

Zidovi uz komoru za ispitivanje zrakopropusnosti i rezultati ispitivanja zidova opterećenjem okomito na ravninu

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:	D1
Sadržaj:	Ovaj dokument analizira mehanička i toplinska svojstva zidova od nabijene zemlje, uključujući koeficijent toplinske provodljivosti, tlačnu i vlačnu čvrstoću te modul elastičnosti, kroz laboratorijska ispitivanja i mjerena. Rezultati potvrđuju da zidovi od nabijene zemlje imaju visoku energetsku učinkovitost i predstavljaju održivo građevinsko rješenje za modernu gradnju.
Autori izvještaja:	doc. dr. sc. Ivan Kraus, dr. sc. Mihaela Domazetović, dr. sc. Ana Perić Fekete, doc. dr. sc. Marin Grubišić
Datum:	13. 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.

Sažetak:

Cilj istraživanja bio je odrediti koeficijent toplinske provodljivosti, zrakopropusnost, tlačnu i vlačnu čvrstoću te modul elastičnosti zidova i uzoraka izrađenih od nabijene zemlje. Rezultati ispitivanja toplinskih svojstava pokazali su da zidovi od nabijene zemlje imaju značajno bolja svojstva toplinske izolacije u usporedbi s tradicionalnim građevinskim materijalima poput betona i opeke. Vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti uzoraka starosti 24 mjeseca kretale su se od $0,3325 \text{ W/mK}$ do $0,6711 \text{ W/mK}$, potvrđujući njihovu energetsku učinkovitost. Mehanička ispitivanja pokazala su najveće srednje vrijednosti tlačne čvrstoće na kockama ($1,85 \text{ N/mm}^2$), dok su najmanje vrijednosti izmjerene na valjcima ($1,09 \text{ N/mm}^2$). Moduli elastičnosti pokazali su najveće vrijednosti na valjcima ($149,73 \text{ N/mm}^2$), a najmanje na prizmama ($36,41 \text{ N/mm}^2$). Nosivost zidova ispitivanih na djelovanje okomito na ravninu procijenjena je na 35 kN . Proučavanje vlažnosti otkrilo je razlike u raspodjeli vlage u zidovima, s prosječnom vlažnošću od $2,50\%$ pri podnožju i $3,05\%$ na vrhu. Zaključno, zidovi od nabijene zemlje predstavljaju održiva i energetski učinkovita konstrukcijska rješenja, a rezultati istraživanja doprinose razvoju normi za njihovu širu primjenu u graditeljstvu.

Ključne riječi: C zid, toplinska provodljivost, djelovanje izvan ravnine, nabijena zemlja

Abstract:

The aim of the research was to determine the thermal conductivity coefficient, air permeability, compressive and tensile strength, and modulus of elasticity of rammed earth walls and samples. The results of thermal property testing showed that rammed earth walls have significantly better thermal insulation properties compared to traditional building materials such as concrete and brick. The thermal conductivity coefficient values of 24-month-old samples ranged from 0.3325 W/mK to 0.6711 W/mK, confirming their energy efficiency. Mechanical testing revealed the highest average compressive strength values on cubes (1.85 N/mm^2), while the lowest values were measured on cylinders (1.09 N/mm^2). The modulus of elasticity showed the highest values on cylinders (149.73 N/mm^2) and the lowest on prisms (36.41 N/mm^2). The load-bearing capacity of walls tested under out-of-plane loading was estimated at 35 kN. Moisture analysis revealed differences in moisture distribution within the walls, with an average moisture content of 2.50% at the base and 3.05% at the top. In conclusion, rammed earth walls represent sustainable and energy-efficient construction solutions, and the research results contribute to the development of standards for their broader application in construction.

Key words: C wall, thermal conductivity, out-of-plane loading, rammed earth

Sadržaj

1.	Uvod.....	5
2.	Ispitivanje zida W5-OoP na djelovanje opterećenja okomito na ravninu	5
3.	Određivanje koeficijenta toplinske provodljivosti.....	13
4.	C zid.....	16
4.1.	Ispitivanje C zida od nabijene zemlje primjenom odskočnog čekića	16
4.2	Ispitivanje tlačne čvrstoće	20
4.3	Ispitivanje vlačne čvrstoće	21
4.4	Određivanje modula elastičnosti	22
5.	Zaključak	24
	Literatura.....	24

1. Uvod

Provedeno je ispitivanje zemljanog zida W5-OoP, koji je izrađen u prethodnom razdoblju projekta i inicijalno testiran uz komoru za ispitivanje zrakopropusnosti. Ispitivanje je provedeno početkom ovog razdoblja, kako bi se dodatno analizirala zrakopropusnost i termička svojstva zida u kontroliranim uvjetima. Osim toga, zid je podvrgnut ispitivanju na djelovanje opterećenja okomito na ravninu.

Postupak građenja zida W5-OoP detaljno je opisan u izvješću za prethodno razdoblje, gdje su zabilježeni svi ključni parametri procesa izgradnje, uključujući kvalitetu korištenog materijala i tehniku izvedbe. Tijekom četvrtog razdoblja projekta nije građen nijedan novi zemljani zid uz komoru za ispitivanje zrakopropusnosti, u skladu s definiranim radnim i finansijskim planom. Fokus je bio na analizi postojećih zidova, čime su optimizirani resursi i omogućena detaljnija evaluacija prethodno izrađenih konstrukcija.

Rezultati ispitivanja zrakopropusnosti i U-vrijednosti zida W5-OoP, koji predstavljaju ključne indikatore energetske učinkovitosti i toplinske izolacije, već su objavljeni u izvješću za prethodno razdoblje. Ovi rezultati pružaju čvrstu osnovu za daljnju analizu i usporedbu sa sličnim konstrukcijama, dok se nova ispitivanja usredotočuju na dodatna opterećenja i utjecaj vremenskih uvjeta na dugoročnu trajnost zida.

2. Ispitivanje zida W5-OoP na djelovanje opterećenja okomito na ravninu

Zid dimenzija $40 \times 250 \times 250$ cm ispitana je na djelovanje opterećenja okomito na ravninu kako bi se procijenila njegova nosivost i otpornost na horizontalne sile. Opterećenje je nanošeno pomoću ručno kontrolirane hidrauličke preše, s točkom primjene smještenom na visini od dvije trećine svjetle visine zida. Kako bi se osigurala preciznost i pouzdanost mjerjenja, unos sile kontinuirano je bilježen pomoću mjerne čelije kapaciteta 200 kN.

Za potrebe detaljne analize deformacija, pomaci su mjereni u tri točke duž visine zida – na $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ i $\frac{3}{4}$ ukupne visine – i to na oba ruba zida radi bolje kontrole simetrije. Osim toga, dodatna mjerjenja pomaka provedena su u središnjoj točki zida, ispod točke unosa sile, kako bi se precizno zabilježile lokalne deformacije. Svi pomaci su mjereni pomoću LVDT senzora s hodom mjerne igle od 15 cm, čime je omogućena visoka razina preciznosti u praćenju pomaka tijekom cijelog eksperimenta.

Na slici 2.1 prikazan je raspored LVDT senzora u trenutku provedbe eksperimenta i način primjene sile hidrauličkom prešom. Sila je na zid prenošena preko drvene letve duljine 2 metra, kako bi se postiglo ravnomjerno linjsko opterećenje i osigurala vjerodostojnost simulacije stvarnih uvjeta. Opterećenje je primjenjivano monotono rastuće sve do trenutka sloma zida, što je omogućilo preciznu identifikaciju graničnog stanja nosivosti konstrukcije.

Ovaj postupak ispitivanja dao je vrijedne uvide u mehanička svojstva i otpornost zida, te je pružio podatke koji će biti korisni za daljnje analize i razvoj standarda za zidove od nabijene zemlje.

Prije početka ispitivanja, detaljno je zabilježeno stanje zida, što je prikazano na slici 2.2. Općenito je uočeno da je zid zadržao svoju cjelovitost i stabilnost, što ukazuje na dugotrajnu otpornost konstrukcije pri laboratorijskim uvjetima. Površinska oštećenja bila su minimalna, a najveći nedostaci primjećeni su na uglovima zidova, gdje su rubovi pokazivali znakove trošenja i manjeg oštećenja. Ovakva oštećenja na uglovima zidova nisu neuobičajena za

konstrukcije od nabijene zemlje, posebice kada su izložene mehaničkim utjecajima tijekom razdoblja sušenja. Ipak, pretpostavlja se da bi se redovnim održavanjem, poput sanacije oštećenih rubova primjenom kompatibilnih materijala i tehnika, mogla osigurati dugotrajna upotrebljivost ovakvih konstrukcija. Primjena vapnenog morta ili drugih materijala koji su u skladu s tradicionalnim tehnikama mogla bi dodatno pridonijeti trajnosti i otpornosti zidova.



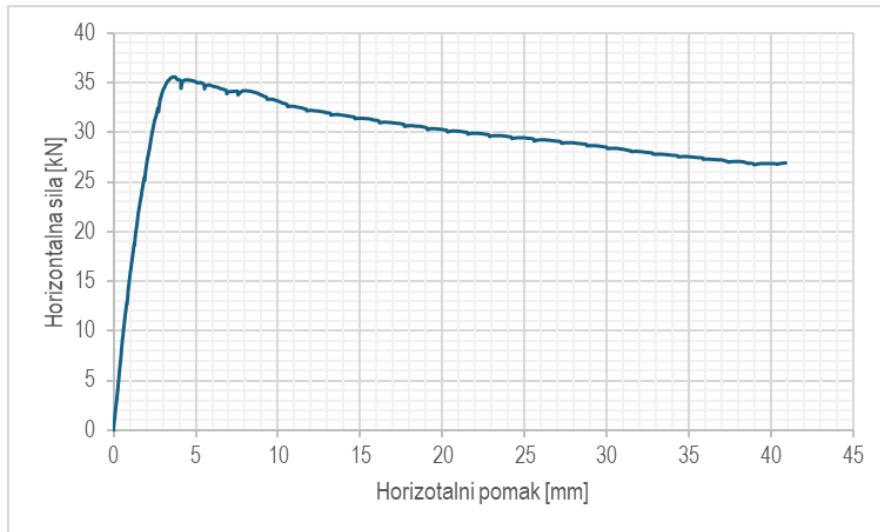
Slika 2.1 Zid od nabijene zemlje prije ispitivanja s postavljenim mjernim instrumentima

Zabilježeno stanje zidova u ovoj fazi istraživanja pruža vrijedan uvid u ponašanje konstrukcija od nabijene zemlje tijekom vremena. Dobiveni podaci ukazuju na to da, uz pravilno održavanje i povremene sanacije, zidovi izrađeni ovom tehnikom mogu osigurati dugotrajanu stabilnost i funkcionalnost, čak i u zahtjevnim uvjetima. Ovo zapažanje dodatno potvrđuje potencijal zidova od nabijene zemlje kao održivih i pouzdanih građevinskih rješenja.



Slika 2.2 Stanje zida od nabijene zemlje prije rušenja

Sposobnost nosivosti zida na djelovanje opterećenja izvan ravnine određeno je na temelju unesene sile i pomaka mjerenoj LVDT-om u centru zida. Na slici 2.3, prikazana je sposobnost nosivosti zida gdje je vidljiva nosivost od 35 kN.



Slika 2.3 Sposobnost nosivosti zida od nabijene zemlje na djelovanje izvan ravnine

Nakon ispitivanja zidova, uzeti su uzorci za određivanje vlažnosti u trenutku ispitivanja. Za zidove uzeti su uzorci podnožju zida, na visini od 50 cm od podnožja zida, u težištu zida te pri vrhu zida. Određene vlažnosti prikazane su u tablici 2.1.

Tablica 2.1 Vlažnost zidova od nabijene zemlje na dan ispitivanja (mjereno nakon rušenja)

	#1	#2	#3
Podnožje zida (%)	2,49	2,17	2,83
Prosječna vlažnost (%)		2,50	
50 cm od podnožja (%)	1,87	1,54	1,89
Prosječna vlažnost (%)		1,77	
Težište zida (%)	1,43	2,57	1,96
Prosječna vlažnost (%)		1,99	
Vrh zida (%)	3,38	3,17	2,61
Prosječna vlažnost (%)		3,05	

Tijekom ispitivanja zida, zabilježeno je da se slom dogodio u podnožju, pri čemu je cijeli zid srušen kao blok, što je prikazano na slici 2.4. Ova pojava ukazuje na koncentraciju naprezanja u donjim dijelovima konstrukcije, što je rezultiralo naglim kolapsom.

Nakon rušenja zida, primjećeno je raslojavanje gornjih dijelova konstrukcije, dok je podnožje zida uglavnom ostalo cjelovito, kako je prikazano na slici 2.5. Ovaj obrazac sloma ukazuje na razlike u strukturnim svojstvima između različitih dijelova zida, vjerojatno uzrokovane varijacijama u zbijenosti, vlažnosti materijala ili vezivanju slojeva tijekom izgradnje.

Sličan oblik sloma zabilježen je i tijekom terenskih istraživanja provedenih u prethodnom razdoblju projekta. Na terenu su također uočena raslojavanja zidova od nabijene zemlje, no za razliku od laboratorijskih ispitivanja, nije pronađeno cjelovitih dijelova zida nakon urušavanja. Ovo može ukazivati na veće degradacijske učinke okolišnih uvjeta, poput oborina, vjetra i temperaturnih promjena, koji su mogli dodatno oslabiti zidove tijekom vremena.

Ovi nalazi naglašavaju važnost laboratorijskih ispitivanja za detaljno razumijevanje ponašanja konstrukcija od nabijene zemlje te ističu potrebu za dodatnim istraživanjima o utjecaju okolišnih čimbenika na njihovu trajnost i stabilnost.



Slika 2.4 Pogled na zid W5-OoP tijekom ispitivanja (komad drvene grede poslužio je kao pridržanje kako se zid ne bi vratio u početni položaj)



Slika 2.5 Zid W5-OoP nakon rušenja

Prilikom izrade zida uz komoru za ispitivanje zrakopropusnosti u prethodnom razdoblju projekta, izrađeni su i uzorci za određivanje mehaničkih svojstava zidova od nabijene zemlje. Tom je prilikom izrađeno tri kocke ($15 \times 15 \times 15$ cm) tri valjaka (15×30 cm) te tri prizme ($4 \times 4 \times 16$ cm), pri čemu su kocke i valjci planirani za ispitivanje tlačne sile (Slika 2.6 i Slika 2.7), dok je na uzorcima prizmi prvo određena vlačna čvrstoća (Slika 2.8), a potom na preostalim polovicama i tlačna čvrstoća (Slika 2.9). Uzorci su godinu dana čuvani u komori za sušenje uzoraka na temperaturi 25 ± 5 °C i RH 65 ± 5 %. Ispitivanje uzoraka kocaka i valjaka je provedeno koristeći uređaj Shimatzu AG-X kapaciteta 300 kN, dok su uzorci prizmi ispitani koristeći uređaj manjeg kapaciteta (Shimatzu AG-X kapaciteta 50 kN). Unos opterećenja proveden je kontrolom pomaka 1 mm/min.

Prije ispitivanja, svaki je uzorak precizno izmjerен kako bi se mogla odrediti čvrstoća prema izrazu (1). Uz to, iz sredine svakog ispitnog uzorka izdvojeno je nešto više od 100 grama materijala, za potrebe određivanja vlažnosti prilikom ispitivanja.

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

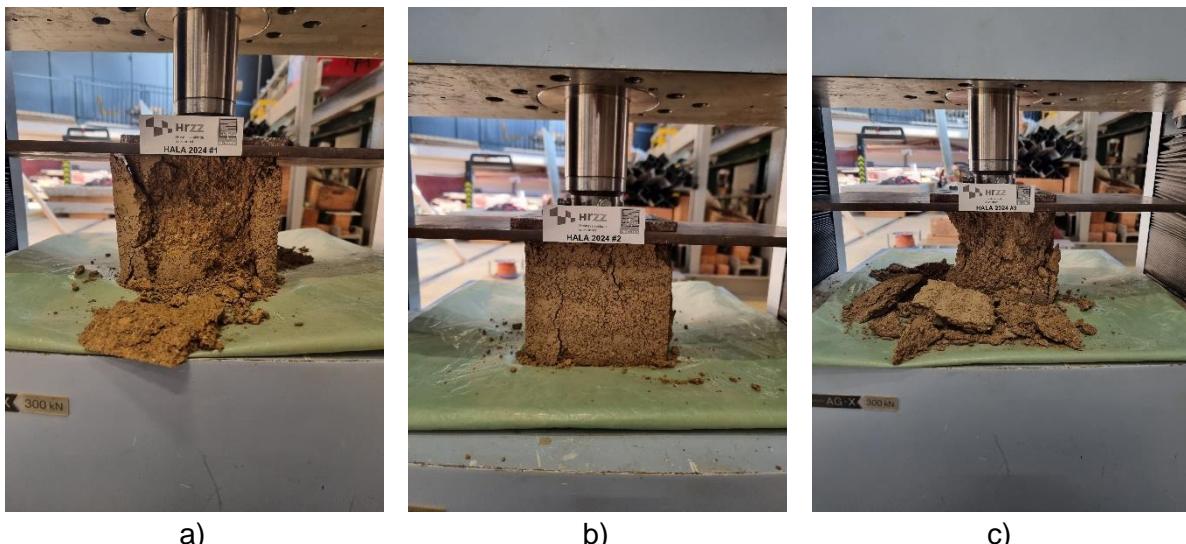
gdje je: f_c – tlačna čvrstoća, F_{\max} – najveća postignuta sila prilikom ispitivanja, A – površina plohe na koju djeluje sila.

Modul elastičnosti proračunan je na temelju 30 % vrijednosti tlačne čvrstoće (Silva et al., 2013, 2016, 2018), prema Hookeovom zakonu (2)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

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

Tlačna čvrstoća ispitana je na tri uzorka kocke (slika 2.6) i tri uzorka valjka (slika 2.7):



Slika 2.6 Ispitivanje tlačne čvrstoće na kockama

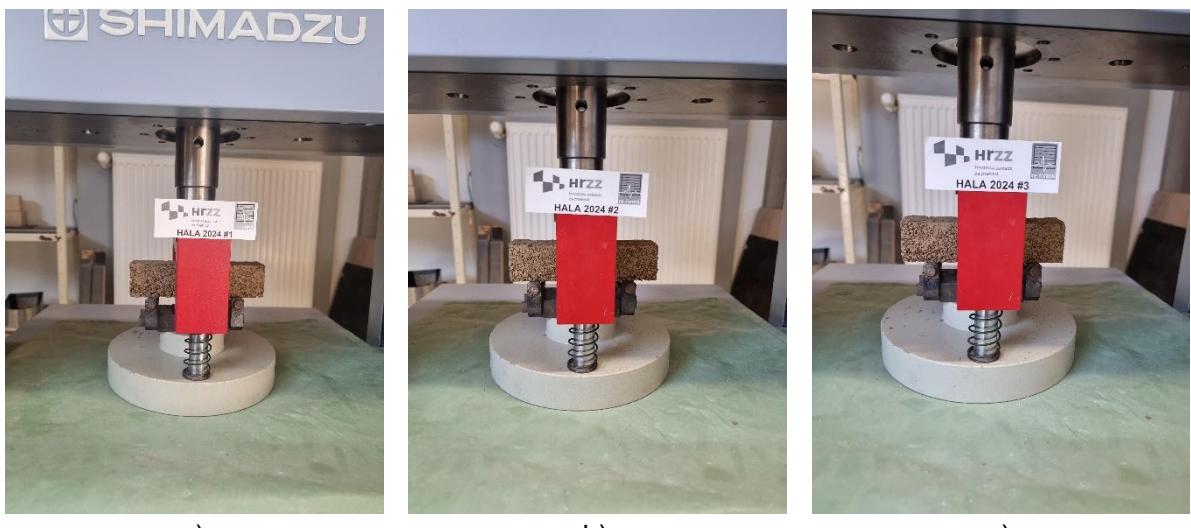


a)

b)

c)

Slika 2.7 Ispitivanje tlačne čvrstoće na valjcima



a)

b)

c)

Slika 2.8 Ispitivanje vlačne čvrstoće na prizmama



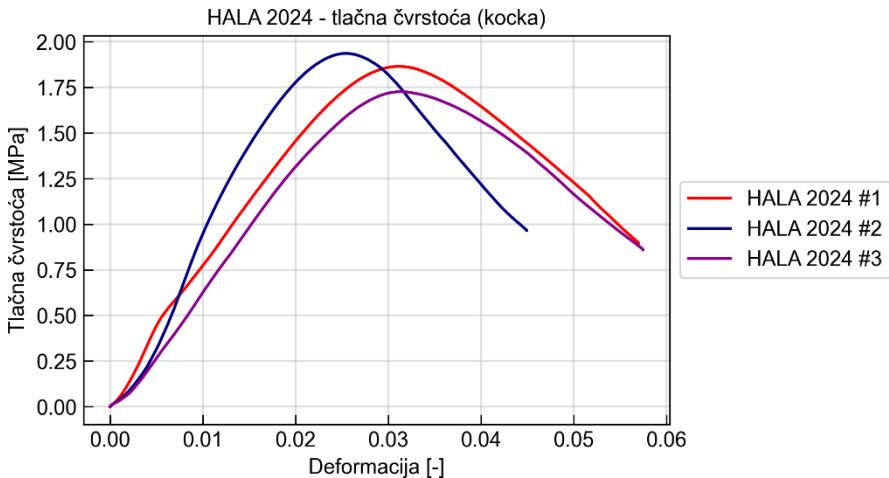
a)

b)

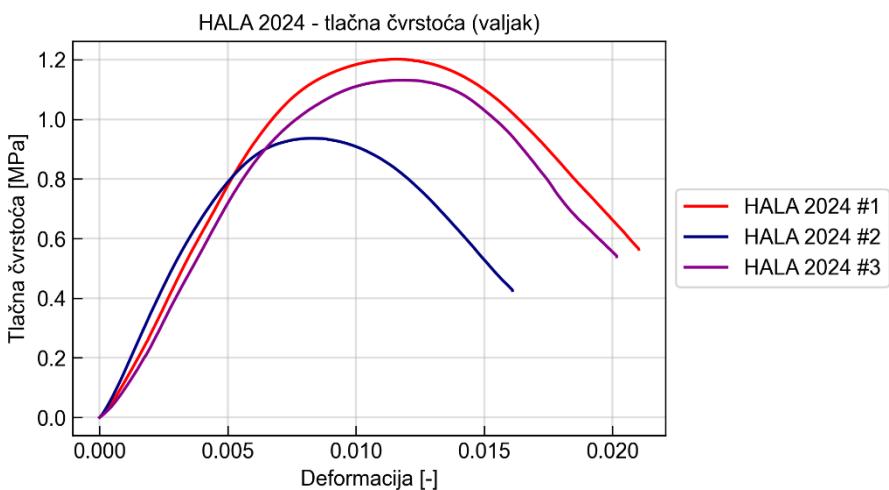
c)

Slika 2.9 Ispitivanje tlačne čvrstoće na prizmama

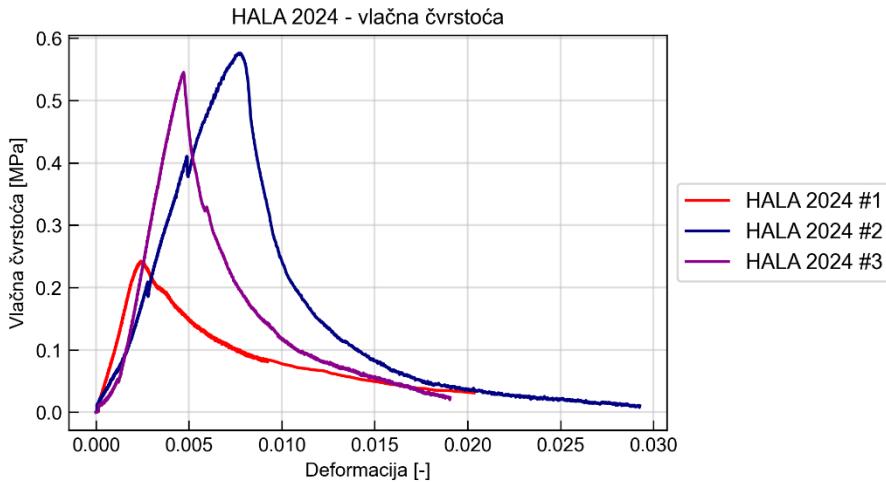
Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama i valjcima grafički su prikazani na slikama 2.10 i 2.11. U tablici 2.2 sažeto su prikazane čvrstoće uzoraka te prosječna čvrstoća određena na svakom setu uzoraka, kao i modul elastičnosti određen na temelju podataka o ispitivanju tlačne čvrstoće na svakom uzorku. U tablici 2.3 prikazane su vrijednosti vlažnosti za svaki ispitni uzorak.



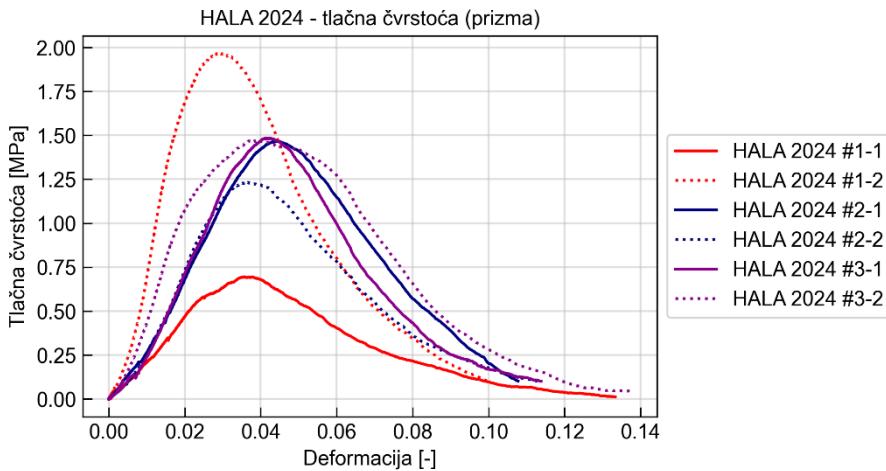
Slika 2.10 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama



Slika 2.11 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na valjcima



Slika 2.12 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće na prizmama



Slika 2.13 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na prizmama

Tablica 2.2 Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće

	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (MPa)	1,87	1,94	1,73
Srednja tlačna čvrstoća – kocka (MPa)			1,85
Tlačna čvrstoća – valjak (MPa)	1,20	0,94	1,13
Srednja tlačna čvrstoća – valjak (MPa)			1,09
Tlačna čvrstoća – prizma (MPa)	1,33	1,35	1,48
Srednja tlačna čvrstoća – prizma (MPa)			1,39
Vlačna čvrstoća – prima (MPa)	0,24	0,58	0,54
Srednja vlačna čvrstoća – prizma (MPa)			0,45
Modul elastičnosti – kocka (MPa)	84,70	80,18	60,21
Srednji modul elastičnosti – kocka (MPa)			75,03
Modul elastičnosti – valjak (MPa)	146,97	171,71	130,51
Srednji modul elastičnosti – valjak (MPa)			149,73
Modul elastičnosti – prizma (MPa)	42,68	29,60	36,96
Srednji modul elastičnosti – prizma (MPa)			36,41

Tablica 2.3 Rezultati vlažnosti ispitnih uzoraka

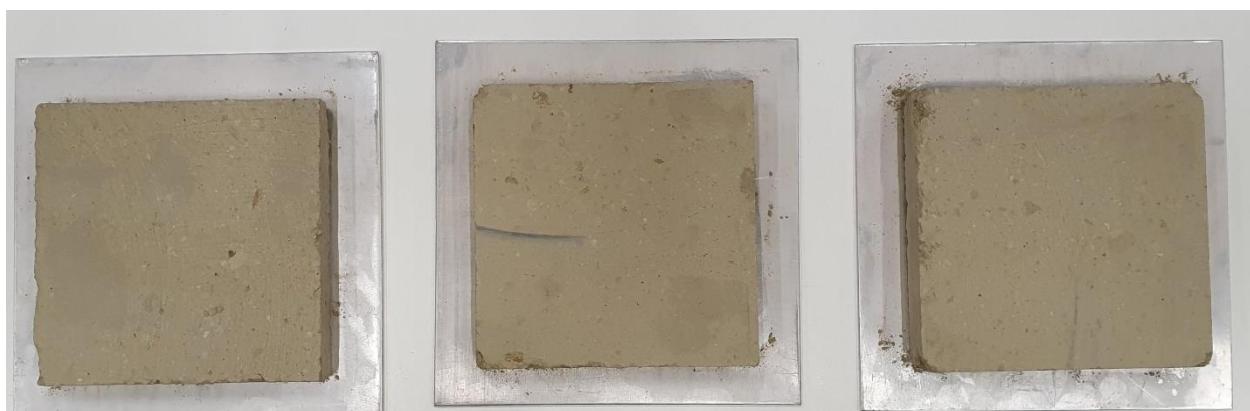
	#1	#2	#3
Kocka (%)	3,00	2,92	2,71
Prosječna vlažnost (%)		2,88	
Valjak (%)	2,73	2,45	2,64
Prosječna vlažnost (%)		2,61	
Prizma (%)	2,08	2,25	2,10
Prosječna vlažnost (%)		2,14	

3. Određivanje koeficijenta toplinske provodljivosti

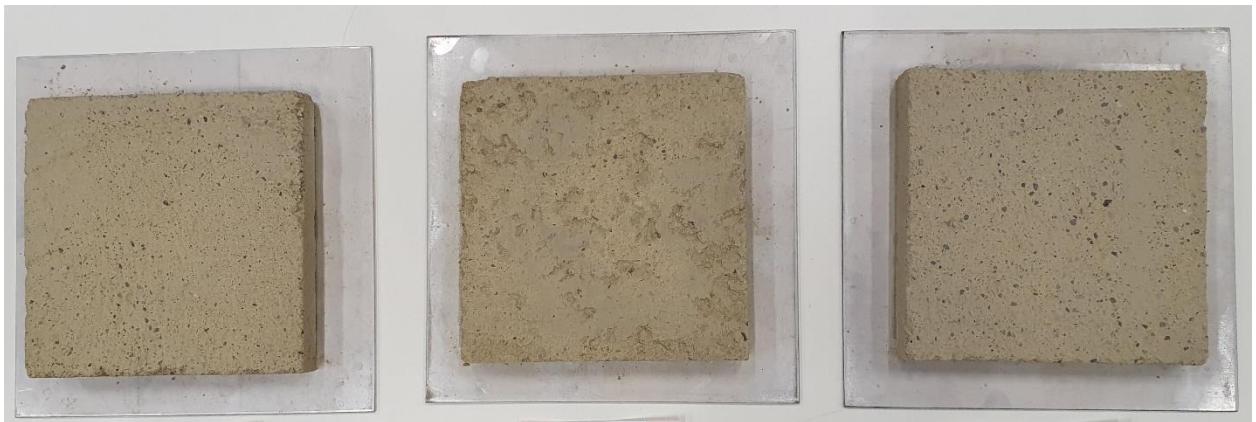
Koeficijent toplinske provodljivosti određen je na uzorcima oblika kvadra, tlocrtnih dimenzija 150 x 150 mm te debljine 25 – 30 mm. Ispitivanje je provedeno primjenom uređaja FOX200 koji koristi ustaljenu tehniku za određivanje koeficijenta toplinske provodljivosti.

Provjedeno je određivanje koeficijenta toplinske provodljivosti za pet skupina uzoraka koji su stari 2 godine (slike 3.1 – 3.5). Provjedeno je i ispitivanje toplinske provodljivosti uzorka izrađenih od materijala od kojega su izrađeni i zidovi W9 – W12 (slika 3.6).

Na slikama 3.1 – 3.6 prikazani su uzorci na kojima je ispitana koeficijent toplinske provodljivosti. Slike su za sve uzorce izrađene nakon provedenog ispitivanja. Za svaku od 6 mješavina izrađeno i ispitano je po tri uzorka.



Slika 3.1 Uzorci nakon određivanja koeficijenta toplinske provodljivosti - reprezentativni uzorci izgrađenih zidova (EM hala rec)



Slika 3.2 Uzorci nakon određivanja koeficijenta toplinske provodljivosti - reprezentativni uzorci izgrađenih zidova
(60V+40T+4vap)



Slika 3.3 Uzorci nakon određivanja koeficijenta toplinske provodljivosti - reprezentativni uzorci izgrađenih zidova
(M3_10_11)



Slika 3.4 Uzorci nakon određivanja koeficijenta toplinske provodljivosti - reprezentativni uzorci izgrađenih zidova
(W1)



Slika 3.5 Uzorci nakon određivanja koeficijenta toplinske provodljivosti - reprezentativni uzorci izgrađenih zidova (W3)



Slika 3.6 Uzorci nakon određivanja koeficijenta toplinske provodljivosti – materijal za zidove W9-W12

Za svaki uzorak određena je srednja vrijednost koeficijenta toplinske provodljivosti. U Tablici 3.1 prikazane su srednje vrijednosti za svaki uzorak te prosječne vrijednosti za svaku ispitivanu mješavinu.

Tablica 3.1 Rezultati ispitivanja koeficijenta toplinske provodljivosti

Mješavina (interna oznaka zida)	Starost uzorka	Uzorak			Prosječna vrijednost λ (W/mK)
		#1	#2	#3	
EM hala rec	24 mjeseca	0,5272	0,6490	0,6711	0,6158
60V+40T+4vap	24 mjeseca	0,4756	0,4271	0,4690	0,4572
M3_10_11	24 mjeseca	0,3678	0,3325	0,3853	0,3619
W1	24 mjeseca	0,6061	0,5795	0,6289	0,6048
W3	24 mjeseca	0,6631	0,4797	0,6176	0,5868
W9-12	6 mjeseci	0,2773	0,3787	0,3768	0,3443

Vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti određene na uzorcima od nabijene zemlje starim 24 mjeseca kreću se u granicama od 0,3325 W/mK do 0,6711 W/mK. Usporedbom s podacima danim u Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, uzorci od nabijene zemlje bilježe bolje toplinske karakteristike i od armiranog betona ($\lambda = 2,6$ W/mK) i od pune opeke ($\lambda = 0,81$ W/mK), no lošije u odnosu na stiropor ($\lambda = 0,032 - 0,04$ W/mK).

4. C zid

Ispitivanje svojstava nabijene zemlje, uključujući tlačnu čvrstoću, vlačnu čvrstoću i modul elastičnosti, provedeno je na uzorcima u obliku kocki, valjaka i prizmi starim 28 dana. Uzorci su izrađeni od materijala dobivenog rušenjem prvog ispitivanog zida, čime se omogućilo ponovno korištenje materijala za analizu njegovih svojstava. Ovaj pristup ne samo da doprinosi održivosti istraživanja, već pruža i vrijedne podatke o promjenama svojstava materijala nakon ponovne obrade.

Tlačna čvrstoća ispitana je i sklerometrom na zidovima izrađenim od nabijene zemlje. Sklerometar je uređaj za određivanje tvrdoće materijala, a temelji se na mjerenu veličine povratnog odbijanja utega unutar uređaja. Na temelju veličine povratnog odbijanja može se procijeniti tlačna čvrstoća materijala. Ova metoda pruža brz i neinvazivan način procjene svojstava konstrukcija in-situ, čime se smanjuje potreba za destruktivnim ispitivanjima.

Rezultati ovih ispitivanja omogućili su detaljan uvid u mehanička svojstva zida i pokazali potencijal ponovnog korištenja materijala od nabijene zemlje. Kombinacija laboratorijskih ispitivanja na uzorcima i ispitivanja na stvarnim konstrukcijama dodatno doprinosi razumijevanju ponašanja materijala pod različitim uvjetima te pruža temelje za daljnja istraživanja i poboljšanja tehnika izgradnje. Ovakav pristup naglašava važnost integracije suvremenih metoda ispitivanja s tradicionalnim građevinskim tehnikama za postizanje održivih i otpornijih konstrukcija.

4.1. Ispitivanje C zida od nabijene zemlje primjenom odskočnog čekića

Provadena su ispitivanja kako bi se odredila tlačna čvrstoća na dva zida od nabijene zemlje in-situ. Tlačna čvrstoća određena je pomoću Schmidt OS-120 sklerometra (slika 4.1.1), uređaja za nedestruktivno ispitivanje mekih građevinskih materijala s tlačnom čvrstoćom manjom od 5 MPa. Ova metoda omogućava brzu i neinvazivnu procjenu čvrstoće, bez potrebe za uzimanjem uzorka ili oštećivanjem konstrukcije.

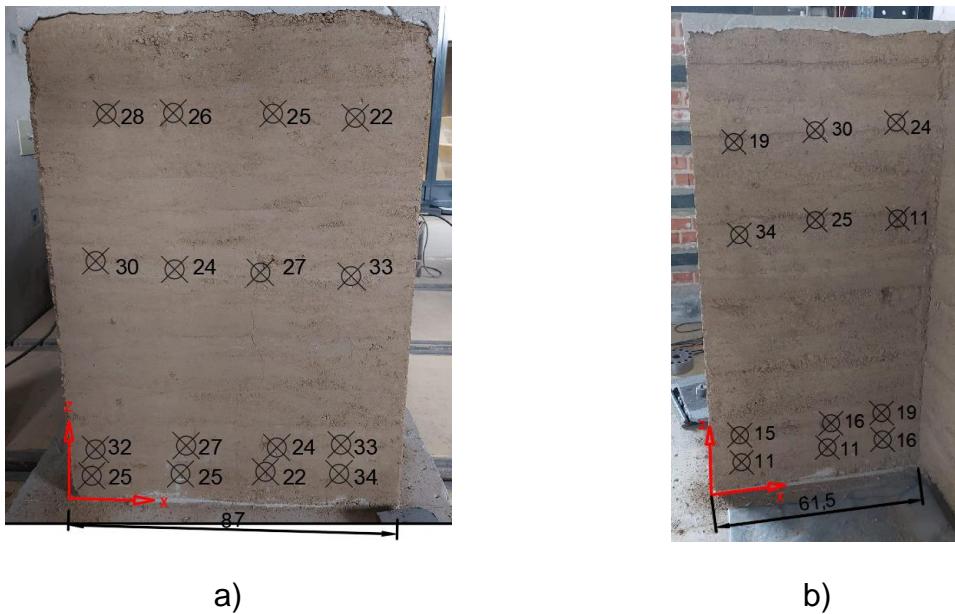


Slika 4.1.1 Schmidt OS-120



Slika 4.1.2 C zid

Na svakom zidu tlačna čvrstoća ispitana je u četiri razine visine. Na vanjskoj strani zida ispitivane su četiri točke u jednoj ravnini, dok su na unutarnjoj strani ispitane tri točke u ravnini na lijevom i desnom dijelu zida (prikazano na slici 1.2). U sredini zida, na vanjskoj i unutarnjoj strani, provedeno je ispitivanje na četiri točke u jednoj ravnini. Ovakva mreža mjernih točaka osigurava reprezentativne podatke o distribuciji tlačne čvrstoće po cijeloj površini zida.



Slika 4.1.3 Ljevi dio zida s vrijednostima povratnog odbijanja na ispitivanim točkama a) vanjska strana b) unutarnja strana

Tablica 4.1.1 Tlačna čvrstoća za ispitivane razine na vanjskoj strani lijevog dijela zida

Razina	1	2	3	4
Prosječna vrijednost odskoka	26,50	29,00	28,50	25,25
Tlačna čvrstoća (N/mm^2)	2,41	2,82	2,79	2,21

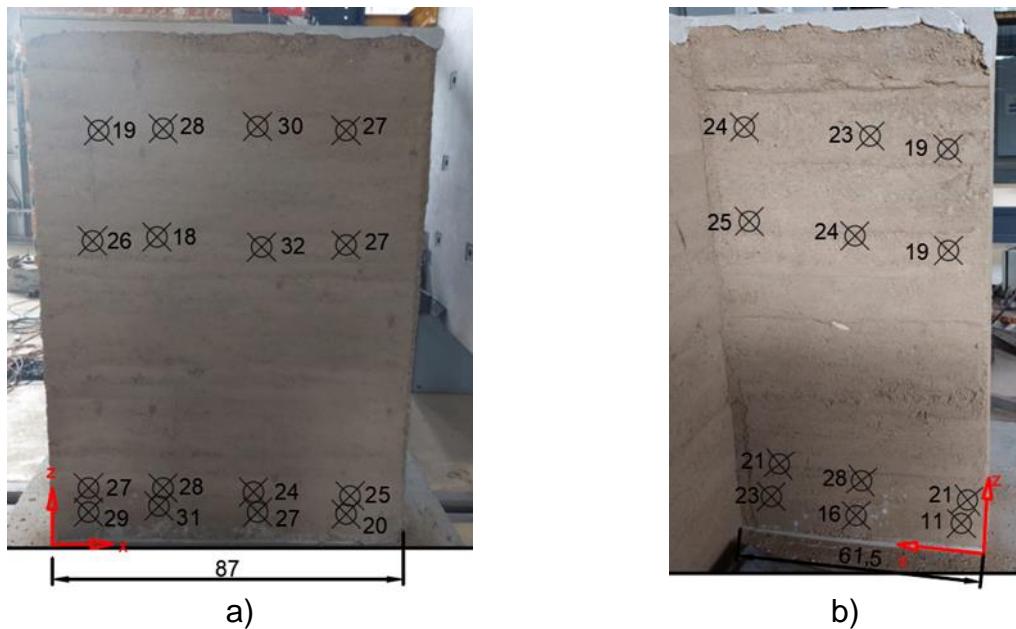
Tablica 4.1.2 Tlačna čvrstoća za ispitivane razine na unutarnjoj strani lijevog dijela zida

Razina	1	2	3	4
Prosječna vrijednost odskoka	12,67	16,67	23,33	24,33
Tlačna čvrstoća (N/mm^2)	0,72	1,16	1,98	2,16

Posebno je zanimljivo da je lijevi dio zida, okrenut prema prozoru i istočnom smjeru, pokazao značajne razlike u čvrstoći između vanjske i unutarnje površine. Vanjska površina izložena sunčevoj svjetlosti imala je veću tlačnu čvrstoću od $2,56 \text{ N/mm}^2$, dok je unutarnja površina, zaštićena od sunca, imala znatno manju tlačnu čvrstoću od $1,51 \text{ N/mm}^2$. Osim niže čvrstoće, unutarnja površina pokazala je i veću varijaciju izmjerenih vrijednosti čvrstoće, što ukazuje na potencijalni utjecaj vlage ili temperturnih razlika na svojstva materijala.

Ovi rezultati ukazuju na važnost okolišnih čimbenika, poput izloženosti sunčevoj svjetlosti, na mehanička svojstva zidova od nabijene zemlje. Dodatna istraživanja mogla bi pružiti dublje razumijevanje utjecaja mikroklimatskih uvjeta na trajnost i performanse ovakvih konstrukcija te doprinijeti razvoju smjernica za optimalnu izvedbu i održavanje zidova od nabijene zemlje.

Vanjska površina desnog dijela zida ima tlačnu čvrstoću od $2,58 \text{ N/mm}^2$. S druge strane, unutarnja površina desnog dijela zida pokazala je nižu tlačnu čvrstoću od $1,70 \text{ N/mm}^2$. Ova razlika ukazuje na potencijalni utjecaj vanjskih uvjeta, poput izloženosti sunčevoj svjetlosti ili vremenskim utjecajima, na poboljšanje čvrstoće vanjskih slojeva zida.



Slika 4.1.4 Desni dio zapadnog zida s vrijednostima povratnog odbijanja na ispitivanim točkama
a) vanjska strana
b) unutarnja strana

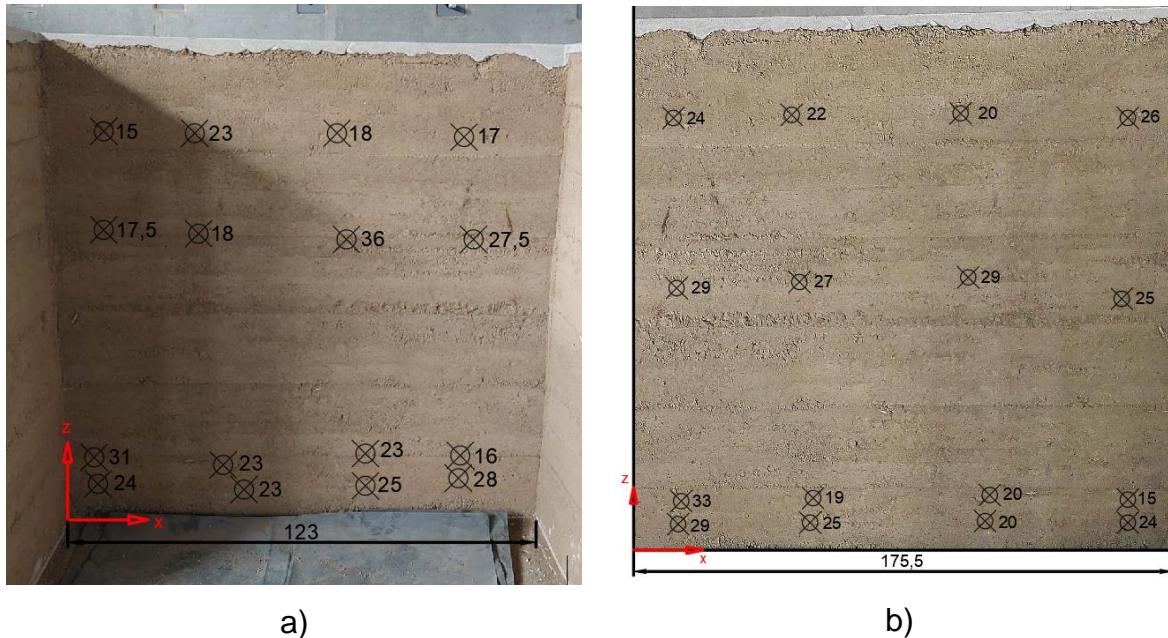
Tablica 4.1.3 Tlačna čvrstoća za ispitivane razine na vanjskoj strani desnog dijela zida

Razina	1	2	3	4

Prosječna vrijednost odskoka	26,75	26,00	25,75	26,00
Tlačna čvrstoća (N/mm ²)	2,61	2,58	2,56	2,58

Tablica 4.1.4 Tlačna čvrstoća za ispitivane razine na unutarnjoj strani desnog dijela zida

Razina	1	2	3	4
Prosječna vrijednost odskoka	16,67	23,33	22,67	22,00
Tlačna čvrstoća (N/mm ²)	1,16	1,98	1,86	1,80



Slika 4.1.5 Središnji dio zida s vrijednostima povratnog odbijanja na ispitivanim točkama a) unutarnja strana b) vanjska strana

Tablica 4.1.5 Tlačna čvrstoća za ispitivane razine na unutarnjoj strani središnjeg dijela zida

Razina	1	2	3	4
Prosječna vrijednost odskoka	25,00	23,25	24,75	18,25
Tlačna čvrstoća (N/mm ²)	2,20	1,97	2,13	1,37

Tablica 4.1.6 Tlačna čvrstoća za ispitivane razine na vanjskoj strani središnjeg dijela zida

Razina	1	2	3	4
Prosječna vrijednost odskoka	24,50	21,75	27,50	23,00

Tlačna čvrstoća (N/mm ²)	2,10	1,77	2,58	1,86
--------------------------------------	------	------	------	------

Tlačna čvrstoća na unutarnjoj strani zida iznosi $1,92 \text{ N/mm}^2$, dok na vanjskoj strani iznosi $2,08 \text{ N/mm}^2$.

4.2 Ispitivanje tlačne čvrstoće

Tlačna čvrstoća pripremljenih uzoraka (slika 4.2.1) ispitana je pomoću preše na kockama, valjcima i polovicama prizmi. Vrijednosti tlačne čvrstoće prikazane su u tablici 4.2.1.



Slika 4.2.1 Uzorci na kojima je ispitivana tlačna čvrstoća: kocka dimenzija $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ (lijevo) i valjak dimenzija $150 \times 300 \text{ mm}$ (desno)

Tablica 4.2.1 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka od nabijene zemlje

Oznaka	geometrija (mm)	starost (dana)	masa (kg)	gustoća (kg/m ³)	vlažnost (%)	najveća sila (N)	tlačna čvrstoća (N/mm ²)
kocka	#1		7,28	2157,04	3,00	43525,27	1,93
	#2		7,06	2091,85	2,92	43617,59	1,94
	#3		7,16	2121,48	2,71	38864,47	1,73
valjak	#1		11,05	2084,34	2,73	22280,79	1,26
	#2		10,43	1967,39	2,45	17852,40	1,01
	#3		11,20	2112,63	2,64	20580,05	1,16
prizma	#1	28	0,506	1976,56	2,08	1178,46	0,74
	#2					3380,30	2,11
	#3					2052,21	1,28
	#4					2532,01	1,58
	160x40x40		0,496	1937,50	2,25	2522,52	1,58
			0,504	1968,75	2,10	2505,92	1,57
			0,499	1949,23	2,29	2474,69	1,55

				3241,06	2,03
#5	0,517	2019,53	2,19	3368,47	2,11
				3878,83	2,42
#6	0,484	1890,63	2,19	1952,22	1,22
				2422,38	1,51

Izračunate su srednje vrijednosti i standardne devijacije tlačne čvrstoće za ispitivane uzorke. Vrijednosti su prikazane u tablici 4.2.2. Najveća srednja vrijednost tlačne čvrstoće dobivena je na kockama, dok je najmanja zabilježena na valjcima. Najveće oscilacije u vrijednostima tlačne čvrstoće uočene su na polovicama prizmi, s rasponom od 0,74 do 2,42 N/mm².

Tablica 4.2.2 Srednja vrijednost i standardna devijacija tlačne čvrstoće

Uzorak	tlačna čvrstoća (N/mm ²)	prosječna tlačna čvrstoća (N/mm ²)	standardna devijacija tlačne čvrstoće (N/mm ²)
Kocka	1,93	1,87	0,12
	1,94		
	1,73		
Valjak	1,26	1,14	0,13
	1,01		
	1,16		
	0,74		
	2,11		
	1,28		
	1,58		
	1,58		
	1,57		
	1,55		
Prizma	2,03	1,64	0,46
	2,11		
	2,42		
	1,22		
	1,51		

Srednja vrijednost tlačne čvrstoće dobivena na kockama i prizmama veća je od vrijednosti dobivene ispitivanjem zida sklerometrom.

4.3 Ispitivanje vlačne čvrstoće

Vlačna čvrstoća ispitivana je savijanjem na prizmama dimenzija 160 × 40 × 40 mm (slika 4.3.1). Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.3.1.



Slika 4.3.1 Ispitivanje vlačne čvrstoće uzorka od nabijene zemlje

Tablica 4.3.1 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće uzorka od nabijene zemlje

oznaka uzorka	geometrija (cm)	starost (dana)	udaljenost između oslonaca (cm)	najveća sila (N)	vlačna čvrstoća (N/mm ²)
#1				68,47	0,11
#2				161,39	0,25
#3				149,80	0,23
#4	16x4x4	28	10	94,87	0,15
#5				177,80	0,28
#6				108,24	0,20

Tablica 4.3.2 Srednja vrijednost i standardna devijacija vlačne čvrstoće

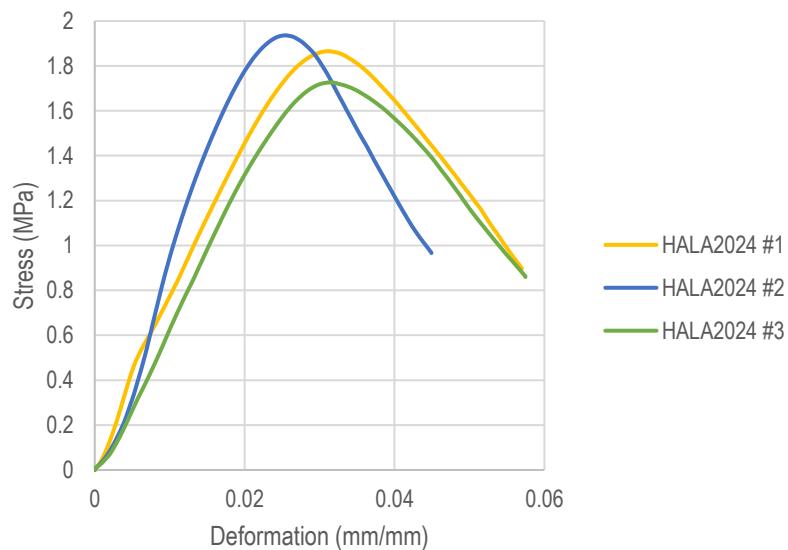
uzorak	vlačna čvrstoća (N/mm ²)	prosječna vlačna čvrstoća (N/mm ²)	standardna devijacija vlačne čvrstoće (N/mm ²)
prizma	0,11	0,20	0,063
	0,25		
	0,23		
	0,15		
	0,28		
	0,20		

Srednja vrijednost vlačne čvrstoće iznosi 12 % srednje vrijednosti tlačne čvrstoće dobivene na prizmama.

4.4 Određivanje modula elastičnosti

S obzirom na to da je modul elastičnosti uzorka tla teže odrediti primjenom standardnih metoda, njegova procjena izvršena je na temelju dijagrama naprezanje-

deformacija tijekom ispitivanja tlačne čvrstoće. Na dijagramu naprezanje-deformacija (slika 4.4.1) očitana je deformacija koja odgovara 40 % maksimalne vrijednosti tlačne čvrstoće. Modul elastičnosti procijenjen je za kocke, valjke i prizme (tablica 4.4.1). Izračunati modul elastičnosti predstavlja procjenu, pri čemu je potrebno uzeti u obzir određenu razinu nepouzdanosti koja može utjecati na konačne zaključke i primjenu u praksi.



Slika 4.4.1 Dijagram naprezanje-deformacija dobiven ispitivanjem tlačne čvrstoće kocki (primjer dijagrama)

Tablica 4.4.1 Modul elastičnosti uzoraka od nabijene zemlje

	oznaka uzorka	modul elastičnosti (MPa)
kocka	#1	84,70
	#2	80,18
	#3	60,21
valjek	#1	146,97
	#2	171,71
	#3	130,51
prizma	#1	21,29
		64,07
	#2	29,08
		30,11
	#3	30,41
		43,51
	#4	41,11
		58,72
	#5	55,09
		61,20
	#6	31,20
		39,16

5. Zaključak

Glavni ciljevi istraživanja uključivali su određivanje koeficijenta toplinske provodljivosti, zrakopropusnosti te otpornosti zidova na djelovanje opterećenja okomito na ravninu. Osim toga, istraživane su tlačna i vlačna čvrstoća, kao i modul elastičnosti različitih uzoraka izrađenih od nabijene zemlje.

Rezultati ispitivanja zrakopropusnosti pokazali su da zidovi od nabijene zemlje zadržavaju zadovoljavajuću razinu izolacije i energetske učinkovitosti, dok su rezultati koeficijenta toplinske provodljivosti potvrdili bolja svojstva u usporedbi s tradicionalnim građevinskim materijalima poput opeke i betona. Vrijednosti toplinske provodljivosti uzorka starosti 24 mjeseca kretale su se od $0,3325 \text{ W/mK}$ do $0,6711 \text{ W/mK}$, što ukazuje na visoku potencijalnu učinkovitost ovog materijala u modernim građevinskim praksama.

Ispitivanje tlačne čvrstoće i modula elastičnosti provedeno je na uzorcima različitih oblika, uključujući kocke, valjke i prizme. Najveće srednje vrijednosti tlačne čvrstoće zabilježene su na kockama ($1,85 \text{ N/mm}^2$), dok su najmanje vrijednosti izmjerene na valjcima ($1,09 \text{ N/mm}^2$). Moduli elastičnosti također su pokazali varijacije, s najvećim vrijednostima na valjcima ($149,73 \text{ N/mm}^2$) i najmanjim na prizmama ($36,41 \text{ N/mm}^2$). Ova raznolikost ukazuje na utjecaj geometrije uzorka na mehanička svojstva.

Eksperimentalna ispitivanja zidova na djelovanje opterećenja okomito na ravninu omogućila su procjenu nosivosti konstrukcija. Maksimalna nosivost zabilježena je pri opterećenju od 35 kN , dok su deformacije mjerjenjem pomoću LVDT senzora otkrile konzistentnost u ponašanju zidova pod opterećenjem. Slična ispitivanja u laboratorijskim i terenskim uvjetima pokazala su raslojavanje gornjih dijelova zida, dok su podnožja ostala cijelovita, što ukazuje na ključnu ulogu kvalitete izvedbe i održavanja u trajnosti konstrukcija.

Tijekom ispitivanja vlažnosti uzoraka zabilježene su razlike u vlažnosti između različitih dijelova zidova i uzorka. Vlažnost pri podnožju zidova iznosila je u prosjeku $2,50 \%$, dok je na vrhovima zidova zabilježena prosječna vlažnost od $3,05 \%$. Ovi podaci pružaju važne uvide u raspodjelu vlage u konstrukcijama i njezin utjecaj na mehanička svojstva.

Zaključno, rezultati istraživanja potvrđuju da su zidovi od nabijene zemlje, uz pravilnu pripremu materijala i tehnike izrade, održiva i učinkovita konstrukcijska rješenja za energetski učinkovite zgrade u seizmički aktivnim područjima. Dodatna istraživanja trebala bi se fokusirati na dugoročno praćenje trajnosti ovakvih konstrukcija, kao i na optimizaciju materijala za još bolju otpornost i održivost u promjenjivim uvjetima okoliša. Rezultati ovog projekta postavljaju temelje za razvoj normi i standarda koji će omogućiti širu primjenu nabijene zemlje u suvremenoj gradnji.

Literatura

Minke, G. (2013). Building with Earth. *Building with Earth*. <https://doi.org/10.1515/9783034608725>

Silva, R. A., Domínguez-Martínez, O., Oliveira, D. v., & Pereira, E. B. (2018). Comparison of the performance of hydraulic lime- and clay-based grouts in the repair of rammed earth. *Construction and Building Materials*, 193, 384–394. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.207>

Silva, R. A., Oliveira, D. v., Miranda, T., Cristelo, N., Escobar, M. C., & Soares, E. (2013). Rammed earth construction with granitic residual soils: The case study of northern Portugal. *Construction and Building Materials*, 47, 181–191. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.047>

Silva, R. A., Oliveira, D. v., Schueremans, L., Miranda, T., & Machado, J. (2016). Effectiveness of the repair of unstabilised rammed earth with injection of mud grouts. *Construction and Building Materials*, 127, 861–871. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.064>

Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (Translation: Technical Regulation on the Rational Use of Energy and Thermal Insulation in Buildings). Narodne novine, broj 128/15, 70/18, 73/18, 86/18, 102/20