

dr Marko Marinković¹

INOVATIVNI SISTEM ZA SEIZMIČKI OTPORNU ZIDANU ISPUNU U ARMIRANOBETONSKIM RAMOVSKIM KONSTRUKCIJAMA

Rezime: Armiranobetonske (AB) ramovske konstrukcije zauzimaju značajan procenat armiranobetonskih konstrukcija u svetu, pogotovo u seizmički aktivnim područjima. Ramovi su najčešće ispunjeni zidanom ispunom zbog jednostavnosti i brzine izvođenja, kao i zbog dobrih termičkih karakteristika. Ipak, AB ramovske konstrukcije sa zidanom ispunom su često trpele ozbiljnu štetu u prethodnim zemljotresima. Ima više razloga zbog kojih se ispune lose ponašaju za vreme zemljotresa, između ostalog zbog njene značajno veće krutosti u odnosu na fleksibilni ram, zbog nepostojanja adekvatne veze rama i ispune i zbog istovremenog dejstva opterećenja u ravni ispune i upravno na ravan ispune. Ovakve činjenice su bile motivacija za razvijanje inovativnog sistema za zaštitu zidane ispune pri dejstvu zemljotresa. U okviru Evropskog projekta INSYSME (Innovative Systems for Earthquake Resistant Masonry Enclosures in Reinforced Concrete Buildings) razvijen je system INODIS (Innovative Decoupled Infill System) sa ciljem da se zidana ispuna izoluje od dejstva AB rama i istovremeno spreči ispadanje ispune van ravni. Ovaj rad predstavlja rezultate eksperimentalnog ispitivanja koja su pokazala značajna poboljšanja ponašanja zidane ispune u AB ramovima sa zidanom ispunom i sistemom INODIS u odnosu na tradicionalno izvedenu zidanu ispunu.

Ključne reči: zidana ispuna, AB ram, seizmika, zemljotresi, veza ispuna/ram

INNOVATIVE SYSTEM FOR SEISMIC RESISTANT MASONRY INFILLS IN REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURES

Summary: Reinforced concrete (RC) frame structures occupy a significant percentage of reinforced concrete structures in the world, especially in seismically active areas. Frames are most often filled with masonry infills due to the simplicity and speed of construction, as well as due to good thermal characteristics. However, RC frames with masonry infills often suffered serious damage in previous earthquakes. There are several reasons for such a worse behaviour during earthquakes, among others because of its significantly higher stiffness compared to the flexible frame, due to the lack of an adequate connection of the frame and infill, as well as due to the simultaneous effect of the load in-plane of the infill and perpendicular to the infill. These facts were a motivation for the development of an innovative system for the protection of masonry infills in the event of an earthquake. Within the European project INSYSME (Innovative Systems for Earthquake Resistant Masonry Enclosures in Reinforced Concrete Buildings), the INODIS (Innovative Decoupled Infill System) system has been developed with the aim of isolating the infill from the RC frame and at the same time preventing the out-of-plane failure of an infill. This paper presents the results of experimental tests that showed significant improvements in the behaviour of the masonry infilled RC frames with the INODIS system compared to the traditionally constructed infills.

Key words: masonry infill, RC frame, seismic, earthquakes, infill/frame connection

¹ Docent, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 011/3218580, mmarinkovic@grf.bg.ac.rs

1. UVOD

U savremenim konstrukcijama, zidana ispunja se intenzivno koristi za popunjavanje betonskih i čeličnih ramova u ramovskim konstrukcijama. Oni predstavljaju najtradicionalniji sistem ispunje zbog svojih odličnih performansi u pogledu zdrave unutrašnjosti objekata, temperature, buke, vlage, otpornost na vatru i trajnost. Štaviše, zidovi ispunje u ramovskim konstrukcijama se uglavnom koriste za odvajanje unutrašnjeg prostora zgrada i spoljašnjeg okruženja, jer se lako grade i preuređuju i stoga su privlačni sa strane zahteva moderne arhitekture. Zbog svega navedenog je upotreba zidne ispunje u AB konstrukcijama uobičajena u mnogim zemljama. Uglavnom zidovi ispunje su u toku projektovanja smatrani nekonstruktivnim elementima i stoga su zanemareni u procesu projektovanja. Međutim, zapažanja zemljotresa pokazala su da prisustvo zidova ispunje može značajno da izmeni seizmičko ponašanje konstrukcije. Zidana ispunja menja dinamičke karakteristike konstrukcije, što zauzvrat određuje nivo seizmičkog dejstva na konstrukciju. Iako relevantni standardi sadrže neke zahteve za zidanu ispunju, iznenađujuće je da oni ne opisuju kako se ti zahtevi konkretno mogu ispuniti. Npr. Evrokod 8 [1] predlaže jednostavan pristup koji primenjuje ekvivalentne seizmičke sile za koje je potrebno proveriti nosivost zidane ispunje i njene veze sa ramom. Pored toga, on još i ukazuje na neophodnost ispitivanja lokalnih efekata usled interakcije rama i ispunje, uzimanja u obzir neregularnog rasporeda ispunje u osnovi i po visini kao i primene konstruktivnih mera kako bi se izbegao krtilom ispunje, i proračun konstruktivnih veza rama i ispunje. Takođe Evrokod 8 [1] ograničava nivo dozvojenog relativnog međuspratnog pomeranja na 0,5% za tradicionalnu zidanu ispunju, na 0,75% za duktilnu ispunju i na 1,0% za izolovanu ispunju. Međutim, kako kod ne uključuje specifična i obavezna konstruktivna pravila ili proračunske provere, zidana ispunja se obično gradi bez ikakvih dodatnih mera i sa punim kontaktom sa ramom, što za posledicu ima visoku osjetljivost na seizmička oštećenja. U praksi to dovodi do činjenice da zidovi ispunje nisu dimenzionisani niti pravilno konstruisani. Dokaz za ovu činjenicu potvrđuju nedavni zemljotresi, koji su doveli do ogromnih šteta zbog neadekvatnog projektovanja zidane ispunje. Posledice su bile potpuni kolapsi zgrada i gubitak ljudskih života. Primeri nezadovoljavajućeg ponašanja zidane ispunje (Slika 1), su zabeleženi i nakon zemljotresa koji su se dogodili poslednjih godina, u Duzcu (Turska, 1999), L'Aquila (Italija, 2009), Lorca (Španija, 2011), Christchurch (Novi Zeland, 2011), Emilia-Romagna (Italija, 2012).



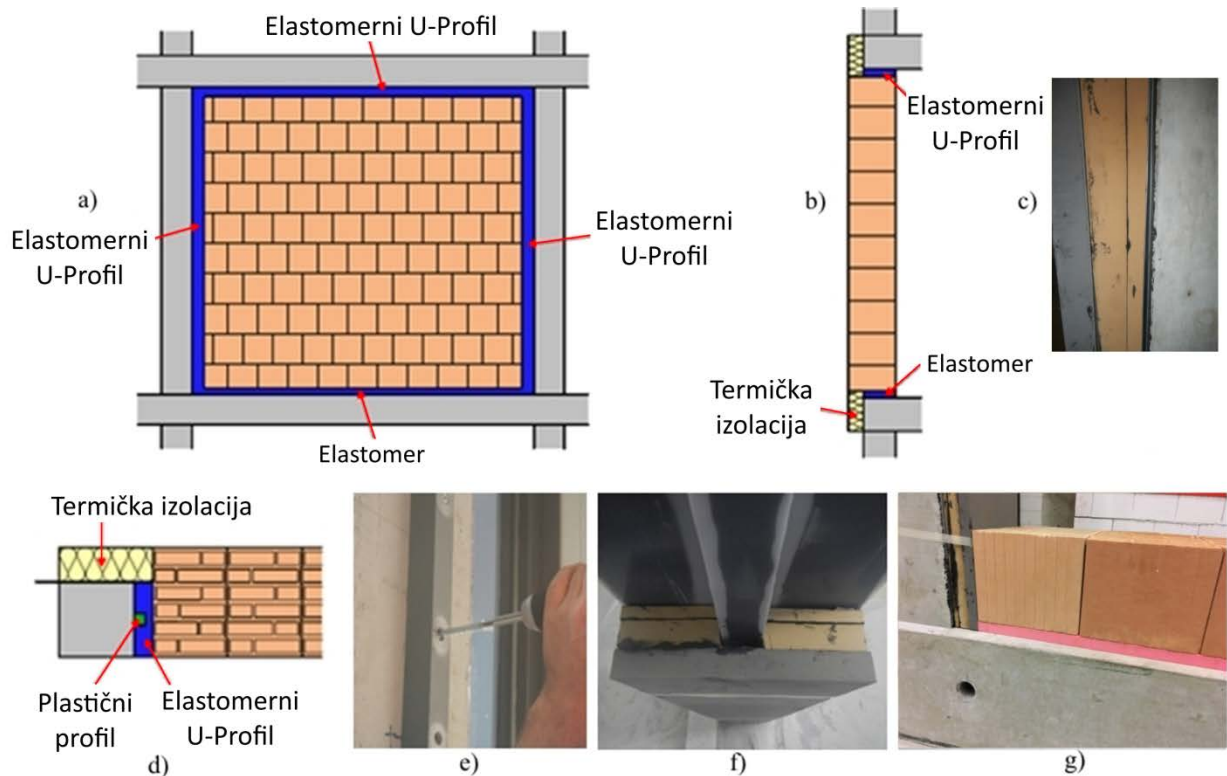
Slika 1. Oštećenje zidova ispunje pri zemljotresu u L'Aquila 2009 [2]

Zbog toga se ponašanje zidane ispunje izložene seizmičkim opterećenjima intenzivno istražuje već decenijama. Uglavnom je ispitivano ponašanje u ravni ispunje [3-9], dok je ponašanje ispunje kada opterećenje deluje upravno na ravan ispunje predstavljeno u radovima [10-14]. Nedavno je uticaj prethodnog oštećenja u ravni na ponašanje van ravni ispunje ispitivan od strane [15-19], dok je istovremeno dejstvo opterećenja u i van ravni ispunje istraživalo samo nekoliko autora [12, 20-22]. Kao što se vidi, uloženi su ogromni napor da se eksperimentalno i numerički istraži ponašanje i uticaj zidova ispunje na AB ramove. U tom smislu, razvijena su i predložena različita rešenja za poboljšanje ponašanja ispunje. Ona se mogu svrstati u tri pristupa. Prvi ide u pravcu stvaranja jače ispunje koja ima krutu vezu sa ramom, i tada ispunja predstavlja nosiv konstruktivni element [23-26]. Drugi pristup se zasniva na tome da se zidovi ispunje čvrsto pričvrste za ram, ili da se blago odvoje, ali da se istovremeno poveća deformabilnost zida uz pomoć posebnih konstrukcijskih mera u zidu [27-30]. Treći pristup je razdvajanje rama i ispunje tako da deformacije rama ne stvaraju velike sile u ispunji, čime se dozvoljava relativno pomeranje između zida i rama bez njihove interakcije [31-33]. Ovi sistemi obezbeđuju izolaciju zidova ispunje i rama.

Ovaj rad predstavlja novi sistem izolacije zidane ispunje od AB rama. Sistem je razvijen u okviru evropskog istraživačkog projekta INSYSME (Innovative Systems for Earthquake Resistant Masonry Enclosures in RC Buildings) i patentiran je na evropskom nivou u 2017. godini. Osnovno ponašanje i primena sistema eksperimentalno su istraženi na AB ramovima ispunjenim šupljim opekarskim blokovima, pod odvojenim, sekvencijalnim i kombinovanim opterećenjem u ravni i upravno na ravan zida.

2. OPIS PREDLOŽENOG SISTEMA

U okviru evropskog istraživačkog projekta INSYSME razvijen je sistem INODIS (Innovative Decoupled Infill System), sa ciljem da se poboljša seizmičko ponašanje AB ramova sa zidanom ispunom. Sistem INODIS ima za cilj povećanje kapaciteta u i van ravni ispune primenom elastomernih U-profila postavljenih duž kontaktnih površina ispune i AB ramova. Sistem razdvaja zidanu ispunu od okolnog AB rama uz pomoć elastomernih profila oblikovanih kao slovo U, koji se postavljaju na vrhu i duž vertikalnih ivica ispune, dok se tri trake od elastomera nalaze na dnu ispune sa srednjom trakom zalepljenom za ram i bočnim trakama zalepljenim za dno blokova prvog reda.



Slika 2. a) Skica rama sa ispunom i sistemom INODIS; b) vertikalnih preseka; c) detalj izvedene veze U-profila kod stuba; d) horizontalni presek; e) pričvršćivanje plastičnog profila za ram; f) postavljanje elastomernog U-profila; g) detalj veze u donem uglu [34]

Na vrhu i na bočnim stranama, plastični profili pričvršćeni su zavrtnejevima za okolni ram, dok su elastomerni U-profil na jednoj strani zalijepljeni za ispunu a sa druge strane postavljeni oko plastičnih profila, čime se sprečava lom ispune van ravni. Na taj način se deformacija okvira kompenzuje kompresijom elastomera, čime se značajno smanjuje prenos opterećenja na ispunu. Kapacitet deformacije elastomera se bira u skladu sa projektovanim potrebama kako bi se odvojio zid ispune od nametnutih deformacija u ravni AB rama. Slika 2 prikazuje raspored sistema sa detaljima veze. Detaljniji opis dat je u [34, 35].

3. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

3.1. Mehaničke karakteristike komponenti sistema

Da bi se odredile mehaničke karakteristike komponenti zidane ispune sa INODIS sistemom, sproveden je niz testova na pojedinačnim materijalima kao i uzorcima blokova za zidanje u skladu s evropskim standardima i kodovima. Rezime ovih rezultata prikazan je u Tabeli 1, dok je detaljan opis ovih testova dat u [35].

U tabeli 2 prikazan je opseg statičkih i dinamičkih modula elastičnosti hiperelastičnih elastomera [36]. Elastomer Regufoam® 400 se koristi za rebro elastomera u obliku slova U, dok se Regufoam® 510 koristi za flanše elastomernog U-profila. Regufoam® 570 je izabran za vezu na donjoj gredi.

Na slici 3a prikazane su krive napon-deformacija za elastomerne trake dimenzija 250 x 250 x 25 mm koje su podvrgnute monotonom pritisku, dok slika 3b prikazuje krive napon-deformacija za ciklično opterećenje. Oba dijagrama ukazuju na nisku krutost na početku praćenu naglim porastom krutosti pri većim vrednostima pritiska. Što je elastomer mekši, to kasnije doalzi do porasta pritiska. Takođe, slika 3b jasno pokazuje konstantnu dispaciju energije u svakom ciklusu opterećenja.

Tabela 1: srednje vrednosti materialnih karakteristika


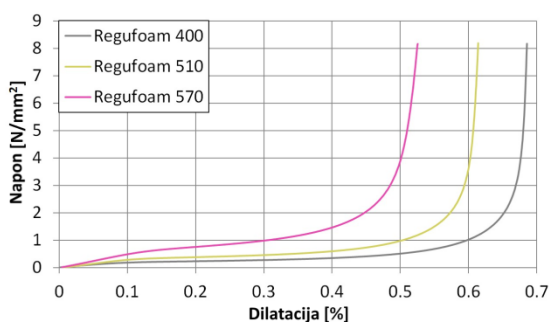
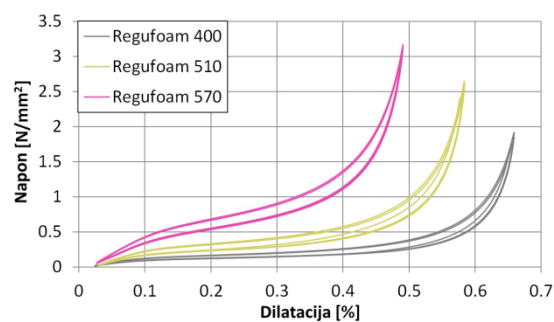
Malter	Tip maltera	Čvrstoća na pritisak f_m [N/mm ²]		Modul elastičnosti E_m [N/mm ²]		Čvrstoća na savijanje $f_{mt,flex}$ [N/mm ²]	
	Tankoslojni malter	15,7	8121,5	3,67	Malter opšte namene	8,9	9787,0
Blok MZ 70	Dimenzije L/T/H [mm]	Čvrstoća na pritisak f_{ck} [N/mm ²]		Modul elastičnosti E [N/mm ²]		Šupljine [%]	Gustina [kg/m ³]
	250/365/249	vertical	longitudinal	vertical	longitudinal	62,3	553
		6,3	4,8	10710	8360		
Zidarija	Čvrstoća na zatezanje malterske spojnice f_w [N/mm ²]	Čvrstoća na pritisak f_k [N/mm ²]		Modul elastičnosti E_m [N/mm ²]		Čvrstoća na savijanje [N/mm ²]	
	0,19	3,1		4870		Paralelno malterskim spojnica: f_{kk1} 0,23	Upravno na malterske spojnice: f_{kk2} 0,14
Elastomer	Tip elastomera	Dimenzije L / T / H [mm]		Gustina [g/cm ³]		Statički modul elastičnosti [MPa]	
	Regufoam® 270	248,8 / 249 / 24,9		0,229		0,25 – 0,45	
	Regufoam® 400	249,4 / 249,1 / 24,74		0,352		0,6 – 1,0	
	Regufoam® 510	249,4 / 249,2 / 24,8		0,460		1,1 – 1,7	
	Regufoam® 570	248,8 / 249 / 24,9		0,561		2,6 – 2,7	
	Regufoam® 680	249,7 / 249,9 / 25,1		0,637		2,0 – 2,9	

Tabela 2. Statički i dinamički modul elastičnosti za elastomere [36]

Elastomer	Statički modul elastičnosti [N/mm ²]	Dinamički modul elastičnosti [N/mm ²]
Regufoam® 400	0,6 – 1,0	1,2 – 2,0
Regufoam® 510	1,1 – 1,7	2,2 – 3,7
Regufoam® 570	2,6 – 2,9	5,3 – 6,5



a)



b)

Slika 3. Napon-dilatacija dijagrami za monotono (a) i ciklično opterećenje (b)

3.2. Experimentalno ispitivanje AB ramova sa ispunom

Kako bi se ispitalo ponašanje AB ramova sa zidanom ispunom i INODIS sistemom, sprovedeno je testiranje na ramovima sa ispunom u ponaj razmeri. U okviru evropskog projekta INSYSME [37] od strane Univerziteta u Kasselu specijalno je razvijena i napravljena testna postavka da bi se uspešno obavili testovi u ravni i ravni ispune. Oprema i instrumenti testne postavke prikazani su na Slici 4. Na početku svih ispitivanja aplicirano je vertikalno opterećenje od 200 kN po stubu, simulirajući vertikalno opterećenje gornjih spratova prisutno u stvarnim objektima. Ispitivanja u ravni izvršena su primenom cikličnih horizontalnih pomeranja sa tri ciklusa na svakom nivou pomeranja. Za testove van ravni, opterećenje upravno na ravan zida primenjeno je korišćenjem četiri pneumatska jastuka sa ograničenjem kapaciteta 50 kN/m². Kapacitet sile dve vertikalne hidraulične prese iznosi do 400 kN svaki. Maksimalni hod iznosi ± 125 mm. Za horizontalno pomeranje korišćena je presa maksimalnog kapaciteta sile od ± 320 kN i granice pomeranja od ± 150 mm.

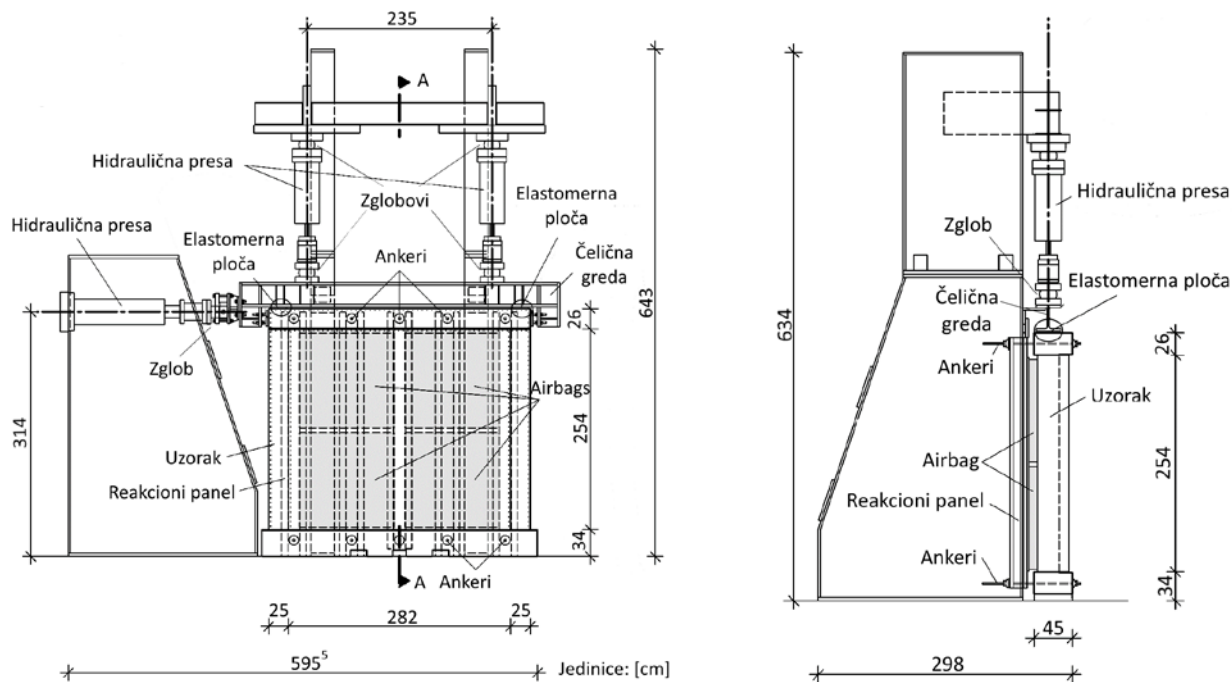
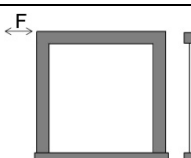
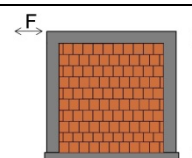
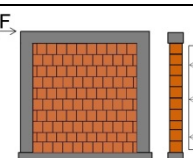
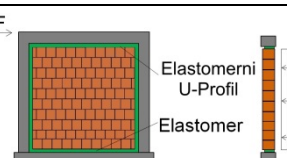


Figure 4. Postavka testa za ispitivanje u ravni i upravno na ravan ispune [22]

Eksperimentalna studija se sastoji od četiri testa prikazanih u tabeli 5. U testu A, armiranobetonski ram podvrgnut je opterećenju u ravni (IP) kako bi se odredila nosivost bez uticaja zidne ispune. Testovi BI i BIO su izvedeni na tradicionalno ispunjenim ramovima kod kojih je ispuna vezana za ram čvrstim kontaktom preko maltera. U test BI, ram je podvrgnut sekvencijalno apliciranom opterećenju u ravni i izvan ravni ispune (IP - OOP - IP). Prvo je opterećenje aplicirano u ravni, zatim upravno na ravan i konačno opterećenje je ponovno aplicirano u ravni ispune. U testu BIO, istovremeno aplicirano opterećenje u ravni i upravno na ravan ispune (OOP + IP). Test DIO je sproveden na AB ramu sa zidanom ispunom i istom INODIS i uključuje odvojenu, sekvencijalnu i istovremenu primenu opterećenja u ravni i izvan ravni ispune (IP + OOP). Poređenje i interpretacija eksperimentalnih rezultata različitih opterećenja i graničnih uslova izvršena je na osnovu detaljne procene rezultata u narednom poglavlju. Detaljan opis testova, instrumentacije i svih rezultata dat je u [35].

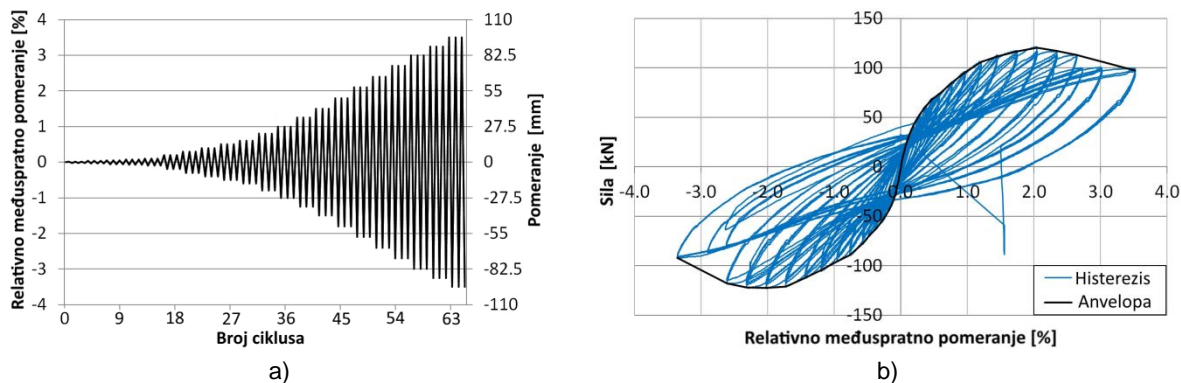
Tabela 3. Program ispitivanja

A: Prazan ram	BI: Tradicionalna ispuna	BIO: Tradicionalna ispuna	DIO: Ispuna sa INODIS sistemom
IP	IP - OOP - IP	OOP + IP	IP + OOP
			

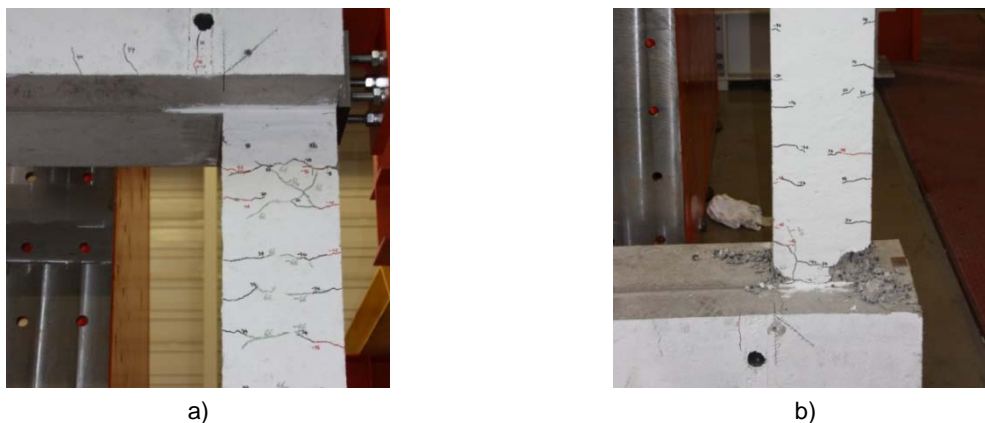
3.2.1. AB ram (Test A)

Slika 5a prikazuje protokol opterećenja, a Slika 5b prikazuje cikličnu krivu opterećenja AB rama sa maksimalnim kapacitetom opterećenja od 120 kN pri relativnom međuspratnom pomeranju od 2%. Sila stalno raste sve dok se ne dostigne ova maksimalna vrednost. Za maksimalnu vrednost pomeranja od oko 3,5%, sila pada na 95 kN. Degradacija krutosti uglavnom je uzrokovana pucanjem betona, a kasnije i tečenjem armature.

Prema slici 6, deformacije su koncentrisane u blizini gornjeg i donjeg kraja stubova. Maksimalni kapacitet deformacije rama nije postignut na relativnom međuspratnom pomeranju od 3,5%, što je bila granica opreme za testiranje. Rezultati testa pokazuju visoku deformacionu sposobnost AB rama, iako je projektovan u skladu sa minimalnim zahtevima najniže klase duktilnosti DCL prema Evrokodu 8 [1].



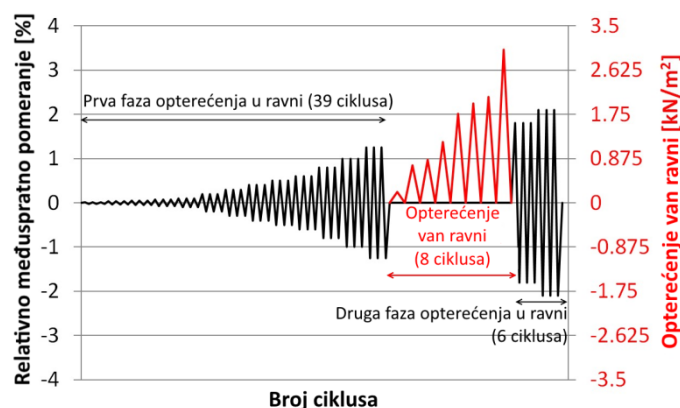
Slika 5. Protokol opterećenja (a) i histerezisna kriva i anvelopa za opterećenje rama u ravni (b) [22, 38]



Slika 6. Pukotine u gornjem uglu rama (a) i u dnu stuba (b)

3.2.2. Tradicionalna zidana ispuna (Test BI)

Slika 7 prikazuje protokol opterećenja testa BI sa sekvencijalnim fazama opterećenja u ravni i van ravni ispune. Test započinje aplikacijom cikličnog pomeranja u ravni do relativnog međuspratnog pomeranja od 1,25%, nakon čega sledi opterećenje van ravni do ekvivalentnog površinskog opterećenja od 3 kN/m². Konačno, primenjuje se sinusoidno opterećenje u ravnini do maksimalnog relativnog međuspratnog pomeranja od 2,1%.

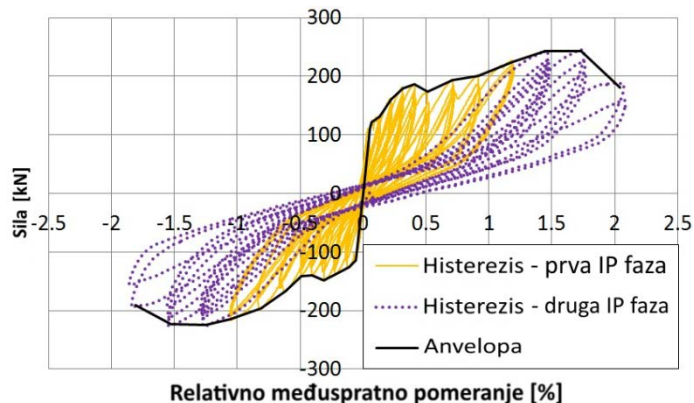


Slika 7. Protokol opterećenja za sekvencijalno opterećenje u i van ravni rama za test BI

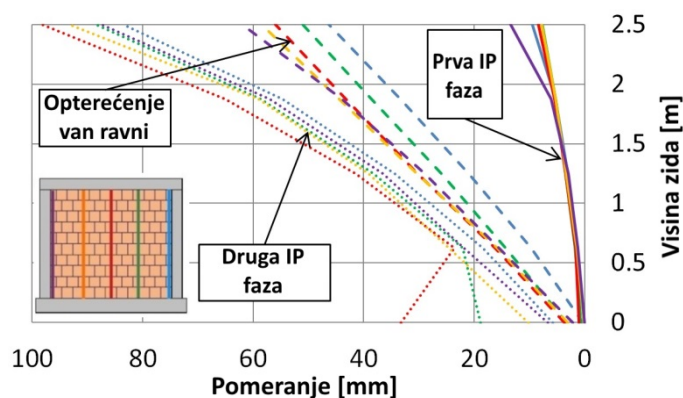
Slika 8 prikazuje histerezne krive i anvelopu za prvu i drugu fazu opterećenja u ravni. Tokom prve faze opterećenja u ravni, ponašanje ispune je gotovo linearno do opterećenja od 110 kN kod relativnog međuspratnog pomeranja od 0,06%. Smanjenje krutosti javlja se u narednim ciklusima zbog širenja početnih pukotina, vidljivih na unutrašnjoj strani zida. U kasnijim ciklusima opterećenja prve faze opterećenja u ravni horizontalna sila se povećava do 225 kN pri relativnog međuspratnog pomeranja od 1,25%. Na ovom nivou opterećenja su već vidljive stepenaste pukotine duž dijagonala zida.

Pomeranja izvan ravni ispune su takođe merena i ona su već počela da se javljaju tokom prve faze opterećenja u ravni. Ovaj efekat je rezultat ekscentričnog opterećenja zidane ispune koji je za dimenzija 115 mm deblji od stuba (Slika 2). Ekscentričnost uzrokuje naizmeničnu rotaciju koja sukcesivno dovodi do povećanja kretanja zida van ravni. Na Slici 9 prikazana su pomeranja upravni na ravan zida za pet vertikalnih deonica duž visine zida nakon završetka prve faze opterećenja u ravni s pomeranjima između 7,5

i 14 mm na vrhu ispune. Naknadna faza opterećenja van ravnine povećava ova pomeranja do 62 mm na vrhu zida u završnom ciklusu opterećenja uz maksimalno površinsko opterećenje od 3 kN/m^2 . Raspodele pomeranja obe faze opterećenja jasno pokazuju ispadanje zida ispune van AB okvira.



Slika 8. Histerzijsne krive i anvelopa za prvu i drugu fazu opterećenja u ravni



Slika 9. Pomeranja zida van ravnine za sve tri faze opterećenja testa B1 (pogled sa strane)

U drugoj fazi opterećenja u ravni, sinusoidno pomeranje je aplicirano do relativnog međuspratnog pomeranja od 2,1% pri čemu se aktivirala horizontalna sila od 180 kN. Maksimalna horizontalna sila u pozitivnom smeru opterećenja je 240 kN pri relativnom međuspratnom pomeranju od 1,5%. Oštećenje na spoljašnjoj strani zida pokazuje stepenaste pukotine duž malterskih spojnica (slika 10a), kao i lom opeke MZ 70 na unutrašnjoj strani zida, koncentrisane u gornjem dijelu (Slika 10b). Test je prekinut zbog naglog povećanja pomeranja van ravnine na vrhu zidane ispune (Slika 9).



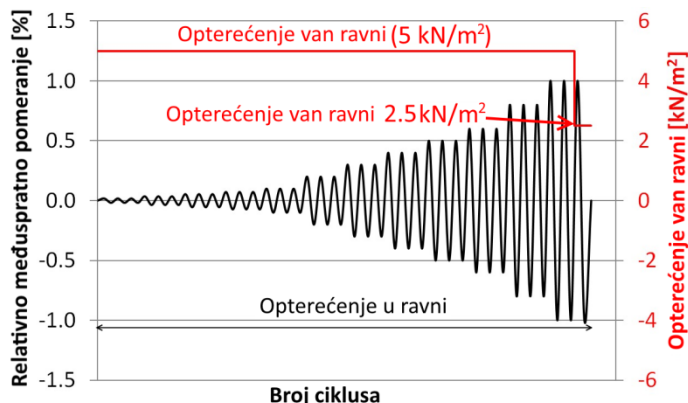
Slika 10. a) Oštećenje spojne strane i b) unutrašnje strane zida na kraju testa

3.2.3. Tradicionalna zidana ispuna (Test BIO)

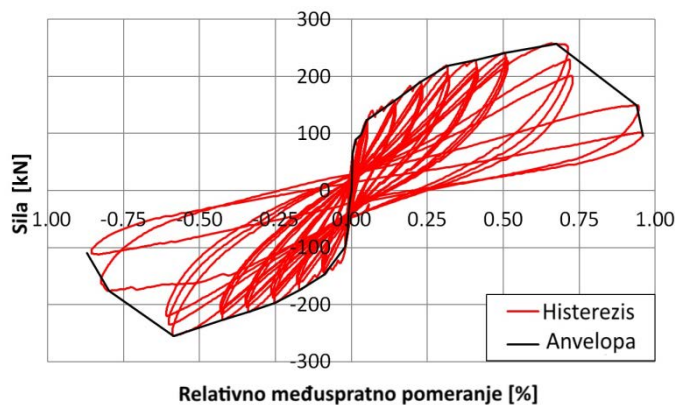
U testu BIO su aplicirana simultano opterećenja u ravni i van ravnine zida (Slika 11). Test započinje apliciranjem površinskog opterećenja od 5 kN/m^2 . Ovo opterećenje se održava konstantnim tokom izvođenja testa, samo u poslednjem ciklusu opterećenja se smanjuje na $2,5 \text{ kN/m}^2$ da bi se izbeglo naglo rušenje zidane ispune van ravnine. Istovremeno se povećava opterećenje u ravni do maksimalnog relativnog međuspratnog pomeranja od 1,0%.

Slika 12 prikazuje rezultujuće krive histerzisa sa maksimalnom horizontalnom silom od 225 kN pri relativnom međuspratnom pomeranju od 0,65%. Horizontalne sile znatno opadaju tokom sledećih ciklusa

opterećenja i dolazi do progresivnog pomeranja ispune van ravni. Pomeranje vrha ispune (Slika 13a) je prouzrokovano kombinacijom loma blokova i gubitka trenja u kontaktnim oblastima između vrha i dna rama i ispune. Tokom povećanja opterećenja u ravni, neophodno je kontinuirano ručno podešavanje pritiska u vazдушnim jastucima zbog značajnog pomeranja zida van ravni. Sledeći ciklusi u ravni dovode do daljeg oštećenja i povećanja pomeranja van ravni. Konačno, test je prekinut kako bi se izbeglo potpuno ispadanje ispune van ravni.



Slika 11. Protokol opterećenja za simultano opterećenje u testu BIO

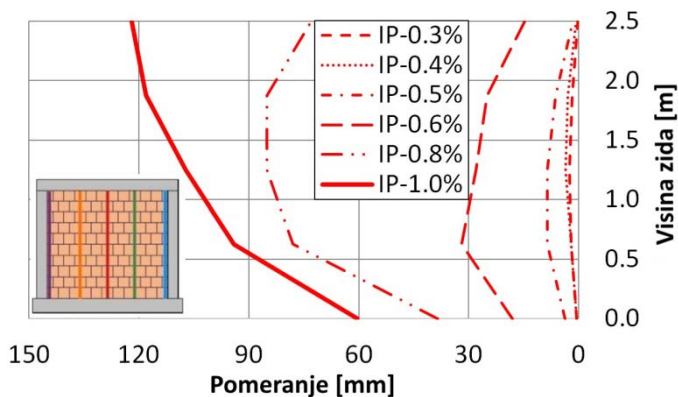


Slika 12. Histerezisna kriva i anvelopa za simultano opterećenje u testu BIO

Slika 13b ilustruje povećanje pomeranja van ravni zida kroz cikluse opterećenja u ravni za pogled sa strane za vertikalni presek u centru zida. Ako je relativno međuspratno pomeranje malo, deformisani oblik ispune odgovara liniji savijanja proste grede sa formiranjem stabilnog efekta luka u vertikalnom pravcu. Sa povećanjem pomeranja u ravni, efekat luka je značajno smanjen zbog gubitka uslova oslanjanja i ispuna reaguje naglim porastom pomeranja van ravni. Linija savijanja sada odgovara kretanja ispune koje je izraženo na vrhu, na koje se nadovezuje kretanje zida kao krutog tela izazvanim gubitkom oslonca na dnu zida. Test je prekinut jer su deformacije zida nekontrolirano porasle. Uočena nepovoljna interakcija kombinovanog/simultanog opterećenja u ravnini i van ravni zida potvrdila je očekivanje Paulay and Priestley [39] da značajno smanjenje kapaciteta van ravni će se javiti zbog nestabilnih i promjenjivih graničnih uslova.



a)

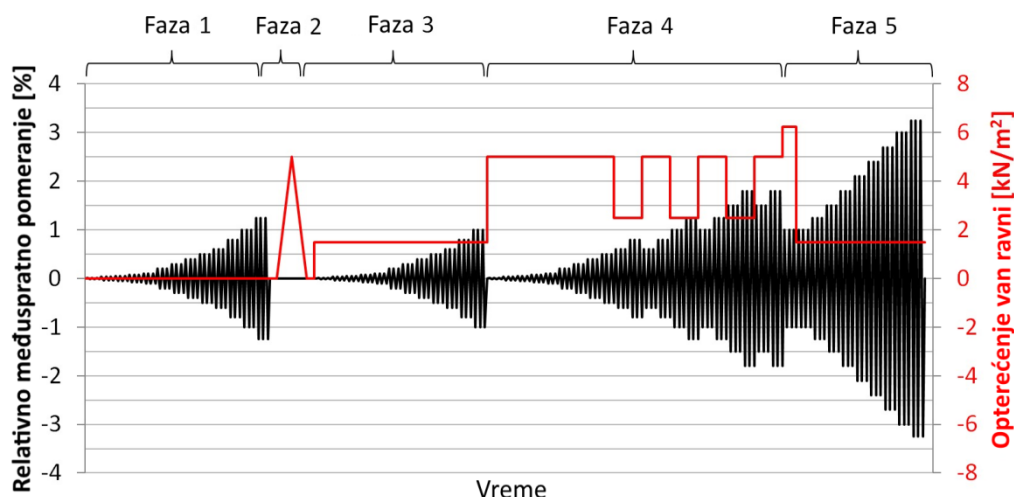


b)

Slika 13. a) Deformacija zida na kraju testa i b) pomeranja van ravni zida za vertikalni presek u sredini zida (pogled sa strane)

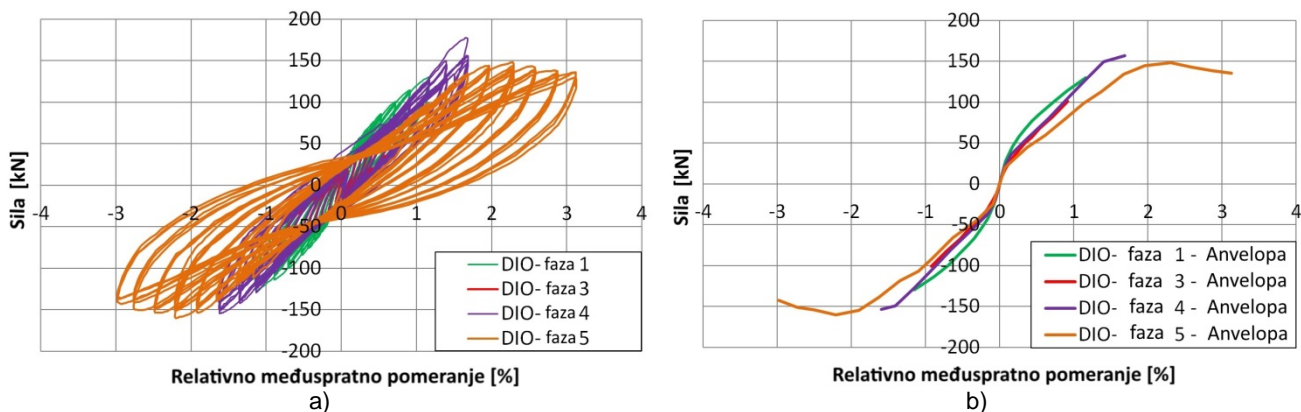
3.2.4. Zidana ispunna sa INODIS sistemom (Test DIO)

AB ram sa zidanom ispunom i INODIS sistemom (DIO) je testiran sa složenijim protokolom opterećenja (Slika 14) sa pet faza (u ravni, van ravni i istovremeno u ravni i van ravni).



Slika 14. Protokol opterećenja za test DIO

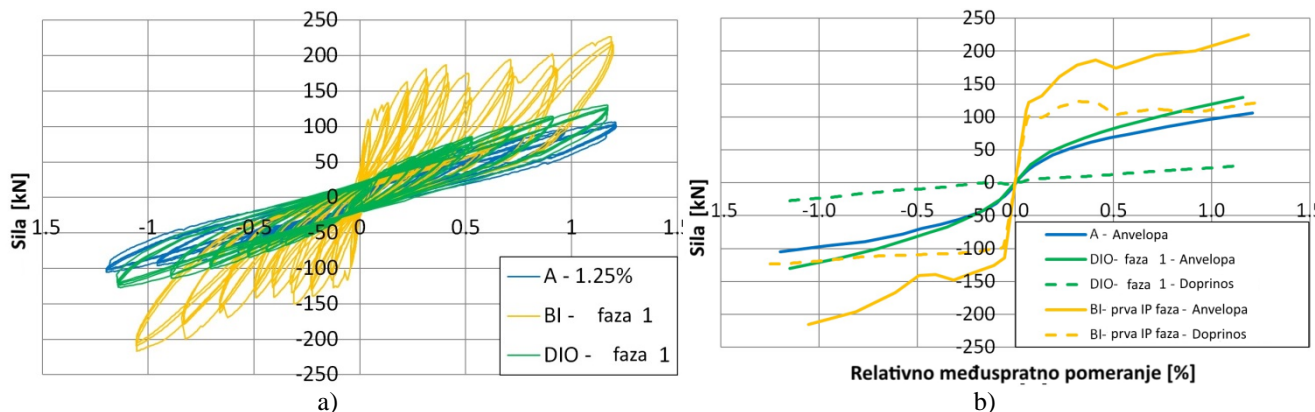
Uzimajući u obzir celokupni test, zidana ispunna sa INODIS sistemom je u stanju da izdrži maksimalnu silu u ravni od 155 kN pri 1,8% relativnog međuspratnog pomeranja (Slika 15). Sila se skladno i stabilno povećava do maksimuma. Tokom testa, nije primećeno oštećenje zidne ispune sve do visokih nivoa relativnog međuspratnog pomeranja u ravni. Zanimljivo je da se sila od skoro 180 kN u prvom ciklusu opterećenja u ravni pri relativnom međuspratnom pomeranju od 1,8% (to je verovatno pogrešan zapis opreme), zbog činjenice da maksimalna horizontalna sila drugog i trećeg ciklusa odgovara maksimalnoj sili u negativnom pravcu. Za maksimalno aplicirano relativno međuspratno pomeranje od 3,25% sila još uvek iznosi oko 140 kN. Histerezisna kriva u ravni pokazuje da je do pojave prve pukotine u ispuni (Damage Limit State-DLS) i do otkaza zida ispune (Ultimate Limit State-ULS) došlo pri jako visokim relativnim međuspratnim pomeranjima. Široke histerezne petlje pokazuju da se velika količina energije troši, ali ne na oštećenje zida već na viskoelastično ponašanje elastomera primenjenog za INODIS sistem.



Slika 15. a) Comparison of the in-plane hysteretic curves and b) envelopes for all the phases of the Test DIO

4. POREĐENJE EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

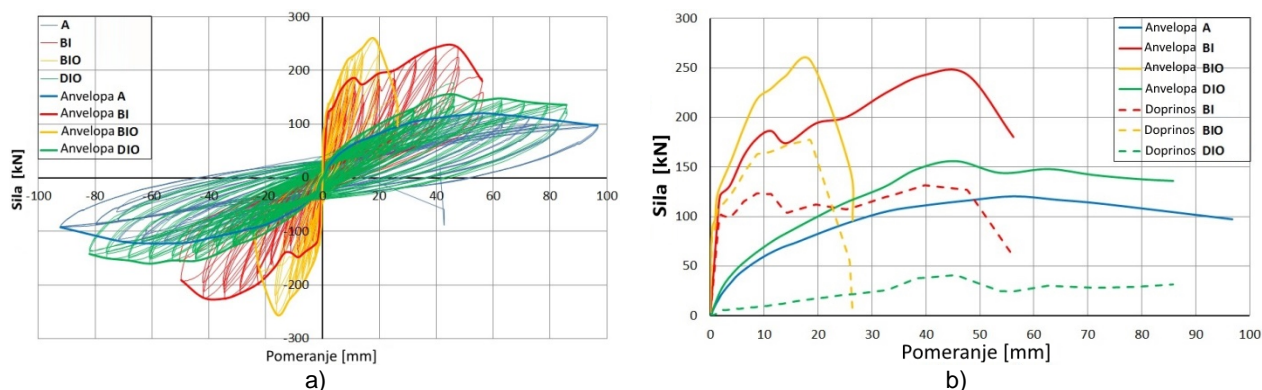
Efikasnost sistema INODIS demonstrirana je poređenjem sa tradicionalnom ispunom i AB ramom. Da bi se bolje razumelo ponašanje i prednosti primene sistema INODIS, poređenje između ispitivanih uzoraka prikazano je na Slici 16. Pošto su uzorci BI i DIO bili podvrgnuti do 1,25% relativnom međuspratnom pomeranju u prvoj fazi opterećenja, za svrhu poređenja, za test A prikazan je deo krive samo do 1,25% (Slika 16a). Može se videti da ispunna sa INODIS sistemom ima mnogo manju krutost i horizontalnu silu od 130 kN u poređenju sa 225 kN za tradicionalno ispunjeni ram. Histerezne krive za DIO test su široke i pokazuju konstantnu krutost u fazama opterećenja i rasterećenja. Nasuprot tome, krive histerezisa za tradicionalnu ispunu (Test BI) su uže i pokazuju naglo smanjenje krutosti. Slika 16b prikazuje anvelope histerezisa za testove A, BI i DIO zajedno sa krivama doprinosa ispune za BI i DIO testove. Poređenje pokazuje da su anvelope za testove A i DIO veoma blizu jedna drugoj i da je opterećenje koje prihvata ispunna samo 20,6 kN u slučaju DIO testa u odnosu na 125 kN u slučaju tradicionalne ispune. Slika 16b pokazuje da je čak i pod istovremenim opterećenjem, nivo aktiviranja ispune za Ab ram sa INODIS sistemom nizak, što omogućava postizanje visokih relativnih međuspratnih pomeranja u ravni, za razliku od tradicionalno ispunjenog rama.



Slika 16. a) Histerezisne krive i b) anvelope sa krivama doprinosa ispune za testove A, BI i DIO do 1,25% relativnog međuspratnog pomeranja (samo opterećenje u ravni)

Važno je napomenuti da je prvi deo cikličnog opterećenja u ravni uzrokovao smanjenje krutosti zbog početnih pukotina koje se javljaju u zidu i otvaranja malterskih spojnica na 110 kN, za slučaj BIO. Nakon toga, sile se stalno povećavaju, ali sa smanjenom krutošću do sile od oko 225 kN (Slika 16b) na 1,25% relativnog međuspratnog pomeranja. U ovom trenutku se primećuju zapažene pukotine u zidu ispune. Zatim je aplicirano opterećenje van ravni, koje je dovelo do maksimalna deformacija od 29 mm u centru zida. Zbog toga što je opterećenje u ravni oštetilo malter za povezivanje zida ispune i betonske grede, opterećenje van ravni proizvelo je nagib zida ispune i njegovo kretanje van ravni kao krutog tela. To dokazuje da je slabost tradicionalnog sistema u kontaktu između AB rama i zidane ispune. Nasuprot tome, u fazi 1 DIO testa, nije došlo do oštećenja i pukotina u opekama i malterskim spojnica. Zidana ispuna je ostala potpuno netaknuta, postizući o maksimalnu silu od 125 kN na 1,25% (Slika 16b). U fazi 2 DIO testa, opterećenje izvan ravnine je povećano sve do dostizanja 5 kN/m^2 (35 kN), pri čemu nije bilo oštećenja i deformacija van ravni, dok je faza 2 BIO testa proizvela visoka pomeranja van ravni zida ispune.

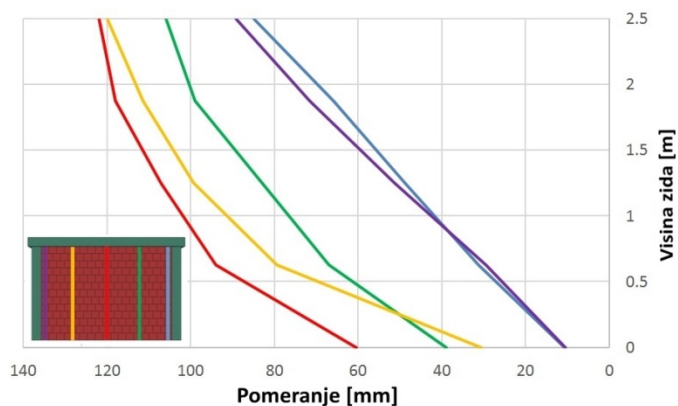
Poređenje histerezisnih krivih različitih sistema i kombinacija opterećenja (Slika 17a) jasno pokazuje prednost INODIS sistema sa visokim deformacionim kapacitetom i niskom aktivacijom horizontalnih sila sličnih AB ramu. Treba napomenuti da je reakcija sistema DIO u ravni dobijena primenom celog protokola opterećenja, uključujući prethodno i istovremeno opterećenje u i van ravni. Na Slici 17b prikazane su anvelope histerezisnih petlji za svaki od sistema. Doprinosa ispune je određen kao razlika između odgovora punog i praznog rama. Ovo omogućava konzistentno poređenje eksperimentalnih podataka u pogledu maksimalnog opterećenja, krutosti i deformacionog kapaciteta.



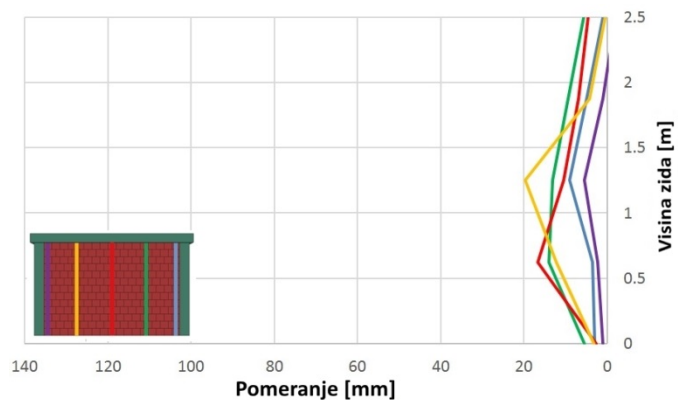
Slika 17. Histerezisne krive u ravni (a) i anvelope i krive doprinosa ispune (b)

Slika 17a pokazuje da je ispuna sa INODIS sistemom sposobna da prihvati 1,3 puta veću horizontalnu silu od AB rama (A: 120 kN / DIO: 155 kN). U oba testa, povratna sila stalno raste sve dok se ne dostigne maksimalna vrednost i histerezisne krive su prilično slične. Poređenje ponašanja u ravni sa tradicionalnom konfiguracijom sistema BI pokazuje izuzetne razlike u odnosu na početnu krutost, maksimalno opterećenje i pomake. Sistem INODIS se polako aktivira sa malom krutošću, a kriva se diže bez naglog pada kao u slučaju BI sistema. Poređenje doprinosa dodatno objašnjava da je doprinos INODIS sistema više od tri puta manji. Veoma smanjen doprinos dovodi do prilično bliskog ponašanja praznom ramu, posebno u okviru preporučenih granica u Evrokodu 8 [1]. Još jedan zaključak od najvećeg značaja je poboljšanje maksimalnih nivoa relativnog međuspratnog pomeranja. Prve pukotine javljaju se za sistem BI pri 0,3% ($8,25 \text{ mm}$) a za sistem DIO na 1,8% ($49,5 \text{ mm}$) relativnog međuspratnog pomeranja i dostignuti krajnji nivoi relativnog međuspratnog pomeranja su 1,9% ($52,5 \text{ mm}$) za sistem BI i 3,25% ($89,4 \text{ mm}$) za sistem DIO. Konfiguracija INODIS sistema (DIO uzorak) pokazuje mnogo bolje performanse koje dostižu 1,8% ($49,5 \text{ mm}$) relativnog međuspratnog pomeranja u ravni sa istovremeno primenjenim 5 kN/m^2 pritiska van ravni bez oštećenja. Kod istih uslova opterećenja uzorak BIO počinje da doživljava oštećenja već pri malim relativnim međuspratnim pomeranjima od oko 0,4% (11 mm), a pri relativnom međuspratnom pomeranju od 1,0% ($27,5 \text{ mm}$) su dostignuta ekstremna pomeranja van ravni (Slika 18) i test je zaustavljen. Nasuprot tome, uzorak DIO

dostigao je 3,25% (89,4 mm) relativnog međuspratnog pomeranja, čak i sa istovremenim nanošenjem pritiska van ravni. Takođe, DIO uzorak pokazuje smanjenje deformacija van ravni i stabilne uslove oslanjanja zbog elastomera U-oblika u kombinaciji s plastičnim profilima. Kao što se i očekivalo, maksimalna deformacija se odvija u sredini ispune (Slika 19). Oštećenja DIO sistema se dešavaju pri relativnim međuspratnim pomeranjima iznad 1,8% (49,5 mm). Oštećenje se odlikuje prevazilaženjem zatezne čvrstoće na savijanje uzrokovane aktiviranjem mehanizma za loma. Duž obodnog AB rama izmerene su samo male deformacije izvan ravni, a spoljne opeke su očigledno netaknute, iako su ovi šuplji blokovi od gline veoma osjetljivi na lokalna oštećenja.



Slika 18. Pomeranja van ravni za tradicionalnu ispunu (BIO) pri simultanom opterećenju (levo) i deformisani uzorak na kraju testa (desno)



Slika 19. Pomeranja van ravni za ispunu sa INODIS sistemom (DIO) pri simultanom opterećenju (levo) i deformisani uzorak na kraju testa (desno)

5. ZAKLJUČAK

Rad predstavlja inovativni sistem za zidnu ispunu u AB ramovima, nazvan INODIS. Efikasnost nedavno predloženog konstruktivnog detalja, koji se koristi za poboljšanje seizmičkih performansi zidanih AB ramova je eksperimentalno ispitano. Rezultati eksperimenata su prikazani kako bi se pokazala efikasnost razvijenog sistema. Za razliku od tradicionalnih rešenja sa krutom veznom preko maltera između rama i ispune, predloženi sistem INODIS odvaja rama od ispune primenom U-profila od elastomera. Elastomeri su zalijepljeni na zid ispune i njihov U-oblik je postavljen oko plastičnih profila koji su pričvršćeni za okolni ram. Osnovna ideja sistema je da se omogući projektno pomeranje AB ramova bez izazivanja oštećenja na zidu ispune i istovremeno da se obezbijedi stabilan i pouzdan oslonac u pravcu upravno na ravan zida. Pored toga, viskoelastičnost elastomera povećava ukupni kapacitet prigušenja zgrade. Performanse predloženog sistema su ispitane eksperimentalnim rezultatima koji su pokazali relativno jaku nosivost ispune u slučaju tradicionalnog uzorka (BI), što je dovelo do pojave pukotina u AB stubovima, izazvanih aktiviranjem ispune. Ovo je pokazalo da je mogućnost pojave mehanizama smicanja velika u slučaju jakih ispuna i da se mora sprečiti adekvatnim merama, gde je jedna od njih primena elastomera. Takođe, uočeno je iznenadno i krto lomljenje tradicionalne ispune, za razliku od ispuna sa INODIS sistemom, gde je oštećenje odloženo ka visokim nivoima relativnog međuspratnog pomeranja. Čak i nakon pojave prsline i daljeg povećanja pomeranja u ravni zajedno sa opterećenjem van ravni, zid je ostao stabilan ne pokazujući krto ponašanje. U poređenju sa praznim ramom, ram sa ispunom i sa INODIS sistemom ima slično ponašanje zbog razdvajanja i redukcije krutosti uz pomoć elastomera. Poređenje inovativnog sistema sa tradicionalnim pristupom pokazuje nekoliko prednosti sistema: Adekvatna seizmička otpornost za istovremeno delovanje

opterećenja u i van ravni; Smanjenje naprezanja unutar ispune; Sprečavanje nepovoljnih interakcija; Transformacija ispune u stvarnu nekonstruktivnu komponentu; Smanjenje uticaja seizmičkog opterećenja pomoću povećanja disipacije energije. Dodatne prednosti INODIS sistema su ekonomičnost, jednostavna instalacija i povoljni efekti na zvučnu izolaciju. Sistem INODIS je patentiran na evropskom nivou i dalje se razvija u cilju uvođenje na tržište.

6. LITERATURA (STIL SGP PODNASLOV)

- [1] CEN Eurocode 8 – design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. EN 1998-1. Brussels, Belgium: ECS; 2004.
- [2] Dazio A, Beyer K, Braune F, Fritsche S, Mittaz X. Das Mw= 6.3 Erdbeben von L'Aquila am 6. April 2009 – Bericht der SGEB-Erkundungsmission, 15-18. April 2009 (No. EPFL-REPORT-147524).
- [3] L. Hermanns, A. Fraile, E. Alarcón, R. Álvarez, Performance of masonry buildings during the 2011 Lorca earthquake. Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 2012.
- [4] S. V. Polyakov, Masonry in Framed Buildings (Godsudarstvenoe Isdatel' stvo Literaturny Po Stroitel'noy Arkhitekture. Moscow, 1956). Translated by G. L. Cairns in 1963. National Lending Library for Science and Technology, Boston Spa, Yorkshire, U.K, 1956.
- [5] A.E. Fiorato, M.A. Sozen, W.L. Gamble, An Investigation of the Interaction of Reinforced Concrete Frames with Masonry Filler Walls. Report No. UILU-ENG 70- 100, University of Illinois, Urbana-Champaign, IL, 1970.
- [6] J. L. Dawe, C. K. Seah, Behaviour of masonry infilled steel frames, Canadian Journal of Civil Engineering, 16(6), 865-876, 1989.
- [7] A. B. Mehrabi, P. B. Shing, M. P. Schuller, J. L. Noland, Experimental evaluation of masonry-infilled RC frames, Journal of Structural Engineering, New York, N.Y., 122(3), 228-237, 1996.
- [8] A. Stavridis, Analytical and experimental study of seismic performance of reinforced concrete frames infilled with masonry walls, University of California, San Diego, 2009.
- [9] S. Hak, P. Morandi, G. Magenes, Prediction of inter-storey drifts for regular RC structures with masonry infills based on bare frame modelling. Bulletin of Earthquake Engineering, 1-29, 2017.
- [10] McDowell E. L., McKee K. E., E. Sevin, Arching action theory of masonry walls, J. Struct. Div., 82(ST2), 915/1–915/18, 1956.
- [11] J. L. Dawe, C. K. Seah, Out-of-plane resistance of concrete masonry infilled panels. Journal of the Canadian Society of Civil Engineering, Vol. 16, pp. 854-864, 1989.
- [12] R. Angel, D. Abrams, D. Shapiro, J. Uzarski, M. Webster, Behavior of Reinforced Concrete Frames with Masonry Infills. Civil Engrg. Studies, Structural Research Series No. 589, UILU-ENG-94-2005, Dept. of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana Champaign, 1994.
- [13] P. G. Asteris, L. Cavaleri, F. Di Trapani, A. K. Tsaris, Numerical modelling of out-of-plane response of infilled frames: State of the art and future challenges for the equivalent strut macromodels, Engineering Structures, 132, 110-122, 2017.
- [14] Walsh, K. Q., Dizhur, D. Y., Giongo, I., Derakhshan, H., and Ingham, J. M. (2017). Effect of boundary conditions and other factors on URM wall out-of-plane behaviour: Design demands, predicted capacity, and in situ proof test results, SESOC Journal, 30(1), 57.
- [15] G. M. Calvi, D. Bolognini, Seismic Response of Reinforced Concrete Frames Infilled with Weakly Reinforced Masonry Panels, Journal of Earthquake Engineering, vol. 5, pp. 153-185, 2001.
- [16] G. M. Calvi, D. Bolognini, A. Penna, Seismic performance of masonry-infilled RC frames: benefits of slight reinforcements, Invited lecture to "Sismica 2004 - 6o Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sismica", 6, 14-16, 2004.
- [17] F. Da Porto, G. Guidi, M. Dalla Benetta, N. Verlato, Combined in-plane/out-of-plane experimental behaviour of reinforced and strengthened infill masonry walls, Proceedings of the 12th Canadian Masonry Symposium, Vancouver, British Columbia, 2013.
- [18] A. Furtado, H. Rodrigues, A. Arede, H. Varum, Influence of the in Plane and Out-of-Plane Masonry Infill Walls' Interaction in the Structural Response of RC Buildings, Procedia Eng., vol. 114, pp. 722–729, 2015.
- [19] A. Furtado, H. Rodrigues, A. Arede, H. Varum, Experimental Characterization of the In-plane and Out-of-Plane Behaviour of Infill Masonry Wall, Procedia Engineering, 114, 862-869, 2015.
- [20] R. D. Flanagan, R. M. Bennett, Bidirectional behavior of structural clay tile infilled frames, Journal of structural engineering, 125(3), 236-244, 1999.
- [21] B. Binici, E. Canbay, İ. O. Demirel, A. Aldemir, U. Uzgan, Z. Eryurtlu, A. Yakut, Seismic response of autoclaved aerated concrete masonry infill walls under in-plane and out-of-plane seismic demands, ce/papers, 2(4), 241-245, 2018.
- [22] C. Butenweg, M. Marinković, R. Salatić, Experimental results of reinforced concrete frames with masonry infills under combined quasi-static in-plane and out-of-plane seismic loading, accepted for publication in Bulletin of Earthquake Engineering, 2019.
- [23] W. W. El-Dakhkhani, Experimental and analytical seismic evaluation of concrete masonry-infilled steel frames retrofitted using GFRP laminates. PhD thesis, Drexel University, United States –

Pennsylvania, 2002.

- [24] M. R. Valluzzi, F. Da Porto, E. Garbin, M. Panizza, Out-of-plane behaviour of infill masonry panels strengthened with composite materials. *Materials and structures*, 47(12), 2131-2145, 2014.
- [25] F. Da Porto, G. Guidi, N. Verlato, C. Modena, Effectiveness of plasters and textile reinforced mortars for strengthening clay masonry infill walls subjected to combined in-plane/out-of-plane actions/Wirksamkeit von Putz und textillbewehrtem Mörtel bei der Verstärkung von Ausfachungswänden aus Ziegelmauerwerk, die kombinierter Scheiben und Plattenbeanspruchung ausgesetzt sind. *Mauerwerk*, 19(5), 334-354, 2015.
- [26] F. Akhoundi, G. Vasconcelos, P. Lourenço, L. M. Silva, F. Cunha, R. Figueiro, In-plane behavior of cavity masonry infills and strengthening with textile reinforced mortar, *Engineering Structures*, 156, 145-160, (2018).
- [27] M. Preti, N. Bettini, G. Plizzari, Infill walls with sliding joints to limit infill-frame seismic interaction: large-scale experimental test, *Journal of Earthquake Engineering*, 16(1), 125-141, 2012.
- [28] V. Bolis, A. Stavridis, M. Preti, Numerical Investigation of the In-Plane Performance of Masonry-Infilled RC Frames with Sliding Subpanels, *Journal of Structural Engineering*, 143(2), 04016168, 2016.
- [29] N. Verlato, G. Guidi, F. da Porto, C. Modena, Innovative systems for masonry infill walls based on the use of deformable joints: combined in-plane/out-of-plane tests, In *Proceedings of the 16th International Brick and Block Masonry Conference*, 2016.
- [30] P. Morandi, R.R. Milanese, G. Magenes Innovative solution for seismic-resistant masonry infills with sliding joints: in-plane experimental performance, *Engineering Structures*, 176: 719-733, 2018.
- [31] M. Aliaari, A. M. Memari, Analysis of Masonry Infilled Steel Frames with Seismic Isolator Subframes, *Engineering Structures*, vol. 27, pp. 487-500, 2005.
- [32] J. S. Kuang, Z. Wang, Cyclic load tests of rc frame with column-isolated masonry infills. In *Second European Conference On Earthquake Engineering And Seismology*, Istanbul AUG (pp. 25-29), 2014.
- [33] A. V., Tsantilis, T. C. Triantafillou, Innovative seismic isolation of masonry infills using cellular materials at the interface with the surrounding RC frames, *Engineering Structures*, 155, 279-297, 2018.
- [34] M. Marinković, C. Butenweg, Innovative System for Earthquake Resistant Masonry Infill Walls, 16th European Conference on Earthquake Engineering, Thessaloniki, Greece, 18-21 June, 2018.
- [35] M. Marinković, Innovative system for seismic resistant masonry infills in reinforced concrete frame structures (PhD Thesis), University of Belgrade – Faculty of Civil Engineering, 2018.
- [36] BSW. Vibration Technology Tech. Details - Regufoam Vibration Isolation, 2019.
- [37] INSYSME Project. Retrieved from <http://www.insysme.eu/>, 2017.
- [38] Butenweg, C., Marinković, M., Fehling, E., Pfetzing, T., Kubalski, T. (2018). Experimental and Numerical Investigations of Reinforced Concrete Frames with Masonry Infills under Combined In- and Out-of-plane Seismic Loading. 16th European Conference on Earthquake Engineering. Thessaloniki, Greece.
- [39] Paulay T, Priestley MJN (1992) *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. John Wiley and Sons Inc., New York, NY, USA.