

Primljen / Received: 25.9.2023.
Ispravljen / Corrected: 6.6.2024.
Prihvaćen / Accepted: 10.6.2024.
Dostupno online / Available online: 10.8.2024.

Učinak naprednih izolacijskih materijala i strategija pasivne optimizacije na toplinsku udobnost u tradicionalnim kućama tijekom zime

Stručni rad

Autori:



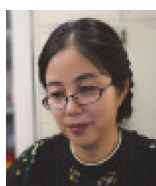
Prof.dr.sc. **Yiyun Zhu**, dipl.ing.građ.
Tehnološko sveučilište Xi'an, Kina
Građevinski fakultet
zyyun@xaut.edu.cn



Lu Liu, dipl.ing.građ.
Powerchina Guiyang Engineering
Corporation Limited
powerchinaliulu@163.com
Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Guochen Sang**, dipl.ing.građ.
Tehnološko sveučilište Xi'an, Kina
Građevinski fakultet
sanguochen@xaut.edu.cn



Izv.prof.dr.sc. **Xiaoling Cui**, dipl.ing.građ.
Tehnološko sveučilište Xi'an, Kina
Građevinski fakultet
hongbeibei@xaut.edu.cn

Yiyun Zhu, Lu Liu, Guochen Sang, Xiaoling Cui

Učinak naprednih izolacijskih materijala i strategija pasivne optimizacije na toplinsku udobnost u tradicionalnim kućama tijekom zime

U radu je prikazano istraživanje toplinske udobnosti interijera kako bi se poboljšala toplinska udobnost interijera tradicionalnih kuća u regiji Guan Zhong u provinciji Shaanxi tijekom zime. Istraživanje je provedeno u selu Xiaoliu koristeći terenske testove i upitnike. Terenska ispitivanja i analize pokazali su da je toplinska udobnost tradicionalnih kuća u ovoj regiji loša, prostorni raspored unutar kuća neprikladan za očuvanje topline, toplinska svojstva vanjskih zidova neadekvatna, a način grijanja neučinkovit. Za poboljšanje analize toplinske udobnosti korišteni su parametri prijenosa topline, gubitak i dobitak topline kroz tkanine i toplinska svojstva nanomaterijala. U kombinaciji s lokalnim gospodarskim uvjetima primijenjene su strategije pasivnog dizajna kao što su optimizacija prostornog rasporeda, poboljšanje toplinske izolacije vanjskih zidova i korištenje solarne energije. Rezultati simulacije pokazuju da se potrošnja energije može značajno smanjiti, a osjećaj toplinske udobnosti u tradicionalnim kućama može se poboljšati razumnijom podjelom unutarnjeg prostora, povećanjem učinkovitosti toplinske izolacije vanjskih zidova i boljim iskorištavanjem Sunčeve energije i prirodne ventilacije. Stoga je za poboljšanje toplinske udobnosti i smanjenje energetske opterećenja tradicionalnih kuća u regiji Guan Zhong potrebno primijeniti strategije pasivne optimizacije.

Ključne riječi:

tradicionalna kuća, unutarnja toplinska udobnost, toplinska simulacija, strategije pasivnog dizajna, nanomaterijali

Professional paper

Yiyun Zhu, Lu Liu, Guochen Sang, Xiaoling Cui

Effect of advanced insulation materials and passive optimization strategies on interior thermal comfort of traditional houses in winter

This study proposed an interior thermal comfort test to enhance the interior thermal comfort of traditional houses in the Guan Zhong region of the Shaanxi Province during winter. The study was conducted in Xiaoliu village by employing field tests and a questionnaire survey. The field tests and analysis revealed that the thermal comfort of traditional houses in this region is poor, the spatial layout of the houses is unsuitable for conserving heat, the thermal properties of the enclosure walls are inadequate, and the mode of heating is inefficient. The heat transfer parameters, heat lost and gained through fabrics, and thermal properties of nanomaterials have been used to improve the thermal comfort analysis. Combined with the local economic conditions, passive design strategies such as optimizing the spatial layout, improving the thermal insulation performance of the enclosure walls, and using solar energy were implemented. The simulation results indicate that energy consumption can be significantly reduced, and the indoor thermal comfort of traditional houses can be enhanced by reasonably dividing the indoor space, increasing the thermal insulation performance of the enclosure walls, and making better use of solar energy and natural ventilation. Therefore, to improve thermal comfort and reduce the energy load of traditional houses in the Guan Zhong region, it is necessary to adopt passive optimisation strategies.

Key words:

traditional house, indoor thermal comfort, thermal simulation, passive design strategies, nanomaterials

1. Uvod

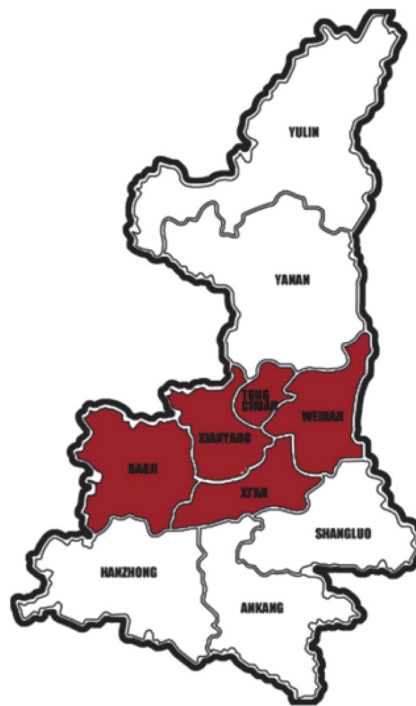
U regiji Guan Zhong koja se nalazi u provinciji Shaanxi, s površinom od 55.500 četvornih kilometara i populacijom od približno 24 milijuna, tradicionalne kuće imaju velike probleme s toplinskom udobnošću tijekom hladnih, snježnih zima uzrokovanih oštrim vjetrovima i oborinama. Te su kuće osjetljive na gubitak topline i propuh jer su uglavnom napravljene od blata, opeke i drva, što čini zimske životne uvjete neugodnima za stanare. Pronalazak kreativnih rješenja koja kombiniraju suvremene tehnologije s tradicionalnim oblikovanjem ključno je za pravilno rješavanje tih poteškoća. Moderni izolacijski materijali i tehnike pasivne optimizacije bili su uspješni u blažim klimatskim uvjetima, međutim, njihova je učinkovitost u tradicionalnim kućama Guan Zhonga još uvijek uglavnom nepoznata. Prilagodba inovacija na ispunjavanje jedinstvenih zahtjeva tradicionalnih kuća u regiji uglavnom je neistražena u postojećoj literaturi koja se bavi modernim tehnikama gradnje i zapadnim arhitektonskim okruženjima.

Povećao se broj urbaniziranih područja diljem svijeta, a prema Ujedinjenim narodima, očekuje se da će se više od 70 % svjetskog stanovništva do 2050. nalaziti u urbanim središtima. Prema Svjetskim pokazateljima razvoja, 85 % stanovništva bit će do 2030. u zemljama u razvoju. Ovaj rast doveo je do povećanja urbane gustoće građevina, posebno u gradskim središtima, čime se utjecalo na karakteristike unutarnjih prostora koji se sve više oslanjaju na umjetne sustave kako bi bili zadovoljavajući. Osim toga, vrijeme provedeno u zatvorenom prostoru znatno se povećalo posljednjih godina. Dok arhitekti i projektanti razmatraju načine za poboljšanje unutarnje udobnosti i performansi građevina, moraju uzeti u obzir da ljudi provode 80-90 % dana u zatvorenom prostoru. U razvijenim zemljama građevinski sektor (stambeni, komercijalni i javni) troši između 20-40 % njihove ukupne nacionalne potrošnje [1]. Građevine troše oko 70 % svoje energije kroz sustave klimatizacije i umjetne rasvjete [2]. Velika potrošnja energije klimatizacijskih uređaja uglavnom je posljedica jedinstvene kontrole unutarnje temperature bez obzira na lokaciju; međutim, kao što su istraživanja pokazala, nije potrebno osigurati precizne toplinski ugodne temperature [3]. Značajne uštede energije mogu se postići klimatizacijskim sustavima koji dopuštaju širi raspon fluktuacija unutarnje temperature. Konkretno, više istraživanja bilo je usmjereno na toplinsku udobnost i energetska učinkovitost [4]. Posljednjih je godina područje istraživanja toplinske udobnosti privuklo pozornost mnogih istraživača diljem svijeta, djelomično zahvaljujući većoj javnoj raspravi o klimatskim promjenama. Ukupna toplinska udobnost i procjena kvalitete unutarnjeg prostora ne ovise samo o fizičkim parametrima. Fiziološke i psihološke reakcije ljudi na okolinu su dinamične i integriraju različite fizičke fenomene koji su u interakciji s prostorom kao što su svjetlost, buka, vibracije, temperatura i vlažnost.

U kontekstu globalnog zatopljenja energetska problemi postaju sve izraženiji. Stoga je održivi energetska razvoj od velike važnosti [5]. Kao zemlja s velikom potrošnjom

energije, potrošnja energije u zgradarstvu u Kini bila je oko 30 % nacionalne potrošnje [6]. Građevinska područja ruralnih stambenih građevina čine više od polovice novoizgrađenih kuća u Kini [7, 8]. Stoga je od ključne važnosti smanjenje potrošnje energije u građevinama, osobito u ruralnim područjima. Vlada predlaže da strateški cilj ruralne revitalizacije bude izgradnja lijepog krajolika i poboljšanje ruralne životne okoline koja je ključna za život u skladu s prirodom. Posljedično postoji hitna potreba za istraživanjem tradicionalnih kuća za održivi razvoj. Neosporno je da tradicionalna ruralna arhitektura nudi bogati ekološki doživljaj. Zbog brzoga gospodarskog razvoja životni standard se neprestano poboljšava, a rastu i zahtjevi za unutarnjim toplinskim okruženjima. Kina ima veliku količinu tradicionalnih kuća. Zbog ograničenih ekonomskih uvjeta projektni standardi tih kuća su niski, a većina tradicionalnih ruralnih kuća ne ispunjava toplinske zahtjeve. Do danas ruralnim samoizgrađenim kućama nedostaju projektne specifikacije i slijepo oponašaju urbane građevine, što dovodi do niskih toplinskih svojstava i značajnih problema s potrošnjom energije za grijanje, koja je skupa i štetna za okoliš.

U regiji Guan Zhong prosječna vanjska temperatura zraka u najhladnijem razdoblju (siječanj) iznosi približno $-1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Većina ruralnih građevina u toj regiji ima trodijelnu tlocrtnu organizaciju, što rezultira prostornim rasporedom koji je neadekvatan za postizanje toplinske udobnosti. Dodatno, vanjski zidovi ne zadovoljavaju standarde, koristi se samo jedan način grijanja, a unutarnje toplinsko okruženje je loše. Zimski toplinski problemi u stambenim zgradama odavno su poznati u cijelom svijetu, a akademski krugovi kontinuirano istražuju povezane probleme. Slika 1. prikazuje regiju Guan Zhong.



Slika 1. Regija Guan Zhong

Od 10. do 14. siječnja 2020. istraživačka skupina provela je istraživanja i testove u okrugu Zhouzhi, u regiji Guan Zhong. Provedeno je istraživanje o toplinskoj ugodnosti u regiji Guan Zhong. Liu i sur. analizirali su probleme u prostornom rasporedu tipičnih seoskih kuća u Guan Zhongu [10]. Yang i sur. analizirali su nedostatke u toplinskom proračunu ovojnice stambenih građevina [11]. Shao i sur. upotrijebili su mjere optimizacije kao što je povećanje solarnog prostora radi uštede energije [12]. Kako bi poboljšali toplinsku udobnost, Yu i sur. predložili su mjere optimizacije kao što su optimizacija vanjske konstrukcije i projektiranje vrata i prozora [13]. Autori [14] istaknuli su važnost pružanja korisnicima kontrole nad uvjetima u zatvorenom prostoru kako bi se poboljšala njihova toplinska udobnost. Primjetno je da su korisnici građevina s prirodnom ventilacijom tolerantniji na unutarnje toplinske uvjete u usporedbi s onima u klimatiziranim građevinama. Većina se znanstvenika usredotočila na uzroke toplinske neugode. Mjere optimizacije su empirijske analize s određenog aspekta ili kuta. Malo je istraživanja sustavno i kvantitativno ispitivalo toplinsko okruženje, pri tome uspoređujući relevantne čimbenike koji povećavaju toplinsku udobnost tradicionalnih kuća.

Održavanje toplinske udobnosti tijekom zime veliki je izazov za tradicionalne kuće u regiji Guan Zhong. Kako bi se poboljšala toplinska udobnost unutar ovih kuća, ovo istraživanje ispituje učinke korištenja pasivnih tehnika optimizacije i sofisticiranih izolacijskih materijala, kao što je ekspanzirani polistiren (EPS). Geografsko i klimatsko okruženje regije Guan Zhong ključno je za razumijevanje važnosti i posljedica ovog istraživanja. Regija ima kontinentalnu monsunsku klimu obilježenu jasno definiranim godišnjim dobima i znatnim temperaturnim razlikama između ljeta i zime.

Prema [28], ovo bi istraživanje trebalo poboljšati značajke ovojnice uredske zgrade koristeći tehniku koja se temelji na simulaciji i ima više ciljeva. Kako bismo ispitali različite opcije, upotrijebili smo tehniku optimizacije roja čestica. Nakon toga rezultati optimizacije ispitani su pomoću analize osjetljivosti temeljene na regresiji. Prema nalazima optimizacije, godišnje uštede energije za grijanje i hlađenje za optimiziranu građevinu bile su 70 odnosno 40 %, a očekivani udio nezadovoljstva korisnika bio je 9 %. Gaši i sur. [30] ispitivali su utjecaj perforacija i proreza na difuziju vodene pare kroz ekspanzirani polistiren (EPS) i kako veličina i količina perforacija i proreza utječe na toplinsku vodljivost EPS ploča. Varijacije u debljini uzorka, razmaku proreza te dubini i promjeru perforacija testirane su pomoću numeričkih modela (pristupi kontrolnog volumena). Numerički model korišten za usporedbu perforiranih i neperforiranih EPS ploča pokazao je da se difuzija vodene pare može poboljšati do 42,18 % korištenjem neperforiranih EPS ploča. Dodatno, ovo istraživanje otkriva da efektivni koeficijent difuzije pare ovisi o debljini perforiranih EPS uzoraka.

Hladno vrijeme i karakteristične značajke tradicionalnih domova u regiji Guan Zhong, koji često koriste materijale kao što je opeka od blata i drvo, prepoznati su kao značajni problemi u postojećim istraživanjima. Istraživanja su se često fokusirala

na bilježenje tih arhitektonskih tradicija i njihove kulturne važnosti uz procjenu temeljnih toplinskih karakteristika kao što su potrošnja energije i gubitak topline. Unatoč tome postoji jasan nedostatak znanja o učinkovitoj primjeni taktika pasivne optimizacije i sofisticiranih izolacijskih materijala za poboljšanje toplinske udobnosti starijih domova. Prilagodba takvih tretmana jedinstvenim zahtjevima i ograničenjima regije Guan Zhong nije dobila puno pozornosti, za razliku od njihovog temeljitog ispitivanja u drugim okruženjima kao što su suvremene konstrukcije ili toplije klime.

Analizirana je kuća u regiji Guan Zhong kako bi se odredile smjernice pasivnog dizajna za tradicionalne kuće u regiji. Ispitivanja na terenu korištena su za procjenu toplinskih svojstava kuća i spremnosti stanara na renovaciju svojih domova. Provedena je simulacija za procjenu učinaka različitih pasivnih strategija. Ove smjernice za pasivni dizajn u pogledu toplinskog zadovoljstva stanara dovele su do boljih toplinskih performansi i smanjene potrošnje energije. Naši rezultati su u skladu s onima iz drugih istraživanja, pokazujući da se toplinska udobnost tradicionalnih domova može značajno poboljšati upotrebom metodologija pasivne optimizacije i modernih izolacijskih materijala. Iako naša analiza nadopunjuje trenutnu bazu znanja, ona također naglašava nedostatke u literaturi u pogledu socioekonomskih posljedica i dugoročne izvedbe pasivnih tehnika i izolacije u tradicionalnim kućama.

2. Metodologija

Ovo istraživanje koristilo je terenska mjerenja, upitnike i računalni program za simulaciju. U procesu simulacije primijenjene su pasivne strategije projektiranja, kao što je optimizacija rasporeda prostora, dodavanje toplinske izolacije ovojnice građevine te korištenje solarne energije i prirodne ventilacije. Naknadno je računalni program usporedio izvornu građevinu s optimiziranom građevinom kako bi utvrdio razlike u toplinskoj udobnosti. Metoda kontrolne varijable sustavno je uspoređivala učinke svake mjere optimizacije. Rezultati simulacije pokazali su da se toplinske performanse tradicionalnih kuća mogu poboljšati primjenom različitih strategija pasivnog dizajna u Guanzhongu, Kina. U ovom istraživanju korišten je EnergyPlus, cijenjeni i inovativni program za energetske simulacije građevina. Repliciranjem fizičkih procesa i interakcija u građevini, EnergyPlus omogućuje dubinsku procjenu toplinske udobnosti, performansi HVAC-a i potrošnje električne energije. Ovaj simulacijski program koristan je za proučavanje utjecaja različitih materijala, shema podjele i strategija pasivne optimizacije na unutarnju klimu i potrošnju energije.

2.1. Ciljevi istraživanja

Za istraživanje je odabrana izvorna kuća od opeke i betona, koja je tipična lokalna samoizgrađena kuća s tri volumena u regiji

Guan Zhong, zbog svog reprezentativnog arhitektonskog stila i klimatskih uvjeta. Izgrađena je 2008. godine i ima dvije glavne etaže. Visine prvog i drugog kata su 3,8, odnosno 3,6 m. Dubina volumena prikazana je na slici 3. Zid je masivni zid od glinene opeke debljine 240 mm. Zidovi su iznutra i izvana ožbukani bez termoizolacijskog sloja. Koeficijent prolaza topline je $k = 2,04 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Krov kuće ima dvostruki nagib bez stropa ili sloja za očuvanje topline. Koeficijent oblika kuće je otprilike 0,52, a kuća je orijentirana sjever-jug. Omjer prozora i zida (engl. Window-to-Wall Ratio – WWR) južnog i sjevernog zida je 0,27. Svi prozori su jednostruki drveni prozori. Na vratima nema zastora. Za grijanje se koristi peć na ugljen. Nanomaterijali su dodani na zidove i krovove građevine. Izolacija dobro smanjuje gubitak topline, no, prema istraživanju, pronalazak odgovarajuće debljine krovne izolacije ključno je za uštedu novca i energije. Mora postojati ravnoteža između debljine izolacije i drugih čimbenika, uključujući troškove materijala, poteškoće ugradnje i dugoročno održavanje. Integracija najnovijih izolacijskih materijala i tehnologije može poboljšati toplinsku učinkovitost, što dovodi do održivijeg dizajna građevina. Glavni ciljevi ovog istraživanja su sljedeći:

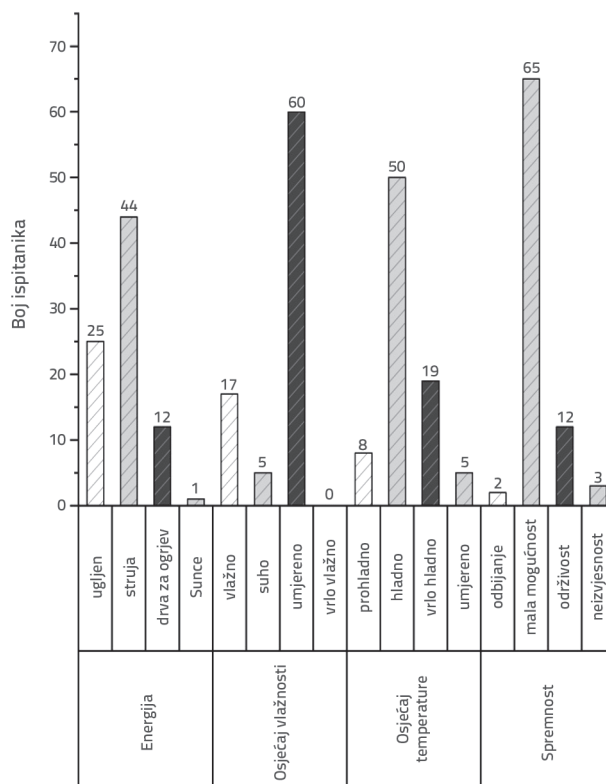
- Usporediti toplinsku vodljivost, otpornost i druge bitne karakteristike modernih izolacijskih materijala, uključujući aerogelove, vakuumske izolirane ploče i fazno promjenjive materijale s tradicionalnijim građevnim materijalima i metodama koje se koristi u regiji Guan Zhong.
- Odrediti učinkovitost naprednih izolacijskih materijala za sprječavanje gubitka topline i povećanje toplinske udobnosti u usporedbi s konvencionalnijim opcijama kao što su blato, opeka i drvo.
- Izvođenje eksperimentalne simulacije temeljene na metrikama kao što su potrošnja energije i toplinska udobnost u zatvorenom prostoru kako bi se poboljšao raspored unutarnjeg prostora, učinak toplinske izolacije vanjske konstrukcije i korištenje solarne energije i prirodne ventilacije.

2.2. Rezultati upitnika

Od 10. do 12. siječnja 2020. posjećeno je približno sto kuća u okrugu Zhouzhi u regiji Guan Zhong i putem upitnika i intervjua prikupljene su informacije o obliku lokalnih građevina, načinu grijanja, spremnosti na transformaciju, percipiranoj unutarnjoj temperaturi i percipiranoj vlažnosti. Ispunjena su 82 valjana upitnika. Rezultati upitnika prikazani su na slici 2.

Rezultati istraživanja pokazuju da 2 % stanovnika ne želi renovirati svoje domove kako bi poboljšali toplinsku udobnost. Iako ti stanari nisu zadovoljni unutarnjim toplinskim učinkom, neki su zabrinuti zbog troškova renoviranja, a neki nisu skloni narušavanju estetike kuće. S druge strane, 94 % stanovnika spremno je poboljšati svoje kuće, što pokazuje mali otpor optimizaciji unutarnjeg toplinskog okruženja u okrugu Zhouzhi. Istraživanje pokazuje da 1 % stanovnika koristi solarne grijanje, a većina se oslanja na neobnovljive i ekološki nepovoljne načine grijanja. Osim toga, zahtjevi za smanjenjem emisija

stakleničkih plinova porasli su posljednjih godina; stoga je ograničena uporaba drva za grijanje. Zbog toga su stariji ljudi zbog loših ekonomskih uvjeta odustali od grijanja. Rezultati analize unutarnje vlažnosti pokazuju da je percipirana unutarnja vlažnost visoka: 21 % stanara smatra da je vlažnost visoka, a 73 % da je umjerena. Analiza percipirane unutarnje temperature pokazuje da samo 4 % stanovnika smatra da je unutarnja temperatura zimi prihvatljiva, što pokazuje da stanovnici smatraju da su unutarnje toplinske karakteristike njihovih domova loše i da ih je potrebno poboljšati.

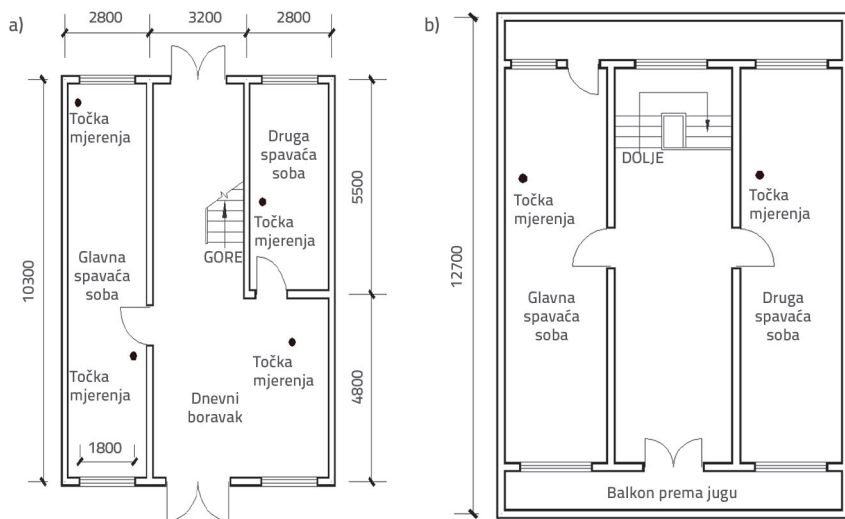


Slika 2. Rezultati analize upitnika

3. Terenska mjerenja

3.1. Plan mjerenja

Tijekom testnog razdoblja od 13. do 14. siječnja 2020. vrijeme je bilo sunčano. Parametri ispitivanja uključivali su unutarnju temperaturu, relativnu vlažnost i intenzitet vanjskog Sunčevog zračenja tijekom zime. Samobilježeci mjerač temperature i vlage s točnošću mjerenja od $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ korišten je 24 sata s intervalom prikupljanja podataka od jedan sat. Mjerne točke postavljene su u spavaćoj sobi na prvoj etaži. Visina unutarnjeg mjernog mjesta iznosila je 0,9 m od tla, a udaljenost od zida bila je veća od 1,0 m. Solarni radiometar postavljen je u otvorenom prostoru bez zaklona, a vremenski interval prikupljanja podataka bio je jedan sat. Nacrtni građevine od opeke i betona i položaji mjerenja prikazani su na slici 3.

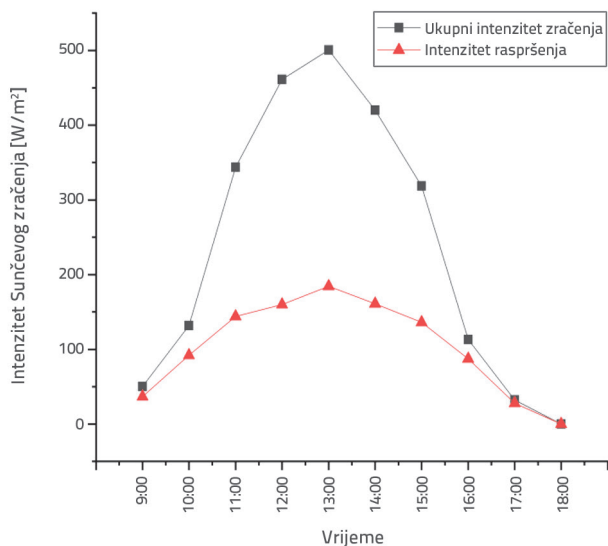


Slika 3. Izvorna shema podjele prostora: a) Prostorna raspodjela prve etaže; b) Prostorna raspodjela druge etaže, dimenzije u mm

temperature bio je 1,5 °C. Prosječna i maksimalna temperatura glavne spavaće sobe na drugoj etaži bila je 7,2 odnosno 8,3 °C. Temperaturna varijacija bila je 2,0 °C. Raspodjela vlažnosti tijekom prvog i drugog razdoblja bila je 47 odnosno 46,5 %. Međutim, ta razlika nije statistički značajna. Prema rezultatima ispitivanja glavne spavaće sobe na drugoj etaži, maksimalna temperatura bila je nešto viša od one u glavnoj spavaćoj sobi na prvoj etaži, ali je prosječna temperatura bila ista. Temperaturna varijacija druge etaže se povećala, što pokazuje da je toplinska stabilnost druge etaže lošija od one prve etaže. Krivulje satnih varijacija temperature i vlažnosti u glavnim spavaćim sobama na prvoj i drugoj etaži prikazane su na slici 5.

3.2. Intezitet Sunčevog zračenja

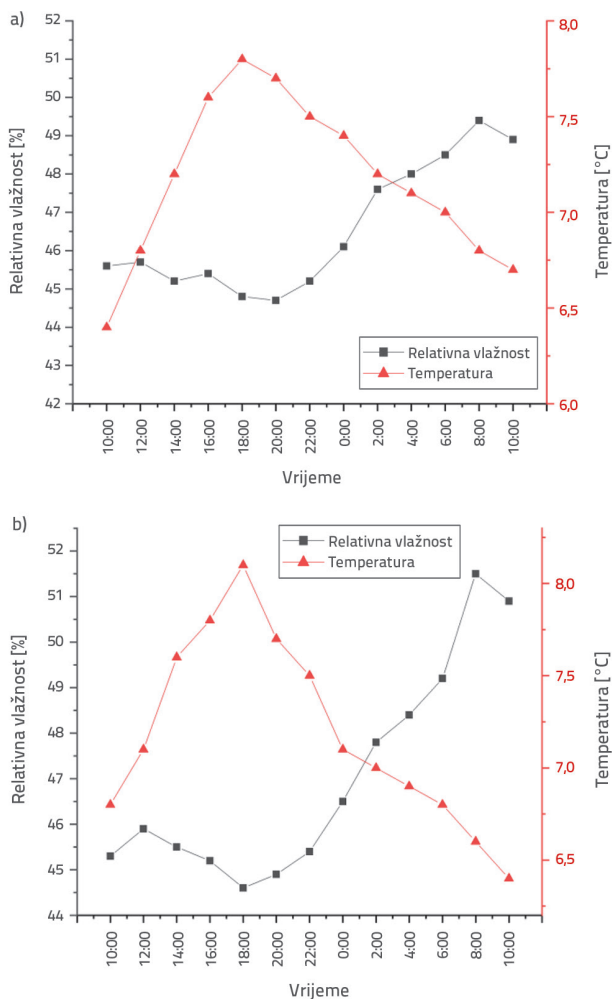
Ispitivanje je trajalo približno 9 sati, od 09:00 do 18:00 sati. Maksimalni intezitet Sunčevog zračenja bio je 500 W/m². Prosječni intezitet bio je 237 W/m². Udio izravnog inteziteta bio je 77,8 %. Stoga je intezitet Sunčevog zračenja zimi u ovoj regiji obećavajući za razvoj pasivnog solarnog grijanja. Krivulja satnih varijacija inteziteta Sunčevog zračenja prikazana je na slici 4.



Slika 4. Krivulja varijacija inteziteta Sunčevog zračenja

3.3. Vlažnost i temperature zraka

Krivulje satne varijacije prikazane su na slici 5. Raspon fluktuacije bio je velik zimi, a relativna vlažnost padala je s porastom temperature. Prosječna i maksimalna temperatura glavne spavaće sobe na prvoj etaži bila je 7,2 odnosno 7,9 °C. Raspon varijacije



Slika 5. a) Krivulje satnih varijacija temperature i vlažnosti: a) soba na prvoj etaži; b) soba na drugoj etaži

Podaci o toplini prikupljeni su s četiri strateški postavljena mjerna mjesta. Lokacije u blizini vanjskih zidova, unutarnjih pregrada i središta poda uzete su u obzir pri odabiru tih lokacija za prikaz različitih mikrookolina. Dvije mjerne jedinice postavljene su na drugoj etaži. Ove su lokacije odabrane za praćenje promjena temperature i toplinske udobnosti na različitim nadmorskim visinama i orijentacijama u odnosu na vanjske zidove i prozore.

3.4. Analiza postojećih problema

Izvorna građevina je tipična zgrada s tri volumena, kojoj nedostaje pametna shema odvajanja prostora i nema podjele spavaćih soba na sjever-jug. Otvor i dubina prostorija su vrlo veliki, a visina etaža vrlo visoka. Pod tim uvjetima teško je postići ugodnu unutarnju temperaturu.

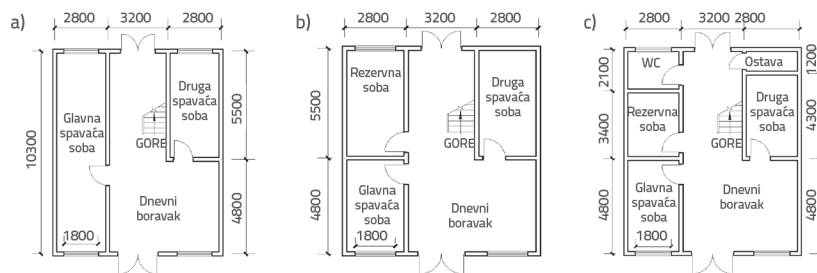
Što se tiče vanjske konstrukcije, vanjski zid se sastoji od glinene opeke debljine 240 mm, a unutarnji i vanjski zid je ožbukani bez toplinske izolacije. Krov je dvokosni bez stropa, a materijali od drva i crijeva imaju loše toplinske performanse. Vanjski prozori su jednostruki, s lošom zrakopropusnošću i toplinskom izolacijom. Stanari su navikli otvarati vrata, a nemaju postavljenu pamučnu zavjesu. Koeficijent prolaza topline svake karike vanjskog zida u hladnim područjima mnogo je manji od standardnih zahtjeva, a kroza zid se gubi znatna toplina, što je nepovoljno za toplinsku izolaciju zimi. U ovom prostoru se koristi jedan način grijanja, a solarna energija se pod određenim uvjetima ne može koristiti za pasivno grijanje. Ove kuće uvelike se oslanjaju na električnu energiju, ugljen i ogrjevno drvo. Međutim, takvi načini grijanja troše velike količine energije, skupi su i štetni za okoliš.

3.5. Analiza simulacije optimizacije

3.5.1. Shema optimizacije uštede energije

Provedena je shema optimizacije kako bi se što je moguće bliže odražavala stvarnost. Postojeći ruralni gospodarski uvjeti također su točno odraženi i mjere optimizacije su provedene u skladu s tim uvjetima. Zbog postojećih problema, ovo istraživanje je predložilo strategije optimizacije koje se temelje na tri aspekta: podjela prostora, učinak toplinske izolacije vanjske konstrukcije i dodatne Sunčeve svjetlosti u prostorijama.

Upotrijebljeni računalni program za simulaciju bio je vodeći softver za toplinski proračun Ecotect 2011. Na temelju metode kontrolne varijable, prednosti i nedostaci sheme uspoređeni su korak po korak kako bi se osiguralo da su rezultati simulacije pouzdani.

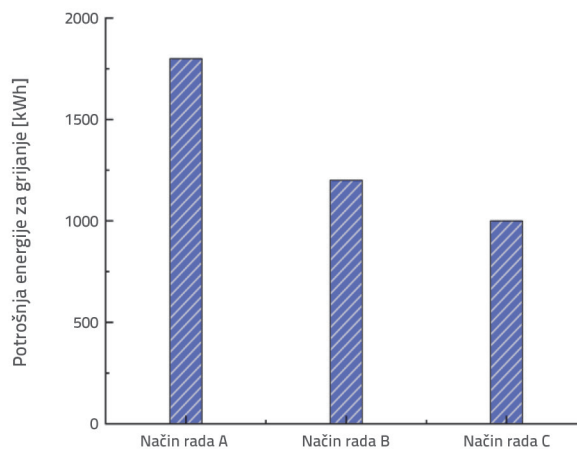


Slika 6. Shema podjele prostora prve etaže (Uvjeti A, B, i C)

3.5.2. Optimizacija prostornog rasporeda

Na temelju osnovne podjele prostora postojećih građevina u regiji Guan Zhong, određena su tri prikladna načina prostorne podjele, kao što je prikazano na slici 6. Uvjet A je izvorni izgled građevine. Uvjet B sadrži podjelu sjever-jug zapadne glavne spavaće sobe na prvoj etaži, a uvjet C dodaje više pomoćnih prostorija u dimenziji sjever-jug. Kada su tri sheme simulirane, druga etaža je postavljena prema slici 2.b za usporedbu.

Vrijeme simulacije koje je postavio softver bilo je u skladu s vremenom testiranja, a odabrani su meteorološki uvjeti u Xi'anu, provinciji Shaanxi. Prema odjeći stanara i [14], prosječna toplinska otpornost u zatvorenim prostorima zimi je postavljena na 2,5 clo, a unutarnja vlažnost je postavljena na 47 %. Učestalost izmjene zraka u zatvorenom prostoru postavljena je na 0,5/h, a prema zadanim uvjetima alata za vremensku prognozu, ljudska aktivnost je postavljena na sjedenje. Međutim, kada je WWR postavljen na 0,5, toplinska izolacija vanjske konstrukcije i učinkovitost solarnog grijanja bili su na niskim razinama. Kombinirani su specifični operativni procesi i postavke parametara [15]. Rezultati simulacije potrošnje energije građevine u različitim načinima podjele prostora prikazani su na slici 7.



Slika 7. Simulacije potrošnje energije građevine u različitim načinima podjele prostora

Tablica 1. Demografski podaci i pokazatelji toplinske udobnosti tradicionalnih kuća u regiji Guan Zhong u provinciji Shaanxi

ID sudionika	Dob	Spol Ž/M	Zanimanje	Tip građevine	Unutarnja temperatura [°C]	Vlažnost [%]
1	45	Ž	Poljoprivreda	Jednokatnica od blata i opeke	18	50
2	30	M	Poduzetništvo	Drvena višekatnica	20	45
3	55	M	Građevinarstvo/fizički rad	Gospodarska kuća s dvorištem	16	55
4	65	Ž	Domaćinstvo	Jednokatnica od blata i opeke	17	60
5	20	M	Student	Drvena višekatnica	19	40
6	35	Ž	Poljoprivreda	Kuća s dvorištem	18	55
7	50	M	Poduzetništvo	Jednokatnica od blata i opeke	16	50
8	60	M	Građevinarstvo/fizički rad	Drvena višekatnica	17	45
9	40	Ž	Domaćinstvo	Jednokatnica od blata i opeke	21	42
10	35	Ž	Student	Gospodarska kuća s dvorištem	19	48

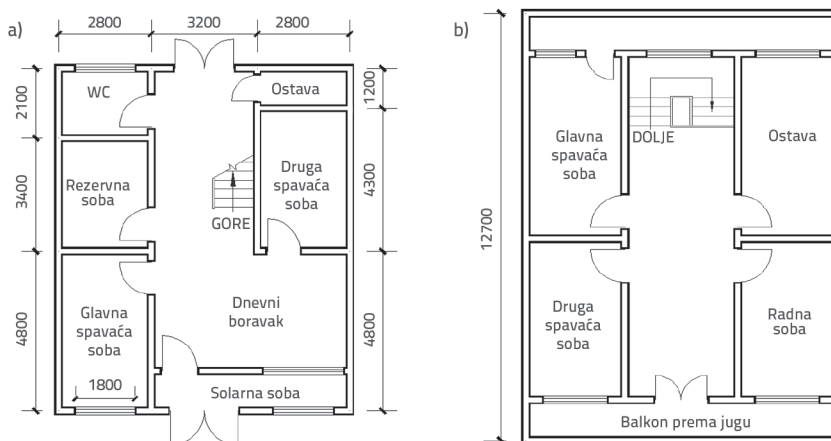
Istraživači su odabrali sudionike iz ciljane populacije koristeći kombinaciju stratificiranog odabira i praktičnog uzorkovanja. Prikladno uzorkovanje korišteno je za identifikaciju pojedinaca zainteresiranih za sudjelovanje u istraživanju. Ova metoda omogućuje prikupljanje korisnih podataka uz održavanje strogih ograničenja vremena i resursa. Stratificirano uzorkovanje jamči da su zastupljeni svi demografski podaci, zemljopisne regije i uobičajeni tipovi domova (npr. jednokatni ili višekatni, okrenuti prema sjeveru naspram jugu). Nalazi bi se trebali generalizirati na veću populaciju, a ova stratifikacija pomaže u bilježenju varijabilnosti. Tablica 1. prikazuje demografske podatke i pokazatelje toplinske udobnosti tradicionalnih kuća u regiji Guan Zhong u provinciji Shaanxi.

Rezultati simulacije otkrili su da podjela na više prostora može značajno smanjiti opterećenje energijom za grijanje. Podaci [16] pokazuju da se unutarnja temperatura glavnih prostorija može

poboljšati postavljanjem pregradnih zidova. Južni zid primao je Sunčevo zračenje; stoga je glavna prostorija bila smještena u smjeru juga. Druga prostorija je uređena na sjeveru kako bi se formirala temperaturna tampon zona. Temperature glavnih prostorija u južnom smjeru održavane su na visokim razinama. Promjena iz uvjeta A u uvjet C povećala je prosječnu temperaturu po satu glavne spavaće sobe na prvoj etaži za približno 1,2 °C. Rezultati simulacije pokazuju da je uvjet C bio energetski najučinkovitiji za grijanje.

Podjela građevine na nekoliko toplinskih zona omogućuje ciljano grijanje i hlađenje. Jedan od načina da se smanji ukupna energija potrebna za upravljanje klimom je taj da se rjeđe koriste dijelovi na nižim temperaturama. Mehanička ventilacija može biti nepotrebna u oblikovanju otvorenog tlocrta zbog poboljšanog kretanja zraka. Međutim, potrošnja energije može se povećati u tijesnim, podijeljenim prostorijama zbog potrebe za više

ventilacije i, možda, individualnih HVAC sustava. Umjetna rasvjeta smanjena je korištenjem pregrada koje optimiziraju ulazak prirodnog svjetla. Prostori s punim pregradama mogu zahtijevati više umjetnog svjetla, čime se povećava potrošnja energije, dok otvoreni tlocrti sa strateški postavljenim prozorima i svjetlarnicama mogu povećati dnevnu svjetlost. Shema podjele prostora naknadnom analizom usvojila je uvjet C. Konačna shema prikazana je na slici 8. Izvorna spavaća soba nije imala podjelu sjever-jug. Izvorna glavna spavaća soba podijeljena je u tri dijela, kao što je prikazano na shemi C. Prva etaža zadržava svoju izvornu funkciju s



Slika 8. Shema optimizirane podjele prostora: a) Tlocrt prve etaže; b) Tlocrt druge etaže, dimenzije u mm

dodatnom kuhinjom, WC-om i spremištem da bi se poboljšala funkcionalnost. Radi povećanja diferencijacije malih prostora i postignute toplinske izolacije, proveden je koncept "soba u sobi" kao zona prijelaza temperature kako bi se spriječio gubitak topline. Iz toga slijedi da pametna podjela unutarnjeg prostora može poboljšati sobnu temperaturu. U arhitektonskom rasporedu, kuhinja i Kang soba su susjedne. Kang soba je izvor topline koji zrači i prenosi toplinu [17]. Ova vrsta sheme podjele prostora ne mijenja koeficijent oblika zgrade i izbjegava konkavno-konveksne promjene u tlocrtu. Naknadna analiza je optimizirana na temelju sheme prostorne podjele prikazane na slici 8.

3.6. Optimizacija konstrukcije ovojnice

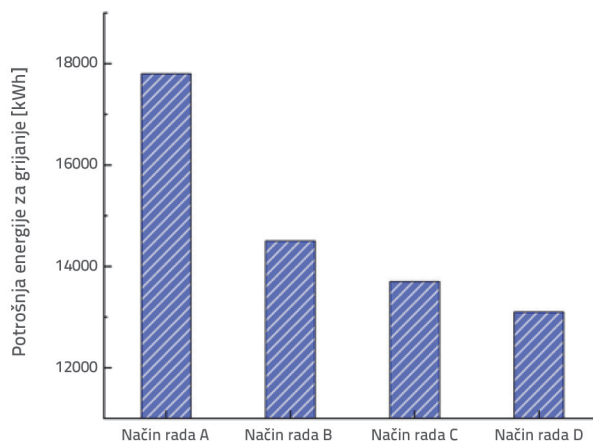
Konstrukcija ovojnice uključivala je vanjske zidove, krovove, vrata i prozore.

3.6.1. Vanjski zidovi

Zid je glavna komponenta ovojnice zgrade, a njegova toplinska svojstva značajno utječu na gubitak topline i unutarnju temperaturu. Prema [18], metoda jednakog koeficijenta prolaza topline trebala bi se koristiti za pojednostavljenje konstrukcije vanjskih zidova. U shemama A, B, C i D, debljina izolacijskog sloja se postupno povećava. U tablici 2. navedeni su proračunski modeli konstrukcije vanjskog zida.

Napomena: Toplinski parametri materijala dobiveni su iz [19], a koeficijent prijelaza topline iz [20].

Četiri materijala zida unesena su u Ecotect 2011 s nepromijenjenim parametrima modela. Rezultati za različite konstrukcije zidova prikazani su na slici 9.



Slika 9. Rezultati simulacije potrošnje energije za različite zidne konstrukcije

Kako se količina izolacije povećava, razina potrošnje energije se smanjuje. To znači da bi primarni zadatak trebao biti povećanje izolacije zidova.

Tablica 2. Parametri modela konstrukcije vanjskog zida

Metode	Materijal	Debljina [mm]	Toplinska vodljivost [W/(m·K)]	Suha gustoća [kg/m³]	Specifična toplota [J/(kg·K)]	Toplinska otpornost [K/W]	Koeficijent prijelaza topline [W/(m²·K)]
Metoda A	cementni mort	20	0,930	1800	1,05	0,022	2,04
	glinena opeka	240	0,810	1800	1,05	0,296	
	cementni mort	20	0,930	1800	1,05	0,022	
Metoda B	EPS	50	0,041	20	1,38	1,220	0,59
	glinena opeka	240	0,810	1800	1,05	0,296	
	cementni mort	20	0,930	1800	1,05	0,022	
Metoda C	EPS	60	0,041	20	1,38	1,463	0,52
	glinena opeka	240	0,810	1800	1,05	0,296	
	cementni mort	20	0,930	1800	1,05	0,022	
Metoda D	EPS	80	0,041	20	1,38	1,951	0,41
	glinena opeka	240	0,810	1800	1,05	0,296	
	cementni mort	20	0,930	1800	1,05	0,022	

Prilikom odabira konstrukcije, istovremeno treba uzeti u obzir i trošak; stoga je metoda B odabrana za naknadne izračune simulacije.

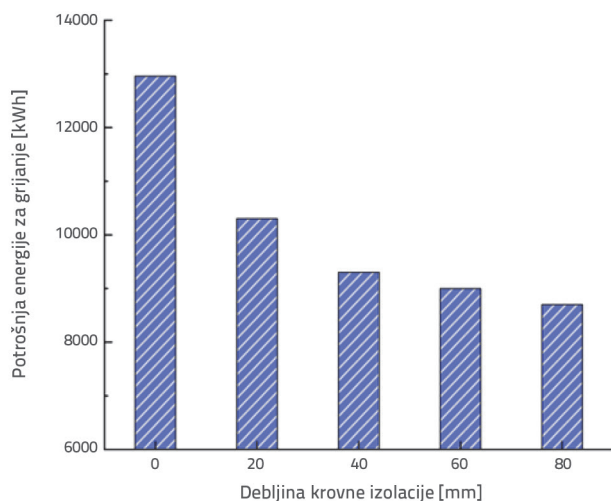
Metoda A predstavlja tradicionalnu zidnu konstrukciju s cementnim mortom i opekam od gline bez dodatne izolacije. Ovaj model vjerojatno pokazuje veću potrošnju toplinske energije zahvaljujući nižem toplinskom otporu i većem koeficijentu prijenosa topline. Metoda B uključivala je 50 mm EPS izolacije, što je značajno poboljšalo toplinski otpor i smanjilo koeficijent prijenosa topline. Ovaj model pokazuje nižu potrošnju toplinske energije od metode A, zahvaljujući poboljšanoj izolaciji. Metoda C koristila je 60 mm EPS izolacije, dodatno povećavajući toplinsku otpornost i smanjujući koeficijent prijenosa topline u usporedbi s modelom B. To rezultira još nižom potrošnjom toplinske energije od metode A i B. Metoda D je uključivala 80 mm EPS izolacije, pružajući najveći toplinski otpor i najniži koeficijent prijenosa topline od svih modela. Ovaj model ima najmanju potrošnju toplinske energije zahvaljujući vrhunskim izolacijskim svojstvima.

3.6.2. Krov

Na temelju izvornog krova simulirana je potrošnja energije promjenom debljine toplinskoizolacijskog sloja. Ovi parametri navedeni su u tablici 3. Rezultati su prikazani na slici 10.

Tablica 3. Model debljine krovne izolacije

Debljina krovne izolacije [mm]	Potrošnja energije [kWh]
0	13000
20	10000
40	9000
60	8800
80	7000



Slika 10. Rezultati simulacije potrošnje energije za različite debljine krovne izolacije

Rezultati pokazuju da povećanje debljine sloja krovne izolacije rezultira manjim dobitcima u uštedi energije. Konačna metoda izolacije krova bila je s crijepom ravne površine, EPS ekstrudiranom pločom debljine 40 mm, vodonepropusnim slojem, izravnavajući slojem cementnog morta i krovnom pločom. Koeficijent prijelaza topline krova je približno 0,590 W/(m²·K). Kosa krovna ploča može se kombinirati sa svijetlim stropom kako bi se formirao zatvoreni međusloj, koji je pogodniji za zimsku izolaciju.

Preklopni spoj stropa ima otvor koji se može otvoriti ili zatvoriti. Ljeti se ventilacija može poboljšati i ukloniti unutarnja toplina. Naknadna optimizacija temeljila se na gore navedenom sadržaju. Ispitano je nekoliko debljina EPS izolacije kako bi se smanjio gubitak topline bez ugrožavanja isplativosti. Ispitane su toplinske performanse betona, glinenih pločica, metala i drugih krovnih materijala i njihova kompatibilnost s EPS izolacijom. Istraživači su ispitali učinke reflektirajućih premaza na krovovima kako bi utvrdili koliko dobro smanjuju upijanje topline i povećavaju energetske učinkovitost. Krovni otvori, grebeni, podsvođa i zabati ispitani su kako bi se utvrdilo kako utječu na toplinsku udobnost i potrošnju energije unutar građevine. Nadalje, provedena su istraživanja o izolacijskim svojstvima, sposobnostima smanjenja gubitka topline i mogućnostima regulacije unutarnje temperature zelenih krovova (krovova prekrivenih biljkama).

3.6.3. Nevidljiva ovojnica

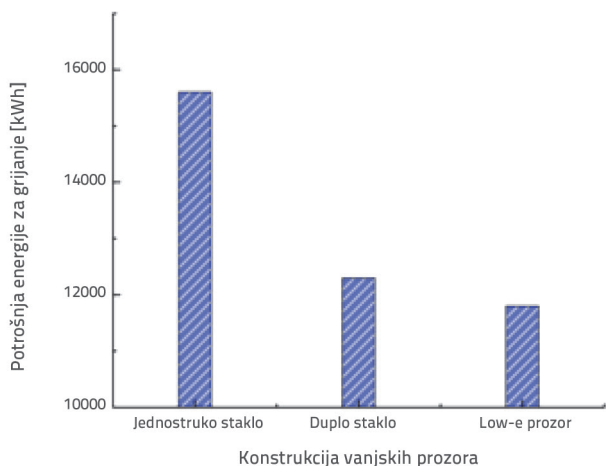
Nevidljiva ovojnica građevine važan je izvor Sunčevog zračenja i glavni način na koji građevine gube toplinu; stoga su njihove toplinske performanse vrlo važne [21]. Toplinske performanse tri tipična vanjska prozora navedena su u tablici 4. Prozori s jednim staklom koriste se u većini tradicionalnih kuća. Energetska opterećenja triju vrsta vanjskih prozora simulirana su pomoću softvera Ecotect. WWR juga i sjevera postavljeni su na 0,5 odnosno 0,27.

Što se tiče materijala za vanjske prozore, s obzirom na njihove cjelokupne performanse, između drva, plastificiranog čelika i legura za lomljenje mostova izabrani su plastificirani čelični prozori. Plastificirani čelik košta znatno manje, a njegovo izvrsno očuvanje topline i zrakonepropusnost mogu se postići uz relativno niske troškove. Podaci o modelu proračuna za različite konstrukcije vanjskih prozora prikazani su u tablici 4. Procijenjeno je nekoliko tipova ostakljenja kako bi se odredio njihov učinak na toplinsku izolaciju i solarni dobitak. To uključuje jednostruka, dvostruka i trostruka stakla. Ovo istraživanje ispitalo je toplinske performanse i energetske učinkovitost nekoliko materijala okvira, uključujući drvo, aluminij i PVC.

Toplinska udobnost proučavana je postavljanjem prozora na nekoliko strana (sjever, jug, istok i zapad) kako bi se ispitali učinci Sunčevog dobitka i sjene.

Tablica 4. Informacije o modelu izračuna različitih konstrukcija vanjskih prozora

Konstrukcija vanjskih prozora	Jednostruko staklo	Dvostruko staklo	Low-E prozor
Metode	6 mm stakla	6 mm stakla	6 mm Low-E staklo (stupanj radijacije 0,25, iznutra)
		10 mm zračnog sloja	10 mm zračnog sloja
		6 mm stakla	6 mm stakla
Koeficijent prolaska topline [W/(m ² K)]	5,70	3,00	2,30



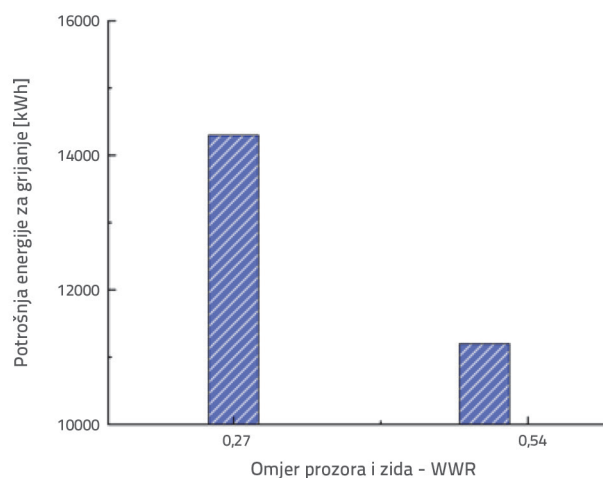
Slika 11. Rezultati simulacije potrošnje energije različitih konstrukcija vanjskih prozora

Rezultati simulacije za potrošnju energije ispod različitih vanjskih prozorskih struktura prikazani su na slici 11. Prozor s jednim staklom imao je najlošiju toplinsku izvedbu i najveću potrošnju energije. Prozor s jednim staklom ima veliki koeficijent prolaza topline i slabu zrakonepropusnost. Zimi je veliki gubitak topline unutarnjeg prostora kroz ove prozore. Potrošnja energije prozora s dvostrukim staklom znatno je niža od potrošnje prozora s jednostrukim staklom, a razlika u potrošnji energije između staklenih prozora i prozora s niskim E je mala; stoga se toplinske karakteristike prozora mogu poboljšati kako bi se značajno smanjio prodor hladnog zraka i gubitak topline, a šuplja struktura također može poboljšati performanse zvučne izolacije. Stoga prva strategija uštede energije za vanjske prozore uključuje zamjenu jednostrukih prozora dvostrukim prozorima. Također možemo razmisliti o vješanju pamučne zavjese na vrata tijekom zime. Gubitak topline, koji je dio unutarnje i vanjske izmjene topline, može se učinkovito smanjiti na vratima i prozorima gore navedenim metodama.

3.6.4. Omjer prozora i zida (WWR)

Originalni WWR (engl. *Window-to-Wall Ratio* - WWR) bio je 0,27. Kao što je navedeno u [22] za ruralne stambene građevine u hladnim područjima, omjer tla i južnog prozora postavljen je na 0,5. Kako bi se pojednostavili radni uvjeti, WWR na sjeveru postavljen je na 0,27. Rezultati energetskih opterećenja pod različitim WWR-ovima prikazani su na slici 12. Rezultati

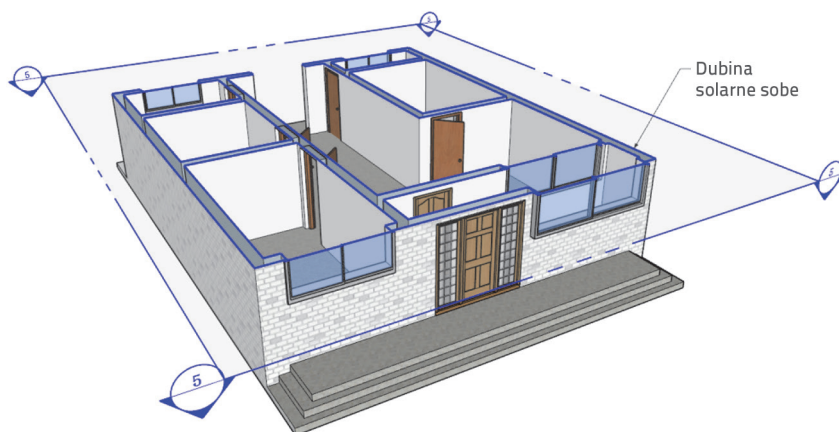
pokazuju da bi povećanje omjera južnih prozora prema tlu moglo značajno smanjiti potrošnju energije te da bi velika površina prozora okrenutih prema jugu mogla povećati temperaturu glavnih prostorija okrenutih prema jugu.



Slika 12. Rezultati simulacije potrošnje energije u različitim omjerima prozora i zida

3.7. Pasivno solarno grijanje

Rezultati ispitivanja pokazuju da je solarno grijanje u ovoj regiji obećavajuće. Sunčeva energija može smanjiti ovisnost stanovnika o ogrjevnom drvu i značajno smanjiti potrošnju neobnovljive energije [23, 24]. Međutim, rezultati istraživanja također pokazuju da samo 1 % stanovnika koristi solarnu opremu za grijanje. S obzirom na lokalnu ekonomsku situaciju, pasivno solarno grijanje je najbolji izbor za poboljšanje toplinske udobnosti. Dodavanje sunčane prostorije prvi je izbor za razvoj pasivnog solarnog grijanja [25, 26]. Da bi se to postiglo, u modelu je u dnevnom boravku postavljena dodatna sunčana prostorija, pravilnog arhitektonskog oblika koji ne mijenja koeficijent oblika kuće. Osim toga, dubina Sunčeve svjetlosti utječe na učinak prikupljanja topline i korištenje prostorije. U ovom istraživanju simulirana je potrošnja energije na različitim dubinama Sunčeve svjetlosti. Dijagram presjeka modela prikazan je na slici 13., a označena pozicija na slici je sunčana soba. Informacije o modelu izračuna za različite dubine osunčanosti navedene su u tablici 5. Rezultati simulacije prikazani su na slici 14.



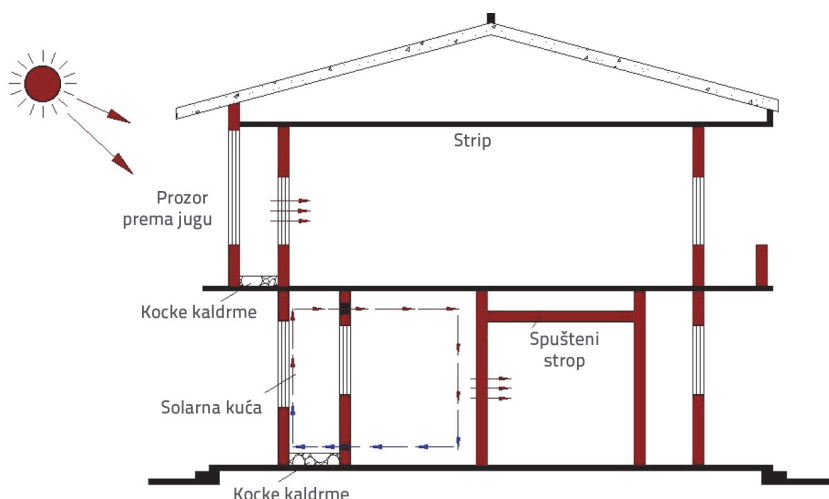
Slika 13. Presjek položaja dodatne Sunčeve svjetlosti

Tablica 5. Podaci o modelu za različite dubine osunčanosti

Prozor	Dubina osunčane kuće [m]				
Dvostruki prozor od plastičnog čelika	0	0,6	1,2	1,8	2,4

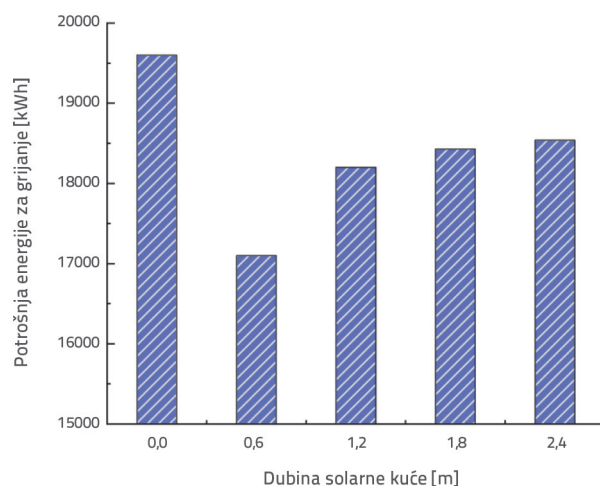
Tablica 5. i slika 14. prikazuju rezultate simulacije, koji pokazuju da je energetska opterećenje najniže kada je dubina 0,6 m. Povećanje dubine Sunčeve svjetlosti znači da se potrošnja energije za grijanje više ne smanjuje, pokazujući trend povećanja. Kada je dubina postavljena na 1,2 m, održana je niska potrošnja energije i zadovoljeni su funkcionalni i troškovni zahtjevi.

Zid između dodatnog prostora za Sunčevu svjetlost i dnevne sobe može imati ulogu u spremanju topline. Korišteni su Trombovi zidovi, a na dnu i na vrhu postavljeni su otvori koji su se mogli otvoriti. Zrak u prostoriji sa Sunčevim svjetlom je zatim zagrijan. Ventilacijski otvori su otvoreni tijekom dana. Kada se zagrije, zrak se podiže i struji u prostoriju kroz zračni prolaz. Hladan zrak u dnevnoj sobi struji u sunčanu kroz donji ventilacijski otvor, stvarajući ciklus. Ventilacijski otvori su se



Slika 15. Prikaz presjeka i unutarnja ventilacija kuća nakon optimizacije

noću zatvarali, a pohranjena toplota ispuštala se za zagrijavanje prostorije. Kako biste se nosili s pregrijavanjem u sunčanoj prostoriji ljeti, staklo u sunčanoj prostoriji može se otvoriti kao ventilacijski otvor. Ljeti se oblutci mogu ukloniti, a rešetke zasjeniti kako bi se spriječilo pregrijavanje. U optimiziranoj shemi, relativni položaji vrata i prozora pogoduju prirodnoj ventilaciji i uklanjanju unutarnje topline. Stoga je na vanjskom zidu ispod vijenca postavljen otvor koji se ljeti može otvoriti, a zimi zatvoriti.



Slika 14. Rezultati simulacije potrošnje energije pri različitim dubinama sunčane prostorije

Kako je visina prvog kata građevine 3,8 m, na 3,0 m u glavnoj spavaćoj sobi postavljen je PVC strop debljine 10 mm kako bi se smanjio volumen prostorije i poteškoće s grijanjem. Dijagram presjeka optimizirane stambene građevine od opeke i betona prikazan je na slici 15.

3.8. Simulacija konačne sheme

Sažetak informacija o praksi poboljšano modela dan je u tablici 6, a konačna renderirana slika ilustrirana je na slici 16. Termalni model Ecotect uspostavljen je kako bi se provjerilo može li shema rekonstrukcije značajno poboljšati toplinske performanse. Simulacije i usporedbe provedene su prije i nakon optimizacije. Vrijeme simulacije koje je postavio računalni program bilo je u skladu s vremenom testiranja, a u bazi podataka odabrani su meteorološki uvjeti u Xi'anu u provinciji Shaanxi. Prosječna

Tablica 6. Podaci o poboljšanom modelu

Pozicija	Sažetak informacija o postavkama modela nakon optimizacije
Podjela prostora	višeprostorni način podjele C / glavne prostorije smještene su na jugu, a sekundarne prostorije na sjeveru / "Peć s Kangom" (tradicionalna metoda grijanja u sjevernoj Kini)
Vanjski zid	50 mm EPS + 240 mm glinena opeka + 20 mm cementni mort, koeficijent prolaza topline je 0,59
Prozor	6 mm staklo + 10 mm zračni sloj+6mm stakla dvostrukog prozora od plastificiranog čelika, koeficijent prolaza topline je 0,30
Omjer prozora i zida	Jug: 0,5; Sjever: 0,3
Krov	Običan crijeplj + 40 mm XPS + vodonepropusni sloj + cementni mort za izjednačavanje nagiba grube krovne ploče koeficijent prolaza topline je 0,59 Lagani spuštenu strop ispod kose krovne ploče
Vrata	Dodavanje pamučnog zastora
Solarna kuća	dubina:1,2 m / dodavanje Trombeovog zida/materijali za spremanje topline/postavljanje roleta
Glavna spavaća soba	10 mm PVC strop je postavljen na 3,0 m

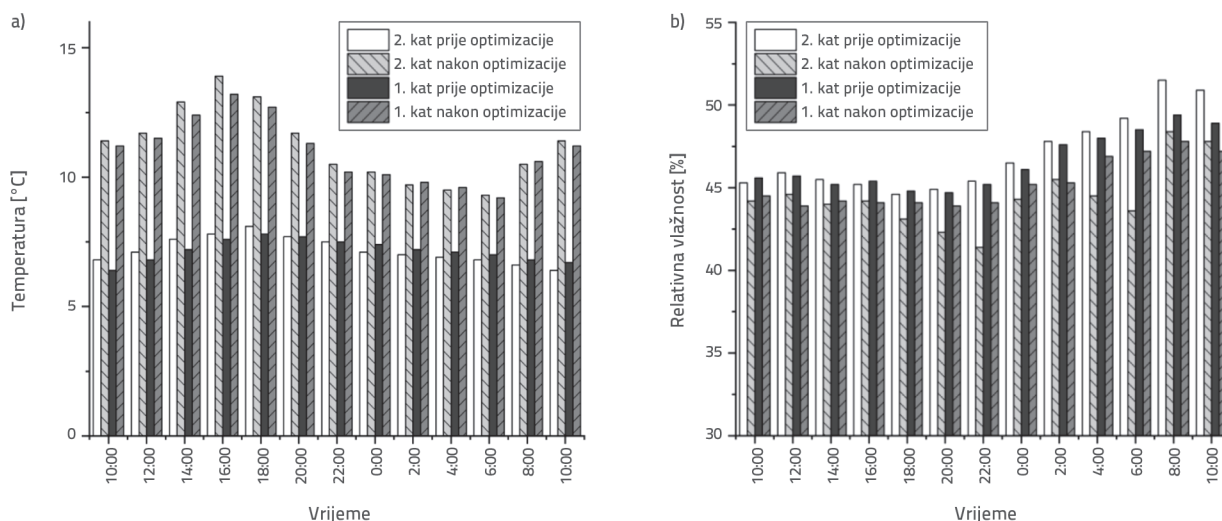
vrijednost toplinske otpornosti odjeće postavljena je na 2,5, unutarnja vlažnost postavljena je na 47 %, unutarnja brzina vjetra postavljena je na 0,5 m/s, a učestalost izmjene zraka u zatvorenom prostoru postavljena je na 0,5 puta u satu.



Slika 16. Prikaz optimizirane kuće

Prema zadanim uvjetima alata za vremensku prognozu, ljudska aktivnost je postavljena na mirovanje, južni WWR je postavljen na 0,5, sjeverni WWR je postavljen na 0,27, izolacija ovojnice je postavljena na srednju, a učinkovitost solarnog grijanja postavljena je na visoku. Rezultati simulacije prikazani su na slici 17. T-testovi su korišteni za usporedbu srednjih vrijednosti dviju skupina i utvrđivanje postoji li među njima statistička razlika. Koristeći zadani skup podataka, t-testovi se mogu koristiti za usporedbu pokazatelja toplinske udobnosti (kao što su unutarnja temperatura, vlažnost i ocjena udobnosti) među različitim demografskim skupinama. Jedna od mogućih upotreba t-testova je usporedba spolnih ili dobnih skupina s obzirom na srednju unutarnju temperaturu.

Toplinska udobnost može se poboljšati usvajanjem pametne podjele prostora, optimizacijom toplinskih performansi konstrukcije ovojnice i korištenjem odgovarajućeg pasivnog solarnog grijanja. Prema navodu, to uključuje solarnu kuću s



Slika 17. Usporedba temperature i vlažnosti glavnih spavaćih soba prije i nakon optimizacije: a) Tablica usporedbe temperature glavne spavaće sobe; b) Tablica usporedbe vlažnosti glavne spavaće sobe

izravnom koristi, Kang sobu i dodatnu sunčanu sobu u dnevnoj sobi. Nakon izračuna, prosječna temperatura glavnih spavaćih soba na prvoj i drugoj etaži iznosila je 11,0 i 11,2 °C, što je poraslo za otprilike 4, odnosno 4,2 °C. Ugodna sobna temperatura zimi varira od 18 do 28 °C, a postoji razlika između gornjih rezultata simulacije i ugodne temperature. Ako se koristi pasivno solarno grijanje i dopuni izvor topline, primjerice uzimajući u obzir doprinose kuhinjskog štednjaka i Kanga, može biti lakše postići ugodan temperaturni raspon. Prema [27], relativna vlažnost za unutarnju udobnost iznosi od 30 do 70 %; stoga je postignuta relativna vlažnost ugodna. Budući da temperature tijekom zime u ovoj regiji često padaju ispod ništice, dobro izolirani i grijani prostori ključni su za udobnost u zatvorenom tijekom cijele godine. Međutim, zbog velikih razlika u temperaturi između dana i noći, održavanje stalne unutarnje temperature je veći izazov.

4. Završna rasprava

Kako bi se istražili učinci sheme oblikovanja, korištena je metoda kontrolne varijable za usporedbu učinaka prije i nakon poboljšanja. Na temelju terenskih ispitivanja i rezultata upitnika usvojena je strategija pasivnog dizajna. Najbolje strategije utvrđene su analizom strategije pasivnog dizajna, koja je uključivala poboljšanje rasporeda prostora, konstrukcije ovojnice, omjera prozora i zida i ventilacije te izgradnju sunčane sobe. Budući da je glavni problem u ovoj regiji očuvanje topline zimi, o ventilaciji ljeti se ne govori. Međutim, mjere optimizacije ventilacije koje su dodane pasivnom dizajnu uzele su u obzir zaštitu od topline ljeti. Ove navedene mjere imale su za cilj poboljšati udobnost tradicionalnih kuća na temelju spremnosti stanovnika na prihvatljivu transformaciju. Ova shema može pružiti reference i testove za novi nacionalni proces ruralne izgradnje. Učinkovitost predložene metode uspoređena je s onom postojeće tehnike s više ciljeva (engl. *simulation-based multi-objective technique* - SMOT) koja se temelji na simulaciji [28]. Predloženom metodom postignuta je visoka učinkovitost od 98,4 %.

5. Zaključak

Ovo istraživanje uvodi sveobuhvatnu strategiju pasivne optimizacije za tradicionalne kuće u regiji Guan Zhong. Terenskim ispitivanjima i analizama utvrđeno je da je osjećaj toplinske udobnosti loš, prostorni raspored neadekvatan, toplinska svojstva vanjskih zidova neidealna, a način grijanja neučinkovit. Rezultati upitnika pokazuju da je podjela stambenog prostora jednostavna, konstrukcija ovojnice loša, koristi se samo jedan način grijanja, toplinska udobnost prostorije ne zadovoljava zahtjeve, a većina stanara ima snažnu želju za optimizacijom toplinske udobnosti svojih domova. Rezultati ispitivanja

pokazuju da je intenzitet Sunčevog zračenja značajan u regiji Guan Zhong zimi te se može razviti pasivno solarno grijanje. Rezultati su također otkrili da je učinak spremanja topline ovojnice zgrade bio nezadovoljavajući. Tijekom testnog razdoblja, unutarnja temperatura ostala je daleko od ugodnog raspona toplinski grijanih ruralnih stambenih dnevnih soba u hladnim područjima. Na temelju kontrolnih varijabli, simulacija potrošnje energije potvrdila je da podjela na više prostora, izolacija vanjskog zida i krova, dvostruki stakleni prozori i dodatna sunčana soba s Trombeovim zidom mogu značajno smanjiti energetske opterećenje i poboljšati temperature prostorija. Simulacije i usporedbe provedene su prije i nakon optimizacije. Vrijeme simulacije koje je postavio računalni program u skladu je s vremenom testiranja, a u bazi podataka odabrani su meteorološki uvjeti u Xi'anu u provinciji Shaanxi. Prosječna vrijednost toplinske otpornosti odjeće postavljena je na 2,5 clo, unutarnja vlažnost postavljena je na 47 %, unutarnja brzina vjetrova postavljena je na 0,5 m/s, a učestalost izmjene zraka u zatvorenom prostoru postavljena je na 0,5 puta u satu. U zadanim uvjetima alata za vremensku prognozu, ljudska aktivnost je postavljena na mirovanje, južni WWR je postavljen na 0,5, sjeverni je postavljen na 0,27, izolacija ovojnice je postavljena na srednju, a učinkovitost solarnog grijanja postavljena je na visoku. Konačna shema simulirana je pomoću računalnog softvera. Prosječna temperatura prve i druge etaže porasla je za otprilike 4, odnosno 4,2 °C.

Rezultati simulacije potvrdili su da su toplinska svojstva predložene ovojnice i podjele prostora poboljšani. U kombinaciji s aktivnim izvorom topline, temperatura je bila bliža donjoj granici raspona ugodne temperature. Poboljšanja toplinske udobnosti mogu se postići strategijama pasivne optimizacije i modernim izolacijskim materijalima u tradicionalnim kućama. To može poboljšati toplinsku udobnost kuća, što je osobito korisno zimi. Vlasnici kuća mogu smanjiti svoj utjecaj na okoliš povećanjem izolacije i pasivnih tehnika, čime se smanjuje potreba za sustavima grijanja. Osim pomoći u postizanju širih ciljeva energetske učinkovitosti, ovo ima značajne implikacije uštede troškova.

Ovo istraživanje analizira unutarnju toplinsku udobnost, toplinski dobitak i energetska opterećenja tradicionalnih kuća korištenjem građevnih nanomaterijala. Međutim, generalizirani su čimbenici kao što su mikroklimatske promjene, neočekivani vremenski obrasci i karakteristični arhitektonski aspekti pojedinih kuća. Buduća istraživanja trebala bi ispitati zahtjeve dugoročne trajnosti i održavanja nanomaterijala kao što su aerogeli i materijali s promjenom faze (engl. *phase change materials* - PCM) u različitim uvjetima okoline.

Zahvala

Ovaj je rad financirao NSFC (br. 52078419).

LITERATURA

- [1] Li, H., Wang, Z., Hong, T., Piette, M.A.: Energy flexibility of residential buildings: A systematic review of characterization and quantification methods and applications, *Advances in Applied Energy*, (2021) 3, p. 100054
- [2] González-Torres, M., Pérez-Lombard, L., Coronel, J.F., Maestre, I.R., Yan, D.: A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers, *Energy Reports*, (2022) 8, pp. 626-637
- [3] Aviv, D., Chen, K.W., Teitelbaum, E., Sheppard, D., Pantelic, J., Rysanek, A., Meggers, F.: A fresh (air) look at ventilation for COVID-19: Estimating the global energy savings potential of coupling natural ventilation with novel radiant cooling strategies, *Applied Energy*, (2021) 292, p. 116848
- [4] Arun, M., Barik, D.: Experimental analysis of heat transfer and thermal performance of parabolic type solar collector with ribbed surface texture for clean energy extraction, *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 25 (2024) 5, pp. 1-17
- [5] Karyono, K., Abdullah, B.M., Cotgrave, A.J., Bras, A.: The adaptive thermal comfort review from the 1920s, the present, and the future, *Developments in the Built Environment*, (2020) 4, p. 100032
- [6] Quitzow, L., Rohde, F.: Imagining the smart city through smart grids? Urban energy futures between technological experimentation and the imagined low-carbon city, *Urban Studies*, 59 (2022) 2, pp. 341-359
- [7] Arun, M.: Experimental investigation on energy and exergy analysis of solar water heating system using zinc oxide-based Nanofluid, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48 (2023) 3, pp. 3977-3988
- [8] Huo, T., Ren, H., Zhang, X., Cai, W., Feng, W., Zhou, N., Wang, X.: China's energy consumption in the building sector: A statistical yearbook-energy balance sheet based splitting method, *Journal of cleaner production*, 185 (2018), pp. 665-679
- [9] Arun, M., Barik, D., Chandran, S.S.: Exploration of material recovery framework from waste—A revolutionary move towards clean environment, *Chemical Engineering Journal Advances*, 18 (2024) 5, p. 100589
- [10] Dan, L., Liu, Y., Rongrong, H., Jiaping, H.: Discussion on energy saving design of new rural houses in typical areas of Guanzhong, *Building energy conservation*, 38 (2010) 3, pp.7-10
- [11] Yang, Z., Zhang, W., Qin, M., Liu, H.: Comparative study of indoor thermal environment and human thermal comfort in residential buildings among cities, towns, and rural areas in arid regions of China, *Energy and Buildings*, 273 (2022), p. 112373
- [12] Shao, T., Zheng, W., Jin, H.: Analysis of the indoor thermal environment and passive energy-saving optimization design of rural dwellings in Zhalantun, Inner Mongolia, China, *Sustainability*, 12 (2020) 3, p. 1103
- [13] Zhichun, Y., Yanhong, M.: Indoor thermal environment and energy consumption test and analysis of rural residential buildings in Guanzhong area of Shaanxi Province in summer, *Building energy conservation*, 46 (2018) 1, pp.39-46
- [14] Ganesh, G.A., Sinha, S.L., Verma, T.N., Dewangan, S.K.: Investigation of indoor environment quality and factors affecting human comfort: A critical review, *Building and Environment*, p. 108146
- [15] Huynh, A., Dias Barkokebas, R., Al-Hussein, M., Cruz-Noguez, C., Chen, Y.: Energy-efficiency requirements for residential building envelopes in cold-climate regions, *Atmosphere*, 12 (2021) 3, p. 405
- [16] Arun, M., Barik, D., Chandran, S.S., Govil, N., Sharma, P., Khan, T.Y., Baig, R.U., Bora, B.J., Medhi, B.J., Kumar, R., Rizal, A.: Twisted helical Tape's impact on heat transfer and friction in zinc oxide (ZnO) nanofluids for solar water heaters: Biomedical insight, *Case Studies in Thermal Engineering*, 56 (2024) 4, p.104204
- [17] Zhao, Q., Fan, X., Wang, Q., Sang, G., Zhu, Y.: Research on energy-saving design of rural building wall in Qinba mountains based on uniform radiation field, *Mathematical Problems in Engineering*, (2020), pp. 1-16
- [18] Liu, L., Liu, Q., Peng, X., Chen, M., Li, T.: Study on indoor temperature and thermal performance of a novel solar coupled floor and Kang heating system, *Case Studies in Thermal Engineering*, (2024), p. 104566
- [19] Zhu, L., Wang, B., Sun, Y.: Multi-objective optimization for energy consumption, daylighting and thermal comfort performance of rural tourism buildings in north China, *Building and Environment*, 176 (2020), p. 106841
- [20] Wang, R., Li, J., Ma, J., Peng, W.: The characteristics of thermal environment and comfort of residential buildings during winter in hot summer and cold winter climate zone of China, *E3S Web of Conferences*, 356 (2022), p. 03027
- [21] Üрге-Vorsatz, D., Khosla, R., Bernhardt, R., Chan, Y.C., Vérez, D., Hu, S., Cabeza, L.F.: Advances toward a net-zero global building sector, *Annual Review of Environment and Resources*, 45 (2020), pp. 227-269
- [22] Sun, Z., Cao, Y., Wang, X., Yu, J.: Multi-objective optimization design for windows and shading configuration: considering energy consumption, thermal environment, visual performance and sound insulation effect, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 12 (2021) 4, pp. 805-836
- [23] Li, B., You, L., Zheng, M., Wang, Y., Wang, Z.: Energy consumption pattern and indoor thermal environment of residential building in rural China, *Energy and Built Environment*, 1 (2020) 3, pp. 327-336
- [24] Kinjangi, D.K., Foti, D.: Characterization of energy transfer and triadic interactions of coherent structures in turbulent wakes, *Journal of Fluid Mechanics*, 971(2023).
- [25] Zhang, S., Fu, Y., Yang, X., Xu, W.: Assessment of mid-to-long term energy saving impacts of nearly zero energy building incentive policies in cold region of China, *Energy and Buildings*, 241 (2021), p. 110938
- [26] Xu, W., Guo, H., Ma, C.: An active solar water wall for passive solar greenhouse heating, *Applied Energy*, 308 (2022), p. 118270
- [27] Arun, M., Barik, D., Sridhar, K.P., Dennison, M.S.: Thermal performance of a dimpled tube parabolic trough solar collector (PTSC) with SiO₂ nanofluid, *International Journal of Photoenergy*, (2022) 8.
- [28] Annual development report of building energy efficiency in China, China Construction Industry Press, 2020.
- [29] Solmaz, A.S.: Optimization of energy performance and thermal comfort of an office building, *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*, 70 (2018) 7, pp. 581-592
- [30] Gaši, M., Milovanović, B., Banjad Pečur, I., Bagarić, M.: Effect of perforations and slits on hygrothermal properties of EPS, *Građevinar*, 74 (2022) 5, pp. 369-381, <https://doi.org/10.14256/JCE.3483.2022>