

Primljen / Received: 21.9.2022.

Ispravljen / Corrected: 2.5.2023.

Prihvaćen / Accepted: 26.10.2023.

Dostupno online / Available online: 10.12.2023.

Fizikalna svojstva tla u zidovima tradicijskih kuća od nabijene zemlje u istočnoj Hrvatskoj

Autori:



Dr.sc. **Jelena Kaluđer**, mag.ing.aedif.
Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
jkaluđer@gfos.hr

Autor za korespondenciju



Izv.prof.dr.sc. **Ivan Kraus**, mag.ing.aedif.
Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
ikraus@gfos.hr



Ana Perić, mag.ing.aedif.
Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
aperic@gfos.hr



Doc.dr.sc. **Ivana Brkanić Mihčić**, mag.ing.arch.
Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
ibrkanic@gfos.hr

Prethodno priopćenje

Jelena Kaluđer, Ivan Kraus, Ana Perić, Ivana Brkanić Mihčić

Fizikalna svojstva tla u zidovima tradicijskih kuća od nabijene zemlje u istočnoj Hrvatskoj

Na području istočne Hrvatske u prošlosti su se tradicionalno gradile kuće od nabijene zemlje. Pri odabiru tla za gradnju takvih kuća potrebno je voditi računa o njegovim svojstvima. U Republici Hrvatskoj ne postoje norme ili preporuke za gradnju takvih kuća, pa je danas njihova gradnja gotovo nepostojeća, a obnova postojećih kuća otežana. Obilaskom već izgrađenih objekata od nabijene zemlje prikupljeni su uzorci s ciljem ispitivanja svojstava tla i mogućim formiranjem detaljnih preporuka za područje istočne Hrvatske u skorijoj budućnosti. Rezultati ispitivanja Atterbergovih granica pokazali su dobro podudaranje s rezultatima objavljenim u literaturi i preporukama iz inozemstva, ali su uočena odstupanja u granulometrijskom sastavu.

Ključne riječi:

tradicijske kuće, nabijena zemlja, granulometrijski sastav, Atterbergove granice, organske tvari, gustoća

Research Paper

Jelena Kaluđer, Ivan Kraus, Ana Perić, Ivana Brkanić Mihčić

Physical properties of the soil in the walls of traditional eastern Croatia rammed earth houses

In eastern Croatia rammed earth houses were traditionally built in the past. The choice of suitable soil for building rammed earth houses depends on several soil properties. Moreover, since there are no standards or recommendations for construction of rammed earth houses in Croatia, the construction and renovation of such houses is almost non-existent nowadays. With the aim of forming detailed recommendations for eastern Croatia area in near future, soil samples were collected from existing houses to test the physical properties of the soil. Obtained results showed that Atterberg limits are within the limits of the recommended values and published results in the literature, while particle size distribution differs from most recommendations and published results.

Key words:

traditional houses, rammed earth, particle size distribution, Atterberg limits, organic content, density

1. Uvod

Tlo je jedan od najstarijih materijala korištenih za izgradnju kuća. Višestruke su prednosti primjene tla. Tlo je lako dostupan materijal koji se iznova može koristiti [1, 2], a samo odlaganje je jednostavno (bez posebnih zahtjeva od štetnih utjecaja na okoliš). Ako je izvor materijala u blizini gradnje objekta, troškovi transporta su mali, čime se smanjuje i ugljični otisak. Autori Lončar-Vicković i Stober [3] navode da se prednost kuća od nabijene zemlje očituje i u toplinskim svojstvima. U Walker i suradnici [1] navode približno jednak toplinski kapacitet zida od nabijene zemlje debljine 300 mm sa suhom gustoćom od 1,9 g/cm³ kao i zida od betonskih blokova debljine 200 mm. Budući da zidovi od nabijene zemlje mogu predati ili apsorbirati vlagu iz zraka, dodatna prednost kuća od nabijene zemlje je i kvaliteta zraka unutar njih [1, 2]. S arhitektonskog aspekta, tlo može biti zahvalan materijal za gradnju zahvaljujući različitim bojama tla i mogućnostima njegove površinske obrade [1].

U selima istočne Hrvatske u prošlosti su se, zbog nedostupnosti drugih materijala, nosivi zidovi kuća gradili od nabijene zemlje i čerpiča, stropovi od drvenih greda, a krovovi su uglavnom bili dvostrešni s drvenom roženičkom konstrukcijom, pokriveni biber crijepom. Tradicionalno, takve kuće bile su izdužene sa zabatima okrenutim prema ulici (slika 1. lijevo), a obično su se sastojale od tri prostorije nanizane uz otvoreni trijem: velike obiteljske sobe orijentirane prema ulici, kuhinje u sredini i manje sobe na stražnjem dijelu kuće (slika 1. desno). Tijekom vremena i prema potrebi, u nastavku osnovne tri sobe gradile su se i dodatne prostorije. Kuće od nabijene zemlje odlikuju relativno debeli zidovi (debljine ≥ 40 cm). Takvi zidovi gradili su se nabijanjem slojeva tla unutar oplata. Zbijanje slojeva tla uglavnom se provodilo ručno, najčešće drvenim nabijačima. U okviru ovog rada provedena su terenska istraživanja na području istočne Hrvatske, pri čemu je detaljno pregledano dvadesetak kuća od nabijene zemlje te je zaključeno da su debljine ugrađenih slojeva većinom u rasponu od 6 do 10 cm.

Kao i kod nasutih građevina, potrebno je voditi računa o prikladnosti tla i pripadajućim svojstvima pri odabiru materijala za građenje (npr. granulometrijski sastav, Atterbergove granice), mogućnosti dodavanja drugih materijala s ciljem poboljšanja željenih svojstava građevnog materijala, vlažnosti pri ugradnji te, između ostaloga, metodi i energiji zbijanja. Znanja vezana

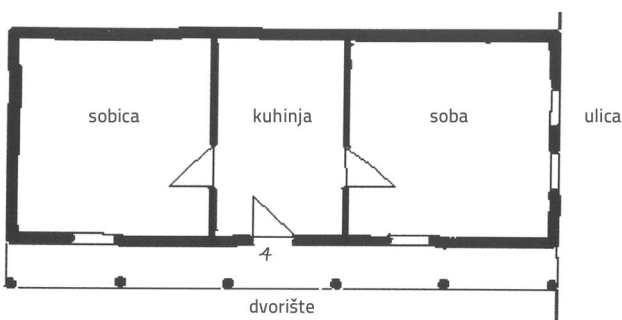
za izgradnju kuća od nabijene zemlje i odabir pogodnog tla na području istočne Hrvatske prenosila su se s koljena na koljeno te, nažalost, nema cjelovitih i detaljnih zapisa. Tako Republika Hrvatska danas nema norme za izgradnju kuća od nabijene zemlje. Upravo nedostatak norma otežava i/ili ograničava građenje novih kuća od nabijene zemlje na prostorima Republike Hrvatske, a obnova postojećih kuća je izazov. Međutim, pregledom dostupne literature, mogu se pronaći mnoge svjetske norme i preporuke koje se odnose na građenje zemljanih kuća (npr. NZS 4298 [4], NZS 4297 [5], HB195 [6], New Mexico Code 14.7.4 NMAC [7], ASTM E2392/E2392M [8], SADC ZW HS 983 [9]). S ciljem prikupljanja znanja o svojstvima i ponašanju kuća od nabijene zemlje, njihovoj gradnji te svojstvima tla s područja Slavonije i Baranje prikladnog za građenje konstrukcijskih elemenata, pokrenut je znanstveni projekt Nabijena zemlja za modeliranje i normizaciju u potresno aktivnim područjima – RE-forMS. U sklopu projekta prikupljeni su uzorci materijala iz postojećih kuća od nabijene zemlje kako bi se analizirala svojstva tla, usporedila s podacima i zahtjevima dostupnim u literaturi i poslužila za formiranje daljnjih preporuka za odabir materijala. U ovome radu prikazani su rezultati ispitivanja fizikalnih svojstava tla za tri postojeće kuće od nabijene zemlje na području istočne Hrvatske. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava tla u sklopu projekta RE-forMS, za neke od promatranih kuća od nabijene zemlje s područja istočne Hrvatske, mogu se pronaći u [10, 11].

2. Materijali i metodologija

Promatrani uzorci prikupljeni su na području istočne Hrvatske (slika 2) u naseljima Bijelo Brdo (uzorak BB), Lug (uzorak LG) i Zmajevac (uzorak ZM). Građevine iz kojih su uzeti uzorci nemaju poznatu godinu izgradnje. Za objekt ZM poznato je tek da je izgrađen prije 1969. godine. No, pretpostavlja se da su sva tri objekta starija od 50 godina. Objekt u Bijelom Brdu imao je gospodarsku namjenu, a objekti u Lugu i Zmajevcu imali su stambenu namjenu, pri čemu je kuća u Zmajevcu još uvijek u uporabi. Debljina zidova u objektu BB je oko 50 cm s debljinom ugrađenih slojeva u rasponu od 6 do 10 cm (slika 2. desno). Kuća LG ima debljinu zidova oko 40 cm, s debljinom ugrađenih slojeva u rasponu od 6 do 8 cm, a kuća ZM ima debljinu zidova približno 50 cm, s debljinom ugrađenih slojeva u rasponu od 9 do 11 cm (slika 2. desno).



Slika 1. Primjer tradicijske kuće od nabijene zemlje na području Baranje (lijevo); Ulično pročelje (autorska fotografija), tlocrt [3] (desno)





Slika 2. Položaj promatranih kuća na karti Republike Hrvatske (lijevo, preuzeto s [12] i uređeno); Kuća BB i debljina ugrađenog sloja (autorske fotografije, desno gore); Kuća LG i debljina ugrađenog sloja (autorske fotografije, desno sredina); Kuća ZM i debljina ugrađenog sloja (autorske fotografije, desno dolje)

Prilikom uzorkovanja tla iz zidova kuća uklonjena je žbuka (uglavnom mješavina tla i pljeve) te pripovršinski sloj zida (u debljini od oko 3 cm). Iz promatranih građevina nije bilo moguće uzeti veću količinu materijala za ispitivanje jer će se neke od njih moći opet koristiti ili se već koriste. Budući da iz navedenih razloga nije bilo moguće izrezati dio zida za potrebe ispitivanja, uzorkovani su manji dijelovi zidova, pazeći pri tome da se dobiju prikladni uzorci koji će se moći iskoristiti za utvrđivanje prostorne gustoće. Dio uzoraka je prilikom prikupljanja dobiven u rasutom stanju. Prikupljene količine materijala bile su dostatne za provedbu osnovnih ispitivanja fizikalnih svojstava tla. Iz dobivenih uzoraka ispitan je granulometrijski sastav, granica tečenja i plastičnosti te je utvrđena prostorna gustoća i udio organskih tvari.

Određivanje granulometrijskog sastava provedeno je kombinacijom sijanja i areometriranja prema normi HRN EN ISO 17892-4 [13]. Mokrim sijanjem su odvojene čestice promjera manjeg od 0,063 mm od čestica većeg promjera. Postupak (suhog) sijanja proveden je za krupne čestice kroz normirani set sita. Granulometrijski sastav čestica promjera manjeg od 0,063 mm ispitan je areometriranjem nakon što je provedena prethodna priprema uzorka prema [13].

Granice tečenja i plastičnosti ispitane su prema normi HRN EN ISO 17892-12 [14]. Za potrebe ispitivanja uzorci su pripremljeni tako da nemaju zrno veće od 0,425 mm. Granica tečenja određena je primjenom uređaja s padajućim šiljkom pod kutom od 30° i mase 80 g, pri čemu se granicom tečenja smatra vlažnost pri kojoj je šiljak utonuo u uzorak 20 mm tijekom 5 s.

Granica plastičnosti ispitana je na ostatku uzorka pripremljenog za ispitivanje granice tečenja tzv. valjanjem valjčića.

Ispitivanje prostorne gustoće provedeno je prema HRN EN ISO 17892-2 [15] metodom istiskivanja tekućine, odnosno potapanjem uzoraka u posudu s vodom. Zbog otežanog uzorkovanja iz zidova postoji mogućnost da su uzorci imali određenu poremećenost, pa je potrebno imati na umu da je moguće odstupanje utvrđenih vrijednosti prostorne gustoće ispitanih uzoraka u odnosu na prostornu gustoću u zidovima. Iz promatranih uzoraka utvrđena je i vlažnost kako bi se mogla utvrditi suha prostorna gustoća, a ispitivanje je provedeno prema normi HRN EN ISO 17892-1 [16]. Dodatno je ispitana gustoća čvrstih čestica primjenom piknometra i to prema normi HRN EN ISO 17892-3 [17].

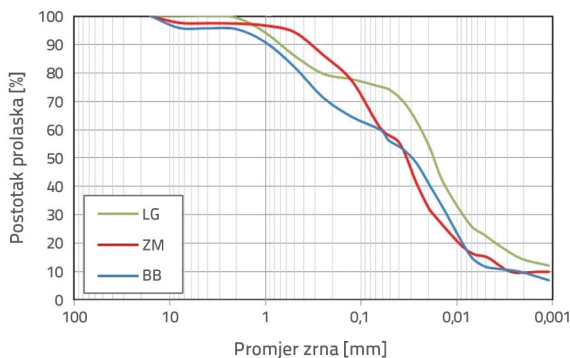
Udio organskih tvari ispitan je žarenjem prema postupku propisanom u normi ASTM D 2974 [18]. Žarenje je provedeno na prethodno osušanim uzorcima (sušenje uzoraka tijekom barem 24 sata na 105 °C). Temperatura žarenja bila je 450 °C (postupno zagrijavanje na traženu temperaturu), a ispitivanje je trajalo dok nije zabilježen daljnji gubitak mase nakon žarenja.

3. Rezultati i rasprava rezultata

3.1. Granulometrijski sastav

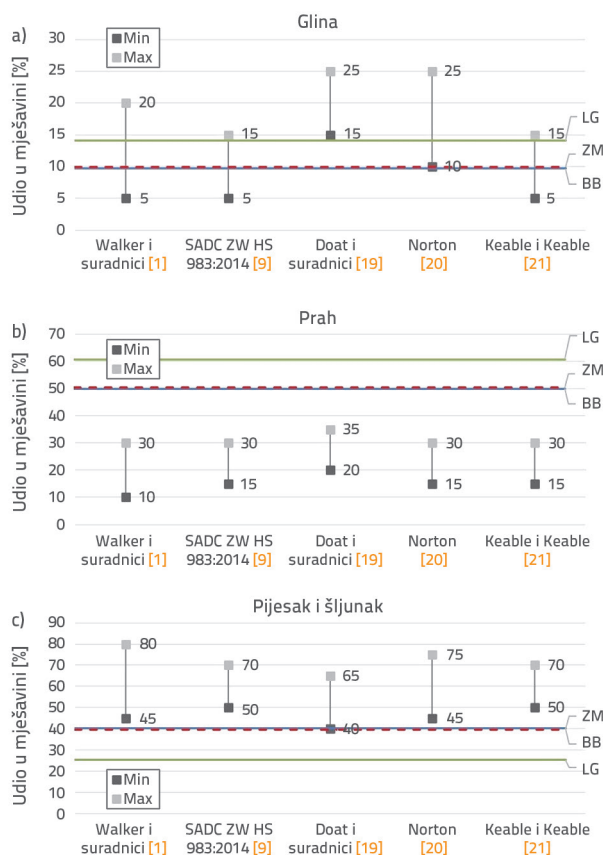
Jedan od najvažnijih zahtjeva pri odabiru tla za građenje kuća, tj. konstrukcijskih elemenata, od nabijene zemlje je granulometrijski sastav tla. Iako se većinom tradicionalno

gradilo primjenom tla iz neposredne blizine objekta, postojala su određena empirijska znanja o odabiru pogodnog tla (npr. potrebno je da tlo ima određeni udio gline radi povezivanja čestica [1, 2]). Danas postoje pisane preporuke i norme za odabir pogodnog tla kao i za sam postupak ispitivanja (npr. [1, 4, 7, 9, 19-21]). Granulometrijski sastav relativno jednostavno se može odrediti kombiniranim postupkom prosijavanja i areometriranja, te se na temelju dobivenih rezultata utvrđuje prikladnost sastava za gradnju objekata od nabijene zemlje. Procijeni li se da tlo dostupno za građenje nema zadovoljavajući granulometrijski sastav, moguće je napraviti korekciju granulometrije dodavanjem ili oduzimanjem određenih frakcija. U literaturi su najčešće dane preporuke i zahtjevi na udio čestica te na veličinu najveće čestice u uzorku [1, 4, 7, 9, 19-21]. U New Mexico Code 14.7.4 NMAC [7] navodi se da tlo ne smije sadržavati čestice veće od 38,1 mm, a u NZS 4298 [4] stoji da tlo ne smije sadržavati velike čestice koje mogu narušiti homogenu strukturnu izvedbu zida. U radu Walkera i suradnika [1] nije dano strogo ograničenje najveće čestice, već se navodi da su česta ograničenja od 10 do 20 mm, iako postoji uspješna primjena tala i s većim česticama (pa čak i 100 mm). Druge preporuke i zahtjevi dani su u vezi s udjelom čestica u tlu prikladnome za građenje zidova tehnikom nabijanja. Preporuka je [1] da udio pijeska i šljunka u uzorku bude u rasponu od 45 % do 80 %, udio praha od 10 % do 30 %, a udio gline od 5 % do 20 %. Sličan raspon vrijednosti dan je u [9, 21], gdje je preporuka da tlo treba sadržavati između 50 % i 70 % šljunka i pijeska, od 15 % do 30 % praha te od 5 % do 15 % gline. Doat i suradnici [19] predlažu nešto niži udio pijeska i šljunka, i to od 40 % do 65 %, praha od 20 % do 35 %, te nešto veći udio gline, i to od 15 % do 25 %, u odnosu na prethodno navedene preporuke. Norton [20] preporučuje da udio šljunka i pijeska treba biti od 45 % do 75 %, praha 15 % do 30 %, a glina u rasponu od 10 % do 25 %. Ispitivanjem granulometrijskog sastava uzoraka prikupljenih na terenu u istočnoj Hrvatskoj utvrđeno je da u promatranim uzorcima (BB, LG i ZM) prevladava koherentno tlo (slika 3). U uzorku BB zabilježeno je 4,7 % šljunka, 35,4 % pijeska, 50,1 % praha i 9,8 % gline. U odnosu na uzorak BB, uzorak LG ima nešto niži udio nekoherentnog tla s 0,8 % šljunka, 24,3 % pijeska, 60,8 % praha i 14,1 % gline, a uzorak ZM ima sličan udio zastupljenosti s 2,7 % šljunka, 36,8 % pijeska, 50,5 % praha i 10 % gline. Za uzorak BB i ZM najveće čestice je 16 mm, dok je za uzorak LG 8 mm.



Slika 3. Granulometrijske krivulje za uzorke BB, LG i ZM

Prema dostupnoj literaturi, granulometrijski sastav uzoraka prikupljenih iz tradicijskih kuća od nabijene zemlje u svijetu pokazuju širok raspon zastupljenosti pojedinih čestica. Tako Perić i suradnici [22] navode da je u uzorcima iz građevina od nabijene zemlje prosječni udio gline oko 13 %, praha oko 24 %, pijeska oko 43 % te šljunka oko 20 %. Usporedbom navedenih vrijednosti s granulometrijskim sastavom uzoraka BB, LG i ZM, može se ustanoviti da je većinom zastupljen veći udio šljunka i pijeska u uzorcima iz kuća od nabijene zemlje u svijetu u odnosu na udio utvrđen za promatrane građevine u Hrvatskoj.



Slika 4. Preporuke najmanjega i najvećega udjela čestica i usporedba s dobivenim rezultatima uzoraka BB, LG i ZM za udio čestica: a) gline, b) praha i c) pijeska i šljunka

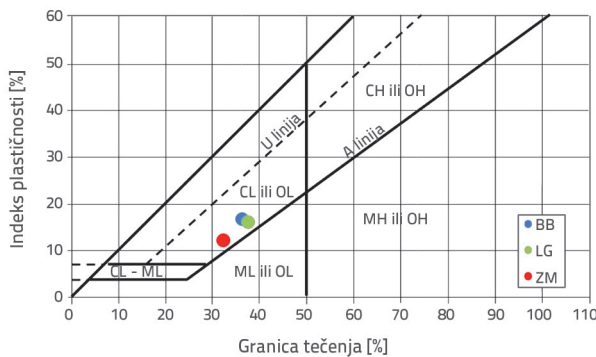
Veličina najvećeg zrna u svim promatranim građevinama u skladu je s vrijednostima danim u [1, 7]. Na slici 4. dan je prikaz preporuka iz dostupne literature u odnosu na granulometrijski sastav [1, 9, 19-21], odnosno udio zastupljenosti gline, praha te šljunka i pijeska uzoraka BB, LG i ZM. Može se vidjeti da je udio gline u svim ispitanim uzorcima zadovoljavajući, osim prema preporuci danoj u [19]. Udio praha je 15 % do 25 % veći ispitanim uzorcima u odnosu na sve promatrane preporuke. Sumarni udio pijeska i šljunka u ispitanim uzorcima je manji u odnosu na dane preporuke, osim preporuke koje daju Doat i suradnici [19]. Usporedbom se može vidjeti da granulometrijski sastavi ispitanih uzoraka ne zadovoljavaju preporuke drugih zemalja

za udio praha te sumarni udio pijeska i šljunka. No promatrani objekti, iz kojih su prikupljeni uzorci BB, LG i ZM, još uvijek postoje (iako je pretpostavka da im je starost veća od 50 godina) i mogu biti ili jesu u primjeni. Time se pokazuje da i tlo s takvim granulometrijskim sastavom može biti korišteno za gradnju kuća od nabijene zemlje.

3.2. Granica tečenja i granica plastičnosti

Uz granulometrijski sastav, plastičnost tla je najvažniji zahtjev pri odabiru pogodnog tla za izvedbu kuća od nabijene zemlje. Na temelju poznatih Atterbergovih granica koherentno tlo se može klasificirati, a indeks plastičnosti (razlika granice tečenja i plastičnosti) upućuje na raspon vlažnosti unutar kojeg se promatrano tlo može najbolje oblikovati. U literaturi (npr. [1, 19, 23, 24]) preporuke su najčešće dane u vezi s rasponom vrijednosti granice tečenja (w_L) i indeksom plastičnosti (I_p), a rjeđe su dane preporuke vezane za granicu plastičnosti (w_p). Doat i ostali [19] predlažu da bi granica tečenja trebala biti unutar raspona od 25 % do 50 % (poželjno 30 % do 35 %), granica plastičnosti od 10 % do 25 % (poželjno 12 % do 22 %), a indeks plastičnosti u rasponu od 7 % do 29 % (poželjno 7 % do 18 %). Houben i Guillaud [23] predlažu w_L u rasponu od 25 % do 46 %, a I_p u rasponu od 2 % do 30 %. Prema Walkeru i suradnicima [1], w_L bi trebala biti manja od 45 %, a I_p u rasponu od 2 % do 30 %. Delgado i Guerrero [24] predlažu da bi w_L trebao biti u rasponu od 32 % do 46 %, a I_p od 16 % do 28 %.

Utvrđena vlažnost na granici tečenja za uzorak BB iznosi 36 %, za uzorak LG 38 %, dok je za uzorak ZM w_L nešto niža i iznosi 32 %. Prema klasifikaciji USCS (engl. *Unified Soil Classification System*; [25]) promatrani uzorci mogu se klasificirati kao uzorci niske plastičnosti (slika 5.).

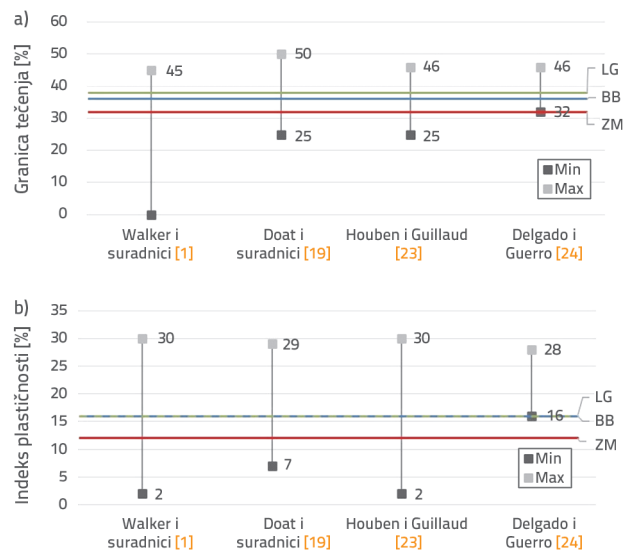


Slika 5. Dijagram plastičnosti prema USCS klasifikaciji tla [25] s podacima za uzorke BB, LG i ZM

Ispitivanjem granice plastičnosti za uzorak BB i ZM utvrđena je w_p od 20 %, a za uzorak LG w_p malo je viša i iznosi 22 %. Razlikom w_L i w_p određen je indeks plastičnosti koji iznosi 16 % za uzorak BB i LG te 12 % za uzorak ZM. Moguće je odstupanje u navedenim svojstvima u odnosu na tlo iz kojeg je uzet materijal za gradnju. Razlog tome može biti činjenica da su uzorci uzeti iz kuća, tj. iz zidova u kojima su bili izloženi vanjskim utjecajima te

su imali relativno malu vlažnost kroz dugo razdoblje. Prosječna vrijednost vlažnosti za uzorke LG i ZM bila je 2,4 % i 2,8 %, a za uzorak BB bila najviša sa 6,0 %. Stoga je prilikom reprodukcije materijala za potrebe istraživanja ili građenja potrebno to uzeti u obzir.

Pregledom literature uočen je širok raspon granice tečenja u uzorcima iz kuća od nabijene zemlje, i to od 14,8 % [26] do 57 % [27]. No, češće su te vrijednosti veće od 25 %, a manje od 45 % kako u izvedenim kućama, tako i u sklopu istraživanja pogodnosti primjene tala za kuće od nabijene zemlje (npr. [26, 28-31]). U literaturi je zabilježeno da za pojedine izvedene građevine od nabijene zemlje nije bilo moguće određivanje granice plastičnosti, odnosno da su promatrana tla bila neplastična [26]. Međutim, granicu plastičnosti bilo je moguće utvrditi u većini slučajeva (iz uzoraka izvedenih građevina i tla korištenog za istraživanja pogodnosti primjene) te su većinom vrijednosti bile u rasponu od 15 % do 30 % [26, 28, 30, 31]. Vrijednosti indeksa plastičnosti su raznolike u ispitivanjima pogodnosti primjene tala za kuće od nabijene zemlje te u već izvedenim građevinama, a mogu biti u rasponu od 6 % pa do 25 % (npr. [26, 28, 30, 31]). Unutar najčešćih zabilježenih vrijednosti granice tečenja i plastičnosti u literaturi se nalaze i rezultati uzoraka BB, LG i ZM. I indeksi plastičnosti uzoraka BB, LG i ZM su unutar objavljenog raspona vrijednosti indeksa plastičnosti uzoraka iz kuća od nabijene zemlje u Portugalu [26].



Slika 6. Preporuke raspona vrijednosti granice tečenja i indeksa plastičnosti s dobivenim rezultatima uzoraka BB, LG i ZM: a) granica tečenja, b) indeks plastičnosti

Na slici 6. prikazana je usporedba preporuka iz literature [1, 19, 23, 24] u odnosu na rezultate dobivene za uzorke BB, LG i ZM. Iz usporedbe se može vidjeti kako sva tri uzorka imaju granicu tečenja koja odgovara preporukama i granicama definiranim u pregledanoj literaturi. Indeks plastičnosti je zadovoljavajući prema promatranim preporukama za uzorke BB i ZM. Za uzorak ZM kriterij je zadovoljen prema preporukama danim u [1, 19, 23],

a vrijednost I_p niža je u odnosu na kriterij dan u [24]. Imajući na umu da je uzorak ZM iz kuće koja je još uvijek u upotrebi te da je i u literaturi zabilježena niža vrijednost indeksa plastičnosti tla iz građevina od nabijene zemlje [26] od graničnih 16 % prema Delgado i Guerrero [24], možda je moguće smanjenje donje granice indeksa plastičnosti u navedenoj preporuci.

3.3. Gustoća

Gustoća tla, odnosno suha gustoća je svojstvo koje ovisi o više čimbenika, a to su vrsta tla i metoda ugradnje, odnosno vlažnost pri ugradnji i energija zbijanja. Kao što u geotehničkim zahvatima postoje preporuke o zbijanju i vlažnosti tla pri ugradnji, tako i za kuće od nabijene zemlje postoje preporuke. Najčešće se za tu svrhu provode ispitivanja Proctorovim pokusom [1, 2, 20, 32]. U literaturi [9, 20] dodatno se navodi i tzv. drop test (test ispuštanja kugle od mješavine tla i primjesa) radi utvrđivanja vlažnosti tla pogodne za ugradnju u zidove kuća, odnosno za kontrolu vlažnosti tla prilikom ugradnje. Međutim, navedeni postupak nije normiran kao Proctorov pokus te je preciznost postupka manja. Prema NZS 4298 [4], preporučeni je stupanj zbijenosti od 98 % s vlažnosti pri ugradnji koja može biti manja od optimalne do 4 %, a veća od optimalne do 6 %. U SADC ZW HS 983 [9] je navedeno da je potreban stupanj zbijenosti veći od 95 %, dok Walker i suradnici [1] navode da je potreban stupanj zbijenosti ne manji od 98 % s odstupanjem od optimalne vlažnosti $\pm 1 - 2$ %. U New Mexico Code 14.7.4 NMAC [7] dana je uputa o zbijanju slojeva do potpune zbijenosti pri optimalnoj vlažnosti. Uz tražene stupnjeve zbijenosti i vlažnosti pri ugradnji, postoje preporuke i za debljine slojeva za ugradnju. Prema New Mexico Code 14.7.4 NMAC [7], visina slojeva ne smije biti veća od 20,3 cm, a NZS 4298 [4] navodi da visina slojeva ugradnje treba biti između 100 i 150 mm u nezbijenom stanju.

Za ispitne uzorke prikazane ovim radom, prosječna prostorna gustoća ispitana na tri različita uzorka iznosila je za uzorak BB 1,81 g/cm³, za uzorak LG 2,02 g/cm³ i 1,89 g/cm³ za uzorak ZM. Određivanjem vlažnosti promatranih uzoraka bilo je moguće odrediti i prosječnu vrijednost suhe gustoće, pa je tako izračunano da uzorak BB ima suhu gustoću u iznosu 1,71 g/cm³, uzorak LG 1,97 g/cm³, a uzorak ZM 1,84 g/cm³. U [32, 33] naveden je širok raspon suhe gustoće za kuće od nabijene zemlje od 1,75 g/cm³ do 2,2 g/cm³, odnosno 1,7 g/cm³ do 2,2 g/cm³. Keable i Keable [21] navode kako je nakon 28 dana od ugradnje potrebna gustoća zida barem 1,8 g/cm³, a preporuka je da bude oko 2 g/cm³. Vrijednosti utvrđene ovim ispitivanjem nalaze se unutar navedenih vrijednosti. Kako je prethodno navedeno, debljina ugrađenih slojeva varira unutar

promatranih objekata BB, LG i ZM te za objekt BB iznosi 6 do 10 cm, za kuću LG 6 do 8 cm, a za kuću ZM 9 do 11 cm. U literaturi [2, 3, 20, 34, 35] zabilježeno je građenje u slojevima od 10 cm do 15 cm u nezbijenom stanju. Ugrađeni slojevi u BB, LG i ZM objektima nalaze se unutar objavljenih [2, 3, 20, 34, 35] i preporučenih odnosno propisanih vrijednosti [4, 7].

Zbog nemogućnosti uzimanja veće količine uzoraka iz promatranih kuća nije bilo moguće provesti Proctorov pokus i odrediti najveće suhe gustoće. To je i razlog zašto se nije mogao utvrditi stupanj zbijenosti tla u promatranim građevinama. Međutim, treba uzeti u obzir i to da je tlo u promatranim kućama već zbijano i u dugom je razdoblju bilo izloženo vanjskim utjecajima i dugotrajnom opterećenju kojima nije bilo izloženo prethodnoj ugradnji, što bi potencijalno imalo utjecaj na rezultate ispitivanja. Iako nije bilo moguće utvrditi stupanj zbijenosti, utvrđene gustoće tla daju podlogu za daljnja istraživanja i numeričko modeliranje koje je planirano u sklopu RE-forMS projekta. Još jedna od podloga za daljnja istraživanja u sklopu projekta jesu ispitane i gustoće čvrstih čestica. Za uzorak BB utvrđena je gustoća od 2,51 g/cm³, za LG 2,56 g/cm³, dok je za uzorak ZM zabilježena nešto veća vrijednost od 2,62 g/cm³. Iako se navedeno svojstvo ne propisuje, može dati uvid u volumne odnose u tlu, ali i prisutnost organskih tvari (niže vrijednosti gustoća).

3.4. Udio organskih tvari

U gradnji nasutih objekata, ali i kuća od nabijene zemlje, izbjegava se organsko tlo koje može imati nepovoljne posljedice za građevinu. Prilikom izgradnje kuća od nabijene zemlje u Hrvatskoj, koristilo se dostupno tlo iz neposredne okolice kuće, a na kontaktima slojeva unutar zida od nabijene zemlje katkada su se radi ojačanja dodavale šibe, trska i stabljike žitarica (slika 7.). Često je prilikom gradnje korišteno tlo od materijala iskopa



Slika 7. Zidovi od nabijene zemlje s područja istočne Hrvatske uz prikaz organskog materijala između slojeva (autorske fotografije): a) šibla, b) trska i pljeva

podruma, bunara ili pojilišta za životinje. Međutim, prema iskustvima, humusni sloj se odbacivao i nije služio kao materijal za gradnju.

Preporuke u literaturi vezane za udio organskih tvari većinom su opisne. Tako NZS 4298 [4] navodi da se tlo koje sadrži organske tvari, koje mogu trunuti ili se slomiti unutar zida, ne smije upotrebljavati u gradnji kuća od nabijene zemlje. New Mexico Code 14.7.4 NMAC [7] i SADC ZW HS 983 [9] navode da tlo treba biti slobodno od organskih tvari. Maniatidis i Walker [33] ističu da bi se organske tvari trebale izbjegavati. Minke [2] navodi da tlo treba biti nehumusno i bez ostataka bilja, a Keable i Keable [21] navode da bi tlo trebalo biti bez organskih i drugih sastojaka kao što su primjerice soli ili otpad. Među rijetkima, Walker i suradnici [1] daju preporučene vrijednosti i ograničenja te navode da udio organskih tvari treba biti manji od 2 % na masu zemljane mješavine.

U promatranim objektima BB, LG i ZM nisu zabilježeni ostatci većih organskih tvari (npr. šiblje i trstika) na kontaktima slojeva. Udio organskih tvari iz promatranih kuća ispitan je na po tri uzorka. Najveća prosječna vrijednost udjela organskih tvari zabilježena je za uzorak BB u iznosu od 6,0 %. Uzorci LG i ZM imali su nešto niže vrijednosti od 2,0 % (LG), odnosno 2,6 % (ZM). U usporedbi dobivenih rezultata s preporukama danim u [1, 7, 9], tlo iz uzoraka BB, LG i ZM nije zadovoljavajuće za gradnju kuće od nabijene zemlje budući da su udjeli organskih tvari veći ili jednaki 2 %. Prema kriteriju danom u radu Houbena i Guillauda [23], gdje je navedeno da je granica izraženog utjecaja organskih tvari pri 2 do 4 % udjela organskih tvari, primjena tla u slučaju građevina LG i ZM mogla bi biti opravdana, no za uzorak BB nije. Pregledom objavljenih vrijednosti udjela organskih tvari u izvedenim kućama od nabijene zemlje, u Portugalu je zabilježen udio organskih tvari od 0,9 % do 5,4 % [26]. Udio organskih tvari uzoraka LG i ZM ne odstupa od navedenog raspona, međutim uzorak BB je većih vrijednosti i od najveće zabilježene u dostupnoj literaturi. Iako je za gradnju kuća od nabijene zemlje najbolje odabrati tlo sa što manje organskih tvari, pokazalo se kako je i s određenim udjelom organskih tvari gradnja i postojanost takvih kuća moguća.

4. Zaključak

Obilaskom terena i prikupljanjem uzoraka iz kuća od nabijene zemlje dobiven je prvi jasan uvid u fizikalna svojstva tla

korištenog za gradnju kuća u prošlosti na području istočne Hrvatske. U sklopu istraživanja ispitani su granulometrijski sastav, granice tečenja i plastičnosti, gustoća i udio organskih tvari za tri kuće s područja istočne Hrvatske. Iz dobivenih rezultata vidljivo je sljedeće:

- Veličine najvećega zrna u uzorcima bile su unutar preporuka danih u literaturi. Međutim, postotak zastupljenosti šljunka i pijeska u uzorcima bio je manji nego što je to preporučeno, a dominantnim su se pokazala koherentna tla. Budući da sve tri kuće mogu biti ili jesu u upotrebi i nakon više godina postojanja, potrebno je opširnije provesti istraživanje granulometrijskih sastava tala iz kuća od nabijene zemlje kako bi se mogle dati preporuke za područje istočne Hrvatske.
- Promatrani uzorci su niske plastičnosti. Granice tečenja i plastičnosti za promatrane uzorke su unutar većine preporuka, iako treba uzeti u obzir da su ispitani uzorci u uvjetima različitim od uvjeta u samom tlu. Ipak, može se zaključiti da su preporuke većinom primjenjive i kad je riječ o kućama od nabijene zemlje na području istočne Hrvatske.
- Zbog manje količine uzoraka, bilo je moguće utvrditi samo prostorne, odnosno suhe gustoće uzoraka, ali ne i provesti Proctorov pokus. To je i razlog zašto se nije mogao utvrditi stupanj zbijenosti. Utvrđene gustoće uzoraka u skladu su s preporukama danim u literaturi.
- Udio organskih tvari ispitan je žarenjem te je utvrđeno da uzorak BB ima najveći udio od 6 %, dok su uzorci LG i ZM s manjim udjelom od 2,0 % odnosno 2,6 %. Međutim, ne preporučuje se prisutnost organskih tvari u tlu zbog negativnih posljedica za kuću i zdravlje ljudi.

Dobiveni rezultati poslužit će kao podloga za buduća ispitivanja koja su u tijeku te moguće preporuke za tražena svojstva tla za gradnju kuća od nabijene zemlje.

Zahvala

Ovaj rad sufinancirala je Hrvatska zaklada za znanost projektom UIP-2020-02-7363, pod nazivom "Nabijena zemlja za modeliranje i normizaciju u potresno aktivnim područjima", te im ovim putem zahvaljujemo. Zahvaljujemo i dr. sc. Vladimiru Zebecu, docentu s Fakulteta agrobiotehničkih znanosti Osijek na savjetima i pomoći oko određivanja udjela organskih tvari.

LITERATURA

- [1] Walker, P., Keable, R., Martin, J., Maniatidis, V.: Rammed Earth: Design and Construction Guidelines, IHS BRE, 146, 2005.
- [2] Minke, G.: Building with earth: Design and technology of Sustainable Architecture, Birkhauser – Publishers for Architecture, Basel, Switzerland, 199, 2006.
- [3] Lončar-Vicković, S., Stober, D.: Tradicijska kuća Slavonije i Baranje – priručnik za obnovu, Ministarstvo turizma Republike Hrvatske i Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, 2011.
- [4] NZS 4298: Materials and workmanship for earth buildings. Building Code Compliance Document E2 (AS2), New Zealand, 1998.

- [5] NZS 4297: Engineering Design of Earth Buildings. Building Code Compliance Documents B1 (VM1), B2 (AS1), New Zealand, 1998.
- [6] Walker, P.: Standards Australia, HB 195–2002 The Australian Earth Building Handbook. Standards Australia International Ltd, Sydney, Australia, 2002.
- [7] New Mexico Code 14.7.4 NMAC 2015 New Mexico Earthen Building Materials Code. New Mexico Administrative Code.
- [8] ASTM E2392/E2392M – 10 Standard guide for Design of Earthen Wall Building Systems. ASTM International, United States.
- [9] SADC ZW HS 983:2014: Rammed earth structures – Code of practice. Southern African Development Community Cooperation in Standardization.
- [10] Perić, A.: Characterization of materials used for earth architecture in Eastern Croatia, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Young Scientist 2021 (YS21), High Tatras, Slovakia, pp. 1–8, 2021.
- [11] Perić, A., Kraus, I., Krolo, P.: Tlačna čvrstoća tradicijskih zidova od nabijene zemlje: studija slučaja iz Aljmaša, Zbornik radova 11. susreta Hrvatskog društva za mehaniku, Rijeka, Hrvatska, pp. 1–6, 2021.
- [12] Geoportal Državne geodetske uprave Republike Hrvatske, <https://geoportal.dgu.hr>, 12. 3. 2022.
- [13] HRN EN ISO 17892-4:2016 Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 4: Determination of particle size distribution (ISO 17892-4:2016; EN ISO 17892-4:2016)
- [14] HRN EN ISO 17892-12:2018 Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 12: Determination of Atterberg limits (ISO 17892-12:2018; EN ISO 17892-12:2018)
- [15] HRN EN ISO 17892-2:2015 Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 2: Determination of bulk density (ISO 17892-2:2014; EN ISO 17892-2:2014)
- [16] HRN EN ISO 17892-1:2015 Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 1: Determination of water content (ISO 17892-1:2014; EN ISO 17892-1:2014)
- [17] HRN EN ISO 17892-3:2016 Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 3: Determination of particle density (ISO 17892-3:2015; EN ISO 17892-3:2015)
- [18] ASTM D2974-13 Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils. ASTM, United States.
- [19] Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S., Vitoux, F.: Construire en terre, Grenoble, France: CRATerre—Centre de Recherche et d'Application-Terre. École d'Architecture de Grenoble, France, 1979.
- [20] Norton, J.: Building With Earth: A Handbook, IT Publications, 1986.
- [21] Keable, J., Keable, R.: Rammed Earth Structures A Code of Practice, Second edition, Practical Action Publishing, Warwickshire UK, 2011.
- [22] Perić, A., Kraus, I., Kaluđer, J., Kraus, L.: Experimental Campaigns on Mechanical Properties and Seismic Performance of Unstabilized Rammed Earth – A Literature Review, Buildings 11 (2021), pp. 1–21, doi: <https://doi.org/10.3390/buildings11080367>
- [23] Houben, H., Guillaud, H.: Earth construction: A comprehensive guide, London, UK: Intermediate Technology Publications, 2006.
- [24] Delgado, M.C.J., Guerrero, I.C.: The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review, Construction and Building Materials, 21 (2007), pp. 237–251, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.08.006
- [25] ASTM D 2487-17 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, United States.
- [26] Gomes, M.I., Gonçalves, T.D., Faria, P.: Unstabilized Rammed Earth: Characterization of Material Collected from Old Constructions in South Portugal and Comparison to Normative Requirements, International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration, 8 (2014), pp. 185–212, doi: 10.1080/15583058.2012.683133
- [27] Huang, P., Peng, X.: Experimental study on raindrop splash erosion of Fujian earth building rammed earth material, Materials Research Innovations, 19 (2015), pp. 639–645, doi:10.1179/1432891715Z.0000000001763
- [28] Silva, R.A., Oliveira, D.V., Miranda, T., Cristelo, N., Escobar, M.C., Soares, E.: Rammed earth construction with granitic residual soils: The case study of northern Portugal, Construction and Building Materials, 47 (2013), pp. 181–191, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.047>
- [29] Lin, H., Zheng, S., Lourenço, S.D.N., Jaquin, P.: Characterization of coarse soils derived from igneous rocks for rammed earth, Engineering Geology, 228 (2017), pp. 137–145, doi: 10.1016/j.enggeo.2017.08.003
- [30] Tinsley, J., Pavić, S.: Thermal performance and fitness of glacial till for rammed earth construction, Journal of Building Engineering, 24 (2019), pp. 1–8, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.02.019>
- [31] Zhou, T., Liu, B.: Experimental study on the shaking table tests of a modern inner-reinforced rammed earth structure, Construction and Building Materials, 203 (2019), pp. 567–578, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.070>
- [32] Ávila, F., Puertas, E., Gallego, R.: Characterization of the mechanical and physical properties of unstabilized rammed earth: A review, Construction and Building Materials, 270 (2021), pp. 1–12, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121435>
- [33] Maniatidis, V., Walker, P.: A review of rammed earth construction, University of Bath, 109, 2003.
- [34] Bui, Q.B., Morel, J.C., Hans, S., Meunier, N.: Compression behaviour of non-industrial materials in civil engineering by three scale experiments: the case of rammed earth, Materials and Structures, 42 (2009), pp. 1101–1116, doi: 10.1617/s11527-008-9446-y
- [35] Miccoli, L., Müller, U., Pospíšil, S.: Rammed earth walls strengthened with polyester fabric strips: Experimental analysis under in-plane cyclic loading, Construction and Building Materials, 149 (2017), pp. 29–36. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.115.