

# **Eksperimentalna i numerička analiza zidova od pune opeke**

**Senad Medić, Mustafa Hrasnica**

Univerzitet u Sarajevu, Građevinski fakultet

## **Sažetak**

Na Građevinskom fakultetu u Sarajevu izvršeno je eksperimentalno ispitivanje običnoga i ojačanog zida u stvarnoj veličini (2,3/2,4/0,25 m) pri djelovanju cikličnoga horizontalnog opterećenja u ravnini uz konstantni pritisak. Kod običnih je zidova došlo do otkazivanja nosivosti s pojavom karakterističnih ukriženih pukotina, dok se kod zidova ojačanih armiranobetonskom oblogom javlja prevrtanje krutoga tijela. Numerička analiza provedena je primjenom programa Diana 10.1 na makromodelima pri čemu je zide modelirano kao ortotropan i nelinearan heterogeni materijal koji može otkazati na smicanje, zatezanje ili pritisak.

*Ključne riječi: zidovi od pune opeke, ab obloga, eksperimentalno ispitivanje, makro-modeli*

## **Experimental and numerical analysis of solid brick masonry walls**

### **Abstract**

An experimental investigation of strengthened and unstrengthened solid brick masonry walls in full scale (2.3/2.4/0.25m) exposed to cyclic horizontal in – plane loading and constant vertical pressure was conducted at the Faculty of Civil Engineering in Sarajevo. The failure mechanism of an unstrengthened wall is typical with diagonal crack pattern, while the walls strengthened with RC jacketing exhibit rocking. Numerical analysis was performed using Diana 10.1 on macro-models where masonry is modeled as orthotropic and nonlinear heterogeneous material which can fail in shear, tension or compression.

*Key words: solid brick masonry walls, RC jacketing, experimental testing, macro-models*

## 1. Uvod

U seizmički aktivnim područjima od ključne je važnosti otpornost građevina na djelovanje potresa. S obzirom na stupanj izgrađenosti urbanih sredina, realna je opasnost od oštećenja i rušenja u slučaju jakih potresa koji predstavljaju prirodnu katastrofu. Pri tome su posebno ugrožene postojeće građevine, od kojih je većina građena bez primjene seizmičkih propisa. Bosna i Hercegovina se nalazi u seizmički aktivnom području jugoistočne Evrope, što je i potvrđeno s nekoliko jakih potresa koji su pogodili regiju u drugoj polovini prošloga stoljeća. Mjerodavno vršno ubrzanje tla (engl. *peak ground acceleration*, *PGA*) iznosi 0,10 – 0,20 g u najvećemu dijelu BiH kao i susjednih zemalja, ali se čak i PGA od 0,30 – 0,35 g mora uzeti u obzir na pojedinim mikro-područjima (slika 1.).

Zidane konstrukcije predstavljaju tradicionalni način gradnje u regiji zapadnoga Balkana, kao i u većem dijelu Evrope. Najveći dio postojećih zgrada imaju zidanu nosivu konstrukciju, a također su i mnoge kulturnopovijesne građevine, kojima je ova regija izuzetno bogata, upravo sagrađene kao zidane konstrukcije. Osim stoljetne tradicije zidanih nosivih konstrukcija, treba istaknuti da je veliki broj višekatnih zidanih zgrada izgrađen 50-ih i 60-ih godina prošloga stoljeća, prilikom masovne obnove Evrope nakon II. svjetskog rata. U pravilu je riječ o takozvanim običnim zidanim konstrukcijama (nearmiranim, neojačanim), koje su se pokazale ranjivima u slučaju djelovanja jakih potresa.

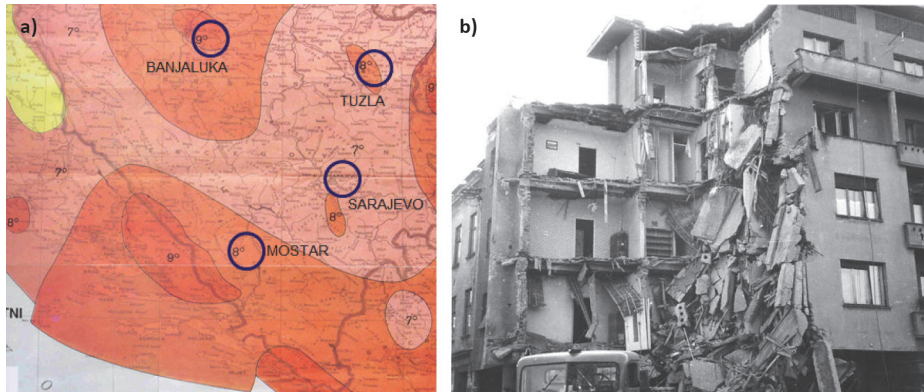
Tradicionalne zidane zgrade imaju relativno masivnu, ali i krutu nosivu konstrukciju kod koje se oštećenja mogu pojaviti već pri umjerenim kretanjima tla. Tipična oštećenja javljaju se u obliku ukriženih dijagonalnih pukotina. Za povoljniji seizmički odgovor neophodno je poboljšanje duktilnosti nosive konstrukcije, što rezultira većom disipacijom energije unesene potresom. Osim niskoga kapaciteta nelinearnoga ponašanja, mnoge se višekatne stambene zgrade odlikuju neadekvatnim rasporedom nosivih zidova u dva međusobno okomita smjera, promatrano u tlocrtu.

Radi poboljšanja svojstava duktilnosti i nosivosti mogu se primijeniti pojačanja zidova od opeke duktilnijim materijalima. Tradicionalno pojačanje zidova vrši se armiranobetonskim omotačem (engl. *jacketing*), ali se mogu primijeniti i noviji materijali, kao karbonske vrpce ili plastične mreže. Međutim, evidentan je nedostatak istraživanja koja će to potvrditi, posebno za odabrani tip zidova karakterističan za veliki broj zgrada u našoj regiji.

Poseban problem predstavlja modeliranje postojećih zgrada zbog nedostatka tehničke dokumentacije i nepoznavanja mehaničkih svojstava ugrađenih materijala. Stoga, seizmička analiza i procjena sigurnosti zidanih objekata predstavlja kompliciran i izazovan zadatak za građevinske inženjere (Hrasnica, 2005).

Na Institutu za materijale i konstrukcije Građevinskoga fakulteta u Sarajevu izvršeno je eksperimentalno ispitivanje običnih zidova u punom mjerilu (2,3/2,4/0,25 m),

tipičnih za nosive sisteme višekatnih zidanih zgrada iza II. svjetskog rata, pri djelovanju cikličnoga horizontalnog opterećenja u ravnini. Radi poboljšanja nosivosti i duktilnosti zidovi su konvencionalno ojačani jednostrano ili dvostrano oblogom od armiranoga betona ili morta. Ispitivanje zidanih konstrukcija predstavlja primarni aspekt verifikacije njihove seizmičke otpornosti, jer se karakteristike ziđa ne mogu jednostavno dobiti homogeniziranjem svojstava morta i opeke (Tomažević, 1999).



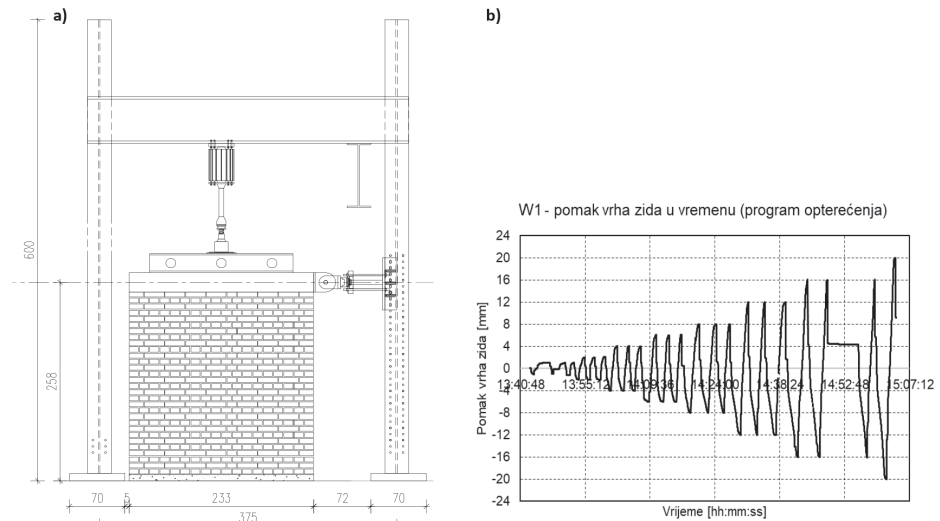
Slika 1. a) Mapa seizmičkoga intenziteta BiH prema MSK-64, b) urušavanje dijela zgrade nakon potresa u Banjoj Luci 1969. godine

## 2. Eksperimentalna ispitivanja zidova

### 2.1 Obični zid

Program eksperimentalnih istraživanja ponašanja zidova odnosi se na ispitivanja pod konstantnom vertikalnom silom koja se unosi na slobodnomu gornjem rubu i cikličnom horizontalnom statičkom silom u ravnini zida. Intenzitet vertikalnoga naprezanja približno je u granicama realnoga naprezanja u stanju eksploatacije. Ukupno su ispitana četiri zida, dva neojačana (označena s W1 i W2) i dva ojačana armiranobetonskom oblogom (W3 i W4). Geometrija zida prilagođena je opremi za ispitivanje i odabrana tako da odgovara karakterističnom zidu u izgrađenom objektu tipičnom za period iza II. svjetskog rata. Dimenzije neojačanih zidova (W1 i W2) su  $l/h/t = 233/241/25$  cm, a konfiguracija testa za ciklično ispitivanje prikazana je na slici 2.a. Za razliku od neojačanoga, ojačani zid dodatno ima obostranu betonsku oblogu debljine 4–5 cm, armiranu s Q196 i spregnutu sa zidom odgovarajućim sidrima. Odnos visine i duljine zidova približno je 1:1, tako da na osnovi geometrijskih odnosa uzorci ne spadaju ni u vitke niti u duge zidove. Mehanička svojstva komponenta zidane konstrukcije te modul elastičnosti i čvrstoća na pritisak ziđa ispitani su prema odgovarajućim evropskim normama, a dani su u (Medić, 2018).

Zidovi u zgradama obično su izloženi relativno manjim naprezanjima na pritisak. Na osnovi analize tipične zgrade, normalno naprezanje karakteristično za zid iznosi oko  $0,4 \text{ N/mm}^2$  (sila jednaka 230 kN), što je oko 1/10 izmjerene tlačne čvrstoće. Stoga je ova veličina vertikalnoga naprezanja nametnuta u testovima. Ojačani zidovi ispitani su i pod naprezanjem od  $0,8 \text{ N/mm}^2$  (sila jednaka 460 kN), jer pri nižemu nije došlo do sloma. Intenzitet vertikalne sile (napona) ograničen je kapacitetom preše Amsler, koji je jednak 500 kN. Tipični program opterećenja prikazan je na slici 2. b. i odnosi se na zid W1.

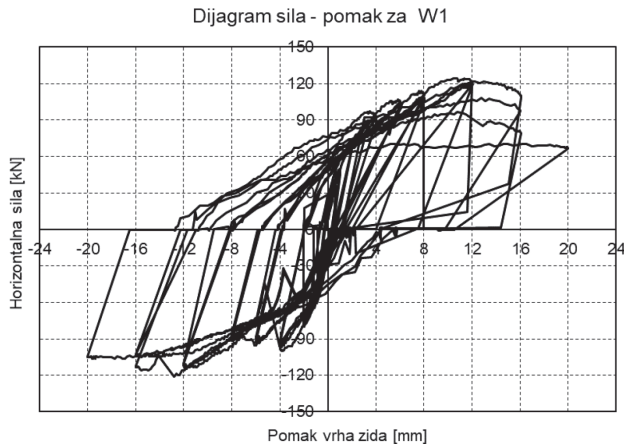


Slika 2. a) Konfiguracija testa za ciklično ispitivanje zidova, b) tipični program opterećenja



Slika 3. a) Zid W1 nakon ispitivanja, b) raspored i širina pukotina

Kao što je i očekivano, obični (neoljačani) zid otkazuje na posmik s pojavom karakterističnih ukriženih dijagonalnih pukotina. Na slici 3. prikazan je zid W1 nakon ispitivanja, kao i detaljan raspored i širina pukotina. Pukotine se prvo počinju javljati na sredini zida, a u konačnoj fazi evidentirane su pukotine širine preko 40 mm. Konačna je širina pukotina dvostruko veća od nametnutoga pomaka (max 20 mm, slika 2.b.), što je uzrokovano akumulacijom plastične deformacije (klizanja) uzduž glavne kose pukotine iz ciklusa u ciklus. Histerezna krivulja (dijagram sila–pomak vrha zida) prikazana je na slici 4.



**Slika 4. Histereza zabilježena na neoljačanom zidu W1:  $V = 230 \text{ kN}$  ( $\sigma = 0.4 \text{ N/mm}^2$ )**

Tijekom ispitivanja primijećene su raznovrsne specifičnosti ponašanja zida. Pri malim vertikalnim tlačnim naprezanjima dolazi do otkazivanja klizanjem u spojnicama, pri čemu opeke u pravilu ostaju neoštećene. Pukotina se formira u jednoj horizontalnoj spojnici ili stepeničasto kroz horizontalne i vertikalne spojnice. Povećanjem tlačnoga naprezanja, nakon početnoga klizanja u spojnicama, dolazi do rotacije opeka, pri čemu se u opeci javljaju velika vlačna naprezanja koje dovode do sloma. Iznad određene vrijednosti vertikalnoga opterećenja slom nastaje isključivo zbog prekoračenja vlačne čvrstoće opeke. Za razliku od klizanja pri kojemu je energija dissipirana na trenje, histereza puna i globalno ponašanje duktilno (plastično), vlačni je slom opeke krhak i dolazi do degradacije krutosti karakteristične za modele mehanike oštećenja (engl. *damage*). Na slici 3.b. može se uočiti da su pukotine posljedica klizanja u spojnicama, ali i vlačnoga otkazivanja opeke, tako da je model ponašanja kombinirani plastičnost-oštećenje.

Parametri nosivosti i deformabilnosti, dobiveni kao rezultat ispitivanja, prikazani su u tablici 1. (tabela 1.), a odnose se na karakteristična granična stanja (pojava pukotina, maksimalna nosivost, granična nosivost). Za svako granično stanje izdvojeni su karakterističan pomak, horizontalna sila, sekantna krutost (odnos sile i pomaka) i relativni pomak (rotacija). Također, navedena je početna elastična krutost.

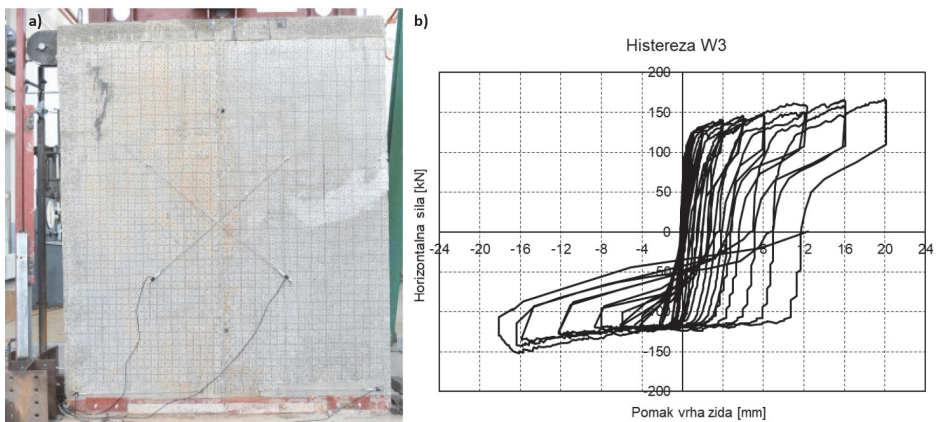
**Tablica 1. Parametri nosivosti i deformabilnosti zida W1**

Oznaka zida	Pojava pukotina				Maksimalna nosivost			Granična nosivost		
	$K_{e,i}$	$H_{cr}$	$d_{cr}$	$K_{cr}$	$H_{max}$	$d_{Hmax}$	$K_{Hmax}$	$H_{dmax}$	$d_{max}$	$K_{dmax}$
	[kN/mm]	[kN]	[mm]	[kN/mm]	[kN]	[mm]	[kN/mm]	[kN]	[mm]	[kN/mm]
W1	116.3	56	0.9	62.2	120	12	10	105	20	5.25
Pomaci $d_{cr}$ , $d_{Hmax}$ i $d_{dmax}$ odgovaraju relativnim pomacima $\theta_{cr} = 0.4\%$ , $\theta_{Hmax} = 4.8\%$ i $\theta_{dmax} = 8.0\%$										

## 2.2. Ojačani zid

Radi usporedbe rezultata ojačani zidovi W3 i W4 ispitani su pod istim vertikalnim opterećenjem kao i neojačani zidovi ( $\sigma = 0,4 \text{ N/mm}^2$  odnosno  $V = 230 \text{ kN}$ ). Budući da do sloma nije došlo, zidovi su dodatno ispitani pod dvostruko većim opterećenjem ( $\sigma = 0,8 \text{ N/mm}^2$  odnosno  $V = 460 \text{ kN}$ ). Vertikalnu silu većega intenziteta nije bilo moguće nanijeti zbog ograničenja kapaciteta hidraulične preše.

Ojačavanjem zida tip sloma promijenjen je u odnosu na prethodne zidove. Uzorak W3 se ponaša kao kruto tijelo koje rotira oko ruba zida (engl. *rocking*), odnosno diže se iznad temeljne grede (slika 5.a.). Ta se vrsta otkazivanja naziva lomom na savijanje i nastupa kada su prekoračena vlačna naprezanja na spoju s temeljnom gredom. U petama zida nisu primijećene pukotine izazvane tlačnim naprezanjima, a nije uočen ni gubitak spoja između obloge i zida (delaminacija).


**Slika 5. a) Ojačani zid W3: a) odizanje zida, b) histerezna petlja za  $V = 230 \text{ kN}$  ( $\sigma = 0,4 \text{ N/mm}^2$ )**

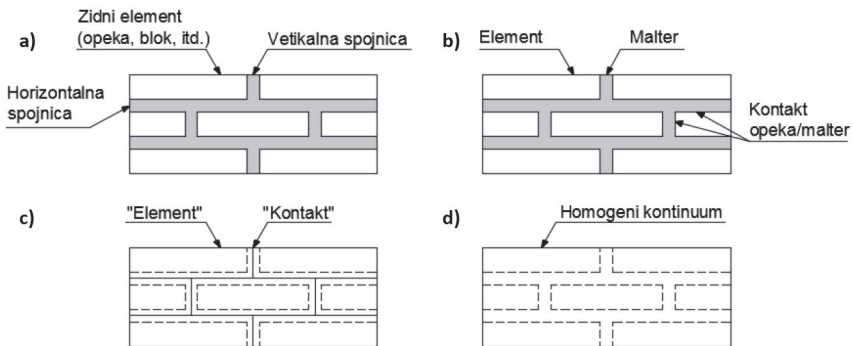
Na slici 5.b. prikazan je dijagram sila–pomak zida W3. Nakon početnoga prirasta sile nastupa smanjenje krutosti i gotovo horizontalan plato „tečenja“ gdje se horizontalna sila blago povećava. Međutim, nelinearni odgovor nije posljedica degradacije materijala s pojavom pukotina, već smanjenja pritisnute zone na spoju zida i temelja (tzv. dekompresija). Histereza ima oblik S, karakterističan za otkazivanje uzroko-

vano savijanjem. Zid ima veliku duktilnost, ali je površina obuhvaćena histerezom odnosno disipacija unešene energije mala. Na slici 5.b. može se uočiti nesimetrija histereze uzrokovana deformacijom pristroja, kao i proklizavanjem na spoju zida i temelja. Rotacija zida kao krutoga tijela može se spriječiti sidrenjem armature u podložnu konstrukciju, što se preporučuje prilikom ojačanja građevina.

### 3. Numerički modeli

#### 3.1. Metoda konačnih elemenata i razredi modela za zidane konstrukcije

Ovisno o željenoj točnosti ili jednostavnosti, za proračun zidanih konstrukcija metodom konačnih elemenata upotrebljavaju se tri vrste modela: detaljni mikromodel, mezomodel (tzv. pojednostavnjeni mikromodel) i makromodel (slika 6.).



**Slika 6. Strategije modeliranja zidanih konstrukcija (Lourenço, 1996): a) uzorak zida, b) detaljni mikromodel, c) mezomodel (pojednostavnjeni mikromodel), d) homogeni makromodel**

U mikromodelu opeka i mort prikazani su elementima kontinuuma s odgovarajućim elastičnim svojstvima i kriterijima sloma. Kontakt opeka–mort predstavlja ravninu potencijalne pukotine/klizanja i modeliran je kontaktnim (engl. interface) elementima kojima se može simulirati diskontinuitet u polju pomaka. Diskretizacija modela konačnim elementima uvjetovana je geometrijom pojedinih komponenata, tako da je geometrija zida u cjelini uzeta u obzir, a numerički model sadrži sve načine otkazivanja zidane konstrukcije. Budući da su spojnice vrlo male u odnosu na dimenzije zidnoga elementa, modelu se nameće vrlo rafinirana mreža koja ima izuzetne numeričke zahtjeve u smislu računalskoga vremena i memorije. Mikromodeliranje je česta tehnika proračuna kod manjih konstrukcija ili se pak primjenjuje u izučavanju doprinosa pojedinih komponenata kompozita globalnom ponašanju.

Mezomodel tretira opeku kao i detaljni model, međutim, spojnica mortom i komponenta kontakta homogenizirani su u jedan zajednički kontaktni element nulte deblji-

ne koji povezuje susjedne opeke. Radi zadržavanja izvorne geometrije zida opeke su uvećane za debljinu spojnice. Zid je, dakle, modeliran kao skup blokova povezanih ravninama potencijalnih pukotina na mjestima spojnica. Raspored opeka utječe na diskretizaciju modela, ali element koji predstavlja mort i kontakt nije u stanju opisati Poissonov efekt morta na stanje naprezanja u opeci. Naime, u stvarnosti se fleksibilan mort pod pritiskom istiskuje između opeka i izaziva vlak u dva smjera okomito na djelovanje tlačne sile. Element kontakta uobičajeno je formuliran tako da su posmični i normalni pomak neovisni (engl. *uncoupled*), pa normalni pomak ne izaziva posmičnu trakciju. Stvarno troosno stanje naprezanja u opeci koja je, primjerice, dio zidane prizme izložene čistom tlaku u numeričkomu modelu postaje jednoosno tlačno naprezanje. Zbog toga primjenom pojednostavnjenoga modela nije moguće obuhvatiti sve oblike sloma.

Tehnika makromodeliranja tretira stvarni heterogeni zidni panel kao homogeni (najčešće anizotropni) kontinuum koji može biti diskretiziran grubljom mrežom neovisnom o rasporedu opeka. Takvo je modeliranje prikladno za slučajeve u kojima želimo predvidjeti globalan odgovor realne višekatne zidane konstrukcije ili analizirati utjecaj „globalnih“ parametara zida (čvrstoća na pritisak, geometrija konstrukcije) na odgovor konstrukcije kao cjeline.

Općenito, za korektnu realizaciju mikromodela treba poznavati veliki broj ulaznih podataka koji se najčešće određuju laboratorijskim ispitivanjima ili se pak preuzimaju iz dostupne literature. Nažalost, izbor podataka često je vrlo težak zadatak, zbog velikoga rasipanja eksperimentalnih rezultata te upitne pouzdanosti izvedenih testova. U praksi, pa i u znanstvenom istraživanju, makromodeliranje je najčešći pristup proračunu zidanih konstrukcija, zbog povoljnoga omjera između trajanja proračuna i razine točnosti. Međutim, nedostatak većine makromodela leži u tome da nisu u mogućnosti prikazati diskontinuitete koji se javljaju između blokova ili dijelova zidane konstrukcije.

Neovisno o vrsti modela, za metodu konačnih elemenata upotrebljavaju se implicitni solveri koji formiraju globalnu matricu krutosti u svakom koraku uz zadovoljne konstitucijskih jednadžbi, ravnoteže i kinematike. Proračunski problemi vezani za konvergenciju i lošu uvjetovanost matrice krutosti mogu nastupiti ako se pojavi omekšanje materijala. Ako je materijal nestabilan, to jest, ako se u konstitucijskom zakonu javlja omekšanje (engl. *softening*), rezultati proračuna ovise o odabranoj mreži konačnih elemenata, odnosno nisu objektivni. Da bi se ovaj problem eliminirao, u formulaciji MKE uvedena su takozvana ograničenja lokalizacije (engl. *localization limiters*), gdje se pod terminom lokalizacija smatra pojava pukotine odnosno diskontinuitet u polju pomaka. Ograničenja se mogu svrstati u tri skupine (Ibrahimbegović, 2009), a jedna od najčešće primjenjivanih je metoda koju su razvili Hillerborg i Bićanić, u kojoj se objektivnost mreže s obzirom na neelastičnu disipaciju osigurava primjenom modula omekšanja (engl. *softening modulus*) koji ovisi o dimenziji konačnog elementa (engl. *mesh-dependent*).

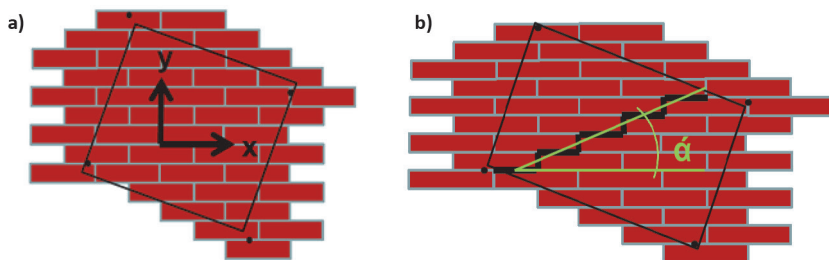


Općenito, kontaktni modeli u kojima je nelinearnost koncentrirana na odabranim mjestima (primjerice spojnica) numerički su stabilniji od kontinuum modela (Lorenço, 1996).

### 3.2. Inženjerski model ziđa

Nakon niza potresa izazvanih eksploatacijom zemnoga plina u zoni oko Groningena i oštećenja na zidanim zgradama, DIANA FEA BV i TU Delft zajednički su razvili inženjerski model ziđa (engl. *engineering masonry model, EM*) posvećen isključivo makromodeliranju zidanih konstrukcija (Schreppers, Garofano, Messali, Rots, 2016). Filozofija i parametri modela utemeljeni su na eksperimentima provedenima na Tehničkom sveučilištu u Delftu (TU Delft, 2015). Konstitutivni model EM utemeljen je na *Total Strain Crack* kontinuum modelu (DIANA, 2016) s razmazanim slomom (engl. *smearred failure*) i može se rabiti s elementima membrane (za ravninsko stanje naprezanja) ili elementima ljuske (za prostorne modele). Uporaba modela posebno je preporučena za statičku nelinearnu analizu pri cikličnom opterećenju ili nestacionarnu dinamičku analizu dijelova konstrukcije ili objekata u cjelini. Model EM ima sljedeće karakteristike:

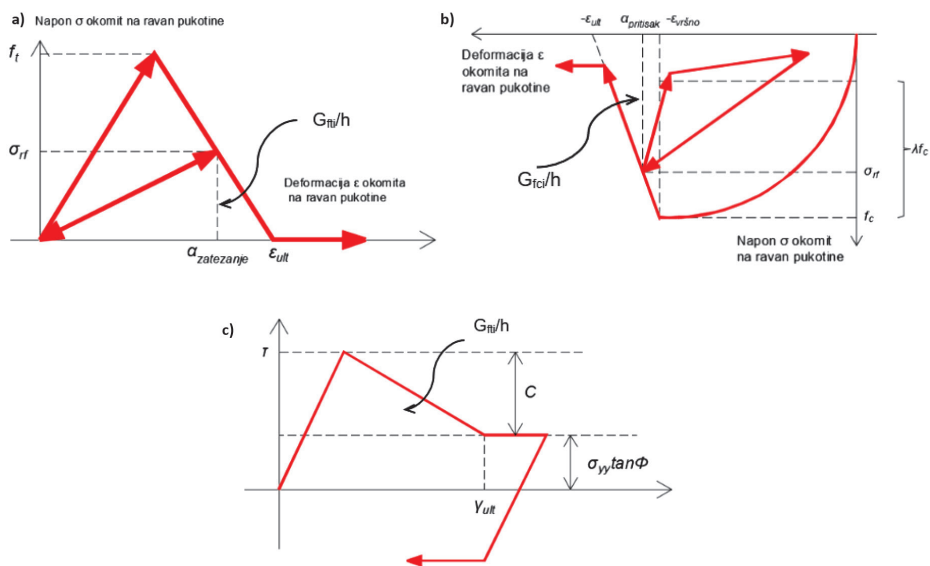
- Anizotropija koja proizilazi iz različite krutosti u pravcu horizontalne i vertikalne spojnice uzeta je u obzir.
- Sadrži odgovarajuće sekantne, elastične i mješovite histerezne krivulje za različite oblike sloma.
- Postoje četiri moguća smjera širenja pukotina (slika 7.): horizontalni, vertikalni i dva dijagonalna najčešće prema geometriji opeke.
- Kada dijagonalne pukotine nisu aktivne ili su isključene, model pretpostavlja da krutost normalnih komponenti u  $x$  i  $y$  smjeru nije povezana s posmičnom krutošću u ravnini. Dakle, model EM se ponaša kao ortotropni materijal s Poissonovim koeficijentom jednakim nuli.
- Model obuhvata sljedeće mehanizme sloma:
  1. valčni slom u horizontalnoj spojnici,
  2. drobljenje okomito na horizontalnu spojnici,
  3. vlačni slom u vertikalnoj spojnici,
  4. drobljenje okomito na vertikalnu spojnici,
  5. vlačni slom okomito na dijagonalnu stepeničastu pukotinu,
  6. posmični slom – klizanje.



Slika 7. Pravci u kojim je moguća pojava pukotine: a) horizontalno i vertikalno, b) dijagonalno pod odabranim kutem (Schreppers, Garofano, Messali, Rots, 2016)

- Kad se dijagonalna pukotina aktivna i otvara, smanjuju se vlačno naprezanje u ravnini okomitoj na pukotinu i posmično naprezanje u dijagonalnoj ravnini. Kad se pukotina zatvara, pretpostavlja se linearna krutost jednaka početnoj krutosti. Dijagonalne pukotine u dugim zidovima mogu se dobro modelirati primjenom ovoga kriterija, dok u slučaju vitkih zidova to ne mora biti slučaj. Stoga se ovaj kriterij otkazivanja može, ali i ne mora upotrijebiti.
- Posmična naprezanja ograničena su standardnim Coulombovim modelom trenja u kojemu figuriraju kohezija i naprezanja okomita na horizontalnu spojnicu.

Zakon ponašanja materijala u nelinearnom području prikazan je na slici 8.



Slika 8. Inženjerski model ziđa: a) vlak, b) tlak, c) posmik

U slučaju vlaka (a slično za tlak i posmik), konačna deformacija  $\varepsilon_{ult}$  je ona pri kojoj je pukotina otvorena i nije moguć prijenos naprezanja, te je definirana izrazom

$$\varepsilon_{ult} = \frac{2 G_{ft}}{h f_t}$$

gdje je  $h$  karakteristična dimenzija vrpce u kojoj se materijal oštećuje, a vezana je za dimenziju konačnoga elementa. Oštećenje se prema ovom modelu lokalizira u određenoj zoni  $h$ , a ne liniji kao u diskretnim modelima. Radi dobivanja objektivnih rezultata koji ne ovise o veličini konačnoga elementa (diskretizaciji), odnosno pod uvjetom da potrošnja energije pri otvaranju pukotine uvijek bude ista, za konstantne  $h$  i  $G_{ft}$  dobiva se različita konačna deformacija  $\varepsilon_{ult}$  ( $G_{ft} = \int(\sigma \cdot d\varepsilon) \cdot h \rightarrow \varepsilon_{ult}$ ) pri čemu se za  $h$  uzima  $h = \sqrt{2A}$  za 2D elemente s linearnom interpolacijom odnosno  $\sqrt{A}$  za 2D elemente višega reda ( $A$  je površina elementa) (Rots, 1997). Takva se formulacija uklapa u standardnu mehaniku kontinuuma i lako se implementira u standardnu metodu konačnih elemenata (Ožbolt, 2006).

Parametri koji su potrebni za definiranje EM modela navedeni su u tablici 2.

**Tablica 2. Parametri EM modela**

Elastični parametri		$E_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Youngov modul u smjeru $x$
		$E_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Youngov modul u smjeru $y$
		$G_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	posmični modul
		$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	gustoća
Engineering Masonry Model	Pukotine	$f_{tx}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	vlačna čvrstoća u smjeru $x$
		$f_{ty}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	vlačna čvrstoća u smjeru $y$
		$G_{ft}$ [N/mm]	energija sloma pri vlaku
		HEADTP	vrsta sloma u vertikalnoj spojnici
		$h$ [mm]	karakteristična dimenzija konačnoga elementa
	Smicanje	$c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	kohezija
		$\varphi$ [°]	kut unutarnjeg trenja
		$G_{fs}$ [N/mm]	energija sloma pri smicanju
	Drobljenje	$f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	tlačna čvrstoća
		$n$ [/]	faktor koji definira graničnu deformaciju
		$G_c$ [N/mm]	energija sloma pri tlaku
		$\lambda$ [/]	faktor koji definira karakter rasterećenja

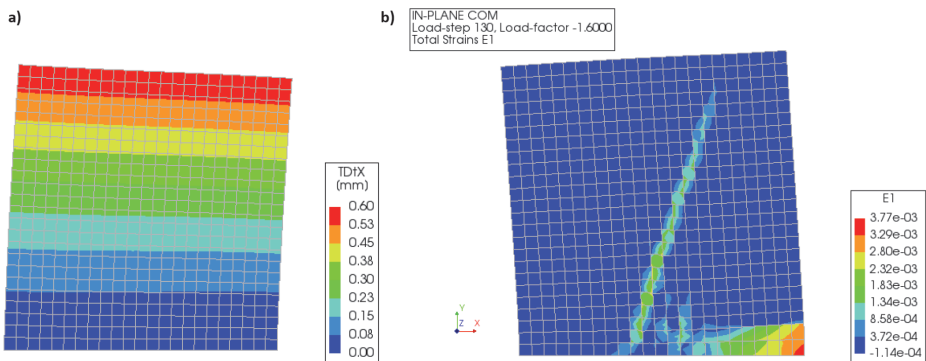
### 3.3. Makro – model ispitanog zida

Opterećenje i rubni uvjeti za obični (neojačani) zid odabrani su tako da što bolje reproduciraju eksperimentalne uvjete. Prvo se preko armiranobetonskoga serklaža na vrhu zida nanosi vertikalno opterećenje od 230 kN (0,40 N/mm<sup>2</sup>). Vertikalno opterećenje održava se konstantnim, a horizontalna se sila nanosi pod kontrolom pomaka u gornjemu lijevom kutu. Pomaci su nanoseni ciklično, najčešće s tri ponavljanja, a amplitude pomaka povećavaju se iz serije u seriju. Svi čvorovi na gornjemu rubu kruto su povezani, tako da imaju iste horizontalne pomake i dopuštenu rotaciju. U kontinuum modelima, zidovi su modelirani dvodimenzionalnim elementima (ravninsko stanje napprezanja) s 8 čvorova prosječne dimenzije 0,1 m. Provedena je kvazistatička implicitna nelinearna analiza s Newton–Raphson iteracijskom shemom u koju je uključena kako materijalna tako i geometrijska nelinearnost. Parametri modela prikazani su u tablici 3., a na slici 9. prikazano je polje pomaka i polje glavnih deformacija.

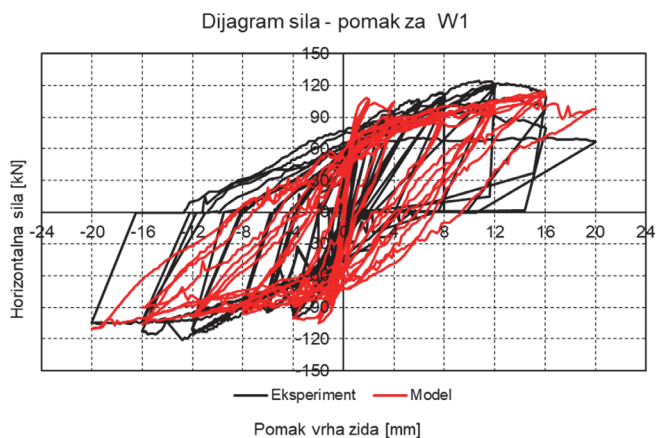
Tablica 3. Odabrani parametri za makromodel običnoga zida

Parametar	Vrijednost
$E_x$	4e+09 N/m <sup>2</sup>
$E_y$	4e+09 N/m <sup>2</sup>
$G_{xy}$	1,6e+09 N/m <sup>2</sup>
$\rho$	2000 kg/m <sup>3</sup>
$f_{ty}$	90000 N/m <sup>2</sup>
$G_{ft}$	10 N/m
HEADTP	No
h	Rots
c	90000 N/m <sup>2</sup>
$\varphi$	0,78 rad
$G_{fs}$	20 N/m
$f_c$	6,48e+06 N/m <sup>2</sup>
n	4
$G_c$	40000 N/m
$\lambda$	1

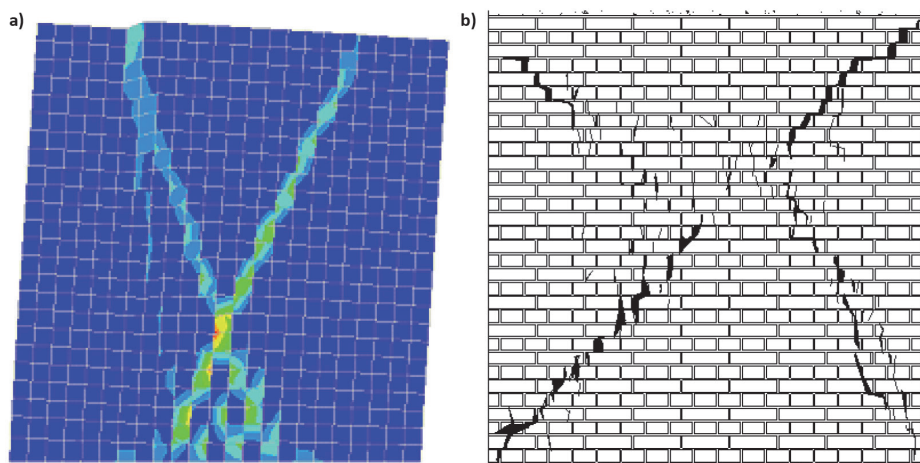
S modelom EM moguće je kao opterećenje nanijeti stvarne protokole opterećenja bez problema s divergencijom pri velikim pomacima, što rezultira točnijim oblikom sloma. Veza sila–pomak na vrhu zida konzistentna je s rezultatima testova, odnosno dobiva se relevantna disipacija energije (slika 10.). Međutim, raspored pukotina je



Slika 9. a) Horizontalni pomaci (korak 150), b) glavna deformacija E1 (korak 130)



Slika 10. Usporedba rezultata numeričkoga makromodela i eksperimenta za W1



Slika 11. Usporedba rezultata numeričkoga modela i eksperimenta: a) akumulirana posmična deformacija, b) oblik sloma zida W1

„razmazan“ na određenu širinu (što ovisi o diskretizaciji) ili je difuzan i geometrijski nije točan u usporedbi s eksperimentom (slika 11.). Eksperimentalno se pukotina lokalizira dijagonalno, dok je numerički dobivena kosa pukotina koja ne spaja kuteve zida (slika 11.).

Na ojačanim zidovima nije došlo do otkazivanja nosivosti, nego se zid zaokreće kao kruto tijelo (engl. *rocking*). Problem je lako numerički modelirati primjenom linear-elastičnoga modela za žiđe i Mohr–Coulombovoga kontakta na spoju zida i obloge (engl. *interface opening mode – gapping*).

#### 4. Zaključak

Poteškoće u modeliranju zidanih konstrukcija uzrokovane su kompozitnom prirodom žiđa koje se sastoji od elemenata (opeka) te horizontalnih i vertikalnih spojnica ispunjenih mortom. Mehanička svojstva žiđa ovise o karakteristikama komponenta, ali i o načinu izgradnje. U stvari, tehnika zidanja (paralelnost stranica, zapunjenost spojnica mortom itd.) može imati presudan učinak na svojstva žiđa, što dodatno utječe na nepouzdanost i varijabilnost parametara žiđa. Samo se u nelinearnoj analizi može pratiti ponašanje zidane konstrukcije koja prolazi kroz više stadija: elastičnu fazu, pojavu pukotina i drobljenje te globalni slom. Jednostavniji konstitucijski modeli lakši su za primjenu, ali daju slabiji uvid u ponašanje konstrukcije. S druge strane, uporaba složenijih modela pretpostavlja detaljno poznavanje ponašanja materijala, značajan utrošak vremena, a u slučaju primjene u projektantskoj praksi zahtijeva i iznadprosječno obrazovanoga inženjera koji poznaje nelinearne konstitucijske modele i napredne tehnike proračuna. To implicira opsežne programe istraživanja, kako na razinu pojedinih komponenta, tako i na razini konstrukcije, kako bi se dobili ulazni podaci i utvrdila valjanost numeričkih rezultata prema eksperimentalnima.

Tip je sloma za ciklično horizontalno opterećenje na neojačanim zidovima posmičan, s dijagonalno ukriženim pukotinama. Dijagonalne pukotine često prati lokalno drobljenje i prevrtanje. Krivulje histereze su pune, odnosno značajna je disipacija unesene energije.

Na ojačanim je zidovima otkazivanje uvjetovano savijanjem odnosno prevrtanjem zida kao krutoga tijela. U eksperimentima nije registrirano odvajanje obloge od tijela zida. Povećanjem vertikalnoga naprežanja na ojačanim zidovima raste nosivost na horizontalne sile, tako da je uporaba ojačanja opravdana uz vođenje računa o kakvoći spoja obloge i zida.

Nearmirani su zidovi pokazali značajnu duktilnost, znatno veću od predviđene u normama. Kod ojačanih zidova može se očekivati i veća duktilnost za opterećenja do sloma. Prema ovim rezultatima, faktor ponašanja koji se uzima u seizmičkom proračunu može biti značajno veći nego što je dan u Eurokodu 8.

Upotrijebljeni numerički model ziđa dobro reproducira eksperimentalni ciklični odgovor zida u smislu čvrstoće i opisa histereznih ciklusa. Također, model je u stanju predvidjeti post–vršno ponašanje bez problema stabilnosti proračuna pri omekšavanju materijala. Homogenizirani makromodeli imaju sljedeće prednosti u odnosu na druge klase modela: jednostavna mreža i geometrija; kraće vrijeme proračuna i manji zahtjevi za memorijom; točnost pri proračunu većih elemenata konstrukcije ili objekata u cjelini. Kada se upotrebljavaju makromodeli, pretpostavljeno je da su konstrukcija, opterećenje i rubni uvjeti takvi da se mort i opeka ne moraju zasebno diskretizirati, što je ujedno i nedostatak makromodela.

## Literatura

Hrasnica M (2005). Seizmička analiza zgrada. Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Sarajevo, BiH

Tomažević M (1999). Earthquake-resistant design of masonry buildings. Imperial College Press, London.

Medić S (2018). Eksperimentalna i numerička analiza zidova od pune opeke izloženih potresu. *Doktorska disertacija*, Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Sarajevo, BiH.

Lourenço PB (1996). Computational Strategies for Masonry Structures. *Ph.D. Thesis*, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, TU Delft, The Netherlands.

Ibrahimbegović A (2009). Nonlinear Solid Mechanics: Theoretical Formulations and Finite Element Solution Methods. Springer Science & Business Media.

Schreppers, Garofano, Messali, Rots (2006). DIANA Validation report for masonry modelling. DIANA FEA BV and TU Delft, The Netherlands.

TU Delft (2015). Preliminary test reports for in-plane tests on masonry walls at TU-Delft. TU Delft, The Netherlands.

DIANA (2016). Diana User's Manual. TNO DIANA BV, Delft, The Netherlands.

Rots JG (1997). Structural Masonry - An Experimental/Numerical Basis for Practical Design Rules. Rotterdam, Balkema.

Ožbolt J (2006). Modeling of Concrete & Fracture Mechanics. Predavanja na doktorskom studiju, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska.