

RE-forMS

rammed earth for modelling and standardization
in seismically active areas



Zidovi uz komoru za ispitivanje zrakopropusnosti	
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:	doc. dr. sc. Ivan Kraus
Izveštajno razdoblje:	1. razdoblje
Oznaka izvještaja:	D6
Sadržaj:	Izrada zidova uz komoru za ispitivanje zrakopropusnosti. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće zidova pomoću udarnog čekića te preliminarni rezultati ispitivanja koeficijenta prolaska topline.
Autori izvještaja:	Ana Perić, doc. dr. sc. Ivan Kraus, Mihaela Domazetović, doc. dr. sc. Marin Grubišić
Datum:	3. 1. 2022.

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:

Uz komoru za ispitivanje zrakopropusnosti izgrađena su dva zida od nabijene zemlje, različite debljine (40 i 50 cm), kako bi se prilikom ispitivanja provjerio utjecaj debljine zida na rezultate. Zidovi su izgrađeni primjenom osnovnog tla tijekom pet radnih dana. Izvođenje je provedeno tradicionalnom tehnikom, nabijanjem pomoću drvenog i/ili čeličnog nabijača, unutar daščane oplata. Nakon skidanja oplata, zadržani su potpornji koji osiguravaju stabilnost zida. Ispitivanje zrakopropusnosti zidova započeto je krajem prvog razdoblja planiran nastavak je u početnim mjesecima idućeg izvještajnog razdoblja.

Zidovi su ispitani udarnim čekićem kako bi se odredila tlačna čvrstoća tijekom sušenja. Ispitivanje je provedeno 60 dana nakon izrade. Tlačna čvrstoća zida debljine 50 cm iznosi u prosjeku 1,01 MPa, dok tlačna čvrstoća zida debljine 40 cm iznosi u prosjeku 1,10 MPa.

Ključne riječi: zrakopropusnost, toplinska provodljivost, opterećenje izvan ravnine zida, udarni čekić

Ovaj materijal sufinancirala je 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.

Imajte na umu da je izvođenje testova zahtijevalo znatan napor istraživačkog tima RE-forMS, djelatnika Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek i partnerskih institucija. Ako ostvarite vrijedne rezultate iz ovih podataka, molimo navedite referencu na relevantne publikacije.

Popis svih publikacija proizašlih iz okvira aktivnosti provedenih na projektu RE-forMS moguće je vidjeti na sljedećoj internetskoj stranici:

<https://www.croris.hr/projekti/projekt/5837>

U slučaju bilo kakvih nedoumica i/ili ako u izvještaju nedostaju određene informacije koje bi vam mogle biti od koristi prilikom primjene dostupnih podataka proizašlih iz projekta RE-forMS, molimo kontaktirati voditelja projekta RE-forMS: dr. sc. Ivan Kraus, ikraus@gfos.hr.

Abstract:

Two rammed earth walls of different thicknesses (40 and 50 cm) were built next to the air permeability test chamber to check the influence of wall thickness on the test results. The walls were built using base soil during five working days. Walls were built traditionally, rammed with a wooden and/or steel rammer, inside the wooden formwork. After removing the formwork, the supports that ensure the stability of the wall were retained. Testing of air permeability of the walls started at the end of the first reporting period is planned to continue during the first months of the next reporting period.

The walls were tested with a rebound hammer to determine the compressive strength during drying period. The test was performed 60 days after building walls. The compressive strength of a 50 cm thick wall averages at 1.01 MPa, while the compressive strength of a 40 cm thick wall averages at 1.10 MPa.

Key words: air permeability, thermal conductivity, out-of-plane wall loading, rebound hammer

This material was co-financed by the Croatian Science Foundation under the project UIP-2020-02-7363. The content or recommendations in this material are those of the author and do not necessarily reflect the views of the Croatian Science Foundation.

Please note that conducting the tests required a significant effort from the RE-forMS research team, the staff of the Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek and the partner institutions. If you derive valuable results from this data, please cite the relevant publications.

The list of all publications resulting from the activities within the RE-forMS project can be found on the following website:

<https://www.croris.hr/projekti/projekt/5837>

If you have any doubts and/or if certain information is missing from the report that could be useful to you in applying the available data from the RE-forMS project, please contact the RE-forMS project leader: Dr. sc. Ivan Kraus, ikraus@gfos.hr.

Sadržaj

1. Uvod.....	5
2. Izgradnja zidova u komori za ispitivanje zrakopropusnosti.....	5
3. Preliminarna eksperimentalna ispitivanja koeficijenta prolaska topline (U vrijednosti) zemljanih zidova.....	11
4. Ispitivanje zidova udarnim čekićem	13
5. Zaključak	14
Literatura	14

1. Uvod

Provedena je ugradnja dva zemljana zida od tradicijskih mješavina uz komoru za ispitivanje zrakopropusnosti koje je planirano početkom idućeg razdoblja, u zimskim mjesecima. Zidovi debljina 40 i 50 cm, izrađeni su tradicijskom tehnikom dodavanja slame i/ili pljeve između slojeva nabijene zemlje, pri čemu je zbijanje zidova provedeno ručnim nabijačima. Zidovi stari 60 dana ispitani su udarnim čekićem kako bi se odredila tlačna čvrstoća tijekom sušenja. U sklopu izvještaja dani su i programski kôdovi za oba numerička modela zida razreda A.

2. Izgradnja zidova u komori za ispitivanje zrakopropusnosti

Za potrebe ispitivanja zrakopropusnosti te toplinskih karakteristika zidova od nabijene zemlje, a kasnije i za potrebe ispitivanja ponašanje zidova pri djelovanju simuliranih potresnih sila, uz komoru za ispitivanje zrakopropusnosti izrađena su dva zemljana zida. Pritom je jedan zid debljine 50 cm, te širine i visine 250 cm, dok je drugi zid debljine 40 cm, širine 260 cm te visine 250 cm. Izrada zida provedena je tijekom 5 radnih dana, pri čemu je svakog dana radilo troje ljudi.

Prije izgradnje zidova, postavljena je drvena oplata sa sve četiri strane zida koja je osigurana drvenim kosnicima (slika 2.1 i 2.2).



Slika 2.1 Postavljanje vanjskog dijela oplata zida



Slika 2.2 Oplata na unutarnjem dijelu zida

Građenje zidova je pojednostavljeno kako bi se prilagodilo uvjetima prostora te kako bi ono bilo u skladu s tradicijom. Prema tome, zemljani materijal pripremljen je na podlozi, sijanjem kroz sito promjera 16 mm (slika 2.3). Nakon toga je vlažen ravnomjernim špricanjem sitnim kapljicama vode po površini materijala (slika 2.4) i miješan lopatom (slika 2.5).



Slika 2.3 Prosijavanje zemljanog materijala



Slika 2.4 Vlaženje zemljanog materijala sitnim kapljicama vode



Slika 2.5 Miješanje materijala lopatom

U svaki sloj dodano je 10 kanti (zapremnine 15 L) pripremljenog materijala. Materijal je prije zbijanja poravnan gaženjem te je zbijan udarcima drvenim (slika 2.6) ili metalnim (slika 2.7) nabijačem. Svaki sloj zbijan je ravnomjerno, nekoliko puta, do postizanja ravnosti plohe (slika 2.8). Prije nasipavanja materijala za novi sloj, površina zbijenog sloja je povremeno pokvašena špricanjem vode. Nakon zbijanja dva sloja, dodana je jedna kanta (zapremnine 15 L) slame i/ili pljeve (slika 2.9), kako bi pokupila prekomjernu vlažnost u materijalu.



Slika 2.6 Drveni nabijač korišten prilikom izrade zemljanih zidova



Slika 2.7 Metalni nabijač korišten prilikom izrade zemljanih zidova



Slika 2.8 Zbijanje sloja zemlje drvenim nabijačem



Slika 2.9 Nasipavanje sloja slame na dva zbijena sloja zemlje

Za izradu dva zida od nabijene zemlje, timu od tri čovjeka trebalo je pet radnih dana. Oplata je skinuta tjedan dana nakon završetka izrade zidova, kako zbog velike vlastite težine ne bi došlo do puzanja zidova. Uz to, kosnici koji pridržavaju zid na sredini visine (slika 2.10) zadržani su nakon uklanjanja oplata kako bi se osigurala stabilnost zida. Konačni izgled zida prikazan je na slici 2.11. Zidovi su izrađeni direktno na betonskoj podlozi, na vanjskim stranama komore za ispitivanje zrakopropusnosti. Tako je odlučeno jer bi zbog velike vlastite težine zidova, transport bio otežan, te jer je na ovaj način izvedba zida jednostavnija.



Slika 2.10 Pridržavanje zida kosnicima nakon skidanja oplata



Slika 2.11 Konačni izgled zida od nabijene zemlje u komori za ispitivanje zrakopropusnosti

Prilikom izrade, uzeta su tri uzorka za određivanje vlažnosti, čiji su rezultati prikazani u tablici 2.1. Vlažnost je u prosjeku iznosila 19,34 %. Valja napomenuti da je vlažnost uzoraka provjerena pomoću „drop testa“ (Minke, 2013), kao i prilikom izrade uzoraka za ispitivanje tlačne i vlačne čvrstoće.

Tablica 2.1 Vlažnost zidova prilikom izrade

Uzorak	1	2	3
Vlažnost (%)	18,72	22,13	17,17
Prosječna vlažnost (%)	19,34		

Za potrebe određivanja tlačne i vlačne čvrstoće materijala od kojeg su izrađeni zidovi, za vrijeme izgradnje zidova, izrađeno je i tri uzoraka kocke te šest uzoraka valjaka. Uzorci su

izrađeni od istog materijala, pripremljenog na isti način. Uzorci kocke dimenzija 15 x 15 x 15 cm zbijani su sa 16 udaraca drvenim batom i gumenim čekićem, u tri sloja. Uzorci valjaka dimenzija 15 x 30 cm zbijani su sa 15 udaraca standardnim ručnim nabijačem za Proctor pokus, u tri sloja. Uzorci su pohranjeni u komoru sa kontroliranom vlažnosti prostora $50 \pm 5 \%$ pri temperaturi $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Njegovanje je planirano do trenutka ispitivanja zidova u idućem projektnom razdoblju, kako bi se poznavale čvrstoće materijala upravo u tom trenutku.

3. Preliminarna eksperimentalna ispitivanja koeficijenta prolaska topline (U vrijednosti) zemljanih zidova

Zemljani zidovi ugrađeni su u komoru za ispitivanje s istočne (W1) i zapadne strane (W2). Prilikom izvedbe zida W1 između slojeva zemljanog materijala (po visini) ugrađena je pljeva, dok je kod zida W2 između slojeva u većem dijelu ugrađena slama. Debljina zida W1 iznosi 50 cm, a zida W2 40 cm.

Na ugrađenim zidovima usporedno je provedeno preliminarno ispitivanje koeficijenta prolaska topline (U vrijednosti) nerazornom in situ temperaturnom metodom (eng. Temperature Based Method, TBM). Mjerenje je provedeno multifunkcijskim uređajem Testo 435-4, slika 3.1. Mjerna oprema postavljena je unutar i izvan komore te okomito na zidove koji se ispituju. Lokacija senzora određena je korištenjem infracrvene kamere (Testo 882). Tehničke specifikacije korištene opreme prikazane su u tablici 3.1.



Slika 3.1 Fotodokumentacija lokacije mjerne opreme

Tablica 3.1 Glavne tehničke specifikacije korištene opreme

Oprema		Mjerno područje	Razlučivost	Točnost
Termokamera Testo 882	Vidno polje (FOV)	$32^\circ \times 23^\circ$	-	$\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$; $\pm 2\%$ od izmjerene vrijednosti
	Spektralni raspon	7,5 do 14 μm	-	
	Temperaturna razlučivost (NETD)	$< 50 \text{ mK na } +30 \text{ }^\circ\text{C}$	-	
Testo 435-4 sa termoparovima tip K	Temperatura na površini zida	-20 do $+70 \text{ }^\circ\text{C}$	0,1 $^\circ\text{C}$	$\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$
	Unutarnja temperatura zraka	-20 do $+70 \text{ }^\circ\text{C}$	0,1 $^\circ\text{C}$	$\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$
	Vanjska temperatura zraka	-60 do $400 \text{ }^\circ\text{C}$	0,1 $^\circ\text{C}$	$\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$

Preliminarno eksperimentalno istraživanje provedeno je tijekom sezone grijanja kada se s vanjske strane komore mogu osigurati niže temperature te ostvariti preporučena razlika temperature između unutarnjeg i vanjskog zraka od najmanje 10 °C. Ispitivanje je provedeno kontinuirano u trajanju od 4 dana. Prilikom ispitivanja zidova unutarnja temperatura, T_i postavljena je na 25°C i održavana konstantnom. Svi mjerni podatci su za potrebe analize uprosječeni na interval od 10 min.

Preliminarnim ispitivanjem utvrđena je nemogućnost postavljanja termoparova za mjerenje temperature na površini zida konvencionalnim sredstvima za pričvršćivanje što predstavlja glavnu moguću problem prilikom provođenja ovakve vrste ispitivanja.

Kao rezultat in situ mjerenja temperaturnom metodom određene su srednje U vrijednosti korištenjem metode prosjeka predložene u ISO 9869-1:2014 prema sljedećoj jednadžbi:

$$U \left[\frac{W}{m^2K} \right] = h_i \frac{\sum_{j=1}^n T_{i(j)} - T_{si(j)}}{\sum_{j=1}^n T_{i(j)} - T_{e(j)}} \quad (1)$$

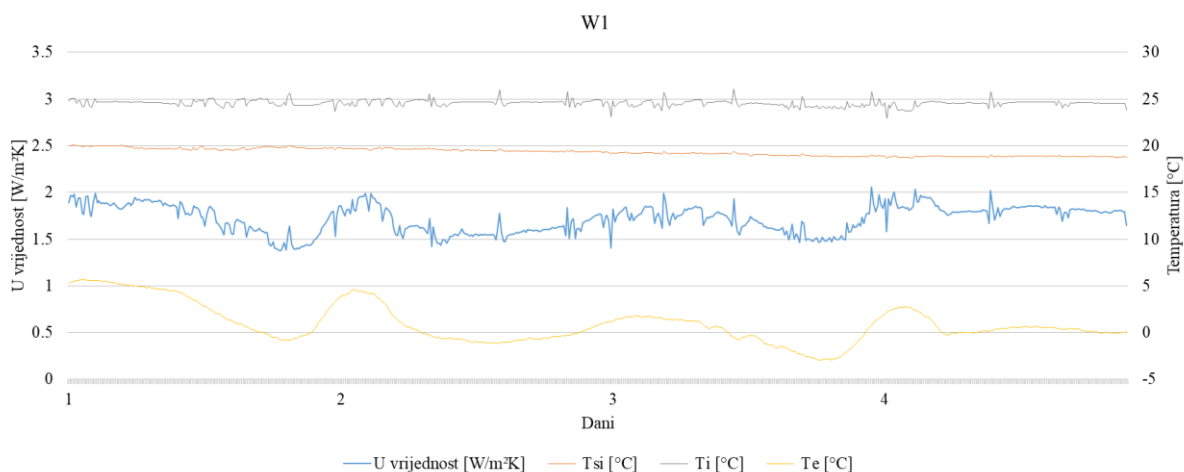
pri čemu je h_i [W/m²K] koeficijent unutarnjeg prijelaza topline (prema normi HRN EN ISO 6946:2017 za vodoravan smjer toplinskog toka kroz vanjske zidove, $h_i = 7,69$ [W/m²K]), T_i [K] temperatura unutarnjeg zraka, T_e [K] temperatura vanjskog zraka i T_{si} [K] temperatura unutarnje površine zida.

U tablici 3.2 su na temelju podataka dobivenih mjerenjem temperaturnom metodom, izračunate i prikazane srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima prema metodi prosjeka. Uz rezultate eksperimentalnog ispitivanja, u tablici 2 prikazana je i usporedba in situ izmjerenih U vrijednosti sa teorijskim vrijednostima izračunatim na temelju karakteristika materijala prema HRN EN ISO 6946:2017. Karakteristike materijala korištene za proračun teorijskih U vrijednosti određene su ispitivanjem uzoraka u uređaju FOX200.

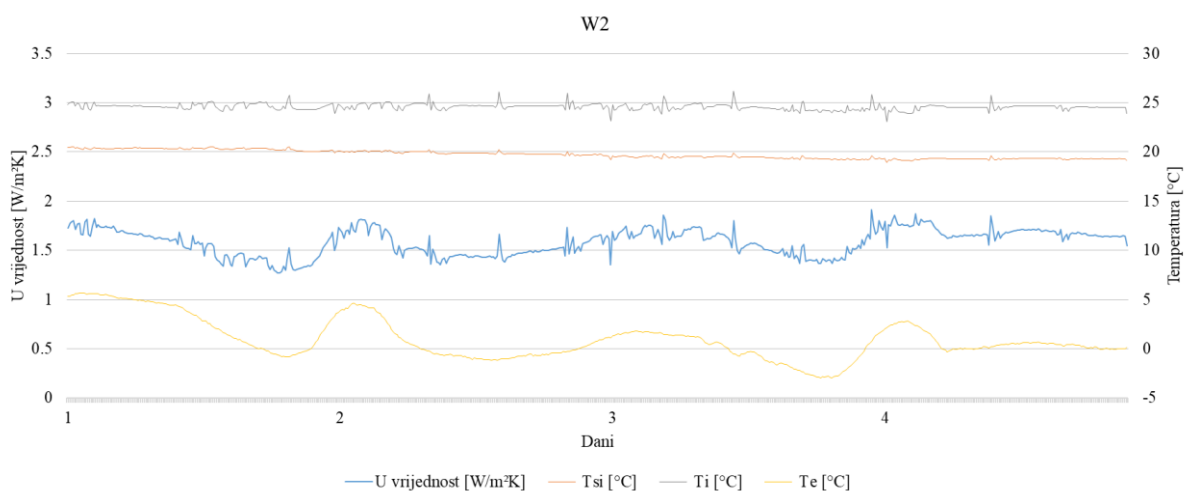
Tablica 3.2 Uvjeti ispitivanja, izmjerene srednje U vrijednosti, teorijske U vrijednosti i odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti zemljanih zidova

Model	Trajanje ispitivanja	Uvjeti ispitivanja	Srednja vrijednost [°C]	ΔT	U_m [W/m ² K]	U_t [W/m ² K]	σ [%]
W1	4 dana	$T_i=25$ °C	23,6		$1,72 \pm 0,10$	0,58	197
W2	4 dana	$T_i=25$ °C	23,6		$1,58 \pm 0,10$	0,70	126

Na slikama 3.2 i 3.3 grafički su prikazani rezultati sedmodnevnih ispitivanja zidova W1 i W2 odnosno izmjerene U vrijednosti u ovisnosti o unutarnjoj temperaturi zraka (T_i), vanjskoj temperaturi zraka (T_e) i temperaturi površine zida (T_{si}).



Slika 3.2 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (Ti), vanjske temperature zraka (Te) i temperature površine zida (Tsi), zid W1



Slika 3.3 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (Ti), vanjske temperature zraka (Te) i temperature površine zida (Tsi), zid W2

4. Ispitivanje zidova udarnim čekićem

Zidovi izgrađeni uz komoru za ispitivanje zrakopropusnosti ispitani su pomoću udarnog čekića Schmidt OS-120 PM (Šestar ID: 3579), kako bi se odredila čvrstoća materijala. Ispitivanje je provedeno 60 dana nakon izgradnje zidova te je planirano tijekom idućeg razdoblja periodički provoditi ispitivanja na istim mjestima kako bi se odredila kolika je promjena u čvrstoći zida tijekom sušenja. Tlačna čvrstoća određuje se nerazorno te ispitni uzorak nakon testiranja ostaje cjelovit. Na temelju odskoka udarnog čekića koji udara o površinu ispitnog uzorka, odredi se tlačna čvrstoća prema izrazu (2) danom u priručniku za korištenje uređaja. Izraz je prilagođen za ispitivanje polaganjem uređaja vertikalno na uzorak, pri čemu je izraz 3 definiran za ispitivanje uzoraka kocke (15 x 15 x 15 cm).

$$f_c = 1,05 \cdot (0,0009 \cdot R^2 + 0,0808 \cdot R - 0,5081) \quad (2)$$

gdje je: f_c – tlačna čvrstoća (MPa), R – mjera odskoka udarnog čekića

U tablici 5.1 prikazani su rezultati ispitivanja oba zida, debljine 40 i 50 cm. Tlačna čvrstoća zida debljine 50 cm iznosi u prosjeku 1,01 MPa, dok tlačna čvrstoća zida debljine 40 cm iznosi u prosjeku 1,10 MPa.

Tablica 4.1 Rezultati ispitivanja zidova udarnim čekićem

	ID	Visina ispitnog mjesta	Odskok udarnog čekića <i>R</i>						Prosjek	f_c (MPa)	Prosjek
50 cm	50-1	190 cm	16	14	16	13	14	15	0,95	1,01	
	50-2	160 cm	15	15	15	15	15	15	0,95		
	50-3	155 cm	16	21	16	15	16	17	1,18		
	50-4	150 cm	15	17	16	12	14	15	0,95		
40 cm	40-1	180 cm	15	12	28	19	15	18	1,30	1,10	
	40-2	170 cm	13	20	17	19	18	17	1,18		
	40-3	100 cm	13	13	15	14	15	14	0,84		

R – odslog udarnog čekića, f_c – tlačna čvrstoća

5. Zaključak

Prilikom izrade dva zida od nabijene zemlje uz komoru za ispitivanje zrakopropusnosti, proučavan je način izrade te vremenski period izrade zidova, kako bi organizacija izrade zidova u narednom projektnom razdoblju bila jednostavnija. Za izradu dva zida od nabijene zemlje timu od četiri iskusna radnika potrebno pet radnih dana. Od toga je za izradu oplata potreban jedan dan te po dva dana za svaki zid od nabijene zemlje. Zemlja se može miješati na betonu, a vlažnost, koja je provjerena na tri nasumična uzorka prilikom izrade zida, u prosjeku iznosi 19 %. Na zidove je potrebno pričvrstiti termočlanke te provesti ispitivanje zrakopropusnosti i toplinske provodljivosti u zimskim mjesecima na početku idućeg projektnog razdoblja.

Zidovi su ispitani udarnim čekićem 60 dana nakon izrade, kako bi se odredila promjena tlačne čvrstoće tijekom sušenja zida. Zid debljine 50 cm u prosjeku ima tlačnu čvrstoću 1,01 MPa, dok zid debljine 40 cm u prosjeku ima tlačnu čvrstoću 1,10 MPa. U narednim mjesecima planirano je nastaviti periodično provoditi ispitivanje tlačne čvrstoće udarnim čekićem te provesti usporedbu rezultata s početnim ispitivanjem prikazanim u ovome izvještaju.

Literatura

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

Perić, A., Kraus, I., Kaluđer, J., & Kraus, L. (2021). Experimental campaigns on mechanical properties and seismic performance of unstabilized rammed earth—A literature review. In *Buildings* (Vol. 11, Issue 8). <https://doi.org/10.3390/buildings11080367>