

doi: 10.67563/ASESCONF2026063M

Marko Marinković¹, Christoph Butenweg²

DESIGN AND CONSTRUCTION OF RC BUILDINGS WITH MASONRY INFILLS: PROCEDURE AND STEPS DEFINED IN THE FIRST AND SECOND GENERATION OF EUROCODE 8

Summary: Paper shows the design and construction procedure for reinforced concrete (RC) structures with masonry infill in accordance with the requirements of the first and second generation of Eurocode 8. The special focus is on understanding the interaction between RC system and the infill, the influence of the infill on the change in stiffness and therefore the fundamental period of the structure, as well as on the differences in approach between the two generations of regulations. The paper systematizes the key design steps: defining the model, considering the effects of the infill on the stiffness, load-bearing capacity, and ductility of the structure, as well as constructive measures for the infill isolation and much simpler design and execution. Results indicate the importance of modern solutions for improving the seismic resistance of buildings.

Keywords: RC structures, masonry infills, seismic resistance, decoupled infill, earthquakes

PROJEKTOVANJE I IZVOĐENJE AB KONSTRUKCIJA SA ZIDANOM ISPUNOM: POSTUPAK I KORACI DEFINISANI U PRVOJ I DRUGOJ GENERACIJI EVROKODA 8

Rezime: Rad prikazuje postupak projektovanja i izvođenja armiranobetonskih (AB) konstrukcija sa zidanom ispunom u skladu sa zahtevima prve i druge generacije Evrokoda 8. Poseban fokus je na razumevanju interakcije između nosećeg AB sistema i ispune, uticaja ispune na promenu krutosti a samim tim i perioda oscilovanja konstrukcije, kao i na razlikama u pristupu između dve generacije propisa. U radu su sistematizovani ključni koraci proračuna: definisanje modela, uzimanje efekata ispune na krutost, nosivost i duktilnost konstrukcije, kao i konstruktivne mere koje omogućavaju izolaciju ispune i njeno daleko jednostavnije projektovanje i izvođenje. Rezultati ukazuju na značaj savremenih rešenja za unapređenje seizmičke otpornosti objekata.

Ključne reči: AB konstrukcije, zidana ispuna, seizmička nosivost, izolacija ispune, zemljotresi

¹ Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd, Srbija, mmarinkovic@grf.bg.ac.rs

² CWE-RWTH Aachen University, Aachen, Nemačka

1. UVOD

Zidana ispunu se izvodi nakon armiranobetonskih (AB) elemenata i u projektnoj dokumentaciji se najčešće svrstava u nekonstrukcijske elemente. Međutim, kada je zid malterom neposredno vezan/oslonjen na stubove i grede, on se aktivira čim se AB konstrukcija deformiše. Posledice zemljotresa u Lakvili (Italija, 2009) i Albaniji (2019) pokazale su dijagonalne prsline, drobljenje uglova, odvajanje i rušenje panela ispune van ravni [1,2]. Uticaj nije ograničen samo na zid: formiranje pritisnute dijagonale menja period i torzioni odgovor zgrade i može znatno povećati smičuće sile u susednim stubovima.

Zbog toga je interakciji okvira i ispune posvećen veliki broj eksperimentalnih i analitičkih istraživanja [3-5]. Modeli sa ekvivalentnim dijagonalama pogodni su za inženjerski proračun, ali njihov odgovor zavisi od čvrstoće zida, otvora, kvaliteta izvođenja, kontakta sa okvirom i nivoa oštećenja. Podstaknuti tim problemima, razvijeni su deformabilni i izolovani spojevi (veze ispune i okvira) koji ove neizvesnosti eliminišu [6,7], a eksperimentalna ispitivanja u punoj razmeri pokazala su da je istovremeno dejstvo u ravni i van ravni zida odlučujuće za zidove ispune [8,9].

Prva generacija Evrokoda 8, EN 1998-1:2004 [10], prepoznaje navedene negativne efekte kao i nepovoljne posledice neravnomernog rasporeda ispune i propisuje lokalne mere za AB elemente (povećanje dimenzije stubova i armature usled sila smicanja), ali ne daje celovit postupak proračuna zidova ispune. Završni nacrt druge generacije, FprEN 1998-1-2:2025 [11], uvodi jasnu podelu na AB konstrukcije sa razdvojenom/izolovanom ispunom i onom koja ima interakciju sa AB konstrukcijom (nerazdvojena ispunu). Ta podela menja i proračunski model i obim projektantskog rada. Razlika je prikazana u ovom radu, kroz dva numerička primera: tradicionalni (nerazdvojeni) zid ispune modeliran ekvivalentnom dijagonalom i INODIS-izolovani zid proveren prema globalnom modelu AB konstrukcije, bez modeliranja ispune. U Tabeli 1 su data pravila vezana za analizu konstrukcija sa zidanom ispunom, definisana u prvoj i drugoj generaciji Evrokoda 8.

Tabela 1: Najvažnije razlike u tretmanu zidane ispune.

Pitanje	EN 1998-1:2004	FprEN 1998-1-2:2025
Uloga ispune	Uzimaju se u obzir nepravilnosti i lokalni nepovoljni efekti.	Ispuna se razvrstava neizolovanu i izolovanu.
Globalna analiza	Model ispune nije potpuno sistematizovan.	Kvantitativna provera simetrije i pravilnog rasporeda ispune u osnovi i po visini; model sa dijagonalama kada je potreban (neizolovana ispunu).
Otvori i nosivost zida	Najčešće se oslanja na inženjerske modele i literaturu.	Propisani faktor redukcije nosivosti i krutosti zbog otvora. Data formula za određivanje nosivosti i krutosti ispune.
Proračun stubova	Uzimaju se lokalno smicanje i efekat kratkog stuba.	Definisani kontaktna dužina, dodatno smicanje i kritične oblasti.
Izolovana ispunu	Nema posebnog celovitog postupka.	Dozvoljen model bez modeliranja ispune nakon definisanja dimenzije šlica (razdvajanja ispune od AB stubova).

2. KRUTO VEZANA (NEIZOLOVANA) ISPUNA: POSTUPAK PRORAČUNA

2.1. ODREĐIVANJE SEIZMIČKE SILE

Bitna promena druge generacije Evrokoda 8 jeste način određivanja faktora ponašanja, koji se sada sastoji od tri člana. Ovo važi za sve tipove konstrukcija, ali ono šta je ključna razlika vezana za temu zidane ispune jeste da je sada Evrokod prepoznao smanjenje duktilnosti u ponašanju konstrukcija sa kruto vezanom zidanom ispunom i skladu sa tim je faktor ponašanja skoro 2 puta manji u odnosu na konstrukcije sa izolovanom zidanom ispunom. Ovo znači da ćemo naše AB konstrukcije, u slučaju da izaberemo da ih izvedemo sa kruto vezanom zidanom ispunom, projektovati na skoro 2 puta veću seizmičku silu i to samo zbog jednog „nekonstrukcijskog“ elementa: zidane ispune. Za rezultat ćemo imati značajno skuplju konstrukciju.

2.2. PROVERA RAVNOMERNOG RASPOREDA ISPUNE

Postupak počinje proverom rasporeda ispune po visini, i ukoliko je površina zidova ispune na jednom spratu veća ili manja za 30% u odnosu na susedni sprat, seizmičko dejstvo na konstrukciju treba uvećati faktorom K_{IR} , koji je dat formulom:

$$K_{IR} = (1 + \Delta V_{RW} / \Sigma V_{Ed}) \leq q \quad (1)$$

Gde je ΔV_{RW} razlika između nosivosti sprata iznad i ispod sprata i koji sadrže najveću razliku zidova ispune i nosivosti sprata i koji se razmatra, nosivost sprata koji predstavlja sumu nosivosti na smicanje svih zidova ispune tog sprata, a ΣV_{Ed} je suma sračunog seizmičkog dejstva u svim vertikalnim primarnih seizmičkim elementima i q je faktor ponašanja.

Zatim se proverava simetričnost rasporeda zidane ispune u osnovi, od čega zavisi da li se zidana ispunna mora modelirati ili se može koristiti samo model AB konstrukcije. Za svaku etažu određuje se ponderisana dužina zidova u odnosu na centar krutosti modela bez ispune, izražena pokazateljem R_{sym} datim u Formuli (2). Ako su vrednosti u oba pravca manje od 0,20, mogu se koristiti modeli bez ispune (samo AB konstrukcija). Ali u praksi će ovo skoro nikada neće biti slučaj. Za vrednosti od 0,20 do 0,40, uticaji dejstava na konstrukciju i relativna međuspratna pomeranja tog modela množe se sa 1,30. Kada je makar jedna vrednost veća od 0,40, interakcija okvira i ispune mora se eksplicitno modelirati ekvivalentnim prostim štapovima [11].

$$R_{sym,x} = \text{ABS}(\Sigma l_{infill,left,x,i} * d_i^2 - \Sigma l_{infill,right,x,i} * d_i^2) / (\Sigma l_{infill,left,x,i} * d_i^2 + \Sigma l_{infill,right,x,i} * d_i^2) \quad (2)$$

Gde je $l_{infill,left,x,i}$ je dužina ispuna paralelne osi X koja se nalazi levo o ose X, gde je osa X osa u pravcu X koji prolazi kroz centar krutosti prazne AB konstrukcije, $l_{infill,right,x,i}$ je dužina ispune paralelna osi X desno od ose X, d_i je rastojanje od ispune do ose X.

Kod svih analiziranih zgrada potrebno je ispunu modelirati su prostim štapovima (Tabela 2). Zgrada P+5 deluje pravilno u X pravcu ($R_{sym}=0,12$), ali vrednost 0,80 u Y pravcu znači da izostavljanje tradicionalne ispune iz modela nije dozvoljeno. Propis definiše da vizuelna ocena pravilnosti osnove nije dovoljna, već se mora koristiti Formula (1).

Tabela 2: Pokazatelji simetrije analiziranih zgrada.

Zgrada	$R_{sym,x}$	$R_{sym,y}$	Potreban globalni model
P+3	0,35	0,99	Sa dijagonalama za ispunu
P+4	0,79	0,78	Sa dijagonalama za ispunu
P+5	0,12	0,80	Sa dijagonalama za ispunu
P+6	0,42	0,22	Sa dijagonalama za ispunu

2.3. EKVIVALENTNA DIJAGONALA I KARAKTERISTIKE ZIDOVA ISPUNE

U linearno-elastičnom modelu zidovi ispune se zamenjuju prostim štapom po dijagonali zida ispune, kome se dodeljuju karakteristike debljine zida t_{ap} i efektivne širine w_s dok se modul elastičnosti određuje iz izraza za krutost prostog štapa koristeći datu formulu za određivanje aksijalne krutosti štapa ispune. Aksijalna krutost dobija se iz sekantne krutosti panela za stanje ograničenih oštećenja. Korišćeni su sledeći izrazi [11,12]:

$$K_{ap} = \omega_{rm} * \gamma_M * V_{ap,Rd} / (\theta_{ap,DL} * h_s), K_{ap,strut} = K_{ap} / \cos^2 \alpha \quad (3)$$

Gde su $\theta_{ap,DL} * h_s$ relativno međuspratno pomeranja zida ispune pri DL (dato u Tabeli 7.1 Evrokoda 8 [11]), ω_{rm} faktor nasumičnosti materijala ispune koji je definisan kao odnos srednje vrednosti nosivosti na smicanje f_{vm0} i karakteristične početne nosivosti na smicanje f_{vk0} ; ω_{rm} treba uzeti jednak 1,3.

$$V_{ap,Rd} = \rho_{op} / \gamma_M * \{t_{ap} * f_{vk0} * [l_{ap} + (\mu_f * l_s * \sin \alpha) / (1 - \mu_f * h_{ap} / l_{ap})]\} \quad (4)$$

$$l_s = \sqrt{(l_{ap}^2 + h_{ap}^2)}, \alpha = \arctan(h_{ap} / l_{ap}), w_s = 0,25 l_s \quad (5)$$

$$\rho_{op} = a \cdot \exp(b * \alpha_a) + c \cdot \exp(d * \alpha_1) \quad (6)$$

Gde su $V_{ap,Rd}$ projektna nosivost na smicanje zida ispune, γ_M parcijalni koeficijent sigurnosti za SD, t_{ap} debljina zida ispune, l_{ap} dužina zida ispune, α_a odnos površine otvora i zida, α_1 odnos širine otvora i zida, $\mu_f = 0,40$, $\omega_{rm} = 1,30$, dok je γ_M parcijalni koeficijent za zidariju. Koeficijenti a, b, c i d zavise od kategorije obezbeđenja otvora i datu su u Tabeli 7.2 Evrokoda 8 [11].

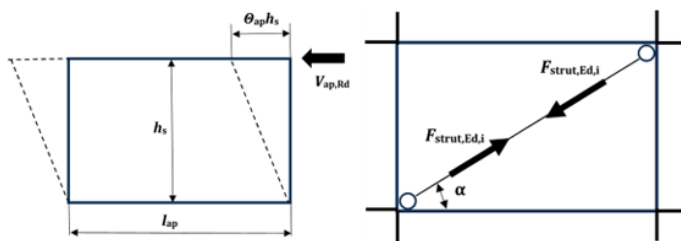
2.4. PRORAČUN ZIDOVA ISPUNE

Nakon definisanja modela prikazanim u prethodnim tačkama, potrebno je proveriti nosivost zidova ispune i relativno međuspratno pomeranje konstrukcije (Slika 1). Za svaki zid ispune (prost štap) potrebno je proveriti aksijalnu silu i ona treba da ispuni sledeći uslov:

$$F_{strut,Ed,i} \leq F_{strut,Rd,i} \quad (7)$$

Gde je:

$$F_{strut,Rd,i} \leq V_{ap,Rd,i} / \cos \alpha \quad (8)$$



Slika 1: a) provera relativnog međuspratnog pomeranja, b) provera aksijalne sile u zidovima ispune.

U primerima iz prakse, ovo se pokazalo kao uslov koji se teško ispunjava i za koji je potrebno puno vremena, jer se proračun sprovodi u iteracijama (kada uslov nije zadovoljen, potrebno je povećati dimenzije AB stubova ili dodati AB platno, kako bi se smanjile sile u zidovima ispune).

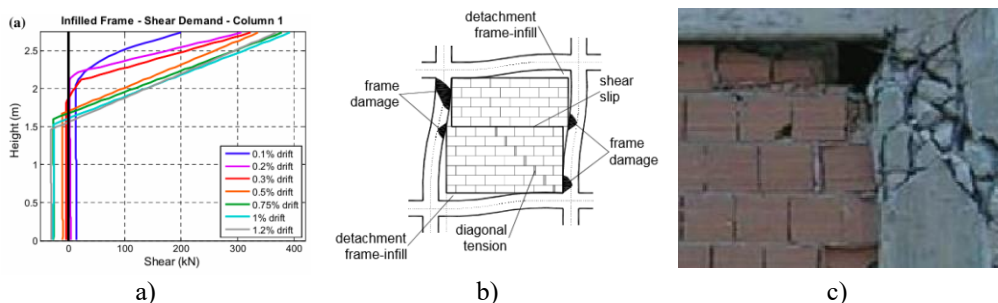
Nova generacija Evrokoda 8 sada jasno definiše granice relativnih međuspratnih pomeranja, koje se sada kontrolišu na usvojenom modelu iz tačke 3.1 i to za seizmičko dejstvo koje odgovara povratnom periodu od 475 godina (odnosno za granično stanje značajnih oštećenje – SD). Ovo je bitna razlika u odnosu na prvu generaciju Evrokoda 8, u kome je provera tražena za stanje ograničenih oštećenja – DL. Granice relativnih međuspratnih pomeranja su date u Tabeli 7.1 Evrokoda 8 [11], koji zahteva da se te vrednosti umanje faktorom 0,8 zbog uticaja djestva uzemljotresa u oba pravca. Propis zahteva dodatno umanjenje za 20% za zidove sa otvorima (prozori i vrata). Ako uzmemo uobičajene tipove elemenata za zidanje dobije se granica

relativnog međuspratnog pomeranja od 0,5% (za granično stanje SD), što je značajno manje od 1,5-2,0% ograničenja definisanih za AB konstrukcije. Ovo znači da ukoliko se projektanti odluče za AB konstrukcije sa kruto vezanom zidanom ispunom, uslovi relativnog međuspratnog pomeranja će biti daleko stroži i oni će moći da se zadovolje samo dodavanjem većeg broja AB zidova u konstrukciju.

Proračun zidova ispune na dejstvo upravno na ravan zida (nosivost van ravni) definisano je formulom datom u Evrokodu 6, koja je ista kao i u prvoj generaciji Evrokoda 6. Novina u novoj generaciji Evrokoda 8 jeste, zahtev da se ta nosivost umanja za 50% zbog istovremenog dejstva u ravni i van ravni zida.

2.5. DODATNA SILA SMICANJA NA AB STUBOVE

Usled interakcije zidova ispune i njima susednih stubova, javlja se dodatna sila smicanja koju stubovi treba da prihvate, pored presečne sile koja se dobija iz numeričkog modela (Slika 2). I prva i druga generacija Evrokoda 8 jasno definišu da stubovi ne smeju doživeti krti lom po smicanju već duktilni lom formiranjem plastičnih zglobova. U skladu sa tim, AB stubove treba dimenzionisati na veću od dve smičuće sile: prva odgovara sili nosivosti zidane ispune, a druga sili smicanja koja se dobija kao krak sile od momenta koji odgovara formiranju plastičnih zglobova u stubovima.



Slika 2: a) Dijagram smičuće sile u stubu [13], b) skica oštećenja AB stubova [14] i c) oštećenje AB stuba [15] usled interakcije sa zidom ispune

Tabela 3: Projektantski tok za izolovanu ispunu.

Faza proračuna	Potrebna provera	Ponovna globalna analiza?
AB zgrada	Model bez modeliranja ispune, sa gravitacionim opterećenjem zida	Nema iteracija dijagonala
Provera u ravni	Proračunski drift (relativno međuspratno pomeranje) → deformacija gume i kontaktna sila	Ne
Provera van ravni	Inercijalna sila na zid ispune, veza i lučno dejstvo zida	Ne
Arhitektonska izmena	Proveriti merodavne zidove	Izmena u rasporedu i dimenziji zidova ispune ne menja krutosti AB sistema

3. IZOLOVANA ISPUNA: POSTUPAK PRORAČUNA

U slučaju kada se projektanti odluče na upotrebu izolovane ispune, nije potrebno sprovesti ništa od navedenih koraka prikazanih u Poglavlju 2. Proračunski model podrazumeva samo AB elemente konstrukcije. Zidana ispuna se ne modelira, već se uzima u obzir samo njena masa kao linijsko opterećenje (Tabela 3). Ovo dovodi do daleko bržeg i lakšeg proračuna, čak i u

slučajevima izmena položaja i dimenzija zidova ispune u toku eksploatacije. Dodatno, faktor ponašanja je skoro 2 puta manji, tako da će i seizmička sila na koju proračunavamo konstrukciju biti manje.

3.1. KRITERIJUM PRIHVATANJA DEJSTVA U RAVNI ZIDA

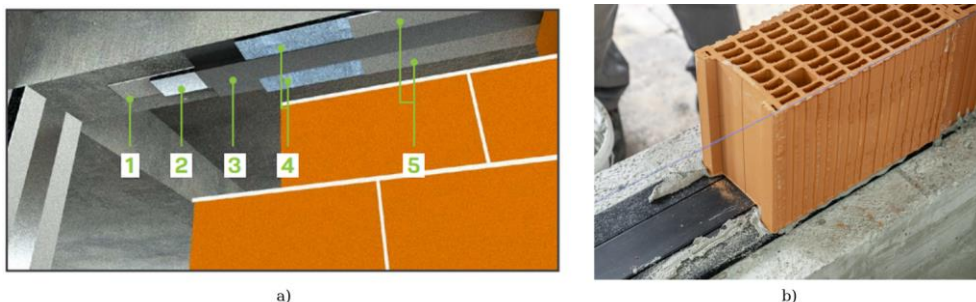
Jedini uslov koji treba da se ispuni jeste da je dimenzija šlica (razmaka) između zida ispune i AB stubova dovoljna da omogući zanemarljivu aktivaciju sile u zidu ispune. Nova generacija Evrokoda 8 je to jednostavno deifinisala uslovom da smičuća sila preneta preko vertikalnog kontakta ostane ispod 30% proračunske nosivosti zida ispune u ravni [11]:

$$V_{c,ap} \leq 0.30 * V_{ap,Rd}, V_{c,ap} = \sigma_{sj,D} * t_{ap} * l_{cs}, l_{cs} \approx 0.25 * l_{ap}/\cos\alpha \quad (9)$$

Relativno međuspratno pomeranje se podeli sa pretpostavljenom širinom šlica, čime se dobija deformacija materijala koji se nalazi između zida ispune i stuba. Zatim se proračunski napon $\sigma_{sj,D}$ očitava sa dijagrama napon-deformacija navedenog materijala. Raspodela napona se uzima kao trougaona, tako da očitani napon ulazi u Formulu (9) sa 50% vrednosti. Dodatno, ukoliko je omogućeno klizanje na vrhu i dnu zida, relativno međuspratno pomeranje se raspodeljuje na obe strane zida i samim tim se proračunska vrednost relativnog međuspratnog pomeranja uzima sa 50% vrednosti. Proračunski postupak je nezavisan od materijala u inženjerskom smislu: isti redosled provera primenjuje se na punu opeku, vertikalno šuplje glinene blokove, autoklavirani gas-beton, silikatne i lakoagregatne betonske blokove.

3.2. PRORAČUN VAN RAVNI ZIDA

Izolovana ispuna treba da zadovolji dva uslova za dejstvo upravno na ravan zida. Prvi je nosivost zida van ravni, koja se određuje na isti način kao i kruto vezana ispuna. S tim što u slučaju izolovane ispune ne postoji uticaj interakcije dejstva u ravni i van ravni zida, tako da nije potrebno umanjivati nosivost za 50% (kao što je to slučaj sa kruto vezanom ispunom). Drugi uslov koji ispuna treba da ispuni jeste da njena veza sa okolnim AB elementima prihvati silu smicanja, koja se dobija kada se sila van ravni podeli po obimu zida.



Slika 3: INODIS: a) delovi INODIS veze (1: malter, 2: srednja traka, 3: klizne površi, 4: spoljne trake, 5: malter) i b) ugradnja gumenih traka.

4. IZOLOVANA ISPUNA SA INODIS VEZOM

INODIS veza (Slika 3) je rešenje za izvođenje zidane ispune tako da se ona može kategorisati kao izolovana ispuna. Suština je da INODIS kontroliše granične uslove umesto da pokušava da predvidi progresivno pucanje svakog panela. Na taj način zidovi ispune su pravi nekonstrukcijski elementi i ne utiču na proračun konstrukcije. INODIS se sastoji od tri gumene trake koje se postavljaju po obimu zida, između zida ispune i AB elemenata. Na taj način se u isto vreme izoluje zidana ispuna, ali i drži da ne ispadne van ravni. Trake od recikliranog elastomera lepe se tankoslojnim malterom za okvir i zid. Mekši vertikalni slojevi prihvataju relativno međuspratno

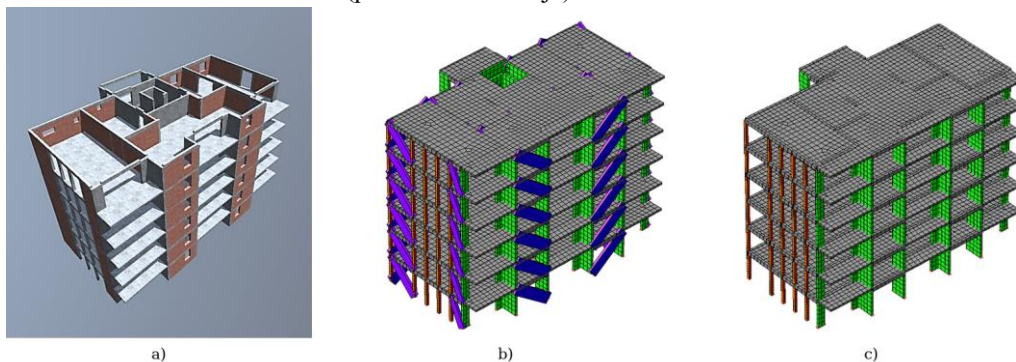
pomeranje. Tanji i krući horizontalni spojevi obezbeđuju stabilan oslonac van ravni, i u isto vreme omogućavaju relativno pomeranje grede i zida. Sam postupak zidanja ostaje uobičajen, a detalj se ne oslanja na čelične ankere koji mogu otkazati pri cikličnim deformacijama u ravni [8,9]. Klizne površi na vrhu i dnu aktiviraju obe strane veze i smanjuju efektivni zahtev deformacije u vertikalnim trakama.

Ispitivanja veze obuhvatila su sve četiri osnovne grupe zidnih elemenata navedenih u Evrokodu i različite vrste maltera [8,9]. Veza je, dakle, primenjiva na praktično sve zidne elemente, nezavisno od njihove dimenzije. Ostali detalji i pojedinosti dati su u literaturi [8,9,17].

5. PRORAČUNSKI PRIMER

Analizirane su četiri zgrade sa četiri do sedam etaža (P+3 do P+6). Konstrukcije su od betona C30/37 i armature B500, sa pločama debljine 20 cm, gredama 25×40 cm i početnim dimenzijama stubova 25×25 cm. Zidana ispunna debljine je 25 cm i izvodi se blokom Porotherm 25, sa $f_b=10$ MPa, $f_k=4,52$ MPa i $f_{vko}=0,30$ MPa [8,9,16]. Dodatno stalno opterećenje iznosi 2,5 kN/m², a korisno 3,0 kN/m². Usvojeno je tlo C i ubrzanje tla od 0,10 g do 0,40 g. Masa svake ispune uključena je u sve seizmičke modele; kod izolovane ispune izostavlja se njeno modeliranje i numerički model je samo AB konstrukcija.

Kao reprezentativni primer izabrana je zgrada od šest etaža (P+5). Modeli korišćeni u analizi su prikazani na Slici 4 i Tabeli 4. Model 1 predstavlja tradicionalno rešenje (kruto vezana ispunna): svaki zid ispune zamenjen je ekvivalentnim prostim štapom po dijagonali. Model 2 predstavlja AB konstrukciju sa ispunom koja je izolovana INODIS vezom. U ovom slučaju, relativno međuspratno pomeranje (drift) dobijeno je iz modela bez modeliranja ispune i bez uzimanja u obzir krutosti ispune, jer ona ne učestvuje u prijemu sila i ne menja krutost konstrukcije a samim tim ni dinamičke karakteristike (periode oscilovanja).



Slika 4: Zgrada P+5: a) render, b) model sa kruto vezanom (neizolovanom) ispunom i dijagonalama i c) model sa izolovanom ispunom ispunom.

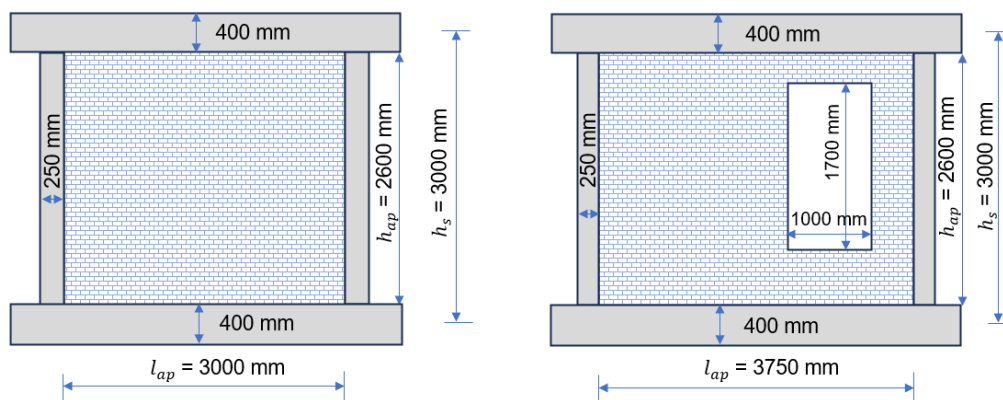
Tabela 4: Modeli korišćeni u uporednoj analizi.

Model	AB sistem	Modeliranje ispune	Namena
1	Okviri + AB zidovi, uvećanih dimenzija po potrebi	Ekvivalentne dijagonale (pritisnuti štapovi)	Tradicionalna neizolovana (kruto vezana) ispunna
2	Okviri + početno usvojeni AB elementi	Bez dijagonala	Optimizovani raspored sa INODIS-om

Zbog ograničenje dužine rada, ovde je detaljno prikazan samo proračun zidane ispune sa INODIS vezom, dok je dat kratak opis poteškoća projektantskih koraka u slučaju AB konstrukcije sa kruto vezanom zidanom ispunom. Prva poteškoća koja se mora istaći jeste da je sada proračun

AB konstrukcije sa kruto vezanom ispunom iterativan. Potrebno je nakon prve analize uporediti nosivost aksijalne sile u štapovima ispune. Ukoliko su one veće od nosivosti ispune, što često jeste slučaj, potrebno je ili zidove ispune zameniti AB zidovima ili povećavati dimenzije AB stubova. I tako sve dok se ne zadovolji uslov nosivosti zidane ispune. Ovo je jako zamoran korak, jer često samo povećanje dimenzije stubova ili dodavanje novog AB platna ne rešava problem, već treba pronaći adekvatnu poziciju za AB platno/a i dimenzije AB stubova. Nakon toga, treba proveriti da su relativna međuspratna pomeranja manja od 0,5% i ukoliko nisu ponavljati isti postupak kao kod verifikacije sile u štapovima zidova ispune. Kada je usvojena konačna dispozicija AB elemenata i zidova ispune, pristupa se verifikaciji nosivosti na smicanje svih AB stubova koji su u kontaktu sa zidovima ispune. Ovo će uvek dovesti do povećanja količine armature u stubovima ili njihove dimenzije. Sve ovo, uključujući dva puta manji faktor ponašanja (za slučaj kruto vezane zidane ispune) na kraju kao rezultat daje neekonomične konstrukcije. Ovo će biti prikazano nakon opisa postupka proračuna AB konstrukcije sa INODIS vezom.

Proračun zidane ispune sa INODIS vezom prikazan je na dva reprezentativna zida sa Slike 5: puni panel dužine $l_{ap}=3,00$ m i panel dužine $l_{ap}=3,75$ m sa prozorom $1,00 \times 1,70$ m. Oba zida imaju $h_{ap}=2,60$ m, $t_{ap}=0,25$ m i gustinu 780 kg/m^3 . Proračun zgrade daje relativno međuspratno pomeranje 1,5%, odnosno 45 mm na etaži visine 3,0 m. Uzimajući u obzir dimenzije grede, pomeranje na vrhu zida iznosi 42 mm. Pošto su klizne površine izvedene na vrhu i na dnu zida, svakoj vertikalnoj vezi pripada polovina pomeranja, odnosno 21 mm. Vertikalne gumene trake INODIS veze, ukoliko se usvoje da su debljine 50 mm, dostižu $\epsilon_{r,SD}=21/50=0,42$. Kada se napon očita sa dijagrama materijala on iznosi $0,17 \text{ N/mm}^2$. S obzirom da je raspodela napona linearna (trougona) po kontaktnoj dužini, napon se uzima sa duplo manjom vrednošću i nakon toga su dobijene sile prikazane u Tabeli 5.



Slika 5: Okviri korišćeni u proračunu INODIS veze: a) puni zid i b) zid sa prozorom.

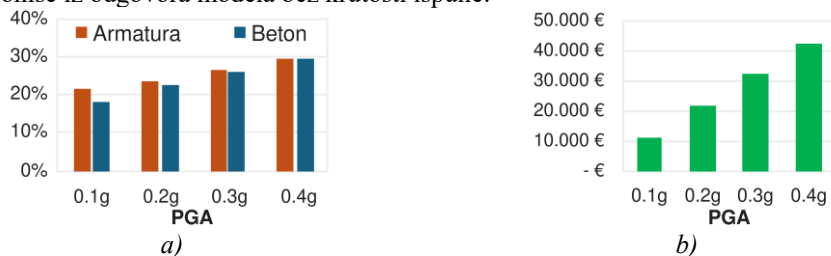
Karakteristične nosivosti INODIS veze sa malterom dobijene su ispitivanjem komponenti sa više kombinacija zidnih elemenata i maltera: $58,3 \text{ kN/m}$ za vezu uz gredu i $11,5 \text{ kN/m}$ za vezu uz stub. Zatim su u ispitivanjima u punoj razmeri istovremeno zadavani drift okvira u ravni i ravnomeran pritisak van ravni [9]. Tradicionalne ispune dostizale su najveći doprinos pri driftu oko 0,8-1,0% i bile teško oštećene; Ispune sa INODIS vezom ostajali su gotovo neaktivni do drifta većeg od 2%. U reprezentativnom poređenju izolovani puni zid preneo je samo $35,8 \text{ kN}$ pri driftu 1,4%, dok je tradicionalni zid već pri 0,64% dostigao 195 kN i srušio se pri 1,4% [8,9]. Pored toga, sprovedena su i ispitivanja na seizmičkoj platformi gde su dostignuta relativna međuspratna pomeranja 2,21% u jednom pravcu i 3,27% u drugom pravcu bez ikakvog oštećenja ispune [17]. Više detalja se može naći u [17].

Tabela 5: Postupna provera nosivosti zida ispune.

Verifikacija nosivosti u ravni	
Verifikacija punog zida ispune (Slika 5a)	Verifikacija zida ispune sa otvorom (Slika 5b)
$V_{c,ap} = 27.58 \text{ kN} < 0.3 V_{ap,Rd} = 68.88 \text{ kN}$ sa: $\varepsilon_{r,SD} = 0.42 \Rightarrow \sigma_{s,D} = 0.17 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ $d_{r,SD} = 21 \text{ mm}, \rho_{op} = 1.0$ $\gamma_M = 1.5, \gamma_{r,SD} = 1.0$	$V_{c,ap} = 29.15 \text{ kN} < 0.3 V_{ap,Rd} = 76.57 \text{ kN}$ sa: $\varepsilon_{r,SD} = 0.42 \Rightarrow \sigma_{s,D} = 0.17 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ $d_{r,SD} = 21 \text{ mm}, \rho_{op} = 0.98$ $\gamma_M = 1.5, \gamma_{r,SD} = 1.0$
Verifikacija nosivosti van ravni: Gumene veze	
Verifikacija punog zida ispune (Slika 5a)	Verifikacija zida ispune sa otvorom (Slika 5b)
$S_{ap} = 1.1g, M_w = 1.52 \text{ t} \Rightarrow F_{ap} = 16.72 \text{ kN}$ Verifikacija uz konzervativnu pretpostavku da se smicanje prenosi samo preko veze na vrhu i dnu zida: $V_{Rd} = \frac{l_{ap} F_c}{\gamma_M} = \frac{2 \cdot 3.0 \cdot 58.3 \text{ kN/m}}{1.5} = 233.2 \text{ kN} > F_{ap} = 16.72 \text{ kN}$	$S_{ap} = 1.1g, M_w = 1.57 \text{ t} \Rightarrow F_{ap} = 17.27 \text{ kN}$ Verifikacija uz konzervativnu pretpostavku da se smicanje prenosi samo preko veze na vrhu i dnu zida: $V_{Rd} = \frac{l_{ap} F_c}{\gamma_M} = \frac{2 \cdot 3.75 \cdot 58.3 \text{ kN/m}}{1.5} = 291.5 \text{ kN} > F_{ap} = 17.27 \text{ kN}$
Verifikacija nosivosti van ravni: Nosivost zida	
Verifikacija punog zida ispune (Slika 5a)	Verifikacija zida ispune sa otvorom (Slika 5b)
Nosivost je određena prema EN 1996-1-1 [12], usvajajući lučno ponašanje i nosivost u vertikalnom pravcu.	
$F_{ap,max} = 50.69 \text{ kN} > F_{ap} = 16.72 \text{ kN}$	$S_{ap,max} = 50.69 \text{ kN} > F_{ap} = 17.27 \text{ kN}$

6. POREĐENJE UTROŠKA MATERIJALA I TROŠKOVA

Globalno poređenje sprovedeno je za $a_g=0,10-0,40g$. Kod neizolovane ispune dodavani su AB zidovi i povećavana armatura kada je bilo potrebno smanjiti sile u prostim štapovima ispune i zadovoljiti provere zidova ispune. Optimizacija je zahtevna jer promena AB sistema menja periode i silu u svakoj dijagonali, nakon čega se provere zidova ispune i eventualne iteracije uklanjanja dijagonala ponavljaju. Kod kruto izolovane zidane ispune AB konstrukcija se direktno dimenzioniše iz odgovora modela bez krutosti ispune.



Slika 6: Ušteda u a) utrošku materijala i b) uštedi investicije sa i bez INODIS veze

Rezultati su sumirani na Slici 6. Ušteda materijala raste sa povećanjem ubrzanja tla na koje se konstrukcija projektuje, ali svakako već i pri 0,1g ušteda u utrošku materijala je oko 20% u slučaju konstrukcije sa INODIS vezom. Ekonomska analiza pokazuje uštede od nekoliko desetina hiljada evra u samoj početnoj investiciji, uključujući cenu INODIS veze. Dodatno, u slučaju zemljotresa oštećenja konstrukcije sa INODIS vezom će biti daleko manja i biće izbegnute

popravke a i prekid funkcionisanja objekata će biti kraći. Svi ovi parametri nisu nisu monetizovani u tabeli početne investicije i dodatno idu u prilog izolovanoj ispuni odnosno primeni INODIS veze.

7. ZAKLJUČCI

U radu je dat pregled postupka proračuna AB konstrukcija sa zidanom ispunom prema prvoj i drugoj generaciji Evrokoda. Proračunski primeri objašnjavaju praktično značenje klasifikacije u drugoj generaciji Evrokoda. Kruto vezana zidana ispuna jeste deo konstrukcije pri seizmičkom dejstvu iako projektant ne može da se pouzdano osloni na nju. Njena krutost, nosivost, otvori, gubitak krutosti i lokalni efekti na stubove moraju se dosledno pratiti. Takav proračun zahteva mnogo podataka i iteracija. Prividnu korist - dodatnu početnu krutost - prate neizvesnost, krto oštećenje zida i često veće sile u AB elementima. Izolovana ispuna ovu nejasnoću uklanja. Globalni AB model ostaje uobičajeni model bez krutosti ispune, uz uključenu masu zida. Tačnost se dovodi na pravi nivo zato što se izostavljena interakcija direktno proverava uslovom $V_{c,ap} \leq 0,30 V_{ap,Rd}$, dok se sigurnost van ravni dokazuje jednostavnim postupkom. Eksperimentalni rezultati daju deformacionu rezervu znatno iznad opsega propisa. INODIS veza se može primeniti na različite blokove, opeku i otvore jer osobine konkretnog zida ulaze u jasne jednačine, umesto u neizvesnu mrežu globalnih pritisnutih štapova. Numerički primeri prikazan u radu pokazuje da jednostavniji model omogućava i optimizaciju AB sistema. Pri 0,30-0,40 g ukupna početna investicija bila je približno 6,8-7,2% niža i pored uračunate cene veze. Upotreba ovakvog pristupa je prepoznata od propisa i ostaje da se vidi kako će ga praksa usvojiti. Ali s obzirom da već ima prvih projekata primene, može se zaključiti da je praksa sama prepoznala potrebu za ovakvim vidom veze čak i pre zvaničnog stupanja novih propisa na snagu.

LITERATURA

- [1] Braga, F., Manfredi, V., Masi, A., Salvatori, A., Vona, M. (2011). Performance of non-structural elements in RC buildings during the L'Aquila 2009 earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9, 307-324.
- [2] Marinković, M., Baballėku, M., Isufi, B., Blagojević, N., Milićević, I., Brzev, S. (2022). Performance of RC cast-in-place buildings during the 26 November 2019 Albania earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20, 5427-5480.
- [3] Mehrabi, A.B., Shing, P.B., Schuller, M.P., Noland, J.L. (1996). Experimental evaluation of masonry-infilled RC frames. *Journal of Structural Engineering*, 122(3), 228-237.
- [4] Asteris, P.G., Antoniou, S.T., Sophianopoulos, D.S., Chrysostomou, C.Z. (2011). Mathematical macromodels for infilled frames: state of the art. *Journal of Structural Engineering*, 137(12), 1508-1517.
- [5] El-Dakhkhni, W.W., Elgaaly, M., Hamid, A.A. (2003). Three-strut model for concrete masonry-infilled steel frames. *Journal of Structural Engineering*, 129(2), 177-185.
- [6] Preti, M., Migliorati, L., Giuriani, E. (2015). Experimental testing of engineered masonry infill walls for post-earthquake structural damage control. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13, 2029-2049.
- [7] Tsantilīs, A.V., Triantafillou, T.C. (2018). Innovative seismic isolation of masonry infills using cellular materials at the interface with surrounding RC frames. *Engineering Structures*, 155, 279-297.
- [8] Milijaš, A., Marinković, M., Butenweg, C., Klinkel, S. (2023). RC frames with masonry infills with and without openings under combined in-plane and out-of-plane loading. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21(7), 3537-3579.

- [9] Milijaš, A., Marinković, M., Butenweg, C., Klinkel, S. (2024). Seismic performance of RC frames with decoupled masonry infills considering in-plane/out-of-plane interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22(15), 7489-7546.
- [10] EN 1998-1:2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1. CEN, Brussels.
- [11] FprEN 1998-1-2:2025. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1-2: Buildings. CEN/TC 250/SC8.
- [12] EN 1996-1-1:2022. Eurocode 6: Design of masonry structures - Part 1-1. CEN, Brussels.
- [13] Milanesi, R. R., Morandi, P. and Magenes, G. (2018). Local effects on RC frames induced by AAC masonry infills through FEM simulation of in-plane tests. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-28
- [14] Asteris, P. G., Antoniou, S. T., Sophianopoulos, D. S., & Chrysostomou, C. Z. (2011). Mathematical macromodeling of infilled frames: state of the art. *Journal of structural engineering*, 137(12), 1508-1517.
- [15] Ricci, P., De Luca, F., & Verderame, G. M. (2011). 6th April 2009 L'Aquila earthquake, Italy: reinforced concrete building performance. *Bulletin of earthquake engineering*, 9(1), 285-305.
- [16] Wienerberger. Porotherm 25 Profi - technical data sheet.
- [17] Manojlovski, F., Tubaldi, E., Sheshov, V. et al. Flexible joints for seismic-resilient design of masonry-infilled RC frames. *Sci Data* 12, 1266 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41597-025-05515-6>
- [18] REGUPOL INODIS. [Online]. Available: <https://acoustics.regupol.com/products/range/regupol-inodis/regupol-inodis/>, 2026.