

KUĆE OD NABIJENE ZEMLJE: TRENUTNO STANJE U HRVATSKOJ I PERSPEKTIVA ZA ODRŽIVA STAMBENA RJEŠENJA

Ivan KRAUS

Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Vladimira Preloga 3, Osijek, Hrvatska
ikraus@gfos.hr

Mirela RAVAS

Ministarstvo kulture i medija, Konzervatorski odjel u Osijeku, Kuhačeva 27, Osijek, Hrvatska

mirela.ravas@min-kulture.hr

Ivana BRKANIĆ MIHIĆ

Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Vladimira Preloga 3, Osijek, Hrvatska
ibrkanic@gfos.hr

Jelena KALUĐER

Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Vladimira Preloga 3, Osijek, Hrvatska
jkaluder@gfos.hr

Lucija KRAUS

Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Vladimira Preloga 3, Osijek, Hrvatska
lucija@gfos.hr

Sažetak

Dostupni podaci pokazuju da oko 40% svjetske populacije živi u zemljanim kućama, dok zemljane građevine čine 15% kulturnih dobara na UNESCO-ovu popisu svjetske baštine. Tlo kao građevinski materijal (tj. zemlja) ima zanemariv utjecaj na okoliš. Moguće ga je vratiti u prirodno stanje nakon prestanka uporabe građevine i lokalno je dostupno. Primjenom tla za građenje kuća minimiziraju se potrebe za transportom i emisije CO₂ građevinskih projekata, doprinoseći Ciljevima održivog razvoja. Tradicijske zemljane kuće dio su graditeljske baštine Hrvatske. Iako čine veći dio stambenog fonda sela istočne Hrvatske te svjedoče o majstorskim vještinama ruralnog graditeljstva, danas svjedočimo njihovu nestajanju zbog suvremenih zakona o graditeljstvu i nedostatka nacionalnih normi za njihovo projektiranje. Mnoge tehnološki napredne države imaju razvijene norme za projektiranje zemljanih konstrukcija, pa se posljednjih godina mogu pronaći moderne zemljane konstrukcije. U Hrvatskoj danas nije dopušteno projektiranje novih građevina od zemlje, a provedene sanacije uglavnom su upitne kvalitete. Važan korak prije planiranja građenja novih zemljanih kuća zasigurno je očuvanje postojećih, što je jedino moguće kroz potpuno razumijevanje materijala i postojećih konstrukcija. Rad je podijeljen na četiri dijela uz naglasak na građenje tehnikom nabijene zemlje. Prvi

dio rada daje osvrt na tradicijsko zemljano graditeljstvo u Hrvatskoj. Bavi se razvojem i prostornim širenjem do početka 21. stoljeća, a sve kroz primjenu lokalnih materijala, pravila i uredbi za građenje i konačno, tehnologija građenja. Opisan je i postupak uvođenja novih materijala i tehnologija građenja te posljedično, nestanak majstora u primjeni tradicijskih tehnologija građenja zemljom. Drugi dio rada bavi se smještajem zemljanih kuća u istočnoj Hrvatskoj te njihovim trenutačnim stanjem. Usto, daje prikaz arhitekture tradicijskih zemljanih kuća s naglaskom na osnovne arhitektonske elemente. Treći dio bavi se pregledom istraživanja provedenih u okviru projekta RE-forMS. U okviru projekta provedena su terenska istraživanja na području istočne Hrvatske koja su rezultirala opisom rubnih uvjeta zidova od nabijene zemlje te izvornog materijala uporabljenog za njihovo izvođenje. Prikazani su i rezultati eksperimentalnih istraživanja provedenih na modelima zidova od nabijene zemlje koji su podvrgnuti djelovanju simuliranih potresnih sila mogućih za istočnu Hrvatsku. Četvrti dio bavi se pregledom modernih tehnologija građenja zemljom te svjetskih normi za projektiranje zemljanih građevina u potresno aktivnim područjima. Usto, dan je i pregled stanja područja uz usporedbu osnovnih fizikalnih i mehaničkih svojstava zemlje, uz isticanje prednosti i nedostataka zemlje kao materijala za projektiranje kuća u potresno aktivnim područjima.

Ključne riječi: zemljana kuća, nabijena zemlja, Ciljevi održivog razvoja, istočna Hrvatska, kulturna baština

Ključna poruka rada: Rad naglašava važnost građenja zemljanih kuća radi očuvanja kulturnog identiteta i ekološke održivosti, uz istovremeno suočavanje s izazovima suvremenih građevinskih normi za projektiranje. Rad se fokusira na povijesni razvoj, tradicijske i moderne tehnologije građenja te potrebu za normama za projektiranje zemljanih kuća otpornih na potrese, posebice u kontekstu istočne Hrvatske.

1. Uvod

Dostupni dokazi pokazuju da oko 40% svjetske populacije živi u zemljanim kućama, dok zemljane građevine čine 15% kulturnih dobara na UNESCO-ovom popisu svjetske baštine (Perić i sur., 2021; Perić Fekete i sur., 2023; Kaluđer i sur., 2023; Brkanić Mihić i sur., 2024). Tlo, kao građevinski materijal, ima izuzetno nizak utjecaj na okoliš, budući da se nakon prestanka korištenja građevine može vratiti u prirodno stanje. Osim toga, tlo je lokalno dostupan materijal koji se može dobiti iskapanjem podruma, bunara, umjetnih jezera ili ribnjaka. Primjenom tla u gradnji, ne samo da se smanjuje potreba za dugotrajnim transportom građevinskih materijala, već se značajno smanjuju i emisije CO₂ koje su povezane s građevinskim projektima. Time se izravno doprinosi ispunjavanju Ciljeva održivog razvoja. Tradicijske zemljane kuće (slika 1), koje su dio hrvatske graditeljske baštine, predstavljaju važno kulturno i povijesno naslijeđe. Na području istočne Hrvatske

one čine značajan dio ruralnog stambenog fonda i svjedoče o iznimnim majstorskim vještinama lokalnih graditelja. Međutim, danas smo svjedoci njihova postepenog nestanka, uglavnom zbog modernih zakona o graditeljstvu i nedostatka nacionalnih normi za njihovo adekvatno projektiranje i očuvanje.

Mnoge tehnološki napredne zemlje razvile su standarde za projektiranje zemljanih konstrukcija, što je rezultiralo pojavljivanjem suvremenih zemljanih građevina (Schroeder, 2016; Thompson, Augarde i Osorio, 2022). U Hrvatskoj, nažalost, trenutno nije dozvoljeno projektiranje novih građevina od zemlje, a sanacije postojećih objekata često su neprikladne i nekvalitetne. Stoga je ključno, prije nego što se razmotri izgradnja novih zemljanih kuća, fokusirati se na očuvanje postojećih. Očuvanje je moguće samo kroz temeljito razumijevanje materijala i konstrukcijskih metoda koje su korištene u izgradnji tih objekata te kroz razumijevanje ponašanja postojećih zemljanih konstrukcija u uvjetima gravitacijskog i potresnog opterećenja.

Slika 1. *Primjer zemljane kuće s područja Baranje (autorska fotografija)*



1.1. Prednosti i mane građenja zemljom

Zemlja kao i svaki drugi materijal posjeduje određene prednosti i mane. U nastavku su navedene neke prednosti i mane koje su autori prikupili tijekom višegodišnjeg bavljenja zemljanom arhitekturom.

Gradnja kuća od zemlje donosi mnoge prednosti, prvenstveno zbog upotrebe prirodnog i lokalno dostupnog materijala, što smanjuje utjecaj na okoliš. U usporedbi s (danas) tradicionalnim građevinskim materijalima kao što su beton, cement i opeka, građenje zemljom troši znatno manje energije, kako u fazi izvlačenja materijala iz prirode, izrade konstrukcijskih elemenata tako i tijekom transporta, čime se dodatno smanjuju troškovi. Zidovi od zemlje posjeduju relativno visoku termalnu masu, što znači da mogu pohraniti značajnu količinu topline te tako osigurati stabilnu i ugodnu unutarnju temperaturu, smanjujući potrebu za grijanjem i hlađenjem. Zemljane kuće su otporne na požar i imaju dobru potresnu otpornost, zahvaljujući tome što su obično niske i imaju debele zidove. Dodatne prednosti uključuju ekološku održivost jer se smanjuje emisija ugljičnog dioksida

prilikom proizvodnje materijala, a zemljane kuće često nude dobru zvučnu izolaciju, stvarajući mirnije unutarnje okruženje. Zemljane konstrukcijske (i nekonstrukcijske) elemente moguće je reciklirati te od njih izgraditi novu konstrukciju ili ih je moguće ponovno ugraditi u istu konstrukciju. Zbog relativno male relativne vlažnosti i visoke kapilarnosti zemljani zidovi (no, ponajviše glina u njima) izvrsno štite drvene dijelove s kojima su u kontaktu, tako što ih čine suhima.

Međutim, gradnja zemljom ima i svoje nedostatke. Jedan od izazova je potreba za stalnim nadzorom kvalitete materijala tijekom gradnje, jer varijabilnost u sastavu zemlje može utjecati na stabilnost konstrukcije. Zemljani zidovi osjetljivi su na vlagu i kišu, pa je nužno osigurati dobru zaštitu od atmosferskih utjecaja, što može zahtijevati dodatne troškove za održavanje. Ograničenja u visini zidova također su prisutna, pogotovo kod gradnje isključivo od zemlje, iako je u nekim dijelovima svijeta (npr. u Njemačkoj) moguće pronaći zemljane kuće visoke čak 8 katova. Proces gradnje fizički je zahtjevan i ovisi o ručnom radu, što može produljiti vrijeme izgradnje. Još jedan problem predstavlja nedostatak stručnjaka i adekvatno obučenih radnika za ovu vrstu gradnje. U mnogim zemljama (uključujući Hrvatsku) nedostaju propisane norme i smjernice koje bi precizno regulirale građenje zemljom, što može otežati dobivanje dozvola i standardizaciju gradnje. Jedan od dodatnih izazova može biti i manja otpornost na eroziju, što zahtijeva pažljivo planiranje temelja i sustava odvodnje kako bi se spriječile dugoročne štete.

U svakom slučaju, na navedene mane moguće je gledati kao na izazove koje je potrebno riješiti domišljatim projektiranjem i/ili kombiniranjem drugih prirodnih ili industrijski proizvedenih materijala.

1.2. Struktura rada

Rad je strukturiran u četiri dijela, s posebnim naglaskom na tehnike građenja nabijene zemlje.

U prvom dijelu, naglasak je stavljen na tradicijsko zemljano graditeljstvo u Hrvatskoj. Analiziran je razvoj i prostorno širenje ovih građevina kroz povijest, sve do početka 21. stoljeća, pri čemu se obraća pažnja na korištenje lokalnih materijala, pravila za gradnju i tehnike građenja. Također je objašnjen postupak uvođenja novih materijala i tehnologija, što je dovelo do postepenog nestanka tradicionalnih majstora koji su poznavali tehnike gradnje zemljom.

Drugi dio rada bavi se postojećim zemljanim kućama u istočnoj Hrvatskoj, njihovim trenutnim stanjem i smještajem, kao i njihovom arhitekturom, s posebnim fokusom na osnovne arhitektonske elemente.

Treći dio donosi pregled dijela istraživanja provedenih u okviru znanstveno-istraživačkog projekta RE-forMS, financiranog od strane Hrvatske zaklade za znanost, koji je uključivao terenska istraživanja u istočnoj Hrvatskoj te eksperimentalna istraživanja u Laboratoriju na



Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek. Rezultati ovih istraživanja obuhvaćaju opis stanja zidova od nabijene zemlje te svojstva izvornog materijala korištenog u izgradnji. Prikazani su i rezultati eksperimentalnih istraživanja na modelima zemljanih zidova izloženih simuliranim potresnim silama specifičnim za područje istočne Hrvatske.

Četvrti dio rada sadrži pregled međunarodnih normi za projektiranje zemljanih građevina u potresno aktivnim područjima, uz komparativnu analizu fizikalnih svojstava materijala korištenog za izgradnju zidova od nabijene zemlje iz Slavonije i Baranje. Usporedba se temelji na preporukama svjetskih normi i znanstveno utemeljenim smjernicama, s ciljem ocjene usklađenosti lokalnih materijala s međunarodnim standardima i preporukama.

2. Tradicijsko zemljano graditeljstvo u Hrvatskoj

Tradicijsko zemljano graditeljstvo u Hrvatskoj istraživano je u relativno maloj mjeri. U postojećoj hrvatskoj etnografskoj literaturi iz 20. stoljeća radovi s kratkim opisima vanjskog izgleda kuća i gospodarskih zgrada, njihovog rasporeda na okućnici te podjelom prostorija i njihove namjene rasuti su po raznim publikacijama. Prva sustavna istraživanja tradicijskog graditeljstva u Baranji provela je Danica Pinterović sredinom 20. stoljeća (Pinterović, 1954), a pregled tradicijske arhitekture s njenom tipologijom dao je dr. Žarko Španiček u knjizi Narodno graditeljstvo Slavonije i Baranje (Španiček, 1995). Detaljniji opis materijala i način izrade ćerpiča i pokrova od trske te problematika očuvanja i obnove izložena je u Priručniku za obnovu Tradicijska kuća Slavonije i Baranje, (Lončar-Vicković i Stober, 2011). Međutim, u svim navedenim radovima detaljnog opisa načina gradnje kuća od zemlje nema.

Iz navedenog proizlazi zaključak da su istraživači tradicijske materijalne kulture smatrali ovo umijeće toliko jednostavnim da mu nije potrebno posvećivati veću pozornost. Kako su posljednje kuće od zemlje u Hrvatskoj građene sredinom prošlog stoljeća, danas više nema nositelja ovog umijeća, te će za revitalizaciju umijeća gradnje zemljom biti potrebna arhivska istraživanja naših, ali i mađarskih i austrijskih arhiva i literature. Tradicijsko graditeljstvo zemljom u Hrvatskoj nije moguće promatrati izdvojeno od tradicijskog graditeljstva u zemljama u okruženju, točnije u Mađarskoj i Vojvodini, jer se razvijalo istovremeno, od istih materijala i pod regulativama iste vlasti.

2.1. Tradicijsko graditeljstvo prije tradicijskog graditeljstva

Tradicija je, po jednoj od definicija, ono što se uvrijedilo, uobičajilo na nekom području tijekom duljega razdoblja te, stoga, tradicijsko graditeljstvo čini skup znanja i vještina građenja koja su na nekom području poznata i prisutna više stoljeća. Iz naše današnje perspektive, osnovna karakteristika tradicijskog graditeljstva Slavonije i Baranje upotreba je zemlje kao osnovnog građevinskog materijala. Ali, do 18. stoljeća, na ovim je prostorima tradicijski građevinski materijal bilo drvo. Taj se podatak iščitava u brojnim opisima državnih službenika Bečkog dvora osvojenih područja, koji, uz razne

podatke o stanovništvu i naseljima, donose kratke opise kuća, odnosno materijala kojim su građene. Opis Baranje 1785. (Sršan, 1999.) govori da su kuće od drveta već stare, građene u kombinaciji sa zemljom, a najviše ih ima u selima s mađarskim stanovništvom (npr. Zmajevac, Bilje, Lug, Čeminac, Darda) te da se takve kuće više ne grade od kako je donesena „kraljevska zabrana“. Dalje, navodi se da se sada grade kuće od naboja (tj. nabijene zemlje) i prijesne opeke (tj. ćerpiča) te da je pečenu opeku moguće kupiti od Beljskog vlastelinstva. U Topolju, Duboševici, Gajiću, Dražu, Podolju, i Kotlini, Kamencu, Baranjskom Petrovom Selu i Šumarini izgrađene su mnoge kuće od nabijene zemlje.

Uredba o naseljavanju iz 1787. godine prati Uredbu koju je Marija Terezija izdala kao odgovor na tužbu mještana jednog mađarskog sela o manjku drveta za gradnju kuće 21. prosinca 1772., koja propisuje „...da podanici zidove grade, gdje je to moguće, od čvrstog materijala ili sirovine... Ovaj propis neka stupi na snagu ne samo u ovom vlastelinstvu i ovoj županiji, nego i u drugim krajevima, gdje je običaj da se samo od drva gradi.“ (Paládi-Kovács, 1997).

Posljednje su drvene kuće u istočnoj Hrvatskoj bile sačuvane na području Srijema, a crteži i fotografije nastali krajem 19. stoljeća objavljeni su u mapi Hrvatski građevni oblici, koju je izdalo Društvo inženjera i arhitekata (1994). Ostatak tradicijske arhitekture od drveta, prvenstveno hrastovine, sačuvan je do danas u bogato dekoriranim gospodarskim zgradama za skladištenje žitarica, ambarima, građenim početkom 20. stoljeća.

2.2. Povijest gradnje zemljom

Tehnike gradnje zemljom prisutne na prostoru Slavonije i Baranje različite su, jednako kao i u dijelovima svijeta gdje za gradnju kuća čovjek od prapovijesti koristi materijale iz okruženja. Najstarija tehnika zemljane gradnje je kuća čiji su zidovi oblikovani od drvenih stupova ukopanih u tlo, opleteni prućem i oblijepljeni s obiju strana blatom te pokriveni snopovima trske. Ovakve su kuće rekonstruirane na Arheološkom nalazištu Sopot nedaleko Vinkovaca, a prema nalazima s lokaliteta. Zid od pletera se na području Slavonije zadržao do početka 20. stoljeća u gradnji ambara i drugih manjih gospodarskih zgrada od kojih su pojedini do danas sačuvani.

Opisi kuća iz 18. stoljeća svjedoče da se zidovi dvodijelnih ili trodijelnih kuća od pletera pokrivaju glinom čime „postaju tvrdi kao najjači zid“, ali se zidovi grade i u cijelosti od zemlje pomiješane sa slamom. Krovovi su pokriveni slamom, trskom i kukuruzovinom. Uz svaku je kuću i krov za poljoprivredne alate i staje za stoku.

Osnovni cilj tradicijske gradnje je funkcionalnost, a veličina stambenih zgrada često nije bila u skladu s brojnošću obitelji i imanja. Same kuće i seoske objekte najčešće je podizala obitelj, a po potrebi su pozivali članove šire obitelji i zajednice za pomoć ili druge majstore (Somek, 2013).

2.3. Zakonom propisano tradicijsko graditeljstvo

Ono što se danas smatra tradicijskim graditeljstvom Slavonije i Baranje, modifikacija je tipskih projekata i pravila o smještaju i rasporedu stambenih i gospodarskih zgrada na okućnici koji datiraju iz vremena naseljavanja dijelova Panonske nizine od strane Habsburške monarhije u drugoj polovini 18. stoljeća i iz vremena formiranja Vojne granice u Slavoniji. Uredba o naseljavanju (iz 1787.) propisuje do detalja izbor lokacije naselja, izmjeru zemljišta, redoslijed gradnje zgrada prilikom doseljavanja, raspored zgrada na okućnici te materijale za gradnju.

Gradnja zemljom, koja koristi materijal sa samog mjesta gradnje te iz neposrednog okruženja omogućila je brzo podizanje kuća za doseljenike i zgrada za stoku, neophodne za prehranu, prijevoz i obradu velikih površina zemlje.

Uredbe o gradnji koje je izdavala Habsburška monarhija utemeljene su na ranije poznatim tehnikama i materijalima područja koja se naseljavaju, ali je ona regulativama unaprijeđena. Ono što danas podrazumijevamo tradicijskim graditeljstvom Slavonije i Baranje tipski su projekti stambenih i gospodarskih zgrada koje su doseljenici iz Njemačke, Austrije, Slovačke, Češke i drugih dijelova Monarhije prilagodili svojim potrebama, dograđivane su u dubinu čestice, te u njih implementirali umijeća gradnje koje su donijeli iz svojih domovina.

Potreba za očuvanjem nacionalnog identiteta doseljenika izražena je u koloritu, dekorativnim elementima na pročelju i u stolariji, od kojih brojni nose simboličko značenje, zadržana je do danas.

Doseljavanje su poticali veleposjednici kojima su trebali radnici i obrtnici te vojne vlasti radi naseljavanja područja Vojne granice uz Savu.

Matija Antun Relković u drugoj polovici 18. stoljeća u spjevu Satir opisuje kuće u Slavoniji, na području Vojne granice, kao veoma siromašne i skromne te kaže da „sva sela već u redu stoje, svaka kuća ima misto svoje, sve po redu i sve po numeri” (Živković, 2013). Tijekom formiranja Vojne granice, Militärgrenze, područje Slavonije uređuje se te dolazi do planske izgradnje gradskih naselja. Do tad rasuta sela skupljaju se, ušoravaju, te nastaju karakteristične ulice s nizovima gotovo istih kuća, zabatom okrenutim ulici. Ova karakteristična slika tradicijskog graditeljstva slavonskih sela nastala je uredbama koje su propisivale razmak između kuća, visinu ograde, položaj bunara, drvorede. Povijesna tipologija zgrada se ponavlja u izgradnji nakon Drugog svjetskog rata, kada se kuće od čerpiča ili nabijene zemlje zamjenjuju pečenom opekam. Idilične vizure vojno-strateški organiziranog prostora počinju razbijati katnice 80-ih godina 20. stoljeća.

Upravo ta tradicijska arhitektura, bez obzira na njenu današnju malobrojnost i dalje svjedoči o demografskim promjenama na području Slavonije i Baranje od 19. stoljeća do danas. Stoga, kako je zemljana gradnja poticana i zakonski regulirana za vrijeme koloniziranja, tako je i potisnuta zakonskim regulativama poslije Drugog svjetskog rata.

2.4. Uredba o naseljavanju

Glavni standard o naseljavanju, koji je sastavljen iz svih do sada donesenih propisa na ovu temu – Hauptnormale über das Ansiedlungswesen, welches aus allen bisliero über diesen Gegenstand ergangenen Verordnungen zusammengesetzt worden ist, ddo. 3. April 1787. – skup je detaljnih propisa za kolonizaciju područja koje je Habsburška monarhija donijela krajem 18. stoljeća. Propisi prate koloniste od prijave za preseljenje do dodijele zemlje, stoke, alata na mjestu u kojem im je određeno naseljavanje. Prije naseljavanja određene su lokacije naselja ili, rjeđe, proširenja postojećih, te je prostor detaljno isplaniran, pri čemu su definirani, između ostalog: raspored ulica, veličina čestica, raspored zgrada na okućnici, grupiranje zgrada javne namjene, uređenje seoskih puteva i jaraka pored njih.

U članku 44. Uredbe, Vrsta naselja kuće, staje i hambari, definirano je da se „Svaka kuća ima sastojati od velike sobe, susjedne sobe, predvorja, kuhinje i peći, male sobe za posuđe, zatim staje za mužnju i tegleću stoku.“ Način gradnje se spominje u više stavaka, a najzastupljeniji je u 54. članku. Uredba propisuje da kuće za sve koloniste trebaju biti iste, ali i ukazuje da zbog „raznolikosti regija u zemlji ne dopušta istovjetnost u pogledu materijala“. U nedostatku odgovarajuće zemlje, propisi predviđaju mogućnost korištenja pletera kao osnove zida, ali i kamena u gradnji. U propisima se nalaze pojmovi „egipatska opeka“, i „gradnja u mađarskom stilu zidovima od nabijene opeke“ koji svjedoče o prisustvu zemlje kao građevinskog materijala u zakonodavstvu Habsburške monarhije krajem 18. stoljeća, kada su na njemačkom govornom području objavljene brojne stručne publikacije .

Uredba govori i o važnosti lokalnih okolnosti prilikom gradnje, te da je „važno provjeriti i istražiti nema li na imanju i mjestima gdje se gradi prikladna ilovača za proizvodnju trajne egipatske opeke? Međutim, samo po sebi se razumije da se, kako bi se osigurala trajnost zgrade, moraju odabrati ne samo dobra sezona, već i dovoljno kvalificirani radnici.“

O značaju zemlje kao sirovine govori simbol ucrtan na povijesnim katastarskim kartama iz 19. stoljeća koji označava jamu iz koje se kopala zemlja.

2.5. Opis gradnje

Uz zemlju iskopanu za temelje i podrum, na mjesto gradnje bi se dovezla potrebnu količina ilovače ili zemlje s određenim udjelom gline. Majstor, koji je vodio gradnju, bi odredio potrebne količine pljeve koja se miješala sa zemljom i uz postupno kvašenje gazila bosim nogama te ostavlja da odstoji. Ponekad su se za gaženje smjese koristili i konji ili volovi.

Kuće su gradili od nabijenih zidova, bilo kao lastavičje gnijezdo, od zemlje koju su miješali pomoću vila sa slamom ili pljevom, a koju su gazili konji, ili od zemlje s određenim udjelom gline, koja se nabijala između dasaka. Krov je bio napravljen od slame ili, još bolje, od trske, koju Mađari jako vole jer je smatraju korisnijom za svoje potrebe od bilo kojeg drugog materijala. Trska na krovu kuće je jednako važna kao i šubara u njegovoj odjeći, ljeti hladi, a zimi zadržava toplinu (Freiheurn Czoernig, 1857).

Nabijeni zidovi su na vrhu pokriveni daskama ili snopovima trske te ostavljani da se suše. Žbuka, blato s primjesama usitnjenog biljnog materijala, nanosila se dlanovima u slojevima i ravnala daščicama.

Pečena opeka, koja se kao građevinski materijal koristi početkom 18. stoljeća za gospodarske i upravne te stambene zgrade, pekla se u poljskim pećima Beljskog vlastelinstva. Tek od sredine 19. stoljeća, izgradnjom ciglana, proizvodnja opeke, crijeva i pločica postaje masovnija te cjenovno pristupačnija. Razvoj parobroda i željeznice krajem 19. stoljeća omogućuje trgovinu građevinskim materijalom koji ranije nije bio zastupljen u tradicijskom graditeljstvu.

Ipak, unatoč relativno malim promjenama, tradicijsko graditeljstvo ne doživljava veće promjene sve do sredine 20. stoljeća (Živković, 2013).

3. Kuće od nabijene zemlje s područja istočne Hrvatske danas

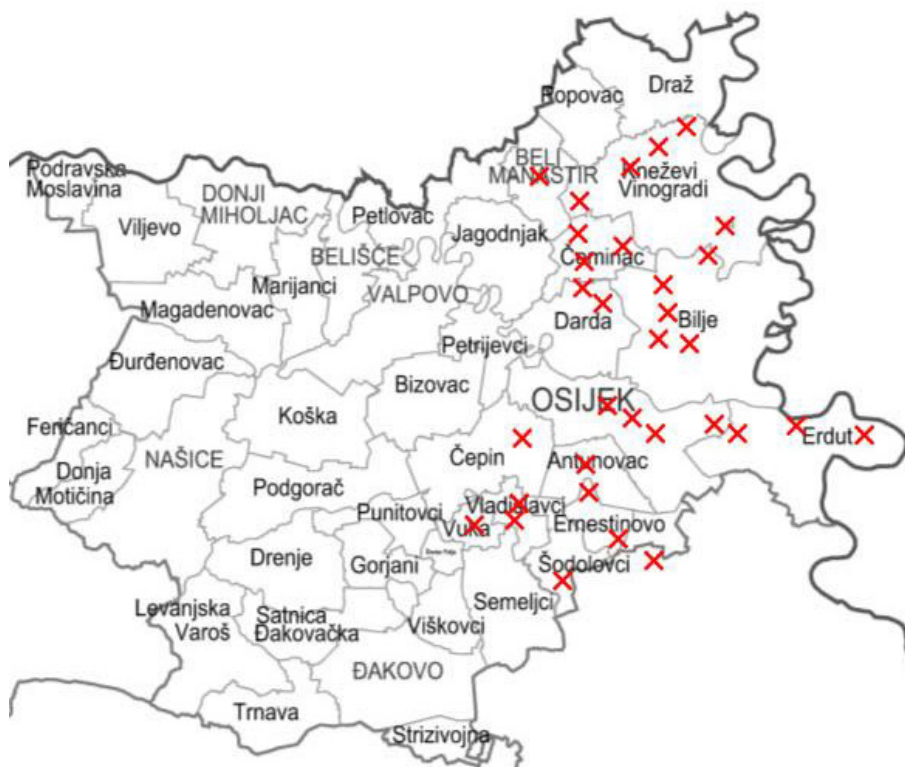
Slavonsko i Baranjsko selo karakteriziraju ulice flankirane nizom od oko 25 metara širokih, a ponekad i preko 100 metara dugih pravokutnih parcela, najčešće orijentiranih u smjeru istok-zapad (Lončar-Vicković i Stober, 2011). Tradicijska kuća je također izduženog oblika, najčešće izgrađena kao objekt u kojemu se prostorije nižu jedna za drugom, u većini slučajeva povezanih s južno orijentiranim trijemom (Španiček, 1995; Lončar-Vicković i Stober, 2011). Promatrajući stare kuće slavonsko-baranjskih sela može se uočiti značajan broj izduženih kuća sa zabatom orijentiranim prema ulici. U manjem, ali ne zanemarivom broju, zastupljene su i kuće koje su svojim dužim pročeljem paralelne s ulicom (Španiček, 1995). Ostalih oblika kuća, u obliku tzv. ključa, u obliku slova „E“ ili „U“ puno je manje. Zbog nemogućnosti gradnje kuća od trajnijih materijala poput kamena, kao glavni građevinski materijal upotrebljavala se zemlja (Španiček, 1995, Živković, 2013). Nosivi zidovi kuća su građeni od nabijene zemlje (ove se kuće nazivaju još i nabijačama), čerpiča, a kasnije i opeke.

Lončar-Vicković i Stober (2011) i Živković (2013) navode tradicijske građevine kao bogatstvo i značajni resurs Hrvatske jer utjelovljuju autentičnosti i jedinstvenost. Španiček (1995) svrstava baranjske kuće od nabijene zemlje među najbolja ostvarenja tradicijskog seljačkog graditeljstva na tlu Hrvatske. Prve kuće od zemlje su se gradile ad hoc i to primjenom materijala koji se dobivao iz neposredne okolice kuće ili kopanjem podruma (Španiček 1995; Lončar-Vicković i Stober, 2011). Sve je više ovakvih objekata napušteno i dotrajalo, a često i djelomično urušeno. Cilj terenskog istraživanja bio je prikupiti što više podataka o postojećim objektima čija je nosiva konstrukcija izvedena od nabijene zemlje. Iako nisu svi zemljani objekti bili namijenjeni za stanovanje, većina njih je bila upravo te namjene pa će se u nastavku teksta za sve objekte izvedene od nabijene zemlje najčešće koristiti naziv zemljane kuće.

3.1. Neki rezultati terenskih istraživanja iz okvira projekta RE-forMS

U istraživanje je uključeno 31 naselje i dva grada iz 12 općina Osječko-baranjske županije te jedno naselje iz Općine Tordinci u Vukovarsko-srijemskoj županiji. Ukupno je u istraživanje uključeno šest naselja Općine Bilje, po četiri naselja iz Grada Osijeka i Općine Kneževi Vinogradi, po tri naselja iz Općine Erdut i Općine Čeminac, po dva naselja iz Općine Vladislavci, Općine Ernestinovo i Općine Darda te po jedno naselje iz Općine Čepin, Općine Antunovac, Općine Vuka, Općine Šodolovc, Grada Belog Manastira te selo Korog (Kórógyi ili Korod) iz Općine Tordinci iz Vukovarsko-srijemske županije. Slika 2 prikazuje rasprostranjenost naselja uključenih u istraživanje na teritoriju Slavonije i Baranje.

Slika 2. Približne lokacije naselja u kojima su uočene zemljane kuće – označena na karti Osječko-baranjske županije (Kraus, Kaluđer, Brkanić Mihić, Kraus i Perić, 2022)



Cilj terenskog istraživanja (Kraus i sur., 2022) bio je identificirati objekte izvedene od zemlje. Kao metoda identifikacije zemljanih kuća koristio se vizualni pregled postojećih objekata. Identifikacija zemlje kao materijala od kojeg su izvedeni nosivi zidovi objekata bila je omogućena činjenicom kako je riječ o starim objektima, u dotrajalom stanju čija se konstrukcija i upotrijebljeni materijali mogu lako vizualno detektirati. U velikoj

većinom slučajeva riječ je o trošnim, napuštenim ili urušenim stambenim objektima ili neodržavanim ili slabo održavanim objektima koji se u mnogim slučajevima koriste u gospodarske svrhe. Vizualnim pregledom objekata unutar 31 naselja uočeno je više od 400 zemljanih kuća. Zemljanih kuća na području Slavonije i Baranje sigurno ima i znatno veći broj. Terensko istraživanje koje je provedeno u okviru projekta RE-forMS, zbog ograničenja ljudskim i financijskim resursima, uključivalo je radijus od oko 30 km sa središtem iz Osijeka.

Na području Slavonije identificirano je oko 130 zemljanih kuća, dok ih je na području Baranje, na području uključenom u istraživanje oko 280. U Baranji je najviše zemljanih kuća uočeno u Općini Kneževi Vinogradi, njih 124, u Općini Bilje 92, u Općini Čeminac uočeno je 46 zemljanih kuća, a najmanje ih je uočeno u Općini Darda, svega njih 15. U Belom Manastiru uočen je jedan zid od nabijene zemlje. Općina Kneževi Vinogradi ujedno je i općina s najvećim brojem zemljanih kuća uključenih u istraživanje. Naselje s najvećim brojem zemljanih kuća je Karanac: 49 (najveći broj zemljanih kuća u jednom naselju), slijedi Lug s 45 kuća te Suza u kojoj je uočeno 40 zemljanih kuća.

Na području slavonskih općina, zemljane kuće su najzastupljenije u Općini Erdut, ukupno 73 i prigradskim naseljima Grada Osijeka, 50. Naselje s najvećim brojem zemljanih kuća je Bijelo Brdo s ukupno 47, slijedi Tenja s 31 te Aljmaš s 21 zemljanom kućom.

U promatranom uzorku, najveći udio zemljanih kuća čine kuće zidane ćerpičem. Dio objekata izveden je u kombinaciji ćerpiča i opeke, ćerpiča i nabijene zemlje, te samo od nabijene zemlje. Materijali veće nosivosti korišteni su u većini kuća kao elementi ukrute zida ili su od njih zidana podnožja koja su u kontaktu s tlom (veća količina vlage), zabati, stupovi ili dimnjaci.

3.2. Prostorni raspored kuća od nabijene zemlje i njihovo stanje

Identificirana su dva glavna prostorna rasporeda kuća od nabijene zemlje s područja Slavonije i Baranje: kuće s pročeljem okrenutim prema ulici i kuće s L-tlocrtom. Ovakve kuće detaljnije su analizirane u radu Brkanić Mihić i suradnika (2024). U istraživanju je pronađeno 106 kuća od nabijene zemlje, od kojih 91 ima zabat okrenut prema ulici, dok je 15 građeno u obliku slova L, s krovnim grebenom paralelnim s ulicom. Oblikovanje zabata, koji potječe iz starih drvenih kuća, stvara simetričan raspored prozora i malih otvora na tavanu za ventilaciju. Ova metoda gradnje zadržala se i nakon zabrane drvenih kuća, prelazeći s nabijene zemlje na ćerpič i ciglu.

Kuće s L-tlocrtom, poznate i kao “u ključ” ili “na lakat”, imaju krovni greben paralelan s ulicom, s prostorijama okrenutim prema ulici i dodatnim prostorijama unutar imanja. Ovaj raspored, koji su često koristili bogatiji njemački obrtnici, simbolizirao je viši društveni status.

Terenskim istraživanjem utvrđeno je da su građevine od nabijene zemlje većinom u dotrajalom stanju s vidljivom, od elemenata nezaštićenom konstrukcijom. Radi se uglavnom o trošnim, napuštenim ili urušenim stambenim objektima te o neodržavanim ili slabo održavanim građevinama koje služe gospodarskim svrhom. To su najčešće kuće izduženog tlocrta, često s trijemom duž dvorišnog pročelja, dvostrešnog drvenog krovišta pokrivenog crijepom sa zabatnim zidom orijentiranim na ulicu.

Međutim, postoje primjeri i obnovljenih kuća od nabijene zemlje, ali oni su rijetki i uočeno ih svega nekoliko prilikom terenskih istraživanja u okviru projekta RE-forMS.

3.3. Osnovni arhitektonski elementi

Tradicijske kuće Slavonije i Baranje gradile su se od lako dostupnog materijala na temelju znanja koje se usmenom predajom prenosilo s generacije na generaciju. Zemlja od koje su izvodili zidovi se najčešće iskapala u dvorištu kuće, a za drvenu građu krovne konstrukcije koristilo se lokalno drvo. Tradicijska kuća Slavonije i Baranje može se podijeliti na četiri konstrukcijska elementa: i) podnožje, ii) zidove od nabijene zemlje, iii) drvenu stropnu konstrukciju te iv) drveno krovništvo.

U provedenim terenskim istraživanjima promatrale su se izgrađene kuće u kojima temelji nisu bili dostupni za pregled, ali u literaturi se navodi kako su se oni izvodili tako što se vršio iskop rovova u koje se kasnije vraćala i nabijala ista zemlja pomiješana sa slamom ili pljevom koje su imale ulogu armature (Lončar-Vicković i Stober, 2011). Iste autorice navode i da su temelji kuće građeni ispod vanjskih nosivih zidova, dok su se ispod unutarnjih zidova postavljali tek po potrebi, a često se samo zid upuštao u tlo ili se direktno oslanjao na površinu tla.

Za temelje i nadtemeljne zidove koristio se isti materijal pa ne postoji jasna granica između ova dva konstrukcijska elementa kuće što je predstavljalo problem za zaštitu od vlage. Kuća se od vlage štitila tako što se i) donja zona kuće oblagala slojem pečene opeke koja se umetala u zarez u zidu od nabijene zemlje, ii) izvodio sokl od pečene opeke najčešće u visini od 60 cm ili iii) se početak zida izvodio od nekoliko slojeva pečene opeke (Brkanić Mihić i sur., 2024).

Pod kuće od nabijene zemlje u odnosu na okolni teren izdignut je za visinu dvije ili tri stube, a podnožje se izvodilo od nabijene zemlje tako što se mješavina gline ili ilovače s pijeskom i vapnom nabijala u slojevima debljine 15 do 20 cm (Brkanić Mihić i sur., 2024). Podovi u prostorijama su najčešće bili zemljani, daščani (drvene daske pričvršćene na gredice položene u pijesak) ili obloženi opekama, a mogu se pronaći i obloge od kamenih ploča ili keramičkih pločica. Pod trijema se izvodio od nabijene zemlje, a uočeni su i podovi od pečene opeke i keramičkih pločica.

Zidovi od nabijene zemlje najčešće debljine od 50 cm i visine 230 do 290 cm izvodili su se nabijanjem smjese zemlje (ilovača), sječene slame, pljeva, hoblovina ili piljevina koja

je služila za bolje povezivanje mase te vode u dvostranoj drvenoj oplati visine pola metra (Brkanić Mihić i sur., 2024). Ovi dodaci povećavali su elastičnost materijala te sprječavali pucanje zidova za vrijeme sušenja. Zemlja za izvođenje zidova se uzimala iz iskopa za podrum ili rupe koja se nalazila u blizini. Zemlji se dodavala voda, a u slučaju lošije kvalitete i glina te je smjesa morala odležati 12 do 24 sata. Na ovaj način pripremljena zemlja se nabijala između daščane oplata u slojevima debljine 10 cm. Novi se sloj nabijao tek kada se prethodni osušio, a oplata bi se dizala te se u nju stavljao novi sloj zemlje te postupak ponavljao. Cijela kuća od nabijene zemlje gradila se tijekom dva do tri tjedna, a takozvano dozrijevanje ili potpuno sušenje zidova trajalo je i do dvije godine, ovisno o sastavu i debljini zida (Lončar-Vicković i Stober, 2011), ali i klimatskim uvjetima. Zbog toga su se zemljane kuće često gradile u kasno proljeće ili rano ljeto.

Unutarnji zidovi su najčešće iste debljine kao i vanjski, ali nikada tanji od 40 cm. Za ojačavanje zidova od naboja koristilo se nekoliko različitih metoda: i) slojevi zemlje su armirani polaganjem trske ili pruća od vinove loze i vrbe, ii) u uglove se postavljalo vertikalne snoplje trske ili slojevi pečene opeke te iii) zidali vertikalni serklaži od opeke (Brkanić Mihić i sur., 2024). Otvori u zidovima su se izvodili postavljenjem drvenih kalupa za vrijeme gradnje ili su se naknadno izrezivali u masi zida. Zidovi su finalno obrađeni mješavinom blata ili ilovače i pljeve koji su se nanosili na zid u nekoliko slojeva, ukupne debljine i do 5 cm. Nakon sušenja zidovi su bojani vapnom. U 20. stoljeću često je zid bojan u jednu boju na koju su se gumenim valjkom nanosili cvjetni motivi (mustre) druge boje. Trijem tradicijske kuće od nabijene zemlje karakteriziraju kvadratni stupovi čija je uloga bila prenošenje opterećenja krovne konstrukcije. U početku su se izvodili od drveta, no s vremenom ih je zamijenila opeka.

Stropovi tradicijskih kuća od nabijene zemlje s područja Slavonije i Baranje su drveni, a izvodili su se najčešće na jedan od sljedećih načina: kao vidljivi drveni grednik s podvlakama ili strop s vitlovima s ravnim podgledom (Brkanić Mihić i sur., 2024). Za drvenu stropnu konstrukciju upotrebljavale su se masivne grede jelovine ili borovine širine 16 do 20 cm te visine 18 do 28 cm (Lončar-Vicković i Stober, 2011) koje su se postavljale na razmacima od 60 do 100 cm. Strop s vidljivim gredama i podvlakom koja je često bila dekorirana (Španiček, 1995), iznad greda postavljane su daske oplata (odnosno pod tavana) koje su užlijebljene jedna u drugu. Izvođenje stropa s vitlovima je složenije. Vitlovi su tanke hrastove oblice (Španiček, 1995) ili vrbini štapovi (Lončar-Vicković i Stober, 2011) presjeka 4×4 i 3×5 cm te dužine 80 do 100 cm, omotane slamom te uvaljani u zemlju pomiješanu sa sječenom slamom i pljevom. Kod stropova s vitlovima, podgled se izvodio na dva različita načina. U prvom su se vitlovi s donje strane mazali blatom te nakon toga bijelili vapnom, dok se u drugim načinju izvođenja, na donju stranu greda postavljala donja daščanu oplata na koju se pribijala trska koja je služila kao nosač zemljane žbuke (Brkanić Mihić i sur., 2024). Obje vrste stropa su s gornje strane izravnote blatnim premazom koji je formirao pod tavana (Španiček, 1995).

Krovovi kuća od nabijene zemlje najčešće su izvedeni kao dvostrešne roženike konstrukcije. To su jednostavne konstrukcije u kojima parovi rogova čine trokut s veznom gredom koji se kod većih raspona dodatno ukružuje dodatnom gredom – pajantom. Pajanta se postavljala na visinu od 1,8 m od razine poda kako bi se omogućilo korištenje tavana. Nestabilnost uzdužnog smjera krovništa rješavala se vjetrovnim vezom: daskama pribijenim pod kutom od 45° gdje prva daska povezuje donji kraj prvog s gornjim krajem četvrtog roga, zatim druga daska povezuje donji kraj četvrtog rog s gornjim krajem osmog i tako do kraja. Krovnu strehu čine rogovi čiji su se krajevi prepuštali 20 do 40 cm izvan lica vanjskih zidova zbog zaštite zida od kiše, a najizraženija je kada je krov okrenut prema sjeveru.

Zabati kuća od nabijene zemlje građeni su posljednji, a koristilo se ćerpiče (sušene nepečene opeke napravljene od istog materijala kao i zid od naboja) ili od pečene opeke najčešće debljine 12 cm, a uočena su i ojačanja ovih zidova u obliku stupova od ćerpiča ili pečene opeke (Brkanić Mihić i sur., 2024). Na zabatu se najčešće nalaze dva mala otvora za ventilaciju tavanaskog prostora.

Najčešće korišteni pokrov je biber crijep (180×380 mm) koji se postavljao na letve poprečnog presjeka 48×24 mm, pribijene na krovnu konstrukciju (rogove).

4. Pregled terenskih i eksperimentalnih istraživanja: projekt RE-forMS

U okviru projekta RE-forMS provedena su terenska istraživanja i prikupljeni uzorci iz kuća od nabijene zemlje u Slavoniji i Baranji, sve s ciljem sistematizacije znanja o tim kućama i svojstvima tla korištenog za gradnju. Istraživanje je uključivalo usporedbu rezultata ispitivanja svojstava tla s podacima iz literature kako bi se dale preporuke za odabir pogodnih materijala za buduću gradnju. Također, provedena su eksperimentalna istraživanja ponašanja zidova od nabijene zemlje pod simuliranim potresnim silama, a rezultati su ovdje prikazani samo u manjoj mjeri budući da daljnje analize još uvijek traju.

4.1. Rubni uvjeti

Rubni uvjeti, odnosno ograničenja na rubovima konstrukcijskog elementa, odnose se na pridržanja i načine povezivanja s drugim konstrukcijskim ili nekonstrukcijskim elementima, definiraju ponašanje promatranog elementa, prijenos i raspodjelu opterećenja i naprezanja na element i unutar njega te, posljedično, utječu na raspodjelu deformacija i reakcija unutar promatranog i/ili susjednog elementa. Promatraju li se zemljani zidovi kao osnovni konstrukcijski elementi kuće, jasno je da su s donje strane omeđeni temeljnim tlom, temeljem ili dijelom zida koji može biti izveden od drugog materijala (npr. beton, opeka). Zidovi su se često završavali s dva reda pečene opeke na vrhu pa su se na taj sloj polagale hrastove grede: vijenac za izvođenje krovne konstrukcije. Također, s gornje strane

zidovi su omeđeni krovnom konstrukcijom, koja može biti kruta ili fleksibilna, dok su s bočnih strana omeđeni drugim zidovima, (betonskim, čeličnim ili drvenim) stupovima ili serklažima ili pak mogu imati slobodni rub. Međutim, zidovi mogu sadržavati otvore za vrata i prozore pa i to treba uzeti u obzir prilikom razmatranja rubnih uvjeta.

Za temelje i nadtemeljne zidove često je korišten isti materijal od kojega su izrađeni zemljani zidovi, pa često nije posve jasna granica između ova dva konstrukcijska elementa. Donji dio zida štitio se od vlage iz temeljnog tla izvedbom sokla od pečene opeke visine od oko 60 cm ili izradom nižeg dijela zida tek od nekoliko slojeva pečene opeke. Pregledom postojećih zemljanih kuća s područja Slavonije i Baranje uočeno je da se na pečenu opeku ponekad postavljala daska (debljine od oko 2,4 cm) ili se izvodila primjenom bitumenskih traka ili premaza.

Vertikalno opterećenje koje su zemljani zidovi preuzimali na vrhu moglo je rezultirati naprezanjem između 0,15 i 0,30 MPa. Ova razina naprezanja utvrđena je prema mjerenjima kuće tijekom terenskih opažanja, uzimajući u obzir težinu krovne konstrukcije i uporabno opterećenje, pod pretpostavkom da se potkrovlje koristilo kao skladišni prostor ili spremište za žito. Ove vrijednosti odgovaraju minimalnim i maksimalnim očekivanim opterećenjima, ovisno o duljini raspona i visini zabata.

4.2. Tlo za građenje zidova

Kako bi se utvrdila fizikalna svojstva materijala korištenih za izgradnju kuća od nabijene zemlje na području Slavonije i Baranje, provedeno je prikupljanje uzoraka (tablica 1) s područja Aljmaša (ALJ-1, ALJ-2), Bijelog Brda (BB-1, BB-3 i BB-4), Čeminca (ČM-1), Karanca (KR-3, KR-4), Kneževih Vinograda (KV-2), Luga (LG1), Tenje (TNJ-1) i Zmajevca (ZM-2 i ZM-3). Uzorkovanje je provedeno tijekom 2021. godine na objektima za koje je uz dopuštenje vlasnika određeno područje uzorkovanja te volumen uzorka. Iz navedenog razloga veći je dio uzoraka uzet u rasutom stanju budući da su korišteni jednostavni alati te je samo manji dio uzoraka uzet iz unutrašnjosti promatranih objekata. Prilikom uzorkovanja nastojali su se dobiti reprezentativni uzorci te je uklonjen površinski sloj zida i žbuka ako je bila prisutna. Debljina uklonjenog površinskog sloja bila je 2 – 3 cm, a uzeta je kao takva na temelju postupka uzorkovanja objavljenog u Gomes, Gonçalves i Faria (2014).

Tablica 1. Fizikalna svojstva tla

Oznaka	G (%)	S (%)	M (%)	C (%)	D _{max} (mm)	w _L (%)	w _P (%)	pd (g/cm ³)	OM (%)
ALJ-1	0,5	37,9	49,6	12,0	8	32,4	18,8	–	2,7
ALJ-2	2,2	54,2	38,4	5,2	8	32,0	20,00	–	4,0
BB-1	4,7	35,4	50,1	9,8	16	36,4	19,7	1,70	6,0
BB-3	1,2	4,4	75,1	19,3	8	39,4	22,3	–	5,1
BB-4	0,3	2,9	69,1	27,7	8	36,8	18,8	1,66	2,5
ČM-1	4,2	68,8	19,5	7,5	8	–	–	–	–
KR-3	10,2	48,9	29,0	11,9	16	–	–	1,70	3,8
KR-4	5,2	54,9	31,8	8,1	16	36,5	21,1	1,67	2,3
KV-2	11,9	51,1	29,0	8,0	16	–	–	1,66	5,8
LG-1	0,8	24,3	60,8	14,1	8	37,7	21,6	1,97	2,0
TNJ-1	0,1	1,8	68,7	29,4	4	41,9	20,7	1,62	5,1
ZM-2	0,3	54,1	36,5	9,1	4	–	–	–	3,1
ZM-3	2,7	36,8	50,5	10,0	16	32,3	20,0	1,84	2,6

Legenda: G – šljunak; S – pijesak; M – prah; C – glina; D_{max} – najveće zrno u uzorku, ≤ od; w_L – vlažnost na granici tečenja; w_P – vlažnost na granici plastičnosti; ρ_s – suha gustoća; OM – udio organskih tvari;

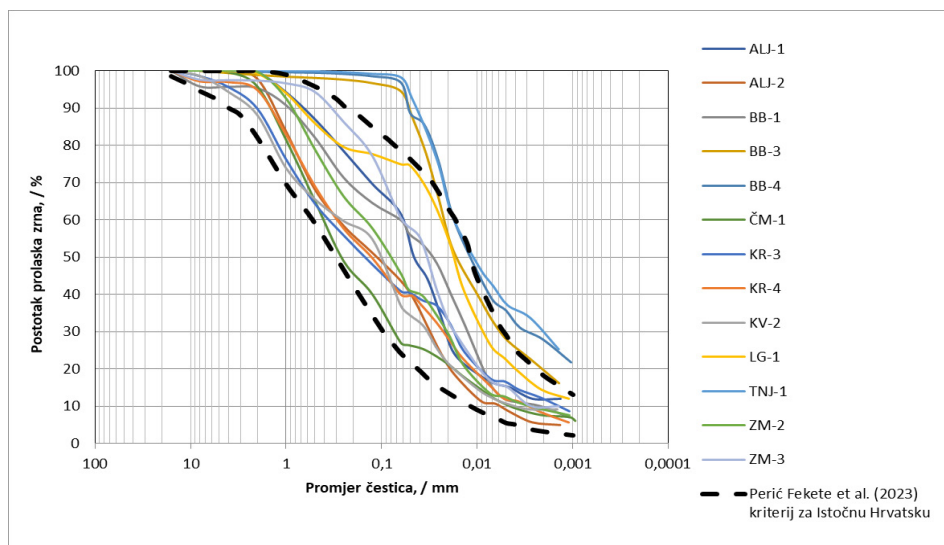
U okviru provedenog istraživanja projekta RE-forMS provedeno je ispitivanje granulometrijskog sastava tla za 13 kuća, granice tečenja i plastičnosti za 9 kuća, prostorne gustoće za 9 kuća te udjela organskih tvari za 12 kuća. Za pojedine objekte nije bilo moguće provesti sva ispitivanja zbog nedostatne količine materijala i stupnja poremećenosti uzorka.

Granulometrijski sastav ispitivan je sukladno normi HRN EN ISO 17892-4. Za utvrđivanje granulometrijskog sastava su mokrim sijanjem odvojene čestice promjera većeg od 0,063 mm za potrebe postupka suhog sijanja, dok su čestice manjeg promjera ispitane areometriranjem. Granice tečenja i plastičnosti ispitane su u skladu s normom HRN EN ISO 17892-12, pri čemu su za ispitivanje korišteni pripremljeni uzorci s česticama manjim od 0,425 mm. Granica tečenja ispitana je padajućim šiljkom (kut 30° i masa šiljka 80 g). Prostorna gustoća ispitana je metodom potapanja uzoraka u posudu s vodom (HRN EN ISO 17892-2). Udio organskih tvari ispitivan je žarenjem pri temperaturi od 450 °C pri čemu je provedeno postupno zagrijavanje na željenu temperaturu, a vrijeme trajanja ispitivanja ovisilo je tome je li zabilježen daljnji gubitak mase nakon žarenja. Ispitivanje je provedeno prema ASTM D2974.

U tablici 1 prikazani su rezultati provedenih ispitivanja fizikalnih svojstava tla uzetog iz kuća od nabijene zemlje s područja Slavonije i Baranje, dok su na slici 3 prikazane granulometrijske krivulje, a na slici 4 podatci o plastičnosti promatranih uzoraka. Podatci prikazani u tablici 1 te na slikama 3 i 4 korišteni su ranijim studijama u okviru projekta RE-forMS te objavljeni u radovima Kaluđer i suradnici (2022) i Perić Fekete i suradnici (2023).

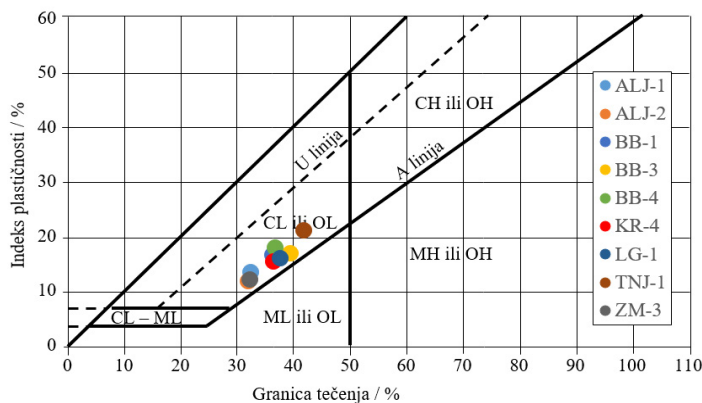
Na temelju ispitivanja granulometrijskog sastava 13 kuća s područja Slavonije i Baranje (tablica 1), može se uočiti da je u uzorcima prevladavajuće koherentno tlo (glina i prah). Najveći udio u uzorcima je zabilježen za prah (prosječno 46,8%), dok je najmanji zabilježen za šljunak (prosječno 3,4%). Kako je prikazano u tablici 1, za promatrane kuće zabilježene su vrijednosti granice tečenja u rasponu od 32,0% do 41,9%, granice plastičnosti u manjem rasponu od 18,8% do 22,3%, dok su izračunati indeksi plastičnosti u rasponu od 12,0% do 21,2%.

Slika 3. Granulometrijski sastav tla iz kuća od nabijene zemlje s područja Slavonije i Baranje (prema Brkanić Mihić i sur., 2024)



Svi se promatrani uzorci tla iz kuća od nabijene zemlje s područja Slavonije i Baranje prema USCS sustavu klasifikacije (eng. *Unified Soil Classification System*; prema ASTM D 2487-17; slika 4) mogu klasificirati kao tlo niske plastičnosti. Udio organskih tvari ispitan je za 12 kuća te je utvrđen raspon vrijednosti od 2 do 6%. Taj udio organskih tvari prema nekim preporukama i normama (v. sljedeće poglavlje) može biti nepovoljan. Međutim, treba imati na umu da su promatrane kuće vrlo stare i vrlo loše održavane i/ili sanirane, što je moglo stvoriti preduvjete za neometan i stalan razvoj organske materije. No, ovo je predmet daljnjih analiza.

Slika 4. Dijagram plastičnosti prema USCS klasifikaciji tla (prema ASTM D 2487-17) s podacima za promatrane kuće od nabijene zemlje s područja Slavonije i Baranje (prema Brkanić Mihić i sur., 2024)



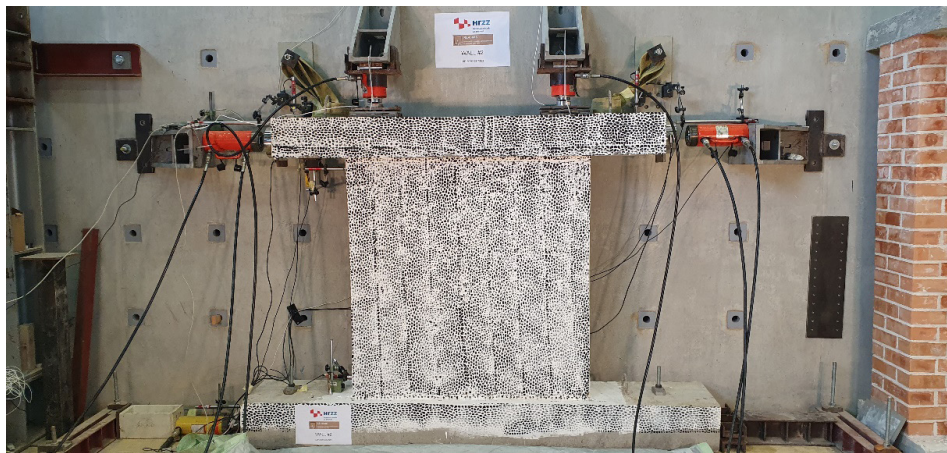
Nadalje, prilikom uzorkovanja postojala su određena ograničenja te nije bilo moguće uzeti dovoljnu količinu materijala za provedbu pokusa Proctor, stoga su utvrđene samo vrijednosti suhe gustoće materijala bez mogućnosti utvrđivanja stupnja zbijenosti tla u zidovima kuća od nabijene zemlje s područja Slavonije i Baranje. U tablici 1 prikazane su vrijednosti suhe gustoće u rasponu 1,62 do 1,97 g/cm³. Propisi za suhu gustoću tla ne postoje, ali Keable i Keable (2011) predlažu da gustoća zida od nabijene zemlje starog 28 dana bude oko 2 g/cm³, ali ne manje od 1,8 g/cm³.

4.3. Eksperimentalna istraživanja na modelima zidova od nabijene zemlje

Tijekom 2022. godine provedena su eksperimentalna istraživanja na četiri modela zidova od nabijene zemlje, koristeći tradicijske mješavine i lokalno tlo (Perić, Kraus i Grubišić, 2022). Zidovi su podijeljeni u dva para s različitim sastavom mješavina, dok su im dimenzije bile identične. Izgradnja je izvršena tradicionalnom tehnikom nabijanja uz korištenje ručnih nabijača i drvene oplate. Nakon sušenja u laboratorijskim uvjetima tijekom perioda od dva mjeseca, uzorci zidova su podvrgnuti vertikalnim opterećenjima te cikličkim horizontalnim silama u ravnini zida. Uzorci materijala korišteni za zidove također su ispitani kako bi se odredila njihova materijalna svojstva. Rezultati eksperimentalnih ispitivanja detaljno su analizirani i objavljeni u radu Perić-Fekete i suradnika (2023).

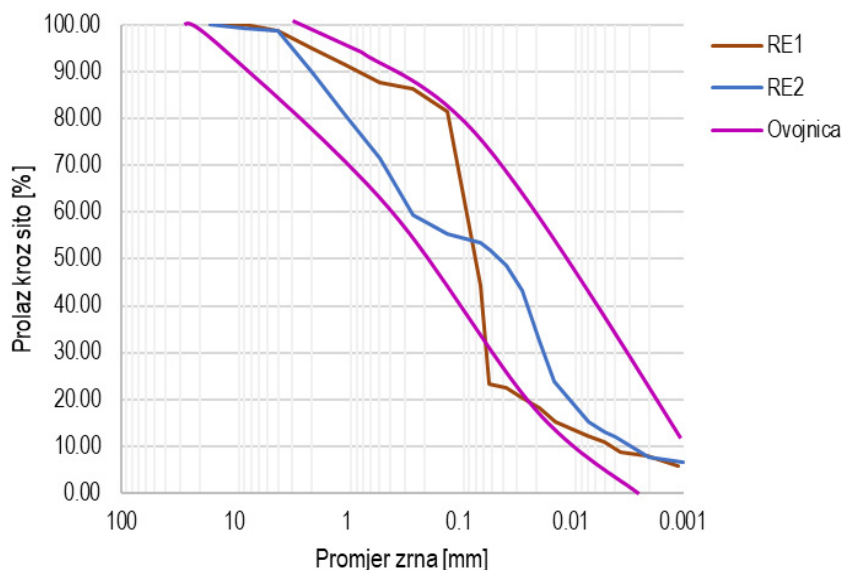
Za potrebe eksperimentalnog istraživanja izrađena su četiri modela zida od nabijene zemlje u mjerilu 1:2 (slika 5), pri čemu je jedina varijabla bila mješavina materijala. Ostala svojstva zidova bila su ista kako bi se omogućila usporedba rezultata i provjera utjecaja materijala na potresni odziv. Geometrijska svojstva zidova bila su identična za sve modele: visina od 1,25 m, duljina također 1,25 m, a debljina zidova 25 cm, u skladu s istraženim karakteristikama stvarnih zidova od nabijene zemlje na području istočne Hrvatske.

Slika 5. *Postav eksperimenta (autorska fotografija)*



Kako bi se osigurala provjera ponovljivosti rezultata, modeli zidova izrađeni su u parovima s istim materijalnim svojstvima. Prva dva modela zida (W1 i W2) izrađena su od zemljanog materijala u svom prirodnom sastavu (RE1), prikupljenog iz iskopine u okolici Osijeka (iz naselja Retfala). Druga dva modela zida (W3 i W4) izrađena su od zemljanog materijala prikupljenog iz druge iskopine, također u okolici Osijeka (s područja Orlovnjak), no u zemljani materijal dodano je i 40% masenog udjela sitnog šljunka, promjera zrna do 4 mm, čime je nastala mješavina RE2. Za obje mješavine je granulometrijski sastav (slika 6) određen postupkom mokrog sijanja i areometriranja prema normi HRN EN ISO 17892-4. Korekcija sastava mješavine RE2 provedena je kako bi se mješavina sastavom našla unutar ovojnice koja opisuje do sada ispitane mješavine s područja Slavonije i Baranje (slika 6). Granulometrijska ovojnica rezultat je provedenih ispitivanja na prikupljenim uzorcima materijala iz postojećih tradicijskih zemljanih kuća s područja Slavonije i Baranje, a izradio ju je istraživački tim RE-forMS.

Slika 6. Granulometrijski sastav rabljenih mješavina (Perić, Kraus i Grubišić, 2022)



Za potrebe ovog istraživanja, modeli zidova izrađeni su korištenjem tradicionalnih tehnika, ručno zbijani čeličnim i drvenim nabijačima. Vlažnost materijala nije unaprijed egzaktno određena, već je kontrolirana pomoću drop testa (Walker i sur., 2005; Perić, Kraus i Grubišić, 2022). Nakon prosijavanja tla kroz sito s otvorima od 16 mm, tlo i sipina miješani su ručno na betonskoj podlozi. Materijal su pripremali iskusni lokalni majstori s dugogodišnjim iskustvom u gradnji zemljanih kuća, a voda je dodavana špricanjem sitnih kapljica po površini. 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 2 do 3 radnika. Kako bi se spriječilo deformiranje (puzanje) zbog razmjerno velike vlastite težine, ali i i prekomjerno raspucavanje prilikom sušenja, oplata je zadržana na modelima zidova u prosjeku tjedan dana nakon završetka izvedbe.

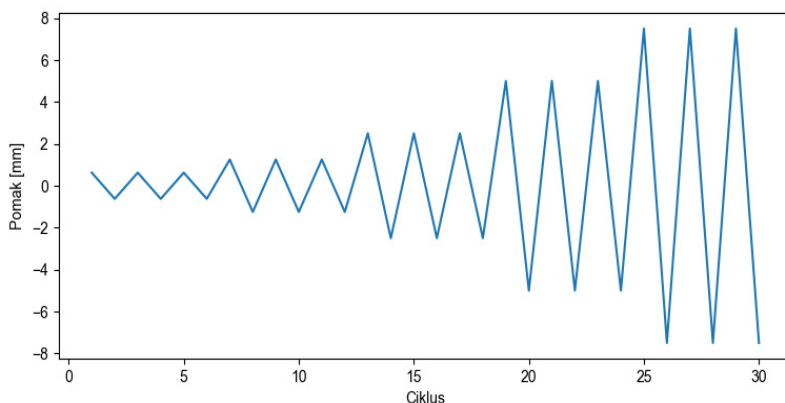
Za potrebe određivanja tlačne, vlačne i posmične čvrstoće materijala od kojeg su izrađeni zidovi, za svaki par zidova izrađeni su sljedeći uzorci (Perić, Kraus i Grubišić, 2022): tri kocke (15×15×15 cm), tri valjaka (15×30 cm) i tri prizme (4×4×16 cm). Uzorci su izrađeni od istog materijala od kojega je izrađen zid. Uzorci su pohranjeni u komoru sa kontroliranim vlažnosti od $50 \pm 5\%$ i pri temperaturi od $20 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, gdje su njegovani tijekom 28 dana nakon čega su ispitani. Provedena tlačna ispitivanja na kockama i valjcima omogućila su određivanje prosječne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti za materijale korištene u izradi zidova W1, W2, W3 i W4. Za zidove W1 i W2, prosječna tlačna čvrstoća iznosila je 1,23 MPa na kockama i 1,10 MPa na valjcima, dok su prosječne vrijednosti modula elastičnosti bile 42,52 MPa na kockama i 82,21 MPa na valjcima. Prosječna vlačna

čvrstoća utvrđena na prizmama iznosila je 0,50 MPa. Za zidove W3 i W4, prosječna tlačna čvrstoća bila je 1,90 MPa na kockama i 2,11 MPa na valjcima, dok je prosječna vrijednost modula elastičnosti iznosila 74,50 MPa na kockama i 221,01 MPa na valjcima. Prosječna vlačna čvrstoća na prizmama iznosila je 1,56 MPa.

Potresna otpornost modela zidova od nabijene zemlje ispitana je eksperimentalno pomoću ciklički promjenjivog horizontalnog opterećenja. Model zida je zbog prijenosa unutar laboratorija te lakšeg učvršćivanja prilikom ispitivanja bio postavljen na temeljnu betonsku gredu. Osim toga, naglavna betonska greda dimenzija 20 x 35 x 200 cm bila je postavljena i na vrh modela zida kako bi se omogućilo ravnomjerno nanošenje vertikalnog opterećenja tijekom eksperimenta (slika 5).

Na model zida najprije je primijenjeno vertikalno opterećenje od oko 0,19 MPa, a zatim je u ciklusima dodavan horizontalni pomak. Prva dva seta ciklusa imala su manji korak kako bi se zabilježilo linearno ponašanje, dok je kasniji korak povećan na 2,5 mm. Protokol horizontalnog pomaka, prikazan na slici 7, temelji se na literaturi. Za modele W3 i W4 proveden je dodatni ciklus s pomakom od ± 10 mm radi postizanja značajnijeg pada krutosti. Ispitivanje je prekinuto kad je uočen značajan pad horizontalne sile uz daljnji porast pomaka.

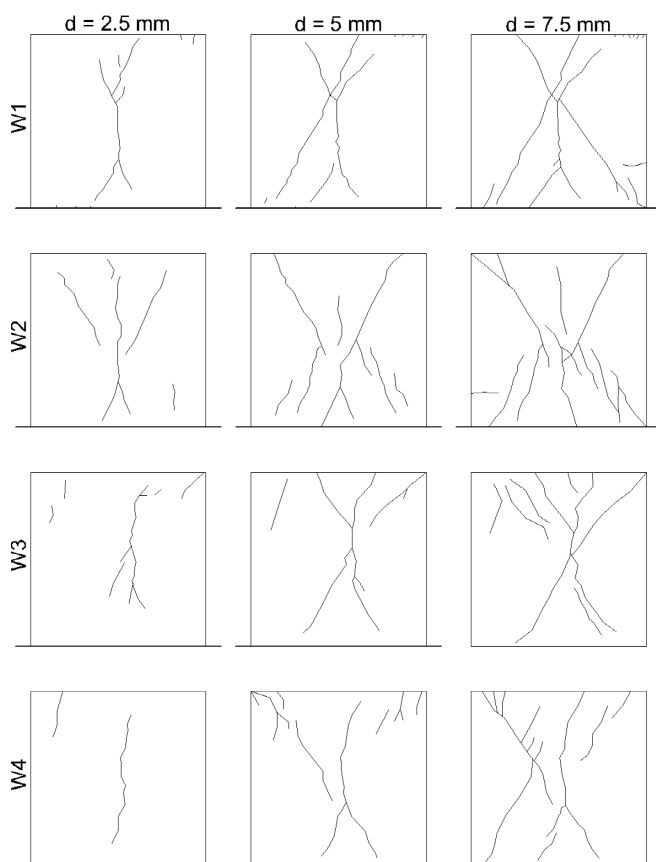
Slika 7. *Potokol opterećivanja modela zida horizontalnim pomakom (Perić, Kraus i Grubišić, 2022)*



Tijekom provedbe eksperimenta, odziv modela zidova bilježen je primjenom više LVDT-a (linearnih varijabilnih diferencijalnih transformatora), pozicioniranih kako je prikazano na slici 5, te primjenom ARAMIS sustava. Osim pomaka gornje betonske grede, mjereno je i relativni pomak betonskih greda u odnosu na model zida, kao i pomak donje betonske grede u odnosu na temeljnu reaktivnu ploču laboratorija.

Rezultati ispitivanja pokazali su da je ponašanje zidova uglavnom simetrično u oba smjera guranja (lijevo i desno). U prosjeku, najveća nosivost zidova i pripadajući pomak u jednom smjeru iznosio je 18,65 kN te 5,45 mm, dok su za drugi smjer ove vrijednosti iznosile 18,95 kN i 6,13 mm. Slika 8 prikazuje razvoj pukotina nakon tri ciklusa cikličkog djelovanja s amplitudama od 2,5 mm, 5 mm i 7,5 mm, što odgovara međukatnim pomacima od 0,2%, 0,4% i 0,56%. Prema Calviijevoj analogiji (Perić, Kraus i Grubišić, 2022), prvi stupac na slici 8 prikazuje pukotine u graničnom stanju LS2 (blaga oštećenja), srednji stupac u stanju LS3 (značajna oštećenja), a posljednji stupac prikazuje pukotine nakon sloma konstrukcije (LS4). Zidovi W3 i W4 pokazali su znatno manje izražene pukotine nakon dosezanja tečenja u usporedbi sa zidovima W1 i W2.

Slika 8. Shematski prikaz pukotina formiranih nakon pojedinog ciklusa djelovanja (Perić, Kraus i Grubišić, 2022)



5. Osvrt na svjetske norme i preporuke za građenje zemljanih kuća

Ovaj dio rada pruža sažet pregled normi i preporuka koje se temelje na brojnim laboratorijskim istraživanjima i terenskim misijama. Iako su u ovom poglavlju prikazane samo odabrane norme, važno je napomenuti da postoji znatno veći broj normi i preporuka koje podržavaju građenje zemljanih kuća. Schroeder (2016) i Thompson, Augarde i Osorio (2022) izradili su opsežne popise svih do tada poznatih svjetskih normi, pružajući temeljit uvid u propise koji su se razvili tijekom vremena na temelju različitih istraživanja i iskustava s terena.

Za gradnju kuća od nabijene zemlje potrebno je koristiti tlo pogodnih svojstava. U prošlosti, na području Slavonije i Baranje, znanja o pogodnom tlu i tehnikama gradnje prenosila su se usmeno s generacije na generaciju, stoga danas ne postoje detaljni zapisi. U svijetu postoje brojne norme i preporuke (Doat i sur., 1979; Norton, 1986; SADC ZW HS 983; Walker i sur., 2005; Keable i Keable, 2011) za odabir prikladnog tla za gradnju kuća od nabijene zemlje. Međutim, Republika Hrvatska još uvijek nema nacionalne norme i detaljne preporuke za građenje zemljanih kuća zbog čega je njihova gradnja, ali i sanacija, otežana i/ili ograničena.

Prilikom odabira prikladnog tla promatra se više svojstava kao što su granulometrijski sastav, Atterbergove granice, udio organiskih tvari i drugo. Norme i preporuke objavljene u literaturi (npr. Doat i sur., 1979; Norton, 1986; SADC ZW HS 983, 2014; Walker i sur., 2005; Keable i Keable, 2011) za tražena svojstva tla za izgradnju kuća od nabijene zemlje vezane su za određena područja i države. Isto je potrebno definirati i za Republiku Hrvatsku.

Usporedbom rezultata prikazanih u tablici 1 s preporukama i zahtjevima danim u tablici 2, može se vidjeti da materijal svih promotrenih zemljanih kuća sagrađenih u Slavoniji i Baranji ne udovoljavaju sve kriterije dane u tablici 2. Ipak kuće iz Slavonije i Baranje iz kojih su uzeti uzorci odolijevaju gravitacijskim i potresnim silama već gotovo 100 godina. Tek se kuće s oznakom ČM-1, KR-3 i KV-2 s obzirom na granulometrijski sastav uklapaju u kriterije koje sugeriraju Walker i suradnici (2005). Kuće KR-3 i KV-2 zadovoljavajućeg su granulometrijskog sastava prema kriteriju danom u Keable i Keable (2011) i SADC ZW HS 983 (2014), dok kuća KR-3 udovoljava kriterijima koje sugerira Norton (1986). Budući da sve promatrane kuće i nakon više godina od gradnje postoje, može se zaključiti da je za područje Slavonije i Baranje potrebno formiranje novih kriterija za što su potrebna opsežnija terenska i laboratorijska istraživanja. U radu Perić Fekete i suradnici (2023) dan je jedan prijedlog kriterija, međutim ni taj kriterij nije zadovoljavajući za sve promatrane kuće što se može vidjeti na slici 3.

Tablica 2. *Zahtjevi za granulometrijski sastav tla za kuće od nabijene zemlje*

Izvor	Glina min – max (%)	Prah min – max (%)	Pijesak i šljunak min – max (%)
Doat i sur. (1979)	15 – 25	20 – 35	40 – 65
Keable i Keable (2011)	5 – 15	15 – 30	50 – 70
Norton (1986)	10 – 25	15 – 30	45 – 75
SADC ZW HS 983 (2014)	5 – 15	15 – 30	50 – 70
Walker i sur. (2005)	5 – 20	10 – 30	45 – 80

Usporedbom rezultata iz tablice 1 sa zahtjevima prikazanim u tablici 3, može se vidjeti da su granice tečenja i indeksa plastičnosti unutar preporučenih vrijednosti, te se navedeni kriteriji mogu primijeniti i za kuće od nabijene zemlje s područja Slavonije i Baranje. Ipak, prilikom usporedbe kriterija i promatranih rezultata ispitivanja potrebno je biti oprezan budući da su uzorci uzeti iz kuća koje postoje dugi niz godina pri čemu su bili u drugačijim uvjetima u odnosu na uvjete u tlu. To za posljedicu može dati određena odstupanja u vrijednostima granice tečenja i plastičnosti.

Tablica 3. *Zahtjevi za granicu tečenja i indeks plastičnosti tla za kuće od nabijene zemlje*

Izvor	Granica tečenja min – max (%)	Indeks plastičnosti min – max (%)
Doat i sur. (1979)	25 – 50	7 – 29
Houben i Guillaud (2006)	25 – 46	2 – 30
Walker i sur. (2005)	0 – 45	2 – 30

Preporuke i zahtjevi vezani za udio organskih tvari u kućama od nabijene zemlje su većinom opisni (tablica 4), dok Walker i sur. (2005) te Houben i Guillaud (2006) daju granične vrijednosti. Sve promatrane kuće imaju udio organskih tvari jednak ili veći od 2%, a za kuće BB-1, BB-3, KV-2 i TNJ-1 koje imaju udio organskih tvari veći od 4% nije zadovoljen niti jedan zahtjev odnosno preporuka iz tablice 4. Preostale kuće zadovoljavaju preporuke dane u Houben i Guillaud (2006) s granicom od 2 do 4% za izraženi utjecaj organskih tvari.

Tablica 4. *Zahtjevi i preporuke za udio organskih tvari*

Izvor	Zahtjevi i preporuke
NZS 4298	tlo koje sadrži organske tvari koje mogu trunuti ili se mogu slomiti unutar zida, ne smije se upotrebljavati u gradnji kuća od nabijene zemlje
Walker i sur. (2005)	udio organskih tvari treba biti manji od 2% mase zemljane mješavine
Houben i Guillaud (2006)	2 – 4% granica izraženog utjecaja organskih tvari
Keable i Keable (2011)	tlo bi trebalo biti bez organskih i drugih sastojaka (npr. sol, otpad)
SADC ZW HS 983	tlo treba biti slobodno od organskih tvari
New Mexico Code 14.7.4 NMAC	tlo treba biti slobodno od organskih tvari

Prilikom gradnje kuća od nabijene zemlje potrebno je postići odgovarajući stupanj zbijenosti, a najčešće je tražena vrijednost od 95% (SADC ZW HS 983) i 98% (NZS 4298; Walker i sur., 2005), dok New Mexico Code 14.7.4 NMAC traži zbijanje slojeva tla do potpune zbijenosti. Stupanj zbijenosti određuje se usporedbom vrijednosti suhe gustoće ugrađenog tla na terenu (u zidu kuće) u odnosu na suhu gustoću određenu pokusom Proctor. Usporedbom preporuka s vrijednostima u tablici 1, može se vidjeti da većina kuća ne zadovoljava postavljene zahtjeve. Niže vrijednosti zabilježenih gustoća mogu se pripisati određenim oštećenjima unutar zidova koje su ostavili kukci u pojedinim kućama, povećem udjelu organskih tvari, ali i mogućoj poremećenosti uzorka koja je mogla nastati kao posljedica otežanog uzorkovanja. Stoga je preporuka ponoviti ispitivanja na većem broju reprezentativnih uzoraka te provesti Proctor pokuse za promatrane kuće kako bi se mogla utvrditi zbijenost tla u zidovima te kako bi se mogle dati preporuke za područje Slavonije i Baranje.

6. Zaključak

Gradnje zemljanih kuća u Hrvatskoj polako počinje jenjavati početkom 20. stoljeća. Današnje stanje tradicijske zemljane arhitekture tužno je svjedočanstvo zaboravljenih vještina, racionalnog i ekološki osviještenog korištenja okruženja u kojem se živjelo s prirodom i ritmom godišnjih doba. Veliki broj manje ili više urušenih zemljanih kuća zorno prikazuje nekada puno veća i nastanjenija naselja, a o nekadašnjem životu na Baranjskoj planini svjedoče zarasli surdoci s ostacima vinogradarskih kućica i podruma. Upravo oni najbolji su prikaz gospodarskih zgrada za koje su tradicijski graditelji koristili jedinstvene karakteristike reljefa. Istraživanje zemljane arhitekture, ili, bolje rečeno, njezinih današnjih ostataka, zahtijeva multidisciplinarni pristup. Nositelja tradicijskog umijeća više nema, a iskazi koje je moguće dobiti na terenu su šturi i (uglavnom) iz treće ruke.

Ovaj rad ističe važnost očuvanja kulturne baštine kroz očuvanje tradicijskih tehnika gradnje zemljom. Tradicijske zemljane kuće u Slavoniji i Baranji predstavljaju neprocjenjiv dio kulturne baštine, a njihovo očuvanje ima ne samo povijesni i kulturni značaj, već i ekološki. Korištenje lokalno dostupnih materijala i tehnika gradnje smanjuje utjecaj na okoliš, smanjuje emisije CO₂ i doprinosi održivoj gradnji. Stoga bi uspostavljanje nacionalnih normi koje potiču gradnju zemljom bilo važan korak prema očuvanju baštine i promicanju održivih građevinskih praksi.

Jedan od ključnih aspekata ovog istraživanja odnosi se na usklađivanje lokalnih materijala i tradicionalnih tehnika gradnje s modernim normama i preporukama. Iako međunarodne norme pružaju smjernice za odabir materijala i tehnika gradnje, rezultati ovog istraživanja pokazuju da je nužno prilagoditi te norme specifičnostima lokalnih materijala iz Slavonije i Baranje. Na primjer, iako materijali korišteni za gradnju zemljanih kuća u ovom području nisu u potpunosti zadovoljili sve zahtjeve međunarodnih normi, te

su kuće izdržale potresna i gravitacijska opterećenja više desetljeća. Ova činjenica sugerira da bi buduće nacionalne norme trebale uzeti u obzir lokalne materijale i tehnike, umjesto da se slijepo oslanjaju na postojeće međunarodne norme i druge slične dokumente.

Eksperimentalna istraživanja provedena u okviru projekta RE-forMS pokazala su razlike u ponašanju zidova tijekom cikličkih opterećenja. Zidovi s dodatkom sipine imali su manji razvoj pukotina nakon doseganja tečenja, što ukazuje na veću sposobnost apsorpcije potresne energije bez značajnog oštećenja. Jedan zid s dodatkom sipine pokazao je najmanje izražene pukotine od svih ispitanih modela, što se može pripisati njegovoj većoj duktilnosti, što je ključno za otpornost na potrese. Ovi rezultati naglašavaju važnost upotrebe optimiziranih mješavina materijala kako bi se poboljšala dugoročna otpornost zemljanih zidova u potresno aktivnim područjima.

Jedan od glavnih izazova s kojima se suočava gradnja zemljom u Hrvatskoj jest nedostatak nacionalnih normi i detaljno razrađenih smjernica za projektiranje i obnovu zemljanih konstrukcija. Iako su druge zemlje razvile norme koje reguliraju gradnju zemljom, Hrvatska se još uvijek suočava s preprekama u tom pogledu. Zbog toga je od presudne važnosti da se na temelju rezultata istraživanja poput ovoga formiraju nacionalni standardi za gradnju zemljom. Ovi standardi trebali bi omogućiti ne samo obnovu postojećih zemljanih kuća, već i gradnju novih objekata koji bi zadovoljili suvremene zahtjeve za otpornost na potrese i ekološku održivost, što je u skladu s Ciljevima održivog razvoja.

Zaključno, rezultati ovdje opisanih provedenih istraživanja i uočene problematike pružaju temelj za daljnji razvoj nacionalnih smjernica i normi za gradnju i obnovu zemljanih kuća u Hrvatskoj. Korištenje lokalnih materijala i tradicionalnih tehnika gradnje može osigurati dugotrajnost i otpornost zemljanih konstrukcija, dok prilagodba međunarodnih normi specifičnostima hrvatskih materijala može doprinijeti razvoju održivih i ekološki prihvatljivih građevinskih rješenja.

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 se ovim putem zahvaljujemo.

Literatura

- ASTM International. (2013). ASTM D2974-13: Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2017). ASTM D2487-17: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Brkanić Mihić, I., Kraus, I., Kaluder, J. i Perić Fekete, A. (2024). Architectural features and soil properties of traditional rammed earth houses: Eastern Croatia case study. *Buildings*, 14, 2049.
- Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S. i Vitoux, F. (1979). *Construire en terre*. Grenoble: CRA Terre—Centre de Recherche et d'Application-Terre, École d'Architecture de Grenoble.
- Društvo inženjera i arhitekata. (1994). *Hrvatski građevni oblici (pretisak iz 1905-1908)*. Privlačica.
- Freiheurn Czoernig, K. (1857). *Ethnographie der Österreichischen Monarchie*. Wien.
- Gomes, M. I., Gonçalves, T. D. i Faria, P. (2014). 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, 185-212. <https://doi.org/10.1080/15583058.2012.683133>
- Houben, H. i Guillaud, H. (2006). *Earth construction: A comprehensive guide*. London: Intermediate Technology Publications.
- Hrvatski zavod za norme. (2015). HRN EN ISO 17892-2:2015 Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Laboratorijsko ispitivanje tla – Dio 2: Određivanje volumne mase (ISO 17892-2:2014; EN ISO 17892-2:2014).
- Hrvatski zavod za norme. (2016). HRN EN ISO 17892-4:2016 Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Laboratorijsko ispitivanje tla – Dio 4: Određivanje granulometrijskog sastava (ISO 17892-4:2016; EN ISO 17892-4:2016).
- Hrvatski zavod za norme. (2018). HRN EN ISO 17892-12:2018 Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Laboratorijsko ispitivanje tla – Dio 12: Određivanje granica Atterberga (ISO 17892-12:2018; EN ISO 17892-12:2018).

Kaluđer, J., Kraus, I., Perić, A. i Brkanić Mihić, I. (2022). Physical properties of the soil in the walls of traditional eastern Croatia rammed earth houses. *Građevinar*, 75(11), 1067-1074. <https://doi.org/10.14256/jce.3608.2022>

Keable, J. i Keable, R. (2011). *Rammed earth structures: A code of practice* (2. izd.). Warwickshire: Practical Action Publishing.

Kraus, I., Kaluđer, J., Brkanić Mihić, I., Kraus, L. i Perić, A. (2022). Pregled postojećih tradicijskih zemljanih objekata i prikaz fizikalnih i mehaničkih svojstava tradicijskih zemljanih mješavina. Izvještaj D4, projekt RE-forMS. Osijek: Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek.

Lončar-Vicković, S. i Stober, D. (2011). *Tradicijska kuća Slavonije i Baranje – Priručnik za obnovu*. Zagreb: Ministarstvo turizma Republike Hrvatske; Osijek: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

New Mexico Administrative Code. (2015). *New Mexico Code 14.7.4 NMAC: New Mexico Earthen Building Materials Code*.

Norton, J. (1986). *Building with earth: A handbook*. London: IT Publications.

NZS 4298. (1998). *Materials and workmanship for earth buildings. Building Code Compliance Document E2 (AS2)*, New Zealand.

Paládi-Kovács, A. (1997). *Magyaréprajz, Anyagi kultúra 3., Eletmód*. Budapest. Preuzeto s <http://mek.niif.hu/02100/02152/html/04/index.html>

Perić, A., Kraus, I. i Grubišić, M. (2022). Eksperimentalno ispitivanje zidova i uzoraka od nabijene zemlje. Izvještaj D5, projekt RE-forMS. Osijek: Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek.

Perić, A., Kraus, I., Kaluđer, J. i Kraus, L. (2021). Experimental campaigns on mechanical properties and seismic performance of unstabilized rammed earth—A literature review. *Buildings*, 11(8), 367. <https://doi.org/10.3390/buildings11080367>

Perić Fekete, A., Kraus, I., Grubišić, M. i Dokšanović, T. (2023). In-plane seismic performance of rammed earth walls: an eastern Croatia reconnaissance based study. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22(3), 1359-1385. <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01826-4>

Pinterović, D. (1954). *Etnografske karakteristike hrvatskih sela u Baranji*. Osječki zbornik, 4.

SADC ZW HS 983. (2014). *Rammed earth structures – Code of practice*. Southern African Development Community Cooperation in Standardization.



- Schroeder, H. (2016). Sustainable building with earth. Springer Cham.
- Somek, P. (2013). Tradicijski način gradnje ruralnih objekata u Podravini. Podravina, 12(23), 52-69. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/107181>
- Sršan, S. (1999). Baranja 1785. godine. Osijek: Državni arhiv u Osijeku.
- Španiček, Ž. (1995). Narodno graditeljstvo Slavonije i Baranje. Vinkovci: Privlačica.
- Thompson, D., Augarde, C. i Osorio, J. P. (2022). A review of current construction guidelines to inform the design of rammed earth houses in seismically active zones. Journal of Building Engineering, 54, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104666>
- Walker, P., Keable, R., Martin, J. i Maniatidis, V. (2005). Rammed earth: Design and construction guidelines. IHS BRE.
- Živković, Z. (2013). Hrvatsko tradicijsko graditeljstvo. Zagreb: Ministarstvo kulture, Uprava za zaštitu kulturne baštine.

RAMMED EARTH HOUSES: CURRENT STATE IN CROATIA AND PERSPECTIVES FOR SUSTAINABLE HOUSING SOLUTIONS

Ivan KRAUS

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek, Vladimira Preloga 3, Osijek, Croatia

ikraus@gfos.hr

Mirela RAVAS

Ministry of Culture and Media, Conservation Department in Osijek, Kuhačeva 27, Osijek, Croatia

mirela.ravas@min-kulture.hr

Ivana BRKANIĆ MIHIĆ

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek, Vladimira Preloga 3, Osijek, Croatia

ibrkanic@gfos.hr

Jelena KALUĐER

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek, Vladimira Preloga 3, Osijek, Croatia

jkaluder@gfos.hr

Lucija KRAUS

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek, Vladimira Preloga 3, Osijek, Croatia

lucija@gfos.hr

Abstract

Available data shows that about 40% of the world's population lives in earthen houses, while earthen buildings make up 15% of the heritage sites on the UNESCO World Heritage List. The soil as a building material (i.e. the earth) has a negligible environmental impact. It can be returned to its natural state when the building is no longer in use and is locally available. The use of earth for house construction minimises the transport requirements and CO₂ emissions of construction projects and thus contributes to the Sustainable Development Goals. Traditional earthen houses are part of Croatia's architectural heritage. Although they make up a significant part of the rural housing stock in eastern Croatia and reflect the craftsmanship of rural builders, these structures are disappearing due to modern building regulations and the lack of national standards for their design. Many technologically advanced countries have developed standards for earthen buildings, and modern earthen buildings have emerged in recent years. In Croatia, designing new earthen buildings is

currently not permitted and previous renovations have often been of questionable quality. A crucial step before planning the construction of new earthen houses is the preservation of existing houses, which is only possible through a comprehensive understanding of the materials and existing structures. This paper is divided into four sections, focussing on rammed earth construction. The first section provides an overview of traditional earth construction in Croatia and discusses its development and spatial expansion into the 21st century, focussing on the use of local materials, building regulations and construction technologies. It also describes the introduction of new materials and construction techniques, which led to the disappearance of master builders with experience in traditional earthen construction. The second section analyses the distribution of earthen houses in eastern Croatia and their current state. It also analyses the architecture of traditional earthen houses, focusing on the most important architectural elements. The third section presents the research carried out as part of the RE-forMS project. The field studies carried out in eastern Croatia led to descriptions of the boundary conditions of rammed earth walls and the materials originally used for their construction. The results of experimental studies on rammed earth wall models subjected to simulated seismic forces expected in eastern Croatia are also presented. The fourth section gives an overview of modern earth building technologies and global standards for the design of earth buildings in seismically active areas. It also analyses the regional conditions, compares the fundamental physical and mechanical properties of earth and highlights the advantages and disadvantages of using earth as a building material in earthquake-prone areas.

Keywords: earthen house, rammed earth, Sustainable Development Goals, eastern Croatia, cultural heritage

Key message of the paper: This paper emphasises the importance of building earthen houses to preserve cultural identity and environmental sustainability while meeting the challenges of modern building codes. It focuses on the historical development, traditional and modern construction techniques and the need for construction standards for earthquake-resistant earthen houses, especially in the context of eastern Croatia