

Anđelko Cumbo, University of Banja Luka, andjelko.cumbo@aggf.unibl.org
 Gordana Bročeta, University of Banja Luka, gordana.broceta@aggf.unibl.org
 Marina Latinović Krndija, University of Banja Luka, marina.latinovic@aggf.unibl.org
 Slobodan Šupić, University of Novi Sad, ssupic@uns.ac.rs
 Vladan Pantić, University of Novi Sad, pantic_vladan@uns.ac.rs
 Mladen Slijepčević, University of Banja Luka, mladen.slijepcevic@aggf.unibl.org

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF MASONRY INFILL ON THE SEISMIC RESPONSE AND CONCEPTUAL RELIABILITY OF RC FRAME BUILDING

Abstract:

Structural analyses and the assessment of the influence of masonry infill on the seismic response of multi-storey reinforced concrete (RC) frame buildings are, in domestic engineering practice, rarely an integral part of the structural design. However, during construction, the frames are typically traditionally infilled with masonry walls, without specific isolation measures. Through a comparative analysis of models with rigidly connected and isolated infill, using a typical building with an open ground floor and infilled upper storeys as an example, a significant influence of infill on changes in system stiffness, natural periods, internal force distributions, and reinforcement design concepts has been demonstrated. It is emphasized that the inconsistency between the designed and executed states represents a fundamental conceptual inconsistency that may lead to excessive damage and even the collapse of the structural system.

Keywords: RC frames, masonry infill, seismic analysis, stiffness, soft storey, reliability

ПРОЦЈЕНА УТИЦАЈА ЗИДАНЕ ИСПУНЕ НА СЕИЗМИЧКИ ОДГОВОР И КОНЦЕПЦИЈСКУ ПОУЗДАНОСТ АБ ОКВИРНИХ ЗГРАДА

Сажетак:

Прорачунске анализе и процјена утицаја зидане испуне на сеизмички одговор вишеспратних армиранобетонских оквирних зграда у домаћој инжењерској пракси најчешће нису саставни дио пројекта конструкције, иако се при извођењу оквири уобичајено испуњавају зидањем зидова на традиционалан начин, без посебних мјера изолације. Кроз упоредну анализу модела са везаном и изолованом испуном, на примјеру типичне зграде са отвореним приземљем и испуњеним етажама, указано је на значајан утицај испуне на промјену крутости система, периоде осциловања, расподелу унутрашњих сила и концепцију армирања. Наглашено је да неусклађеност пројектованог и изведеног стања представља суштинску концепцијску недоследност, која може довести до прекомерних оштећења, па и до колапса конструкцијског система.

Кључне ријечи: АБ оквири, зидана испуна, сеизмички прорачун, крутост, флексибилна етажа, поузданост

1. UVODNA RAZMATRANJA

U domaćoj inženjerskoj praksi višespratne armiranobetonske (AB) zgrade najčešće se izvode kao monolitne konstrukcije, betoniranjem na licu mjesta u odgovarajućoj oplati. Popunjavanje nosive konstrukcije, po pravilu, izvodi se na tradicionalan način – zidanjem. U radu je akcenat stavljen upravo na takve objekte, a analiza je usmjerena na identifikaciju karakterističnih problema i obrazaca njihovog ponašanja u realnim (eksploatacionim) uslovima.

Nosivi sistem ovih zgrada čine međuspratne i krovne tavanice, oslonjene na vertikalne elemente (okvirne, panelne ili kombinovane sisteme) [1]. U tako formiranom konstrukcijskom sklopu tavanice, pored dominantnog gravitacionog opterećenja, prenose i horizontalna dejstva u svojoj ravni. Njihova krutost u ravni od presudnog je značaja za seizmički odgovor, jer treba da omoguće približno jednako horizontalno pomjeranje vertikalnih elemenata u nivou pojedine etaže.

Vertikalni elementi (stubovi i zidovi) primarno su opterećeni aksijalnim pritiskom usljed gravitacionih dejstava, ali pri seizmičkom djelovanju preuzimaju i značajne momente savijanja i smicanje. Horizontalne sile se sa tavanica redistribuiraju na vertikalne elemente srazmjerno njihovoj krutosti, čime se definiše ukupni seizmički odgovor konstrukcijskog sistema.

Za razliku od stalnih i korisnih opterećenja, koja se mogu sa relativno velikom pouzdanošću uvesti u proračunski model, modeliranje seizmičkog dejstva je znatno kompleksnije. Ona prvenstveno zavise od seizmičnosti lokacije, karakteristika tla i dinamičkih osobina sistema tlo–konstrukcija. Zbog toga se u postupku proračuna uvodi niz parametara zasnovanih na pretpostavkama i aproksimacijama, što dodatno usložnjava procjenu pouzdanosti rezultata.

Kretanje tla tokom zemljotresa pobuđuje oscilacije konstrukcije, pri čemu se inercione sile razvijaju kao posljedica mase i ubrzanja sistema. Elastični seizmički odgovor često bi zahtijevao veoma visoke sile, probleme pri fundiranju i robusne konstrukcijske elemente, što je ekonomski i konstruktivno teško prihvatljivo. Zbog toga se savremeni propisi zasnivaju na konceptu kontrolisanog duktilnog neelastičnog ponašanja, odnosno dozvoljene plastifikacije određenih zona konstrukcije radi disipacije energije [2].

Iako su razvijene napredne nelinearne metode analize, u inženjerskoj praksi se pretežno primjenjuju elastične analize, uz redukovani spektar odgovora. Redukcija se ostvaruje uvođenjem faktora ponašanja, koji predstavlja odnos sila pri potpuno elastičnom odgovoru i sila koje se koriste u projektovanju uz pretpostavljenu duktilnost sistema. Izbor faktora ponašanja, čije se vrijednosti kreću u širokom rasponu, predstavlja odgovornu inženjersku odluku, jer direktno utiče na nivo projektnih seizmičkih sila.

Nelinearne metode analize, kao što su nelinearna statička (*pushover*) analiza i nelinearna dinamička analiza vremenskog odgovora, još uvijek, zbog svoje složenosti, nemaju primjenu u domaćoj inženjerskoj praksi, te se uglavnom koriste samo prilikom naučno-istraživačkih analiza. Takođe, gradnja zgrada izolovanih od kretanja tla, na primjer oslanjanjem temelja preko elastičnih ležišta, ili intervencije na povećanju prigušenja dodavanjem posebnih prigušivača, nisu dovoljno razrađeni niti ekonomski prihvatljivi načini zaštite zgrada od seizmičkog dejstva na ovim prostorima, pa i šire. U važećim propisima zahtijeva se da se konstrukcija ne sruši pri projektnom zemljotresu sa vjerovatnoćom prekoračenja od 10% u 50 godina (povratni period 475 godina), dok se za češća dejstva zahtijeva ograničenje oštećenja. Međutim, sam način uvođenja seizmičkog opterećenja u proračun predstavlja pojednostavljenje stvarnog fenomena, jer budući potres nije unaprijed poznat – ni po intenzitetu, ni po frekventnom sadržaju. Dodatnu složenost predstavlja zavisnost seizmičkih sila od krutosti konstrukcije: krući sistemi privlače veće sile, dok fleksibilniji sistemi ostvaruju veća pomjeranja i izraženije efekte drugog reda.

Dozvoljene (poželjne) plastifikacije određenih zona konstrukcije, radi disipacije energije unijete potresom i smanjenje seizmičkih sila, usljed povećanja pomjerljivosti sistema uvode efekte geometrijske (deformacijske) imperfekcije. Ti efekti se manifestuju na lokalnom i globalnom nivou. Izvijanje stubova, odnosno ugibi između čvorova konstrukcije povećavaju momente savijanja u presjeku vertikalnih elemenata, a horizontalno pomjeranje čvorova cijele konstrukcije izaziva njeno naginjanje. Superpoziciju ova dva stanja i njihov krajnji uticaj na konstrukciju potrebno je procijeniti ili obuhvatiti odgovarajućim proračunskim postupkom, posebno kod konstrukcija sa fleksibilnom etažom (najčešće prizemljem).

U praksi se efekti drugog reda često ne uključuju u proračunske analize – prvenstveno zbog složenosti postupka koji podrazumijeva iteracije za svaku kombinaciju opterećenja, procjenu realne (redukovane) krutosti usljed ispucalosti betona, uvođenje imperfekcija, kao i uticaja reoloških pojava. Čak i u pojednostavljenim procedurama takvi proračuni predstavljaju značajno opterećenje za uobičajenu projektantsku praksu. Istovremeno, dejstvo gravitacionih opterećenja na već

deformisanu (nagnutu) konstrukciju povećava nestabilnost vertikalnih elemenata, što uz smanjeni nosivi kapacitet može dovesti do progresivnog gubitka stabilnosti, pa i do kolapsa sistema.

U takvim okolnostima opravdano se postavlja pitanje stvarne pouzdanosti složenih numeričkih modela i njihove svrshodne primjene u praksi. Savremeni projektantski pristup zasniva se na uravnoteženju nosivosti i duktilnosti konstrukcije, uz očuvanje kontinuiranog i prostorno povezanog sistema za prijem horizontalnih sila. Iskustvo i inženjerska logika potvrđuju da povoljan seizmički odgovor prvenstveno zavisi od pravilne koncepcije objekta [3], [4], [5]: regularnosti u osnovi i po visini, povoljnog odnosa dimenzija, simetrične raspodjele mase i krutosti, izbjegavanja "meke" etaže i kratkih smičućih stubova, obezbjeđenja dovoljne torzione otpornosti, primjene krutih međuspratnih konstrukcija i adekvatnog fundiranja u skladu sa svojstvima tla. Dobro projektovane duktilne AB konstrukcije, zahvaljujući statičkoj neodređenosti i mogućnosti preraspodjele unutrašnjih sila, mogu ostvariti zadovoljavajuće ponašanje i pri jakim potresima, pod uslovom pravilnog izvođenja detalja i kontrolisanog formiranja plastičnih zglobova.

Imajući u vidu prethodno izneseno, vezana zidana ispuna AB okvira, barem u početnoj fazi seizmičkog dejstva, dok je krutost ispune još uvijek visoka, mijenja dinamičke karakteristike konstrukcije [6], što može dovesti do dodatne, nepovratne promjene seizmičkog odgovora, pa čak i oštećenja nosivih AB elemenata. Zbog toga vezana ispuna zaslužuje da se njen uticaj naglasi i analizira, te da se inženjerskoj praksi pruže adekvatna primjenljiva rješenja.

2. UTICAJ ZIDANE ISPUNE

Kod AB okvirnih zgrada, u domaćoj praksi, za fasadne i pregradne zidove najčešće se koristi zidana ispuna (slika 1). Pritom, zidovi ispune se izvođe od keramičkih blokova povezanih malterom, bez stvarnog odvajanja od okvira. Često se stabilnost van ravni obezbjeđuje postavljanjem armaturnih šipki u horizontalne fuge, koje se ankerišu u AB stubove, ili, rjeđe, izvođenjem horizontalnih i/ili vertikalnih serklaža. Međutim, u posljednje vrijeme nerijetko su prisutni slučajevi izvođenja zidane ispune bez pouzdanog vezivanja za AB okvire, što stvara mogućnost njihovog preturanja i ispadanja, posebno na višim etažama.



Figure 1. AB konstrukcije zgrada sa zidanom ispunom (fotografisao autor).

Na slici 2 prikazan je neuobičajen i neadekvatan primjer izvođenja AB vertikalnih serklaža betoniranjem u prefabrikovane šuplje blokove. Namjera izvođača bila je da se na taj način izbjegne klasična oplata i ubrza proces građenja. Međutim, tako izvedeni AB elementi faktički ne ostvaruju funkciju serklaža, jer ne obezbjeđuju adekvatno povezivanje i ukrućenje zidova. Štaviše, ovakvim rješenjem zidovi su dodatno razdvojeni i oslabljeni, čime se povećava rizik njihovog prevrtanja i ispadanja pri seizmičkom dejstvu.

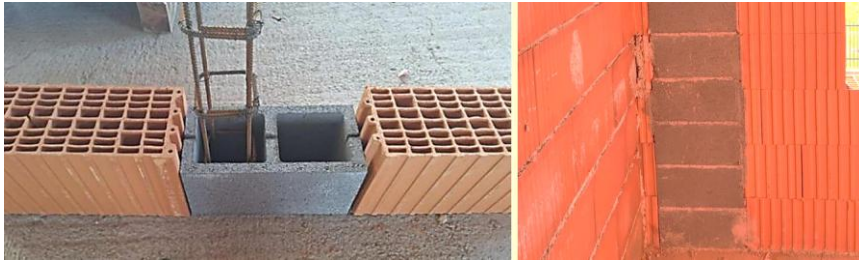


Figure 2. Oplata od šupljih blokova za AB vertikalne serklaže (fotografisao autor)

U uobičajenoj projektantskoj praksi zidana ispuna se u seizmičkim proračunima ne modelira kao sastavni dio konstrukcijskog sistema, već se uzima u obzir isključivo kroz sopstvenu težinu, raspodijeljenu po etažama. Takav pristup podrazumijeva da je ispuna konstruktivno odvojena od primarnog AB skeleta, što u stvarnosti najčešće ne odgovara izvedenom stanju.

Ukoliko zidana ispuna nije stvarno izolovana, već je vezana sa AB okvirom, ona, u početnoj fazi seizmičkog dejstva, neminovno utiče na krutost, raspodjelu sila i ukupne dinamičke karakteristike konstrukcije. U tom slučaju odgovor sistema može biti povoljniji ili nepovoljniji u odnosu na čisti skelet, ali se mogućnost nepovoljnog uticaja mora razmotriti već u fazi projektovanja, kako bi se izbjegla pojava prekomjernih oštećenja ili globalne nestabilnosti objekta [7].

Stoga se nameće potreba da se proračunski model čistog okvira sistema, na neki, za praksu prihvatljiv način, dopuni analizama koje uključuju model neizolovane zidane ispune. Savremeni softverski alati, u elastičnoj oblasti, omogućavaju relativno brzu izradu i poređenje takva dva numerička modela, te bi sistematsko uključivanje takvih analiza, uz odgovarajuću normativnu podršku [2], predstavljalo značajan korak ka povećanju pouzdanosti projektovanja objekata u svakodnevnoj inženjerskoj praksi.

2.1. MODELIRANJE OKVIRA I ZIDANE ISPUNE

Zidanjem blokovima vezanih malterom formiraju se heterogeni i anizotropni elementi, sa izrazito različitim ponašanjem pri pritisku, zatezanju i smicanju. Dok tako formirani zidovi mogu prihvatiti relativno visoke napone pritiska, njihova nosivost pri zatezanju je zanemarljiva, a otpornost na smicanje ograničena. Pritom, nosivost pri smicanju značajno zavisi od vertikalnog pritiska na zid usljed gravitacionih opterećenja, pa je izostankom takvog pritiska u AB skeletu otpornost na smicanje zidova relativno mala.

Vezana zidana ispuna (bez konstruktivne izolacije) može značajno izmijeniti očekivano ponašanje čistog AB okvira, barem do trenutka pojave prvih značajnih oštećenja u zidu. Iako doprinos povećanju globalne krutosti i smanjenju horizontalnih pomjeranja može djelovati povoljno, interakcija ispune i okvira dovodi do koncentracije naprezanja u kontaktnim zonama. Tokom seizmičkog djelovanja okvir deformacijom aktivira mehanizam pritisnute dijagonale u ispunskom panelu, što u početnoj fazi seizmičkog dejstva može uzrokovati drobljenje ispune i oštećenje AB stubova, pojavu meke etaže i efekta kratkih stubova sa nepovoljnim lokalnim koncentracijama smičućih naprezanja (slika 3).

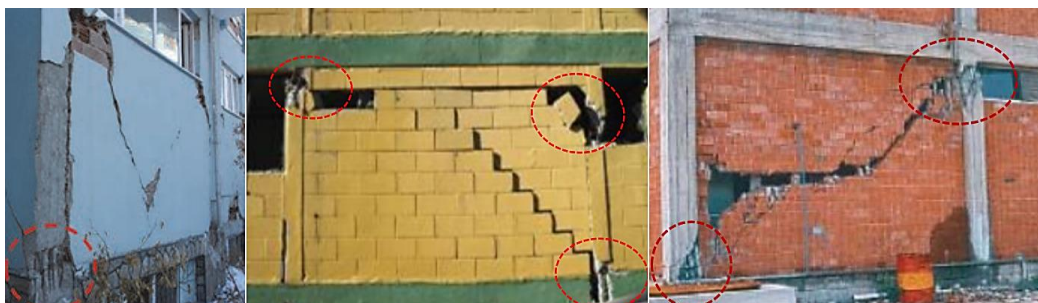


Figure 3. Pukotine i drobljenje ispune i stubova u potresima kao doprinos međusobnog djelovanja [6]: a) Van 2011; b) Čile 2010; c) Džejhan 1998 (fotografisao autor).

Naročit problem predstavlja neregularna raspodjela ispune AB okvira po visini i u osnovi objekta. U tom smislu, kod objekata koji su predmet analize, čest je slučaj potpunog ili djelimičnog izostavljanja ispune u prizemlju (uglavnom poslovna namjena), uz njenu punu zastupljenost na

višim etažama (stambena namjena), što, pri prvom seizmičkom udaru, može dovesti do pojave fleksibilne etaže (prizemlja). Pritom, AB stubovi u prizemlju mogu otkazati prije smanjenja krutosti zidova gornjih etaža. Takođe, različit stepen "perforiranosti" fasada otvorima može izazvati asimetriju krutosti i mase, povećanje ekscentričnosti i izražene, nepovoljne torzione efekte prilikom potresa.

Zanemarivanje ovih uticaja u proračunskim analizama (a što je nerijedak slučaj u domaćoj praksi) dovodi do nesklada između modela i tradicionalnog načina gradnje, čime se direktno narušava pouzdanost procjene seizmičkog odgovora konstrukcije.

2.2. AKTUELNE METODE

Nedavni zemljotresi u regionu i svijetu (Hrvatska 2020, Albanija 2019, Turska i Sirija 2023, Maroko 2023, kao i raniji potresi u Italiji 2009 i 2016, Španiji 2011 i Nepal 2015) pokazali su značajna oštećenja zidanih elemenata i ispuna u AB okvirnim zgradama [8]. Eksperimentalna i terenska istraživanja potvrdila su da zidana ispuna, s jedne strane, značajno utiče na bočnu krutost, period oscilovanja i raspodjelu seizmičkih sila, ali i da je, s druge strane, sklona krutom oštećenju i ispadanju van ravni usljed degradacije veze sa AB konstrukcijom.

Isključenje neizolovane ispune iz proračuna posebno je problematično kod konstrukcija sa neregularnim rasporedom zidova, gdje se mogu očekivati nepovoljni efekti torzije, meke etaže i formiranje kratkih stubova. Brojna istraživanja ukazala su na potrebu realnijeg modeliranja interakcije okvira i ispune, te na potrebu definisanja preciznih uputstava za postupke i detalje pri izvođenju [9]–[11].

U savremenim analizama razlikuju se dva osnovna pristupa modeliranju: makromodeliranje i mikromodeliranje. Makromodeli se koriste u globalnim analizama i najčešće uvode ispunu u obliku ekvivalentne pritisnute dijagonale (slika 4). Mikromodeli omogućavaju detaljnije razmatranje ponašanja materijala i graničnih uslova veza, sa ciljem realnijeg obuhvatanja lokalnih mehanizama oštećenja [12], [13].

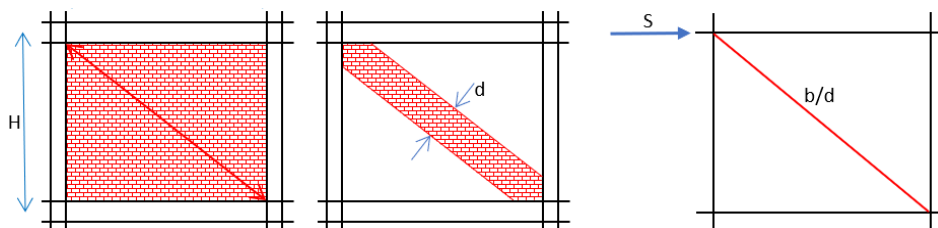


Figure 4. Dijagonalno djelovanje zidane ispune – ekvivalentna pritisnuta dijagonala (izradio autor).

Koncept ekvivalentne dijagonale razvijen je još šezdesetih godina prošlog vijeka i do danas je značajno unaprijeđen. Ipak, taj pristup ne može u potpunosti obuhvatiti kontinualnu interakciju panela ispune i AB stubova. Zbog toga su razvijeni modeli sa više dijagonala, te različiti prijedlozi za određivanje njihove efektivne širine i nelinearne veze sila–pomjeranje, uključujući bilinearne i trilinearne modele, kao i histerezisne relacije za cikličko opterećenje. Međutim, navedeni postupci, zbog složenosti formiranja proračunskog modela, nisu našli primjenu u svakodnevnoj inženjerskoj praksi.

Pored modeliranja u ravni, istraživana je i kompleksna interakcija dejstava u ravni i van ravni, koja može dovesti do ispadanja zidova nakon degradacije veze sa okvirom. Kao moguća rješenja razmatrani su armirani zidovi, primjena tekstilnih ili čeličnih mreža, formiranje kliznih spojeva radi povećanja deformabilnosti, kao i potpuna ili djelimična izolacija ispune od AB okvira, itd.

Iako većina savremenih propisa dopušta primjenu izolovane ispune, nedostatak jasnih i standardizovanih uputstava i detalja često dovodi do improvizacija u praksi. Razvijeni sistemi izolacije, potkrijepljeni eksperimentalnim i numeričkim istraživanjima, pokazuju da je moguće kontrolisati aktivaciju ispune i time povećati pouzdanost seizmičkog odgovora okvirnih zgrada. Jedan od razvijenijih sistema – *INODIS* sistem temelji se na razrađenim detaljima izolacije (slika 5) [14]–[18], koji u nelinearne analize uvodi link-elemente sa karakteristikama u skladu sa [19]. Ipak, još uvijek se s pravom može smatrati da ne postoji opšteprihvaćen i normativno usaglašen pristup modeliranju i tretmanu zidane ispune u seizmičkim analizama koji bi bio primjenljiv u inženjerskoj praksi.

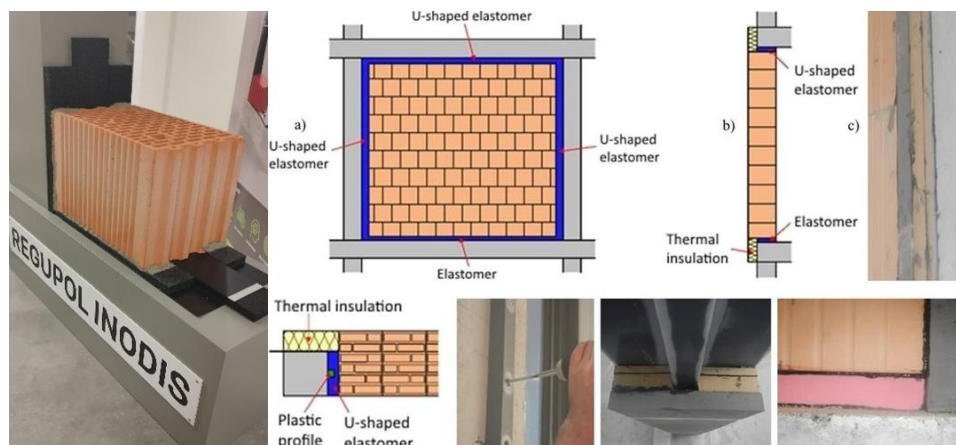


Figure 5. Primjer izolacije zidane ispune u INODIS sistemu [15].

2.3. PRAKTIČNI DOPRINOS RADA

Imajući u vidu izraženu razliku između stvarno izvedenog stanja AB okvirnih zgrada, na našim prostorima, i uobičajenih proračunskih modela u seizmičkim analizama domaće prakse u kojima se zidana ispuna zanemaruje, osnovni cilj ovog rada jeste da se ukaže na nedovoljnu pouzdanost takvog pristupa.

U radu se razmatra promjena globalne krutosti, perioda oscilovanja, raspodjele unutrašnjih sila i horizontalnih pomjeranja konstrukcije usljed uključivanja ispune u numerički model. Posebna pažnja posvećena je identifikaciji nepovoljnih efekata, kao što su pojava meke etaže, torziona osjetljivost i efekat kratkih stubova, koji mogu nastati usljed neregularnog rasporeda ispune u osnovi i po visini objekta, pogotovo u početnoj fazi seizmičkog dejstva, odnosno do trenutka pojave prvih značajnih oštećenja u zidovima.

Doprinos rada ogleda se u uporednoj globalnoj analizi različitih modela AB okvirne konstrukcije – model sa izolovanom ispunom i model sa neizolovanom ispunom, sa ciljem opšteg kvantifikovanja razlika u seizmičkom odgovoru. Na taj način nastoji se ukazati na stepen odstupanja između tradicionalnih proračunskih pristupa sa zanemarenjem ispune i realnog ponašanja konstrukcije sa izvedenom ispunom, te otvoriti pitanje potrebe sistematičnijeg i normativno jasnije definisanog uključivanja ili isključivanja zidane ispune u svakodnevnu projektantsku praksu.

U analiziranim slučajevima razmatrani su tipični primjeri višespratnih AB zgrada kakve se najčešće grade na ovim prostorima (slika 6). Ove zgrade, u prizemlju, uglavnom, imaju poslovnu namjenu, koja je podložna promjenama, zbog čega ti prostori najčešće imaju smanjenu zastupljenost krutih pregradnih i fasadnih zidanih i AB zidova. Nasuprot tome, spratne etaže, namijenjene stanovanju, karakteriše znatno veća zastupljenost zidane ispune, usljed sve izraženije potražnje za manjim stambenim jedinicama, gdje se broj unutrašnjih zidova dodatno povećava.

Takva funkcionalna raspodjela prostora može po visini objekta dovesti do značajne neregularnosti krutosti, sa potencijalnom pojavom fleksibilne etaže u prizemlju, što predstavlja jedan od najnepovoljnijih seizmičkih mehanizama ponašanja. Krutost ispune gornjih etaža može izazvati početni, nagli porast unutrašnjih sila u AB elementima prizemlja, što dalje može dovesti do oštećenja, pa čak i loma AB elemenata, prije nego što dođe do značajnije degradacije zidova ispune i "omekšavanja" gornjih etaža.



Figure 6. *Primjeri tipičnog izgleda zgrada u Banjoj Luci – prizemlja imaju poslovnu, a spratovi stambenu namjenu (fotografisao autor).*

2.4. ANALIZA KROZ USPOSTAVLJENE MODELE

U skladu sa postavljenim ciljem, za razmatranje uticaja zidane ispune na seizmički odgovor AB okvirnih konstrukcija usvojena je zgrada realnih dimenzija, sa karakterističnim rasporedom elemenata i otvora u zidovima (slika 7). U osnovi prizemlja zgrada je dimenzija $15,0 \times 15,5$ m, spratnosti: suteran, prizemlje i osam spratova, ukupne visine $3,0 + 4,0 + 8 \cdot 3,2 = 32,6$ m. Suteran je poluukopan, sa krutim AB zidovima po obimu i kratkim stubovima usljed otvora za osvjtljenje iznad visokih parapeta. Objekat je fundiran na krutoj temeljnoj ploči i tlu dobrih karakteristika.

Za proračun prostornih modela korišćen je, u domaćoj projektantskoj praksi široko zastupljen, softverski paket *Tower*, koji je posebno pogodan za objekte visokogradnje. Iskorišćene su mogućnosti programa za redukciju krutosti elemenata u skladu sa pojedinačnim nosivostima, uključujući i njihovo potpuno isključenje iz proračunskog modela. Početne vrijednosti parametara materijala za beton i zidove ispune usvojene su prema standardnim preporukama (beton: C30/37, $E = E_m = 33$ GPa; opeka: $E = 38$ MPa, $E_m = 2,3$ GPa), dok su u seizmičkom proračunu krutosti elemenata redukovane radi simulacije očekivanog ispucalog stanja (beton: $k = 0,6$ za savijanje i smicanje; opeka: $k = 0,001$ za savijanje upravno na ravan i $k = 0,6$ za naprezanje u svojoj ravni).

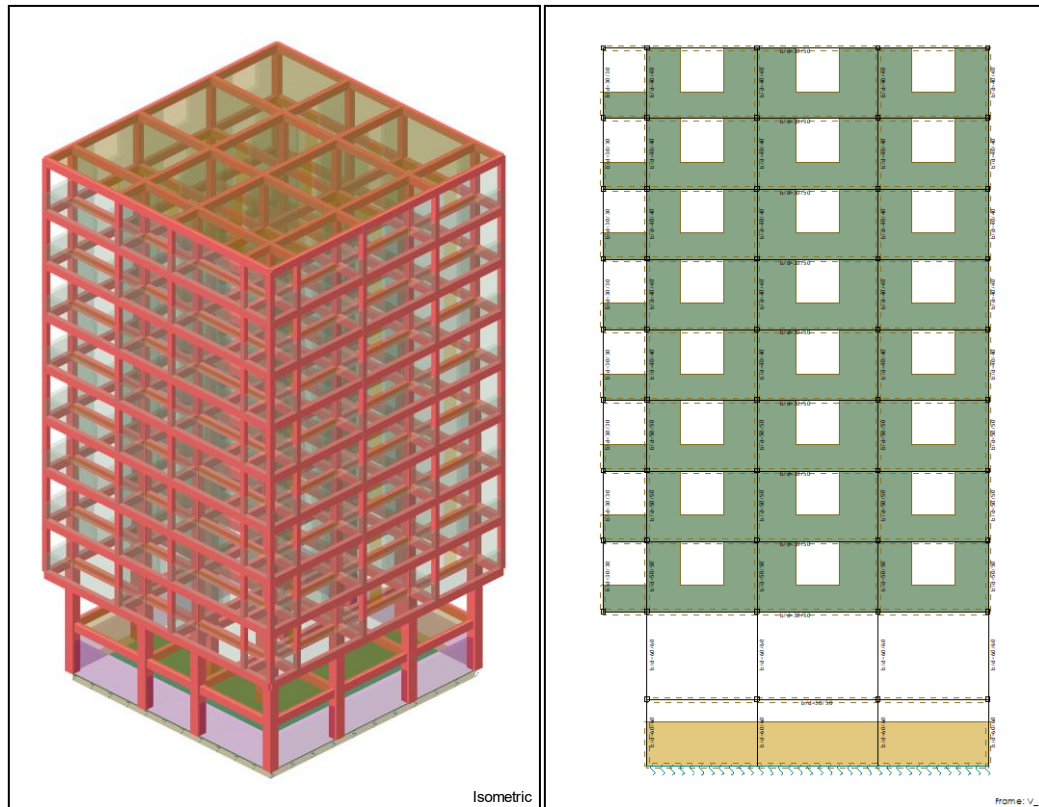


Figure 7. Proračunski 3D model konstrukcije zgrade sa prikazom karakterističnog fasadnog okvira sa otvorima u zidanoj ispunu (izradio autor).

Seizmički proračun izvršen je prema EC8, za ubrzanje tla $a_{gR} = 0,25(g)$, tlo kategorije B i faktor značaja II ($\gamma = 1$). Faktori ponašanja procijenjeni su za klasu duktilnosti DCM, u skladu sa konstruktivnim sistemom i njegovom regularnošću, te je za model sa vezanom ispunom usvojena vrijednost $q = 3,0$, a za model sa izolovanom ispunom $q = 4,0$.

Za model sa vezanom ispunom u prva tri tona dobijeni su periodi: $T_1 = 1,251$ s, $T_2 = 1,185$ s i $T_3 = 1,039$ s, dok su za model sa izolovanom ispunom dobijene vrijednosti: $T_1 = 1,884$ s, $T_2 = 1,868$ s i $T_3 = 1,605$ s (slika 8).

Distribucija seizmičkih sila po etažama, kao i ukupne seizmičke sile, razlikuju se usljed promjene krutosti sistema. Za model sa vezanom ispunom ukupne sile iznose: $\Sigma S_x = 5582$ kN i $\Sigma S_y = 5277$ kN, dok za model sa izolovanom ispunom iznose: $\Sigma S_x = \Sigma S_y = 2669$ kN.

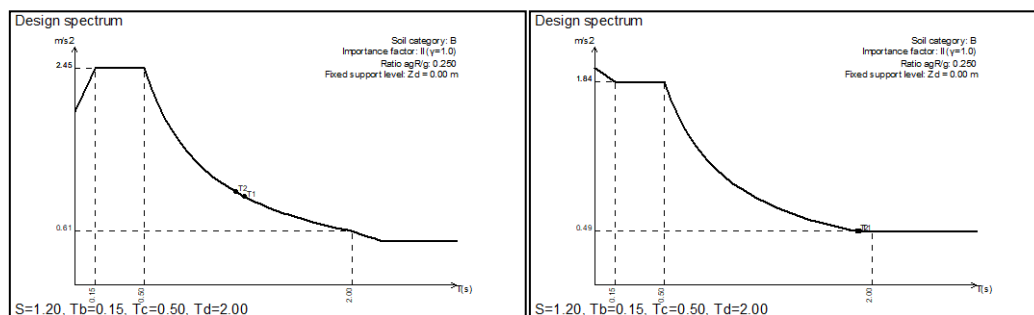


Figure 8. Projektni spektri: a) za model sa vezanom ispunom; b) za model sa izolovanom ispunom (izradio autor).

Za prikaz karakterističnih rezultata proračuna izdvojeni su dijagrami horizontalnih pomjeranja zgrade za seizmičko dejstvo u y pravcu (slika 9) i dijagrami potrebne podužne i poprečne armature AB stubova za kombinaciju stalnog, korisnog i seizmičkog dejstva (slika 10 i 11).

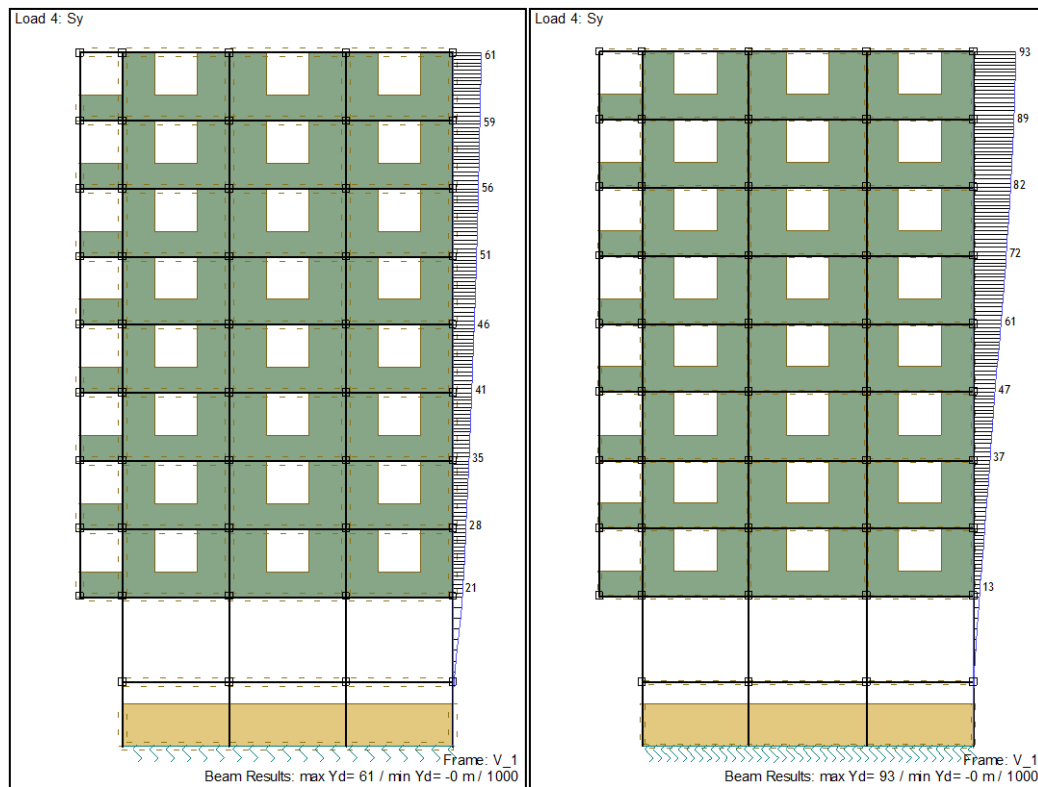


Figure 9. Horizontal pomjeranja: a) za model sa vezanom ispunom; b) za model sa izolovanom ispunom (izradio autor).

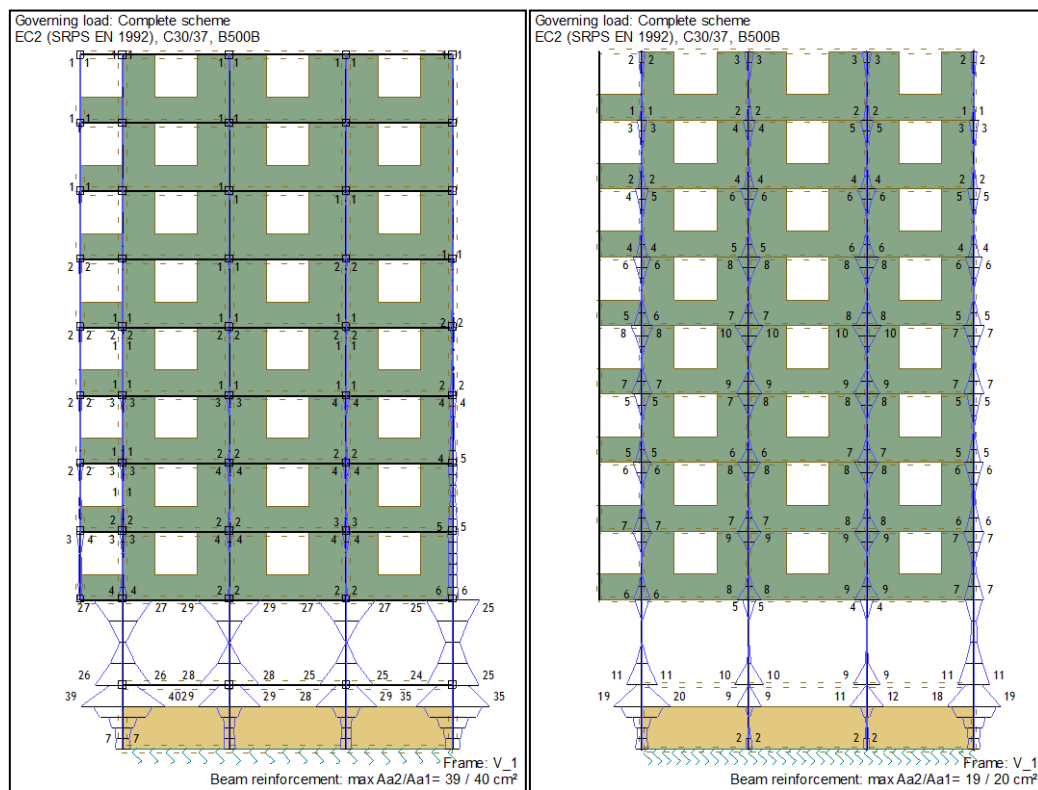


Figure 10. Potrebna podužna armatura u AB stubovima: a) za model sa vezanom ispunom; b) za model sa izolovanom ispunom (izradio autor).

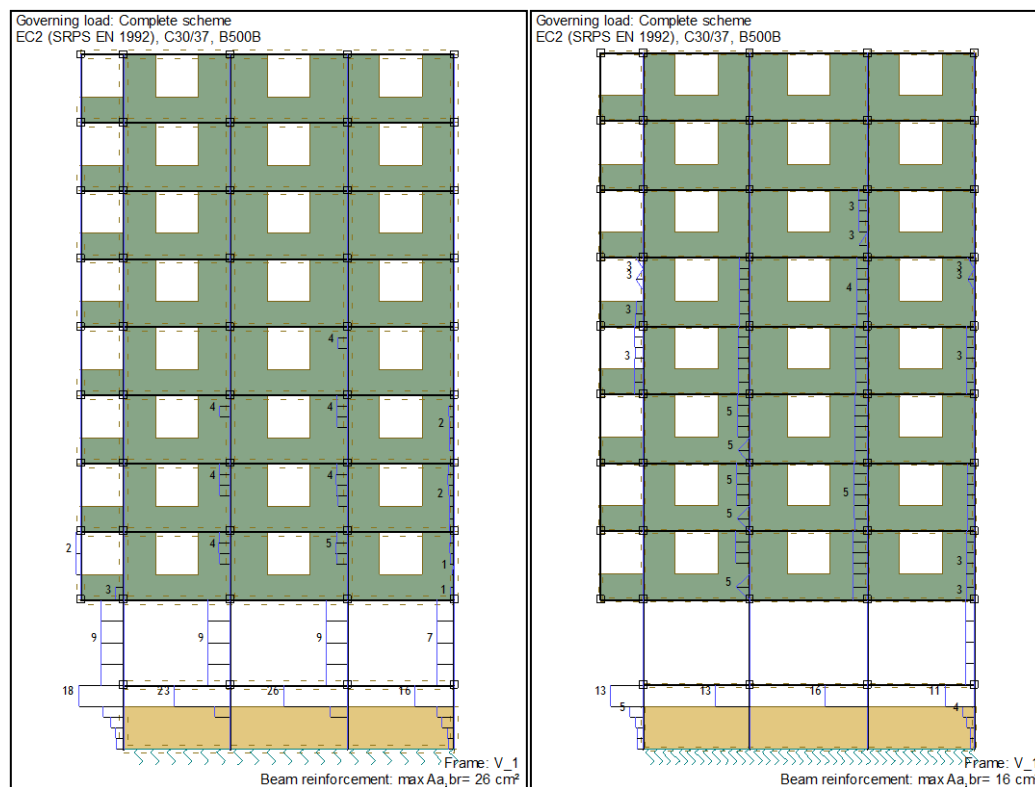


Figure 11. Potrebna poprečna armatura u AB stubovima: a) za model sa vezanom ispunom; b) za model sa izolovanom ispunom (izradio autor).

2.5. DISKUSIJA REZULTATA ANALIZE

Poređenjem modela sa izolovanom i vezanom (neizolovanom) ispunom uočava se izrazito skraćanje osnovnog perioda oscilovanja, što odgovara povećanju globalne krutosti sistema u inicijalnoj fazi odziva od približno 50%. Pritom su oscilovanja zgrade za model bez ispune očekivano pravilna, tj. u prvom tonu zgrada osciluje dominantno u y pravcu, u drugom tonu u x pravcu i u trećem tonu objekat torziono osciluje, dok model sa vezanom ispunom pokazuje torziono oscilovanje zgrade već i u prva dva tona.

U linearnom proračunskom modelu vezana ispuna se implicitno tretira kroz svoju početnu (inicijalnu tangentnu) krutost, koja odgovara neoštećenom stanju zida. Međutim, takva krutost realno postoji samo tokom prvih ciklusa seizmičkog pobuđivanja. Već pri relativno malim međuspratnim pomjeranjima dolazi do pojave kosih pukotina, drobljenja pritisnutih zona i progresivne degradacije mehaničkih karakteristika ispune. Time se efektivna krutost sistema smanjuje, a odziv postaje izrazito nelinearan, sa histereznim degradacionim ponašanjem.

Ipak, ključno je naglasiti da početni seizmički impulsi, koji aktiviraju punu inicijalnu krutost ispune, mogu generisati znatno povećane unutrašnje sile u AB elementima. U analiziranom slučaju ukupna horizontalna seizmička sila povećana je približno dva puta. Takvo povećanje generiše unutrašnje sile koje mogu dovesti do dostizanja graničnih stanja nosivosti stubova prije nego što dođe do značajnijeg omekšavanja ispune. Drugim riječima, konstrukcija može pretrpjeti ozbiljna oštećenja upravo u fazi kada ispuna još uvijek djeluje kao kruti element.

Analiza međuspratnih horizontalnih pomjeranja dodatno potvrđuje prisustvo vertikalne neregularnosti. Kod modela sa vezanom ispunom najveći dio ukupne horizontalne deformacije koncentrisan je u prizemlju, dok su spratovi sa ispunom znatno krući. Ovakva raspodjela pomjeranja predstavlja tipičan efekat fleksibilnog prizemlja (*soft-storey*), koji zahtijeva redukciju faktora ponašanja što dodatno povećava projektne seizmičke sile. Suprotno tome, kod modela sa izolovanom ispunom raspodjela pomjeranja duž visine objekta je približno linearna, bez izražene koncentracije deformacija u jednoj etaži. Rezultati pokazuju da je horizontalno pomjeranje vrha zgrade kod modela sa izolovanom ispunom ($Y_d = 93$ mm) veće za približno 50% u odnosu na model sa vezanom ispunom ($Y_d = 61$ mm). Nasuprot tome, pomjeranje u nivou ploče iznad prizemlja kod modela sa vezanom ispunom ($Y_d = 21$ mm) veće je za približno 60% u odnosu na model sa izolovanom ispunom ($Y_d = 13$ mm). Ovakva raspodjela pomjeranja jasno ukazuje na mogućnost intenzivnije koncentracije deformacija u prizemlju kod modela sa vezanom ispunom.

Uvođenje inicijalne krutosti ispune mijenja distribuciju unutrašnjih sila, a time i potrebnu količinu proračunske armature u AB elementima. Model sa vezanom ispunom zahtijeva približno dvostruko veću količinu armature u stubovima prizemlja i suterena u odnosu na model sa izolovanom ispunom. Suprotno tome, model sa izolovanom ispunom zahtijeva intenzivnije armiranje stubova gornjih etaža u odnosu na model sa vezanom ispunom.

U analiziranom primjeru to upućuje na zaključak **da bi stubove prizemlja i suterena trebalo dimenzionisati prema rezultatima modela sa vezanom ispunom, dok bi stubove spratnih etaža bilo racionalnije dimenzionisati prema modelu sa izolovanom ispunom**. Ovakav pristup dodatno potvrđuje da problem nije isključivo numerički, već prvenstveno konceptijski – jer izbor idealizacije sistema direktno utiče na raspodjelu uticaja po visini objekta.

Treba razlikovati globalnu i lokalnu neregularnost sistema. Globalna neregularnost ogleda se u promjeni osnovnog perioda i povećanju seizmičkih sila usljed povećane krutosti sistema. Lokalna neregularnost manifestuje se kroz koncentraciju deformacija i unutrašnjih sila u elementima prizemlja, kao i kroz torzione efekte uzrokovane nesimetričnim rasporedom ispune. U slučaju nesimetrične ispune dolazi do pomjeranja centra krutosti i povećanja torzionih zahtjeva, što dodatno komplikuje realan seizmički odziv konstrukcije.

Važno je naglasiti da linearni proračunski model sa vezanom zidanom ispunom reprezentuje inicijalnu tangentnu krutost sistema, čime implicitno precjenjuje njegovu efektivnu krutost tokom razvijenog nelinearnog odziva, ali istovremeno realno registruje nepovoljan efekat inicijalnog povećanja seizmičkih sila. S druge strane, model sa izolovanom ispunom potcjenjuje početne sile ukoliko u izvedenom stanju postoji kruta veza ispune i okvira. Ova metodološka dilema potvrđuje da je problem prvenstveno konceptualne prirode – odnosi se na izbor konstruktivnog rješenja i njegovu dosljednu primjenu u praksi.

Rezultati jasno ukazuju da interakcija okvir–ispuna predstavlja izrazito nelinearan i fazno zavisani fenomen, te da pojednostavljeno linearno modeliranje bez jasne konstruktivne koncepcije može dovesti do nepouzdanih procjena sigurnosti na seizmička dejstva.

Iako rezultati jasno ukazuju na značajan uticaj zidane ispune na globalno ponašanje AB okvirne konstrukcije, potrebno je naglasiti da je analiza sprovedena na idealizovanom linearnom modelu – nisu obuhvaćene ciklična degradacija materijala niti potpuna nelinearna evolucija oštećenja, što bi zahtijevalo vremenske nelinearne analize i eksperimentalnu verifikaciju.

Međutim, osnovni cilj ovog rada nije bilo insistiranje na primjeni složenih neelastičnih proračunskih postupaka, koji u realnim uslovima svakodnevne projektantske prakse najčešće nisu racionalni ni ekonomski opravdani. Suština je ukazati na ključni izvor nepouzdanosti – nekompatibilnost između proračunskog modela i stvarnog načina izvođenja konstrukcija na ovim prostorima. Upravo ta konceptijska nedosljednost, a ne nedostatak numeričke sofisticiranosti, predstavlja dominantan rizik za pouzdanost seizmičkog projektovanja.

3. ZAKLJUČCI I PREPORUKE

Projektanti konstrukcija se u savremenoj praksi sve češće suočavaju sa složenim arhitektonskim zahtjevima koji rezultuju konstruktivnim rješenjima nejasnog ili nepovoljnog seizmičkog ponašanja. Takva rješenja nerijetko izlaze iz okvira tipskih konstrukcijskih sistema na koje se eksplicitno odnose normativne smjernice, te odstupaju od principa regularnosti i dobre inženjerske logike. Posljedica je povećana zavisnost od složenih numeričkih modela, iako sama koncepcija konstrukcije ostaje suštinski nepovoljna.

Savremena projektantska praksa sve više traži primjenu složenih numeričkih modela, uključujući efekte drugog reda, nelinearne analize i detaljno modeliranje materijala. Međutim, opravdano je postaviti pitanje njihove stvarne koristi u odnosu na pouzdanost konačnog rješenja, posebno kod AB okvirnih zgrada sa zidanom ispunom. U takvim sistemima ključni problem često nije nedostatak analitičke sofisticiranosti, već nejasan i nedovoljno dosljedan tretman zidane ispune u projektovanju i izvođenju.

Ne uzimanje u obzir uticaja od zidane ispune u proračunu, a njeno kruto vezivanje u izvođenju, predstavlja suštinsku konceptijsku nedosljednost. Posljedice takvog pristupa ne mogu se kompenzovati naprednijim numeričkim modelima, jer je problem u osnovnoj pretpostavci sistema, a ne u preciznosti analize. S druge strane, potpuno modeliranje ispune kao djelimično nosivog elementa uvodi dodatnu složenost, bez jasnih normativnih smjernica i bez garantovane reproduktivnosti rezultata u svakodnevnoj praksi.

Iskustvo iz realnih potresa pokazuje da su oštećenja najčešće posljedica neregularnosti, mekih etaža, torzionih efekata i izostanak rješavanja konstruktivnih detalja, a ne nedostatak naprednih analitičkih procedura. U tom smislu, pouzdanost seizmičkog proračuna treba prvenstveno tražiti u pravilnoj

konceptiji objekta, jasno definisanom sistemu prenosa sila i dosljednoj primjeni konstruktivnih mjera – uključujući i sistemsku izolaciju zidane ispune kada je to racionalno rješenje.

Pouzdanost seizmičkog proračuna ne postiže se prvenstveno povećanjem složenosti numeričkog modela, već dosljednošću između proračuna, koncepcije i izvođenja. Konstrukcija koja je pravilno koncipirana, regularna po visini i osnovi, sa jasno definisanim sistemom prenosa sila i kvalitetno izvedenim detaljima za duktilnost elemenata, ima veći stepen stvarne sigurnosti od konstrukcije analizirane naprednim nelinearnim metodama, ali izvedene bez kontrole nad ključnim konstrukcijskim rješenjima. Bez koncepcijske dosljednosti između modela i realnog sistema, svaka numerička preciznost ostaje samo privid sigurnosti – **savremeni softveri mogu unaprijediti proračun, ali ne mogu nadomjestiti pogrešnu konstrukcijsku koncepciju.**

Preporučuje se sistematsko uvođenje jasno definisanih konstruktivnih mjera izolacije zidane ispune od AB okvira uz obavezno obezbjeđenje stabilnosti zidova na djelovanje sila van ravni, kako bi se spriječilo njihovo ispadanje i ugrožavanje bezbjednosti korisnika. Prednost takvog pristupa ogleda se u kontrolisanoj i odloženoj aktivaciji ispune, povećanju deformabilnosti sistema, smanjenju nepovoljne interakcije dejstava u ravni i van ravni ispune, te u stabilnijem i predvidljivijem seizmičkom odgovoru konstrukcije. Izolovana ispuna dodatno smanjuje osjetljivost sistema na naknadne izmjene rasporeda zidova tokom izvođenja ili eksploatacije objekta.

Posebno nepovoljan slučaj u praksi predstavlja tradicionalno zidanje bez izolacije, ali i bez pouzdanog ankerisanja, jer tada nije isključen uticaj krute ispune na AB okvire, dok zidovi nemaju obezbjeđenu stabilnost i predstavljaju dodatni rizik za korisnike.

Savremeni trendovi u publikovanju sve više favorizuju formalno naučne radove, što nerijetko dovodi do njihove kvantitativne ekspanzije, ali često bez stvarnog doprinosa i efikasne primjene u inženjerskoj praksi. Istovremeno, u realnom okruženju i dalje se pojedine konstrukcije zgrada projektuju i grade sa izraženim koncepcijskim nedostacima. U ovom radu, kroz primjer nedovoljno jasnog tretmana ispune AB okvira, ukazuje se na potrebu da se naučna istraživanja u većoj mjeri usmjere ka realnoj primjeni u praksi.

LITERATURA

- [1] G. Broćeta i A. Cumbo, *Principi konstruisanja arhitektonskih objekata*. Banja Luka: Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci, 2025.
- [2] European Committee for Standardization, *EN 1998-1:2004 Eurocode 8 – Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings*, 2004.
- [3] D. Aničić, P. Fajfar, B. Petrović, A. Szavits-Nossan i M. Tomažević, *Zemljotresno inženjerstvo – visokogradnja*. Beograd: DIP Građevinska knjiga, 1990, str. 399–408.
- [4] B. Petrović, *Odabrana poglavlja iz zemljotresnog inženjerstva*. Beograd: Građevinska knjiga, 1989.
- [5] A. Cumbo, “Procjena seizmičke otpornosti postojećih zgrada – iskustva iz Banjaluke,” u *Zborniku IX naučno-stručnog međunarodnog savjetovanja Ocena stanja, održavanje i sanacija građevinskih objekata i naselja*, Zlatibor, 2015, str. 569–578.
- [6] A. Cumbo, G. Broćeta, M. Latinović Krndija, S. Šupić and Ž. Lazić, “The Effect of Masonry Infill Model Selection on the Seismic Response of Reinforced Concrete Frame Structures,” *AGG+ J. Archit., Civ. Eng., Geod. Relat. Sci. Fields*, vol. 13, no. 2, pp. 50–70, Dec. 2025, doi: 10.61892/AGG202502002C.
- [7] L. Babić i R. Folić, “Uticaj ispune na ponašanje AB konstrukcija pri seizmičkim dejstvima,” u *Zborniku II naučno-stručnog savetovanja Zemljotresno inženjerstvo i inženjerska seizmologija*, Divčibare, 2010, str. 231–236.
- [8] S. Nikolić-Brzev, M. Marinković, I. Milicević i N. Blagojević, *Posledice zemljotresa u Albaniji od 26.11.2019. na objekte i infrastrukturu*. Beograd, Srbija: Serbian Association for Earthquake Engineering (SUZI-SAE), 2020.
- [9] R. Salatić, R. Mandić i Z. Perović, “Modeliranje zidane ispune u seizmičkom proračunu,” u *Zborniku II naučno-stručnog savetovanja Zemljotresno inženjerstvo i inženjerska seizmologija*, Divčibare, 2010, str. 107–112.
- [10] R. Salatić, R. Mandić, M. Marinković i V. Carević, “Modeliranje zidane ispune primjenom komercijalnog računarskog programa,” u *Zborniku naučno-stručnog skupa Savremena teorija i praksa u graditeljstvu*, Banja Luka, 2014, str. 129–138.
- [11] V. Carević i J. Radovanović, “Modeliranje nelinearnog ponašanja zidane ispune u AB skeletnim konstrukcijama,” u *Zborniku 14. kongresa DGKS*, Novi Sad, 2014, str. 387–395.

- [12] P. Morandi, G. Magenes and S. Hak, "Evaluation of infill strut properties based on in-plane cyclic tests," *Građevinar*, vol. 65, no. 6, pp. 509–521, 2013.
- [13] S. Hak, P. Morandi and G. Magenes, "Prediction of inter-storey drifts for regular RC structures with masonry infills based on bare frame modelling," *Bull. Earthq. Eng.*, 2017.
- [14] C. Butenweg, M. Marinković and R. Salatić, "Experimental results of reinforced concrete frames with masonry infills under combined quasi-static in-plane and out-of-plane seismic loading," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 17, no. 6, pp. 3397–3422, 2019.
- [15] M. Marinković and C. Butenweg, "Innovative decoupling system for the seismic protection of masonry infill walls in reinforced concrete frames," *Eng. Struct.*, vol. 197, Art. no. 109435, 2019.
- [16] M. Marinković, S. Flores Calvinisti and C. Butenweg, "Numerical analysis of reinforced concrete frame buildings with decoupled infill walls," *Build. Mater. Struct.*, vol. 63, no. 4, pp. 13–48, 2020, doi: 10.5937/GRMK2004013M
- [17] M. Marinković, "Eksperimentalna ispitivanja AB ramova sa izolovanom zidanom ispunom – rezultati i prednosti," u *Zborniku simpozijuma DGKS*, Vrnjačka Banja, 2024, str. 387–395.
- [18] N. Krtinić, M. Gams and M. Marinković, "Modelling the Seismic Response of a Confined Masonry Building Using Equivalent Strut Models," in *Proc. 3rd Croatian Conf. on Earthquake Engineering (3CroCEE)*, Split, 2025, pp. 601–612.
- [19] Federal Emergency Management Agency, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356)*. Washington, DC, USA, 2000.