

RE-forMS

rammed earth for modelling and standardization
in seismically active areas



HRZZ

Hrvatska zaklada
za znanost

Izvještaj o ispitivanju zidova W9 – W12 na djelovanje cikličkog opterećenja u njihovoj ravnini

Naziv projekta:	Nabijena zemlja za modeliranje i normizaciju u potresno aktivnim područjima
Akronim:	RE-forMS
Šifra projekta:	UIP-2020-02-7363
Ustanova s kojom je sklopljen ugovor o financiranju:	Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
Partnerske ustanove:	Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci
Voditelj:	izv. prof. dr. sc. Ivan Kraus
Izvještajno razdoblje:	4. razdoblje
Oznaka izvještaja:	D4
Sadržaj:	Ovaj izvještaj sadrži rezultate ispitivanja zidova od nabijene zemlje (W9–W12) pod cikličkim opterećenjem, s ciljem analize njihovih mehaničkih svojstava i otpornosti na seizmička djelovanja.
Autori izvještaja:	Ana Perić, izv. prof. dr. sc. Ivan Kraus, doc. dr. sc. Paulina Krolo, doc. dr. sc. Marin Grubišić
Datum:	10. 1. 2025.

Ovaj je materijal sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom UIP-2020-02-7363. Sadržaj ili preporuke navedene u ovom materijalu odnose se na autora i ne odražavaju nužno stajališta Hrvatske zaklade za znanost.



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
**Fakultet agrobiotehničkih
znanosti Osijek**



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
Josip Juraj Strossmayer University of Osijek
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek



Sveučilište
u Rijeci
**Građevinski
fakultet**

Sažetak:

Ovaj izvještaj prezentira rezultate eksperimentalnog ispitivanja zidova od nabijene zemlje (W9–W12) pod djelovanjem cikličkog opterećenja. Cilj istraživanja bio je analizirati mehanička svojstva zidova izrađenih tradicionalnom tehnikom nabijanja te utvrditi njihovu otpornost na seizmička djelovanja. Zidovi su izrađeni korištenjem glinene mješavine s poznatim podrijetlom i oštrobridnom sipinom, uz primjenu dvije različite tehnike zbijanja: ravnom bazom i šiljcima.

Eksperimenti su uključivali mjerenja tlačne i vlačne čvrstoće, analizu deformacija te evaluaciju utjecaja vlažnosti materijala. Rezultati su pokazali značajne razlike u mehaničkim svojstvima među uzorcima. Tlačna čvrstoća prizmica kretala se od 1,01 N/mm² do 2,96 N/mm², dok je vlačna čvrstoća na savijanje dosegala vrijednosti do 0,704 N/mm². Zidovi s tehnikom zbijanja šiljcima pokazali su bolju povezanost slojeva, veću homogenost i otpornost.

Ispitivanja pod cikličkim opterećenjem otkrila su formiranje dijagonalnih i horizontalnih pukotina, pri čemu su najveći horizontalni pomaci dosegali 10 mm. Vlažnost materijala imala je ključan utjecaj na performanse zidova, s prosječnim rasponom od 1,3 % do 1,6 %.

Rezultati istraživanja potvrđuju da zidovi od nabijene zemlje, uz optimizirane metode izrade i kontrolu vlažnosti, mogu biti učinkovita konstrukcijska rješenja za potresno aktivna područja. Zaključeno je da su potrebna daljnja istraživanja za standardizaciju postupaka izrade i dugoročnu analizu trajnosti ovakvih konstrukcija.

Ključne riječi: zidovi od nabijene zemlje, mehanička svojstva, cikličko opterećenje, tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća, potresna otpornost, vlažnost

Abstract:

This report presents the results of experimental testing of rammed earth walls (W9–W12) under cyclic loading. The aim of the research was to analyze the mechanical properties of walls constructed using traditional rammed earth techniques and to determine their resistance to seismic actions. The walls were built using a clay mixture of known origin and sharp-edged sand, with two different compaction techniques applied: flat-base and spiked-base compaction.

The experiments included measurements of compressive and tensile strength, deformation analysis, and evaluation of the impact of material moisture. The results showed significant differences in the mechanical properties among the samples. The compressive strength of the prisms ranged from 1.01 N/mm² to 2.96 N/mm², while the flexural tensile strength reached values up to 0.704 N/mm². Walls compacted using spiked tools demonstrated better layer bonding, greater homogeneity, and improved resistance.

Testing under cyclic loading revealed the formation of diagonal and horizontal cracks, with maximum horizontal displacements reaching 10 mm. Material moisture had a critical impact on the performance of the walls, with an average range between 1.3% and 1.6%.

The research results confirm that rammed earth walls, with optimized construction methods and moisture control, can serve as effective structural solutions for seismically active areas. It was concluded that further research is necessary to standardize construction procedures and conduct long-term durability analyses of such structures.

Keywords: rammed earth walls, mechanical properties, cyclic loading, compressive strength, tensile strength, seismic resistance, moisture.

Sadržaj

1. Uvod.....	5
2. Opis odabrane geometrije zidova od nabijene zemlje.....	5
3. Opis postupka građenja.....	6
4. Opis i protokol eksperimentalnog ispitivanja.....	8
5. Rezultati ispitivanja na cikličko djelovanje	10
6. Postupak ispitivanja mehaničkih svojstava	13
7. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava	15
8. Zaključak	17

1. Uvod

Izgradnja četiri zida od nabijene zemlje provedena je korištenjem tradicijskih mješavina s posebnim fokusom na kvalitetu materijala i tehniku izvedbe. Zidovi W9 do W12 izrađeni su od mješavine koja je obuhvaćala glinu dobivenu s deponija ciglane u Sarvašu, čiji je izvor rudokop u Tomašancima nedaleko Đakova, te oštrobridnu sipinu frakcije 0-4 mm, koja je nabavljena od tvrtke Tihakor. Korištenje glinenog materijala s poznatim podrijetlom i sipine određene granulacije osigurava postizanje optimalnih svojstava potrebnih za konstrukciju zidova.

Zidovi W9 i W10 izrađeni su tehnikom zbijanja zemlje uz pomoć zbijača s ravnom bazom. Ova tehnika primijenjena je radi postizanja ujednačene gustoće i čvrstoće u cijeloj strukturi. S druge strane, za zidove W11 i W12 provedeno je završno zbijanje svakog ugrađenog sloja korištenjem ježastog zbijača (zbijača sa šiljcima). Ova metoda primijenjena je radi ostvarivanja bolje povezanosti između pojedinih slojeva, što doprinosi ukupnoj strukturnoj stabilnosti te trajnosti zida.

Svi zidovi izrađeni su tradicijskom tehnikom nabijanja, pri čemu su korišteni ručni nabijači. Proces izgradnje završen je 9. srpnja 2024. godine, dok su zidovi ispitani na ciklička djelovanja u ravnini početkom siječnja 2025. godine. Nakon četiri mjeseca sušenja u kontroliranim laboratorijskim uvjetima, zidovi su podvrgnuti testiranju kako bi se utvrdila njihova otpornost na cikličko opterećenje. Ovaj postupak osigurao je da se precizno evaluiraju mehanička svojstva zida pod različitim uvjetima opterećenja.

Osim glavnih zidova, izrađena su i probna tijela koristeći iste zemljane mješavine. Na ovim probnim tijelima određena su materijalna svojstva kako bi se dodatno potvrdila kvaliteta mješavine i pouzdanost konstrukcijskih metoda.

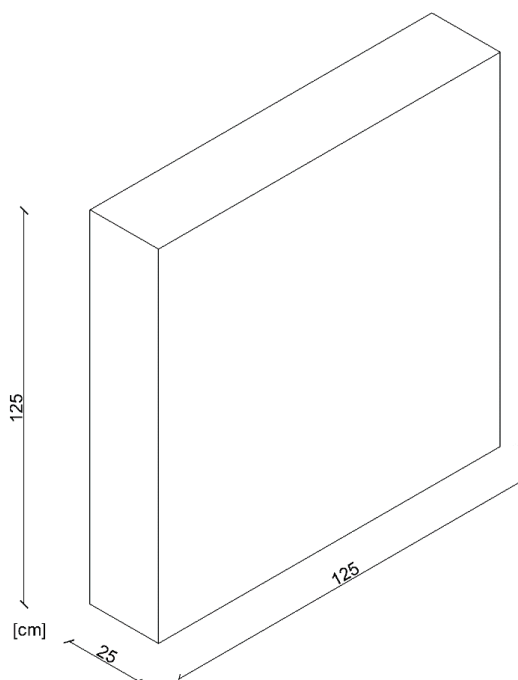
2. Opis odabrane geometrije zidova od nabijene zemlje

Za potrebe eksperimentalnog ispitivanja izrađena su četiri modela zida od nabijene zemlje u mjerilu 1:2, uzimajući u obzir sve relevantne parametre kako bi se osigurala vjernost repliciranja stvarnih uvjeta. Geometrijska svojstva modela zidova identična su za sve četiri testirane konstrukcije, a detalji su prikazani na slici 2.1. Provedbom opsežnih terenskih istraživanja utvrđeno je da visina zidova u konstrukcijama od nabijene zemlje na području Istočne Hrvatske najčešće ne prelazi 2.5 metra. Sukladno tome, visina modela zidova ispitanih ovim istraživanjem, u skladu s mjerilom 1:2, definirana je na 1.25 metara.

Radi pojednostavljenja izvedbe i olakšanja postupka ispitivanja, duljina svakog zida određena je na isti iznos kao i visina, što osigurava kompaktnost i praktičnost pri rukovanju modelima. Također, obilaskom kuća od nabijene zemlje na području istraživanja potvrđeno je da debljina nosivih zidova uglavnom iznosi 50 centimetara. Slijedom toga, debljina modela zidova od nabijene zemlje definirana je na 25 centimetara, što odgovara mjerilu 1:2.

Geometrijska svojstva zidova W9 – W12, testiranih u ovom razdoblju projekta, identična su svojstvima zidova W1 – W8, koji su ispitani tijekom prethodnog razdoblja projekta. Ovaj dosljedni pristup omogućava preciznu usporedbu ponašanja zidova od nabijene zemlje u oba izvještajna razdoblja. Usporedba rezultata omogućuje dublje razumijevanje faktora koji utječu na mehanička svojstva ovakvih konstrukcija i njihovu otpornost na različite uvjete opterećenja.

Cjelokupni dizajn i ispitivanja prilagođeni su tako da obuhvate širok spektar varijabli, čime se nastoji unaprijediti praktična primjena tehnika izrade zidova od nabijene zemlje u modernim konstrukcijama.



Slika 2.1 Geometrija modela zidova od nabijene zemlje

3. Opis postupka građenja

Modeli zidova za potrebe ovog istraživanja izrađeni su primjenom tradicionalne tehnike nabijanja, pri čemu su korišteni čelični ručni nabijači. Ova metoda izvedbe osigurava autentičnost i održavanje povijesnih tehnika gradnje, što je ključno za analizu mehaničkih svojstava zidova izrađenih od nabijene zemlje. Zbog primjene tradicionalnih tehnika, potrebna vlažnost materijala nije unaprijed točno određena, već je kontrolirana tijekom postupka izrade pomoću drop testa, kako su to opisali Walker i dr. (2005), Minke (2012) i Krahn (2019). Drop test je poslužio kao praktičan alat za vizualno i taktilno ocjenjivanje optimalne vlažnosti materijala.

Unatoč tome, za svaki model zida dodatno je određen precizan postotak vlažnosti materijala u trenutku izrade, a rezultati su prikazani u tablici 3.1. Ovaj postupak omogućio je usporedbu različitih zidova u pogledu njihove kvalitete i konstrukcijskih svojstava. Zemljani materijal korišten za izradu zidova miješan je strojno, koristeći građevinsku miješalicu, čime je osigurana homogena distribucija svih komponenti u mješavini. Prije miješanja, tlo je prosijano kroz sito promjera 16 mm kako bi se uklonili veći komadići i postigla konzistentnost materijala.

Kombinacija tradicionalnih tehnika izvedbe i suvremenih metoda kontrole vlažnosti osigurava da su izrađeni modeli zidova vjerne reprezentacije stvarnih konstrukcija od nabijene zemlje. Ova metodologija doprinosi razumijevanju utjecaja vlage na mehanička svojstva zidova te osigurava precizne podatke za buduća istraživanja i praktične primjene u građevinarstvu.

Kako bi procesi ispitivanja i premještanje modela zidova unutar laboratorija bili jednostavniji, zidovi su izrađeni na betonskim gredama dimenzija 25 × 45 × 250 cm. Ove dimenzije odabrane

su kako bi se osigurala stabilnost i lakoća manipulacije tijekom laboratorijskih testiranja. Prije izvedbe zida, na površinu betonske grede izliven je tanki sloj vapnenog morta pripremljen u omjeru 1:3. Ovaj sloj služi za poboljšanje adhezije između betonske grede, koja djeluje kao "temelj," i zemljanog zida, čime se povećava ukupna stabilnost konstrukcije.



Slika 3.1 Geometrija modela zidova od nabijene zemlje

Tablica 3.1 Vlažnost materijala prilikom izrade modela zidova

Model zida	W9	W10	W11	W12
Vlažnost pri izradi (%)	8,66	8,66	6,58	6,58

Nakon pripreme podloge, postavljena je drvena oplata kako bi se oblikovao prostor za nabijanje zemlje. Oplata je bila čvrsto osigurana pomoću drvenih kosnika, koji su spriječili pomicanje i deformacije tijekom procesa nabijanja. Drvena oplata nije samo pružila stabilan okvir za izradu zida, već je omogućila i postizanje preciznih dimenzija te ravnih površina modela. Ova metoda osigurala je visoku razinu kontroliranosti i ponovljivosti tijekom izrade svih modela zidova, što je ključno za usporedbu rezultata testiranja.

Kombinacija betonske grede, vapnenog morta i drvene oplata omogućila je izvedbu modela uz visoku razinu preciznosti i stabilnosti, dok su drveni kosnici dodatno doprinosili sigurnosti i funkcionalnosti cijelog sustava.

Modeli zidova od nabijene zemlje bili su izrađeni od slojeva debljine od 5 do 7 cm, a za izradu svakog modela bilo je potrebno nekoliko sati grupi od 3 radnika. U svaki je sloj dodano dvije kante pripremljenog zemljanog materijala zapremnine 15 L. Materijal je prije zbijanja poravnan te je potom uslijedilo zbijanje metalnim nabijačima, do zbijenosti 98 %, prema preporuci u literaturi (Walker i dr., 2005.). Kako bi se osigurala stalna razina vlage u zemljanom materijalu, tlo do usipavanja u drvenu oplatu čuvano u zatvorenim PVC vrećama.

Kako bi se spriječilo pužanje zbog razmjerno velike vlastite težine, oplata je zadržana na modelima zidova u prosjeku tjedan dana nakon završetka izvedbe. Potom su modeli zidova čuvani u laboratorijskim uvjetima tijekom četiri mjeseca, nakon čega je provedeno ispitivanje. Provjerom razine vlažnosti u ispitanim zidovima W1-W8, uočeno je da je njega duža od 60

dana dostatna za postizanje dovoljno ujednačene razine vlažnosti u zidovima od nabijene zemlje. To je u skladu s pregledanom literaturom (Perić et al., 2021) i prethodnim iskustvima drugih istraživača u području konstrukcija od nabijene zemlje (Miccoli et al., 2016, 2017, El-Nabouch et al., 2016, 2017).

Nakon sušenja, gornja ploha zidova poravnata je tankim slojem vapnenog morta kako bi se osigurala bolja povezanost gornje betonske grede (gravitacijskog opterećenja) i zida od nabijene zemlje. Ovaj sloj morta ne samo da povećava adheziju između elemenata konstrukcije, već dodatno doprinosi ukupnoj stabilnosti i homogenosti sustava. Vapneni mort nanesen je tjedan dana prije provedbe ispitivanja kako bi se osigurala potpuna suhoća morta prije pričvršćivanja gornje betonske grede. Pravilno vrijeme sušenja osigurava optimalne uvjete za izvedbu daljnjih testiranja.

Za potrebe određivanja tlačne i vlačne čvrstoće materijala od kojeg su izrađeni zidovi, tijekom njihove izgradnje izrađena su i tri uzorka kocke, tri uzorka valjaka te po tri uzorka prizmi. Ovi uzorci služe za dodatnu evaluaciju svojstava materijala kako bi se osigurala pouzdanost dobivenih rezultata. Uzorci kocke dimenzija $15 \times 15 \times 15$ cm, valjaka dimenzija 15×30 cm, i prizmi dimenzija $4 \times 4 \times 16$ cm izrađeni su od istog materijala koji je korišten za izradu zidova. Materijal je pripremljen na isti način, čime je osigurana konzistentnost između uzoraka i glavnih konstrukcija.

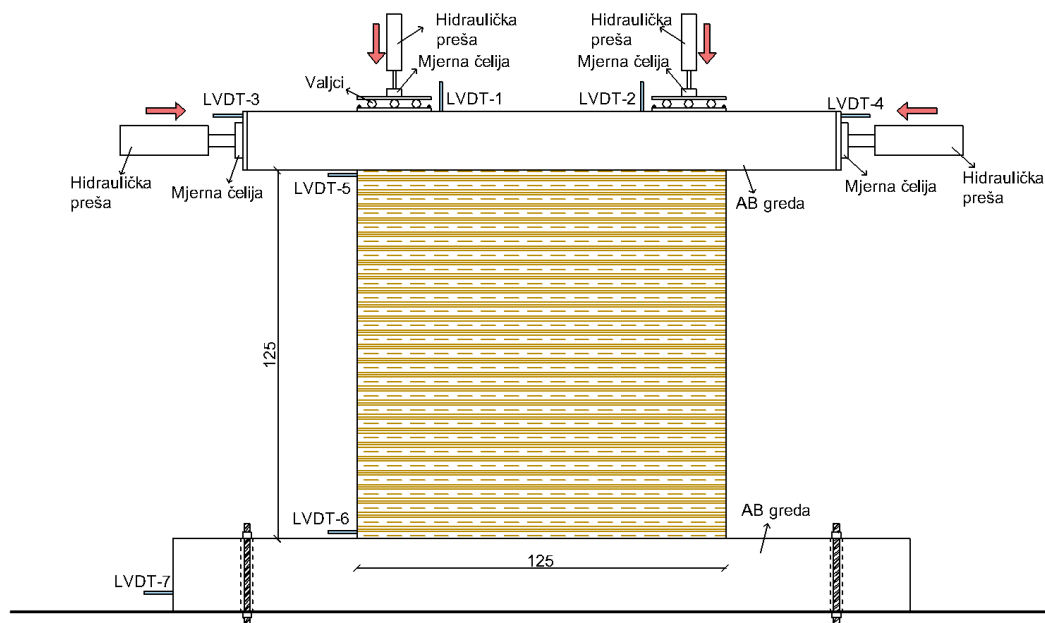
Nakon izrade, uzorci su pohranjeni u komoru s kontroliranim uvjetima vlažnosti prostora od 50 ± 5 % pri temperaturi od 20 ± 5 °C. Ovi uvjeti repliciraju optimalne laboratorijske standarde za njegu zemljanih materijala. Uzorci su negovani tijekom razdoblja od 28 dana kako bi se postigla stabilizacija materijala prije ispitivanja. Tijekom ovog razdoblja, osigurana je stalna kontrola vlažnosti i temperature, čime se minimizira utjecaj nepovoljnih uvjeta okoline.

Po završetku perioda njege, uzorci su podvrgnuti ispitivanjima tlačne i vlačne čvrstoće, pri čemu su dobiveni podaci poslužili kao dodatna osnova za evaluaciju mehaničkih svojstava zidova. Ovaj sustavni pristup ispitivanju osigurava preciznost i pouzdanost rezultata, omogućujući bolje razumijevanje ponašanja zidova od nabijene zemlje pod različitim uvjetima opterećenja.

4. Opis i protokol eksperimentalnog ispitivanja

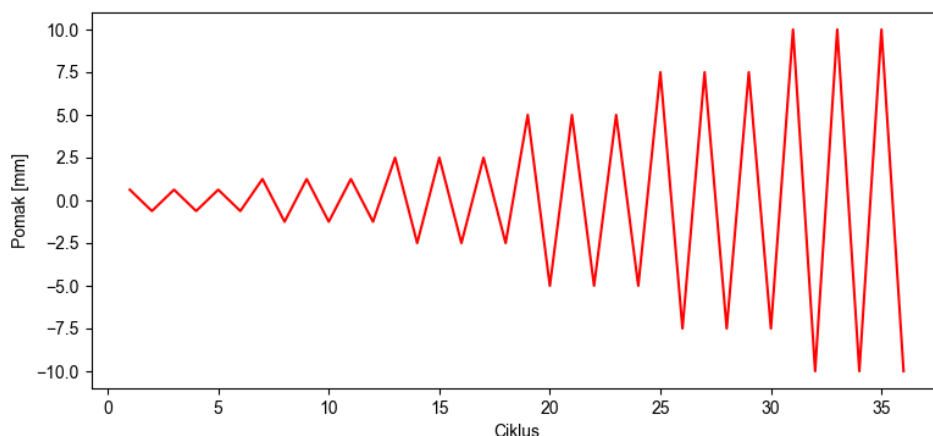
Potresna otpornost modela zidova od nabijene zemlje ispitana je eksperimentalno pomoću ciklički promjenjivog opterećenja, s posebnim naglaskom na analizu ponašanja pri različitim razinama pomaka. Model zida, radi olakšanog prijenosa unutar laboratorija te sigurnog i stabilnog učvršćivanja tijekom ispitivanja, bio je postavljen na betonsku gredu, kako je prethodno opisano u poglavlju. Dodatno, betonska greda dimenzija $20 \times 35 \times 200$ cm postavljena je i na vrh modela zida kako bi se osigurala ravnomjerna distribucija opterećenja tijekom eksperimenata. Postav eksperimenta ilustriran je na slici 4.1. Na model zida prvo je nanoseno vertikalno opterećenje ukupnog iznosa približno 0.19 MPa (nakon postavljanja betonske grede, u vertikalno postavljene prese unesena je sila od po 26,50 kN, što u presama čini ukupnu vertikalnu silu na betonsku gredu od 56,25 kN). Ovaj iznos vertikalnog opterećenja određen je na temelju karakteristične težine drvene građe i elemenata tradicionalnog krovišta, kao i uporabnog opterećenja nastalog skladištenjem žitarica. Vertikalno opterećenje ima dvostruku svrhu: osim što reprezentira stalno i uporabno opterećenje, ono također osigurava čvrstu povezanost između betonskih greda i modela zida, smanjujući rizik od klizanja između tih elemenata tijekom nanošenja horizontalnog pomaka. Tijekom eksperimenta, zbog ručne

kontrole nanošenja opterećenja, zabilježeno je postupno opadanje vertikalnog opterećenja s povećanjem horizontalnog pomaka gornje betonske grede.



Slika 4.1 Postav eksperimenta

Sljedeća faza eksperimenta uključivala je nanošenje horizontalnog pomaka u ciklusima, pri čemu se svaki ciklus ponavljao tri puta prije povećanja pomaka. Kako bi se zabilježilo ponašanje modela zida unutar linearnog područja, prva dva seta ciklusa imala su manji korak pomaka, dok je korak između setova ciklusa kasnije povećan na 2.5 mm. Program nanošenja horizontalnog pomaka grafički je prikazan na slici 4.2 i određen je prema smjernicama iz pregledane literature (Miccoli i dr., 2016., 2017.; Ramezanpour i dr., 2021.). Za razliku od zidova ispitanih u prethodnom razdoblju projekta (W1-W4), u ovom je eksperimentu dodan dodatni ciklus horizontalnog pomaka u iznosu od ± 10 mm kako bi se postigao značajan pad krutosti. Eksperiment je prekinut kada je kritički ocijenjen pad horizontalne sile uz daljnji porast pomaka.



Slika 4.2 Program opterećivanja modela zida horizontalnim pomakom

Horizontalni pomak nanošen je u osi gornje betonske grede uz pomoć ručno kontroliranih hidrauličkih preša, što je osiguralo preciznu kontrolu postupka. Tijekom eksperimenta, odziv modela zidova mjeren je pomoću LVDT senzora, pozicioniranih prema shemi prikazanoj na

slici 4.1, te ARAMIS sustava za optičko praćenje deformacija. Osim pomaka gornje betonske grede, mjerio se i relativni pomak između betonskih greda i modela zida, kao i pomak donje betonske grede u odnosu na podlogu. Ovakav pristup osigurao je sveobuhvatnu analizu svih ključnih aspekata odziva modela zida na horizontalno opterećenje. Rezultati mjerenja pokazali su zanemarivo proklizavanje betonske grede u odnosu na podlogu kod svih četiri modela zida, što potvrđuje uspješnost izvedbe i stabilnosti eksperimentalnog postava. Ovaj eksperiment pruža važne uvide u potresnu otpornost zidova od nabijene zemlje te doprinosi boljem razumijevanju njihovog ponašanja pod cikličkim opterećenjem.

5. Rezultati ispitivanja na cikličko djelovanje

Tijekom ispitivanja pod djelovanjem cikličkog opterećenja, pažljivo su praćene i bilježene najveće vrijednosti sila i ostvareni pomaci. Ove ključne veličine zabilježene su kako bi se omogućila detaljnija analiza ponašanja konstrukcije pod opterećenjem. Rezultati mjerenja za zidove W9 i W11 prikazani su redom u tablici 5.1 i tablici 5.2, koja sadrži sve relevantne podatke potrebne za daljnju interpretaciju.

Tablica 5.1 Ostvareni pomaci i najveće sile po koracima za zid W9

Korak	Ciljani horizontalni pomak [mm]:	Ostvaren horizontalni pomak [mm]:	Sila [kN]:
1.	+0,625	+0,770	-11,00
2.	-0,625	-0,760	12,50
3.	+0,625	+1,28	-15,80
4.	-0,625	-0,73	13,80
5.	+0,625	+0,69	-5,50
6.	-0,625	-0,76	13,70
7.	+1,25	+1,26	-10,60
8.	-1,25	-1,45	17,90
9.	+1,25	+1,37	-12,90
10.	-1,25	-1,23	15,00
11.	+1,25	+1,31	-11,80
12.	-1,25	-1,25	15,50
13.	+2,50	+2,50	-20,80
14.	-2,50	-2,42	21,40
15.	+2,50	+2,52	-20,70
16.	-2,50	-2,63	21,90
17.	+2,50	+2,57	-20,70
18.	-2,50	-2,47	20,10
19.	+5,00	+4,99	-29,80
20.	-5,00	-5,14	30,70
21.	+5,00	+5,16	-29,60
22.	-5,00	-5,03	28,10
23.	+5,00	+5,04	-28,00
24.	-5,00	-5,10	28,00
25.	+7,50	+7,47	-33,80
26.	-7,50	-7,58	37,00
27.	+7,50	+7,55	-33,30
28.	-7,50	-7,60	34,20
29.	+7,50	+7,50	-32,10
30.	-7,50	-7,70	32,10
31.	+10,00	+10,07	-33,40
32.	-10,00	-9,22	18,10
33.	+10,00	+8,60	-16,80

Tablica 5.2 Ostvareni pomaci i najveće sile po koracima za zid W11

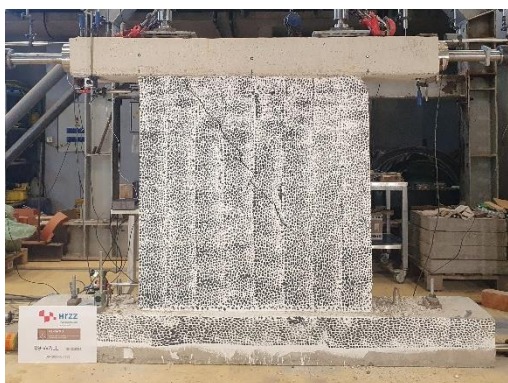
Redni broj:	Horizontalni pomak [mm]:	Ostvaren horizontalni pomak [mm]:	Sila [kN]:
1.	-0,625	-0,72	-9,50
2.	+0,625	+0,70	+10,60
3.	-0,625	-0,70	-10,60
4.	+0,625	+0,76	+11,20
5.	-1,25	-1,40	-14,70
6.	+1,25	+1,44	+15,70
7.	-1,25	-1,32	-14,00
8.	+1,25	+1,51	+15,90
9.	-1,25	-1,24	-13,30
10.	+1,25	+1,39	+14,60
11.	-2,50	-2,48	-18,70
12.	+2,50	+2,45	+19,40
13.	-2,50	-2,41	-17,60
14.	+2,50	+2,42	+18,60
15.	-2,50	-2,42	-17,30
16.	+2,50	+2,49	+18,60
17.	-5,00	-5,08	-19,50
18.	+5,00	+5,29	+22,70
19.	-5,00	-5,27	-17,90
20.	+5,00	+4,95	+19,20
21.	-5,00	-5,21	-15,90
22.	+5,00	+5,12	+18,40
23.	-7,50	-7,51	-15,60
24.	+7,50	+7,77	+19,10
25.	-7,50	-7,53	-12,60
26.	+7,50	+7,71	+15,90

Važno je napomenuti da su ove vrijednosti bilježene ručno kako bi se osigurala dodatna kontrola i preciznost u prikupljanju podataka za navedene zidove. Takav pristup omogućuje višestruku provjeru podataka te doprinosi točnosti rezultata i vjerodostojnosti analize. Cilj ovih mjerenja je pružiti čvrstu osnovu za daljnje istraživanje i unapređenje dizajna konstrukcija pod cikličkim opterećenjem.

Slika 5.1 prikazuje sva četiri zida na kraju ispitivanja, s jasno vidljivim formiranim pukotinama na njihovim površinama. Ipak, zbog primjene stohastičkog crno-bijelog uzorka kojim je prednje lice zida oslikano radi praćenja deformacija, sve pukotine nisu u potpunosti vidljive na fotografijama. Kako bi se osigurao detaljan pregled i analiza nastalih pukotina, izrađen je prikaz svih pukotina prikupljenih ARAMIS sustavom (slika 5.2). Ovaj sustav omogućio je preciznu identifikaciju i kartiranje pukotina koje su se pojavile tijekom ispitivanja.

Tri od četiri ispitana zida pokazala su izražene dijagonalne pukotine. Osim dijagonalnih pukotina, na nekim modelima zabilježene su i manje horizontalne pukotine u blizini spojeva s betonskim gredama, što ukazuje na kritična područja unutar konstrukcije. Prilikom ispitivanja zida W10 ustanovljen je slab kontakt između najvišeg sloja zida i ostatka zida, što je rezultiralo značajnim proklizavanjem betonske grede po gornjoj zoni zida, čime je ispitivanje zida završeno u ranoj fazi. Detaljnim pregledom dijelova zida Z10 nakon završetka ispitivanja i uklanjanja grede ustanovljeno je da je posljednji sloj zemlje bio vrlo loše zbijen.

Analiza rezultata sugerira da poboljšana kvaliteta zemljane mješavine, zajedno s optimizacijom postupka zbijanja i kontrolom vlage, igraju ključnu ulogu u povećanju kapaciteta nosivosti zidova. Ovi nalazi naglašavaju važnost kontinuiranog usavršavanja metoda izrade i ispitivanja kako bi se povećala otpornost zidova od nabijene zemlje.



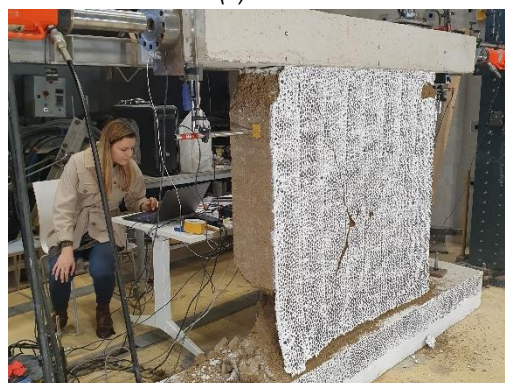
(a) W9



(b) W10



(c) W11



(d) W12

Slika 5.1 Pukotine na zidovima od nabijene zemlje formirane na kraju cikličkog ispitivanja

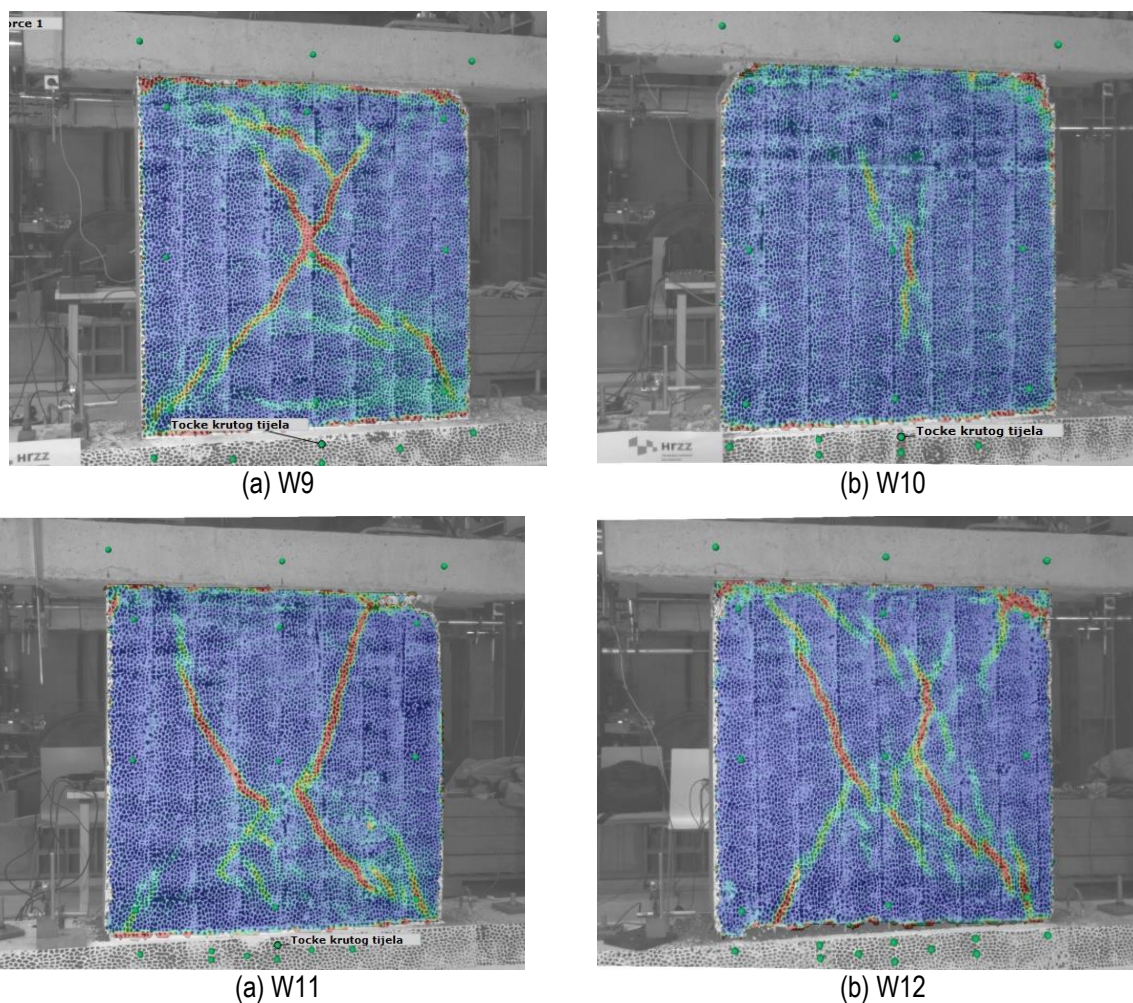
Tablica 5.3 prikazuje vrijednosti vlažnosti materijala uzorkovanog nakon rušenja zidova W9 – W12. Uzorci su prikupljeni iz različitih dijelova zidova kako bi se dobio detaljan pregled distribucije vlažnosti u konstrukcijama od nabijene zemlje. Konkretno, materijal je uzorkovan iz podnožja zida i sredine visine zida, pri čemu su uzeti uzorci s površine zida te iz središnjeg dijela poprečnog presjeka zida. Ovakav pristup omogućuje uvid u eventualne razlike u raspodjeli vlage unutar zida i između različitih pozicija uzorkovanja.

Rezultati pokazuju da je zid W9 imao najnižu prosječnu vlažnost, koja je iznosila 1,3 %, dok je zid W12 zabilježio najveću prosječnu vlažnost od približno 1,6 %. Unatoč ovim razlikama, analiza podataka nije otkrila jasan trend u distribuciji vlažnosti unutar zidova. Nije uočeno da je vlažnost dosljedno veća u podnožju ili u sredini visine zida. Također, nije zabilježeno pravilo koje bi ukazivalo na to da je vlažnost materijala sustavno veća na površini zida u usporedbi s njegovim središnjim dijelom.

Razlike u vlažnosti među uzorcima mogu biti posljedica nekoliko čimbenika, uključujući lokalne uvjete tijekom izgradnje, razlike u izloženosti vlazi iz okoliša tijekom eksploatacije, kao i razlike u zbijenosti i homogenosti materijala. Posebno je važno napomenuti da su zidovi od nabijene zemlje često osjetljivi na lokalne promjene mikroklimatskih uvjeta, što može dovesti do nejednake raspodjele vlage u njihovoj strukturi.

Ovi rezultati naglašavaju potrebu za daljnjim istraživanjem kako bi se bolje razumjeli faktori koji utječu na distribuciju vlage unutar zidova od nabijene zemlje. Dodatna ispitivanja mogla bi uključivati analize utjecaja različitih metoda izgradnje, kvalitete materijala, te izloženosti konstrukcija različitim okolišnim uvjetima. Pored toga, dugoročna istraživanja vlažnosti u

zidovima od nabijene zemlje mogla bi pomoći u uspostavljanju preporuka za njihovo održavanje i povećanje trajnosti u različitim klimatskim uvjetima.



Slika 5.2 Najveće deformacije (Von Mises) zabilježene Aramis sustavom

Ovakvi podaci pružaju vrijedan doprinos razumijevanju ponašanja konstrukcija od nabijene zemlje, omogućujući precizniju analizu i razvoj standardiziranih postupaka ispitivanja te pouzdaniju primjenu ovih ekoloških materijala u građevinskoj praksi.

Tablica 5.3 Vlažnosti materijala uzorkovanog nakon rušenja zidova W9 – W12

ID	podnožje zida na površini, w (%)	podnožje zida u sredini presjeka, w (%)	sredina visine, na površini, w (%)	sredina visine, u sredini presjeka, w (%)
W9	1,15	1,20	1,20	1,67
W10	1,21	1,51	1,43	1,45
W11	1,30	1,61	1,34	1,98
W12	1,68	1,52	1,59	1,58

6. Postupak ispitivanja mehaničkih svojstava

Prilikom izrade zidova, korištenjem istog materijala koji je upotrijebljen za njihovu izgradnju, izrađeni su i uzorci za ispitivanje materijalnih svojstava. Svojstva su ispitana na tri istovjetna uzorka za svaku ispitivanu seriju. Nakon zbijanja, uzorci su čuvani u kalupima 24 sata, nakon

čega su pažljivo raskalupljeni i premješteni u komoru za sušenje. U komori su uzorci njegovani tijekom četiri mjeseca u kontroliranim uvjetima temperature od $25 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i relativne vlažnosti zraka (RH) od $65 \pm 5 \%$.

Budući da trenutno ne postoji standardizirani postupak za njegu uzoraka od nabijene zemlje prije ispitivanja, u ovom istraživanju su, prema uzoru na praksu drugih istraživača u ovom području (Lilley i Robinson, 1995.; Ciano i Augarde, 2013.; Shrestha i sur., 2020.), primijenjeni postupci njege koji se koriste za betonske uzorke. Cilj ovakve njege tijekom najmanje 28 dana je osigurati stabilizaciju vlage unutar uzoraka kako bi se postigla razina vlažnosti što bliža prirodnim uvjetima u konstrukcijama od nabijene zemlje.

Prema dosadašnjim terenskim istraživanjima provedenima u sklopu ovog projekta, koja su opisana u prethodnim izvještajima, prirodni udio vlage u materijalu ugrađenom u zidove od nabijene zemlje na području Slavonije i Baranje kreće se u granicama od 2 % do 4 %. Ova saznanja bila su ključna za postavljanje uvjeta njege uzoraka, osiguravajući njihovu reprezentativnost u odnosu na stvarne uvjete na terenu.

Detaljna analiza uzoraka omogućila je dobivanje pouzdanih podataka o njihovim svojstvima, čime se dodatno doprinosi razumijevanju ponašanja materijala u različitim uvjetima eksploatacije. Ovakav pristup osigurava temelj za daljnji razvoj metodologija ispitivanja i standardizaciju postupaka za materijale od nabijene zemlje, što je ključno za njihovu širu primjenu u građevinskoj praksi.

Tlačna čvrstoća ispitana je na tri različita oblika uzorka (kocka, valjak i prizma) kako bi se omogućila analiza utjecaja oblika i/ili veličine ispitnog uzorka na dobivene vrijednosti tlačne čvrstoće nabijene zemlje. Ovaj pristup omogućava preciznije razumijevanje mehaničkih svojstava materijala, uzimajući u obzir moguće varijacije uvjetovane geometrijom uzoraka, što će biti detaljno analizirano u narednim fazama projekta. Istodobno, vlačna čvrstoća na savijanje ispitana je isključivo na uzorcima prizmatičnog oblika.

Ispitivanja su provedena na univerzalnom uređaju za ispitivanje Shimatzu AG-X kapaciteta 300 kN, koji omogućava precizno praćenje opterećenja i deformacija uzoraka. Za ispitivanje tlačne čvrstoće na uzorcima oblika kocke i valjka primijenjena je kontrola pomaka brzinom od 1 mm/min, dok je ispitivanje vlačne čvrstoće na savijanje provedeno uz polagani prirast opterećenja brzinom od $50 \pm 10 \text{ N/s}$ do trenutka sloma. Kod tlačne čvrstoće na prizmatičnim uzorcima, opterećenje je povećavano brzinom od $2400 \pm 200 \text{ N/s}$, prema normi BS EN 196-1:2005.

Prije svakog ispitivanja, svaki je uzorak precizno izmjereno kako bi se osigurala točnost proračuna čvrstoće prema standardiziranim izrazima (1) i (2):

$$f_c = \frac{F_{\max}}{A} \quad (1)$$

$$f_{t,f} = \frac{1.5 \cdot F_{\max} \cdot l}{b^3} \quad (2)$$

gdje je: f_c – tlačna čvrstoća, $F_{\max}$ – najveća postignuta sila prilikom ispitivanja, A – površina plohe na koju djeluje sila, $f_{t,f}$ – vlačna čvrstoća, l duljina uzorka, a b širina uzorka.

Modul elastičnosti proračunan je na temelju 30 % vrijednosti tlačne čvrstoće (Silva et al. 2013; 2016; 2018), prema Hookeovom zakonu (3)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

gdje je: E – modul elastičnosti, σ – tlačna čvrstoća, ε – deformacija

Uz proračun čvrstoća, iz sredine svakog ispitnog uzorka uzeto je više od 100 grama materijala za analizu vlage, kako bi se bolje razumjela veza između vlažnosti i mehaničkih svojstava.

Detaljnim ispitivanjem različitih oblika uzoraka osigurava se usporedba rezultata te bolja procjena utjecaja geometrijskih čimbenika na mehanička svojstva nabijene zemlje. Ova istraživanja pridonose razvoju standardiziranih metoda ispitivanja i pomažu u definiranju parametara za široku primjenu materijala od nabijene zemlje u građevinarstvu.

7. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava

Tablica 7.1 sadrži informacije o masi i geometriji prizmica izrađenih od materijala korištenog za izradu zidova W9 – W12. U tablici 7.1 oznaka W9-12 odnosi se na zidove, a broj nakon te oznake odnosi se na redni broj uzorka. Uzorci su prilikom ispitivanja stari 4 mjeseca. Za svaki uzorak određena je visina, širina i dužina na više lokacija kako bi se moglo obaviti uprosječivanje dimenzija radi utvrđivanja volumena te gustoće uzoraka.

Masa i geometrijske karakteristike prizmica korištenih za ispitivanje pokazuju određene varijacije, što može utjecati na mehanička svojstva materijala. Najmanja zabilježena masa bila je 440,39 g (uzorak W9-12_02), dok je najveća iznosila 534,10 g (uzorak W9-12_04). Raspon masa ukazuje na razlike u gustoći ili volumenu materijala između pojedinih uzoraka.

Visina prizmica je ujednačena za većinu uzoraka, s vrijednostima između 40,00 mm i 41,00 mm. Širina prizmica također je relativno konzistentna, krećući se od 39,50 mm do 40,00 mm, dok se dužina prizmica kreće u rasponu od 159,50 mm do 160,00 mm. Ova geometrijska dosljednost doprinosi preciznosti ispitivanja i omogućuje pouzdano uspoređivanje mehaničkih svojstava.

Tablica 7.1 Masa i geometrija prizmica izrađenih od materijala korištenog za izradu zidova W9 – W12

ID	<i>m</i> (g)	<i>h</i> (mm)				<i>b</i> (mm)				<i>l</i> (mm)			
W9-12_01	478,50	40,00	40,00	40,00	40,00	39,50	39,50	39,50	39,50	160,00	160,00	160,00	160,00
W9-12_02	440,39	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	39,50	39,50	40,00	159,50	159,50	159,50	159,50
W9-12_03	461,60	40,00	40,00	40,00	40,00	39,50	39,50	39,50	39,50	159,50	159,50	159,50	159,50
W9-12_04	534,10	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	160,00	160,00
W9-12_05	488,10	40,000	40,00	40,00	40,00	39,50	39,50	39,50	39,50	160,00	160,00	160,00	160,00
W9-12_06	503,60	41,00*	41,00*	41,00*	41,00*	40,00	40,00	40,00	40,00	159,50	159,50	159,50	159,50
W9-12_07	469,50	40,00	40,00	40,00	40,00	39,50	39,50	39,50	39,50	160,00	160,00	160,00	160,00
W9-12_08	480,60	41,00*	41,00*	41,00*	41,00*	39,50	39,50	39,50	39,50	159,50	159,50	159,50	159,50

Vlačne čvrstoće određene na prizmicama izrađenim od materijala korištenog za izradu zidova W9 – W12 prikazane su u tablici 7.1. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće prizmica otkrivaju značajne razlike među uzorcima. Najveća zabilježena sila iznosila je 250,24 N (uzorak W9-12_04), dok je najmanja bila 40,25 N (uzorak W9-12_02). Ovo pokazuje veliki raspon vrijednosti, što sugerira varijacije u kvaliteti materijala ili homogenosti prizmica.

Specifična vlačna čvrstoća na savijanje ($f_{ct,fl}$) kretala se od 0,114 N/mm² (W9-12_02) do 0,704 N/mm² (W9-12_04), dok je jednoosna vlačna čvrstoća ($f_{ct,ax}$) imala raspon od 0,050 N/mm² (W9-12_02) do 0,311 N/mm² (W9-12_04).

Tlačna čvrstoća određena je na ukupno 23 polovice dobivene ispitivanjem zemljanih prizmica metodom savijanja. Radni dijagrami dobiveni tlačnim ispitivanjem polovice prizmica prikazani su slikom 7.1, dok su vrijednosti tlačnih čvrstoća prikazane u tablici 7.2. Prosječna jednoosna tlačna čvrstoća dobivena ispitivanjem svih polovice prizmica iznosi 1,69 N/mm². Tlačna čvrstoća prizmica također pokazuje varijacije među uzorcima. Najveća jednoosna tlačna

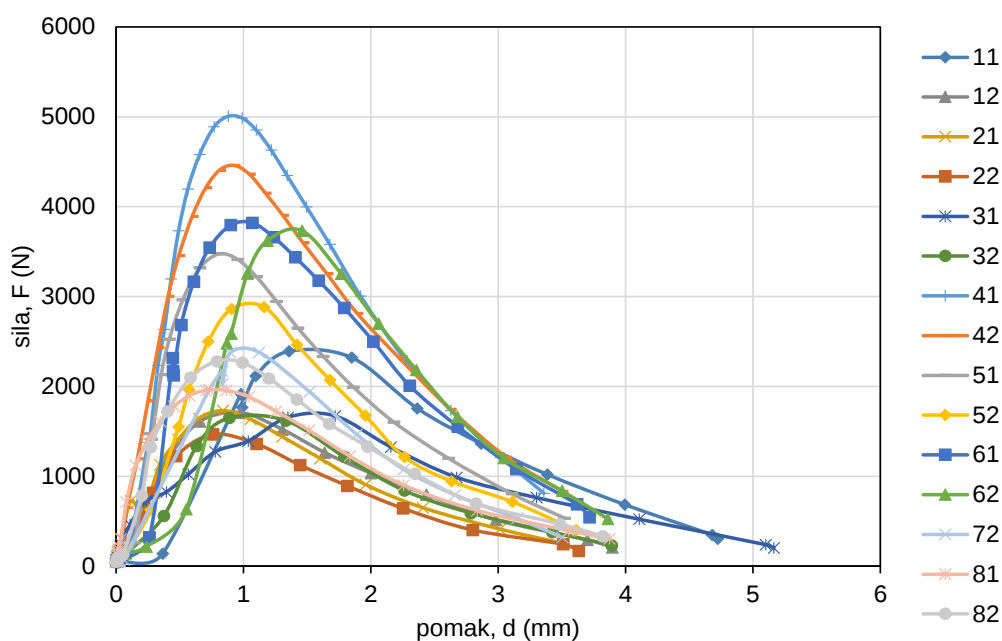
čvrstoća (f_c) iznosila je 3,13 N/mm² (uzorak W9-12_04), dok je najmanja bila 0,92 N/mm² (W9-12_02).

Tablica 7.2 Vlačna čvrstoća određena na prizmicama izrađenim od materijala korištenog za izradu zidova W9 – W12 (NA označava neuspjelo ispitivanje)

ID uzorka	F_u (N)	l (mm)	b (mm)	h (mm)	$f_{ct,fl}$ (N/mm ²)	$f_{ct,ax}$ (N/mm ²)
W9-12_01	82,20	120	39,5	40	0,234	0,104
W9-12_02	40,25	120	39,67	40	0,114	0,050
W9-12_03	64,19	120	39,5	40	0,183	0,081
W9-12_04	250,24	120	40,0	40	0,704	0,311
W9-12_05	NA	120	39,5	40	NA	NA
W9-12_06	NA	120	40,0	41	NA	NA
W9-12_07	84,03	120	39,5	40	0,239	0,106
W9-12_08	50,04	120	39,5	41	0,136	0,061

Tablica 7.3 Vrijednosti tlačnih čvrstoća određenih na polovicama prizmica.

Oznaka prizme	$f_{c,p1}$ (N/mm ²)	$f_{c,p2}$ (N/mm ²)	$f_{c,av}$ (N/mm ²)
W9-12_01	1,51	1,08	1,30
W9-12_02	1,09	0,92	1,01
W9-12_03	1,06	1,04	1,05
W9-12_04	3,13	2,79	2,96
W9-12_05	2,20	1,83	2,02
W9-12_06	2,39	2,33	2,36
W9-12_07	N/A	1,51	1,51
W9-12_08	1,24	1,44	1,34



Slika 7.1 Radni dijagrami dobiveni tlačnim ispitivanjem polovica prizmica (u legendi prvi broj odnosi se na redni broj ispitane prizme, a drugi broj na polovicu ispitane prizme)

lažnosti prizmica izrađenih od materijala korištenog za izradu zidova W9 – W12 prikazane su u tablici 7.4. Vlažnost materijala prizmica ispitivana je na dvije polovice svakog uzorka, a rezultati pokazuju blage razlike između njih. Najniža vlažnost zabilježena je kod uzorka W9-12_05, gdje su obje polovice imale vlažnost od 1,80 %. S druge strane, najviša vlažnost zabilježena je kod uzorka W9-12_08, gdje je prva polovica imala vlažnost od 2,62 %, dok je druga polovica imala 2,02 %. Prosječne vrijednosti vlažnosti (w_{aver}) kreću se od 1,80 % (W9-12_05) do 2,32 % (W9-12_08). Ovi podaci ukazuju na potrebu za dodatnom kontrolom vlage prilikom izrade uzoraka, budući da homogena distribucija vlage može pozitivno utjecati na mehanička svojstva materijala. Promotri li se sve ispitane polovice prizmica, prosječna vlažnost iznosi 2,00 %.

Tablica 7.4 Vlažnosti prizmica izrađenih od materijala korištenog za izradu zidova W9 – W12

ID	$w_{polovica1}$ (%)	$w_{polovica2}$ (%)	w_{aver} (%)
W9-12_01	2,13	2,09	2,11
W9-12_02	N/A	1,97	1,97
W9-12_03	1,87	1,91	1,89
W9-12_04	2,00	1,91	1,96
W9-12_05	1,80	1,80	1,80
W9-12_06	2,16	1,82	1,99
W9-12_07	1,99	1,75	1,87
W9-12_08	2,62	2,02	2,32

8. Zaključak

Istraživanje mehaničkih svojstava zidova od nabijene zemlje pružilo je vrijedne uvide u ponašanje ovog tradicionalnog građevinskog materijala pod cikličkim opterećenjem. Zidovi W9–W12, izrađeni u kontroliranim laboratorijskim uvjetima, testirani su na otpornost na horizontalna i vertikalna opterećenja te su ispitana mehanička svojstva materijala korištenjem uzoraka prizmica, što daje osnovne podatke za izradu numeričkih modela. Eksperimentalni rezultati omogućili su detaljnu analizu ključnih čimbenika koji utječu na ponašanje zidova, uključujući zbijenost, vlažnost i homogenost materijala.

Najvažniji rezultati istraživanja pokazuju da kvaliteta mješavine i tehnika zbijanja igraju ključnu ulogu u postizanju optimalne nosivosti zidova. Zidovi izrađeni tehnikom završnog zbijanja sa šiljcima pokazali su bolju povezanost slojeva, čime su postignuta bolja mehanička svojstva i stabilnost. Ova tehnika može se smatrati preporučenim pristupom za buduće primjene u područjima s visokom potresnom aktivnošću.

Mjerenja vlažnosti materijala pokazala su razlike između uzoraka, pri čemu su zidovi s homogenijom raspodjelom vlage imali bolja mehanička svojstva. Najniža prosječna vlažnost zabilježena je kod zida W9 (1,3 %), dok je najveća bila kod zida W12 (1,6 %). Ovi rezultati naglašavaju važnost kontroliranih uvjeta sušenja i preciznog nadzora vlažnosti tijekom izgradnje.

Tlačna čvrstoća prizmica ukazala je na značajne razlike među uzorcima. Najveća zabilježena vrijednost iznosila je 3,13 N/mm², dok je prosjek za sve uzorke bio 1,69 N/mm². Vlažna čvrstoća na savijanje kretala se od 0,114 N/mm² do 0,704 N/mm². Ovi nalazi ukazuju na potrebu daljnjeg istraživanja kako bi se razumjeli utjecaji različitih tehnika zbijanja i mješavina na mehanička svojstva.

Zabilježeni pomaci i sile tijekom ispitivanja zidova pod cikličkim opterećenjem također su pružili uvid u otpornost zidova na potresna djelovanja. Formiranje dijagonalnih i horizontalnih pukotina ukazuje na područja koja zahtijevaju dodatnu pozornost u dizajnu, posebice u spojevima s betonskim elementima.

Zaključno, istraživanje je pokazalo da su zidovi od nabijene zemlje, uz odgovarajuće metode zbijanja i kontrolu vlage, održiva i otporna opcija za gradnju u potresno aktivnim područjima. Međutim, daljnja istraživanja trebala bi se fokusirati na standardizaciju postupaka izgradnje, dugoročne analize trajnosti te utjecaj mikroklimatskih uvjeta na strukturalne performanse. Ovi rezultati doprinose boljem razumijevanju konstrukcija od nabijene zemlje i njihovoj pouzdanoj primjeni u suvremenoj graditeljskoj praksi.