ayala, D.: Applied Element Modelling and Pushover Analysis of unreinforced masonry buildings with flexible roof diaphragm, *Proceedings of the 7th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, European Community on Computational Methods in Applied Sciences (ECCOMAS)*, 2019.
- [34] Malomo, D., Pinho, R., Penna, A.: Using the Applied Element Method for modelling calcium silicate brick masonry subjected to in-plane cyclic loading, *Earthquake Eng. Struct. Dyn*, 47 (2018), pp. 1610-1630, <https://doi.org/10.1002/eqe.3032>.
- [35] Churilov, S., Dumova-Jovanoska, E., Shendova, V., Krstevska, L., Damchevski, B., Janchev, D.: Experimental investigation on masonry structural joint repointing with cement-polymer mortar and polypropylene strips, *GRAĐEVINAR*, 76 (2024) 7, pp. 607-620, <https://doi.org/10.14256/JCE.3893.2023>.
- [36] Tahat, H., Bedirhanoglu, I.: Finite Element Modelling of masonry wall retrofitted with combination of textile-reinforced mortar and thermal insulation, *Building for the Future: Durable, Sustainable, Resilient. fib Symposium 2023.- Lecture Notes in Civil Engineering*, 350 (2023), [https://doi.org/10.1007/978-3-031-32511-3\\_75](https://doi.org/10.1007/978-3-031-32511-3_75).
- [37] Di Re, P., Greco, M., Lofrano, E., Paolone, A.: Finite element modelling of masonry elements reinforced with the CAM system, *Structures*, 44 (2022), pp. 740-754, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.028>.
- [38] Brookes, C.L., Mehrkar-Asl, S.: Numerical modelling of masonry using discrete elements, *Seismic Design and Practice into the Next Century*, Routledge, 1998., doi: <https://www.doi.org/10.1201/9780203740026-18>.
- [39] Asad, M., Zahra, T., Thamboo, T., Song, M.: Finite element modelling of reinforced masonry walls under axial compression, *Engineering Structures*, 252 (2022), p. 113594, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113594>.
- [40] Chisari, C., Macorini, L., Izzuddin, B.A.: An anisotropic plastic-damage model for 3D nonlinear simulation of masonry structures, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, (2022), <https://doi.org/10.1002/nme.7162>.
- [41] Angelillo, M., Lourenço, P.B., Milani, G.: Masonry behaviour and modelling, *Mechanics of Masonry Structures*, CISM International Centre for Mechanical Sciences, 551 (2014).
- [42] D'Altri, A.M., Sarhosis, V., Milani, G.: Modelling strategies for the computational analysis of unreinforced masonry structures: Review and classification, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27 (2020), pp. 1153-1185, <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09351-x>.
- [43] Lourenço, P.B., Gaetani, A.: Finite Element Analysis for building assessment: Advanced use and practical recommendations (1<sup>st</sup> ed.), *Routledge, Taylor & Francis Group*, 2022.
- [44] Lourenço, P.B.: Computational strategies for masonry structures, PhD dissertation, Delft University of Technology, 1996.
- [45] Vasconcelos, G.: Masonry Components, *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2000., [https://doi.org/10.1007/978-3-642-35344-4\\_152](https://doi.org/10.1007/978-3-642-35344-4_152).
- [46] Roca, P., Cervera, M., Gariup, G., Pelà, L.: Structural Analysis of Masonry Historical Constructions: Classical and Advanced Approaches, *Arch. Computat. Methods Eng.*, 17 (2010), pp. 299-325, <https://doi.org/10.1007/s11831-010-9046-1>.
- [47] Asteris, P.G., Cavaleri, L., Di Trapani, F., Tsaris, A.K.: Numerical modelling of out-of-plane response of infilled frames: State of the art and future challenges for the equivalent strut macromodels, *Engineering Structures*, 132 (2017), pp. 110-122, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.10.012>.

- [48] Pelà, L., Cervera, M., Roca, P.: An orthotropic damage model for the analysis of masonry structures, *Construction and Building Materials*, 41 (2013), pp. 957-967, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.014>.
- [49] Addessi, D., Mastrandrea, A., Sacco, E.: An equilibrated macro-element for nonlinear analysis of masonry structures, *Engineering Structures*, 70 (2014), pp. 82-93, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.03.034>.
- [50] Rizzano, G., Sabatino, R.: Non-linear static analysis of masonry structures by means of equivalent frames simplified approach, *Proceedings of the 8th International Masonry Conference, Dresden, Germany, 2010.*, pp. 1211-1220
- [51] Vrouva, A., Psycharis, I., Eleftheriou, V.: Parametric Investigation of the seismic response of ancient isodomic masonry walls, *Protection of Historical Constructions PROHITECH 2021, Lecture Notes in Civil Engineering*, 209 (2022), Springer, Cham, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-90788-4\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-030-90788-4_37).
- [52] Mayorca, P., Meguro, K.: Modelling masonry structures using the Applied Element Method, *Journal of the Seisan - Kenkyu*, 56 (2003), pp. 581-584
- [53] Lourenço, P.B., Rots, J.G., Blaauwendraad, J.: Continuum model for masonry: Parameter estimation and validation, *Journal of structural engineering*, 124 (1998) 6, pp. 642-652, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1998\)124:6\(642\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:6(642)).
- [54] Papa, E.: A unilateral damage model for masonry based on a homogenisation procedure, *Mech. Cohes.-Fric. Mater.*, 1 (1996), pp. 349-366, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1484\(199610\)1:4<349::AID-CFM18>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1484(199610)1:4<349::AID-CFM18>3.0.CO;2-M).
- [55] Lourenço, P.B., Rots, J.G.: Multisurface interface model for analysis of masonry structures, *Journal of engineering mechanics*, 123 (1997) 7, pp. 660-668, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123:7\(660\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:7(660)).
- [56] Zucchini, A., Lourenço, P.B.: A micro-mechanical model for the homogenisation of masonry, *International Journal of Solids and Structures*, 39 (2002) 12, pp. 3233-3255, [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(02\)00230-5](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(02)00230-5).
- [57] Milosević, J., Lopes, M., Gago, A.S. Bento, R.: Testing and modelling the diagonal tension strength of rubble stone masonry panels, *Engineering Structures*, 52 (2013), pp. 581-591
- [58] Sacco, E.: Micro, Multiscale and Macro Models for Masonry Structures, *Mechanics of Masonry Structures*, CISM International Centre for Mechanical Sciences, 551 (2014).
- [59] DIANA: DIANA Finite Element Analysis - User's Manual, Delft, The Netherlands, 2016.
- [60] Vecchio, F.J., Collins, M.P.: The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear, *ACI Journal*, 83 (1986) 2, pp. 219-231
- [61] Lourenço, P.B., Rots, J.G.: A multi-surface interface model for the analysis of masonry structures, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 123 (1997) 7, pp. 660-668
- [62] Zijl, van, G.P. A.G.: Computational modelling of masonry creep and shrinkage, PhD thesis, Delft University of Technology, 2000.
- [63] Nowak, R., Kania, T., Derkach, V., Orłowicz, R., Halaliuk, A., Ekiert, E., Jaworski, R.: Strength parameters of clay brick walls with various directions of force, *Materials*, 14 (2021) 21, p. 6461
- [64] NZSEE: Seismic assessment of existing buildings (New Zealand Technical guidelines for engineering assessments) - Part C - Unreinforced masonry buildings, Wellington, New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2017.