

Sveučilište u Zagrebu

Arhitektonski fakultet

Marin Binički

ARHITEKTONSKO OBLIKOVANJE KAO ČIMBENIK ENERGETSKE UČINKOVITOSTI NA PRIMJERU OBITELJSKIH KUĆA

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2026.



Sveučilište u Zagrebu

Arhitektonski fakultet

Marin Binički

ARHITEKTONSKO OBLIKOVANJE KAO ČIMBENIK ENERGETSKE UČINKOVITOSTI NA PRIMJERU OBITELJSKIH KUĆA

DOKTORSKI RAD

Mentor: prof.dr.sc. Zoran Veršić

Zagreb, 2026.



University of Zagreb

Faculty of Architecture

Marin Binički

ARCHITECTURAL DESIGN AS A FACTOR OF ENERGY EFFICIENCY OF FAMILY HOUSES

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor: prof.dr.sc. Zoran Veršić

Zagreb, 2026.

Podaci o mentoru

Mentor doktorske disertacije je prof. dr. sc. Zoran Veršić, dipl. ing. arh., redoviti profesor na Arhitektonskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na Katedri za arhitektonske konstrukcije i zgradarstvo.

Zoran Veršić rođen je u Zagrebu 1966. godine, gdje je završio osnovnu i srednju školu. Diplomirao je 1991. godine na Arhitektonskom fakultetu Sveučilištu u Zagrebu. 2001. godine stekao je akademski stupanj magistra znanosti s temom „Metode sanacije starih građevina i građevina pod zaštitom sa stanovišta toplinske zaštite i uštede energije" na Arhitektonskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Doktorirao je 2011. godine s disertacijom na temu „Zaštita zgrada od vanjskih izvora buke" na Arhitektonskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Zoran Veršić zaposlen je od 1992. godine na Arhitektonskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. 2023. godine izabran je u znanstveno-nastavno zvanje redoviti profesor. Od 2003. do 2020. predstojnik je Zavoda za zgradarstvo i fiziku zgrada Arhitektonskog fakulteta. Od 2020. do 2024. bio je prodekan za poslovanje na Arhitektonskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Na preddiplomskom studiju arhitekture i urbanizma Arhitektonskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu voditelj je obveznog kolegija Arhitektonske konstrukcije i materijali III i Fizika zgrade. Voditelj je obaveznog kolegija Održivo građenje II na diplomskom studiju, te izbornog kolegija Zvuk u arhitekturi. Nastavnik je na obveznim kolegijima Studio III i Studio IV – konstrukcije na preddiplomskom studiju i na kolegiju Arhitektura i tehnologija I na diplomskom studiju.

Mentor je uspješno obranjene tri doktorske disertacije.

Objavio je niz stručnih i znanstvenih radova vezanih za temu zvučne zaštite, toplinske zaštite, uštede energije i održive gradnje. Sudjelovao je kao voditelj i kao istraživač na više znanstveno-istraživačkih projekata. U razdoblju od 2016. do 2017. godine bio je voditelj projekta „Provjera inovativnog procesa kompleksnog dinamičkog modeliranja i cjelovitog optimiranja u konceptima energetskih rješenja zgrada", Program provjere inovativnog koncepta za znanstvenike, PoC6, HAMAG-BICRO.

Od 2024. godine mentor je doktorandu u okviru natječaja Hrvatske zaklade za znanost "Razvoj karijera mladih istraživača – izobrazba novih doktora znanosti".

Objavio je kao autor/koautor niz znanstvenih radova koji su publicirani u znanstvenim časopisima, prezentirani i objavljeni u zbornicima međunarodnih znanstvenih skupova. Suradnik je Akademije tehničkih znanosti Hrvatske i tajnik u Odjelu arhitekture i urbanizma. Od 2013. do 2020. godine bio je članom uredništva znanstvenog časopisa za arhitekturu i urbanizam „Prostor" Arhitektonskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Od 2018. do 2024. bio je članom Vijeća doktorskih studija Arhitektonskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Član je Stručnog vijeća Sveučilišnog interdisciplinarnog poslijediplomskog studija „Ekoinženjerstvo" na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije u Zagrebu. Upisan je u Imenik ovlaštenih arhitekata i arhitekata urbanista Hrvatske komore arhitekata. Ovlašten je za obavljanje poslova na zaštiti i očuvanju kulturnih dobara. Autor je projekata zvučne i toplinske zaštite te uštede energije za više stotina zgrada. Predsjednik je tehničkog odbora Akustika (TO 43) Hrvatskog zavoda za norme (HZN).

Autor je digitalnog udžbenika „Arhitektonska akustika" te koautor knjige „Crtanje arhitektonskih nacrta / pribor i osnove" (s A. Štulhofer).

Dobitnik je Zahvalnice „Hrvoje Požar" za 2017. godinu, za značajnu stručnu i znanstvenu djelatnost u razvitku energetike, Hrvatsko energetsko društvo, Zaklada „Hrvoje Požar". Hrvatski savjet za zelenu gradnju i HUPFAS godine 2024. proglasio ga je osobom godine za značajan doprinos unapređenju kvalitete gradnje i života u zgradama kao i održivom gospodarstvu. 2025. godine bio je dobitnikom Priznanja za doprinos u razvoju suradnje Arhitektonskog fakulteta s gospodarstvom i promicanju načela gotovo nule energije u arhitekturi na Arhitektonskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Član je Društva arhitekata Zagreba (DAZ), Udruženja hrvatskih arhitekata (UHA), skupštine i upravnog odbora Hrvatske Komore arhitekata (HKA) i potpredsjednik Hrvatskog akustičkog društva (HAD).

Zahvala

Zahvaljujem mentoru, prof. dr. sc. Zoranu Veršiću, na stručnom vodstvu, savjetima i strpljenju u izradi doktorskog rada, na poticaju za napredovanjem, i najviše na dugogodišnjem prijateljstvu i potpori.

Također zahvaljujem obitelji i prijateljima na potpori i razumijevanju kroz godine rada.

Marin Binički

Sažetak

Potrošnja energije u zgradama ovisi o nizu čimbenika od kojih je jedan arhitektonsko oblikovanje. Uzmemo li u obzir karakteristike zgrada koje utječu na njihov izgled, možemo primijetiti da su pojedini čimbenici arhitektonskog oblikovanja ujedno i čimbenici energetske učinkovitosti.

Glavni cilj ovog rada utvrditi je utjecaj arhitektonskog oblikovanja na potrošnju energije u zgradama kroz analizu pojedinih čimbenika. Rad je usredotočen na šest elemenata arhitektonskog oblikovanja i energetske učinkovitosti: oblik zgrade, toplinska izolativnost ovojnice koja ovisi o debljini i materijalu toplinske izolacije u građevnim dijelovima, orijentacija i ploština prozirnih elemenata ovojnice, vrsta naprave za zaštitu od pregrijavanja, te odnos volumena zgrade, odnosno ploština ovojnice u dodiru s tlom koje predstavlja stabilniju toplinsku masu u odnosu na vanjski zrak.

Analiza utjecaja oblikovanja na energetsku učinkovitost provedena je računskim putem. Svaki od promatranih čimbenika iskazan je kao fizikalna veličina čije su referentne vrijednosti i referentni intervali rezultat statističke obrade proračuna iz projekata racionalne uporabe energije 151 kuće iz cijele Hrvatske. Cilj rada bio je ustanoviti koliko čimbenika nepovoljno odstupa u analiziranim primjerima zgrada, koliko pojedini čimbenici mogu odstupiti od optimalnih vrijednosti i u kojoj mjeri prilagodba ostalih čimbenika može zadržati referentnu razinu potrošnje. Rezultati pokazuju da 13 % analiziranih kuća ima jedan ili dva čimbenika sa značajno nepovoljnim odstupanjima od optimalnih vrijednosti i da je u 77 % slučajeva narušenu energetsku učinkovitost moguće kompenzirati prilagodbom ostalih čimbenika.

Ključne riječi: *arhitektonsko oblikovanje, energetska učinkovitost, referentni model, korekcija potrošnje energije*

Proširenisažetak

Potrošnja energije u zgradama i time povezane emisije stakleničkih plinova dostižu 10 milijardi tona CO_2 godišnje, što predstavlja trećinu ukupnih godišnjih emisija izazvanih ljudskom aktivnošću. Od toga 30 % do 70 % otpada na energiju za grijanje i hlađenje. Potrošnja energije u zgradama ovisi o nizu čimbenika – namjeni zgrade, navikama korisnika, klimatskim uvjetima na lokaciji zgrade i karakteristikama zgrade vezanim za energetsku učinkovitost. Energetska učinkovitost zgrade ovisi o toplinsko-izolacijskoj kvaliteti ovojnice zgrade, iskorištavanju solarnih dobitaka, zaštiti od pregrijavanja, odnosu ploštine ovojnice i grijanog prostora zgrade itd. U ovom radu promatraju se zgrade stambene namjene, odnosno obiteljske kuće do tri stana, u kontinentalnom i primorskom klimatskom području Republike Hrvatske i čimbenici energetske učinkovitosti zgrada: oblik zgrade, debljina toplinske izolacije u građevnim dijelovima koja, uz vrstu izolacije, utječe na toplinsku izolativnost ovojnice, ploština i orijentacija prozirnih elemenata ovojnice, zaštita od pregrijavanja, te odnos volumena zgrade i tla, odnosno ploština ovojnice u kontaktu s tlom. Za navedene čimbenike poznato je koja su optimalna rješenja za pojedine klimatske uvjete. U hladnim podnebljima u kojima je dominantna potrošnja energije za grijanje, povoljniji je kompaktan oblik zgrade, orijentacija otvora prema Suncu, veće debljine toplinske izolacije, kontakt s tlom ili djelomično ukopavanje u tlo koje zimi grije zgradu. Za topla podneblja u kojima je dominantna potrošnja energije za hlađenje, povoljniji je oblik zgrade koji će omogućiti bolje provjetravanje, orijentacija od Sunca ili manja veličina otvora s vanjskom zaštitom od Sunca, manje debljine toplinske izolacije kako bi se omogućilo hlađenje noću, kontakt s tlom ili djelomično ukopavanje u tlo koje tijekom ljeta hladi zgradu.

Prilikom projektiranja zgrada u obzir se uzimaju čimbenici energetske učinkovitosti, međutim oni su samo jedan od niza utjecajnih faktora na oblikovanje zgrada. Pojedine čimbenike moguće je projektirati optimalno dok za pojedine to nije slučaj. Primjerice, u pojedinim slučajevima nećemo biti u mogućnosti ostvariti optimalnu orijentaciju otvora ili vrstu zaštite od pregrijavanja zbog neposrednog okoliša zgrade ili klimatskih uvjeta, dok minimalne debljine zidova i toplinskih izolacija predstavljaju početne uštede. Nadalje, želja projektanta je što skladniji vizualni dojam zgrade, što često aspekt energetske učinkovitosti postavlja u drugi plan. Razmotrimo li koje karakteristike zgrada utječu na vizualni identitet, možemo primijetiti da se pojedini čimbenici arhitektonskog oblikovanja i energetske učinkovitosti preklapaju. Glavni cilj ovog rada utvrditi je koliki je utjecaj arhitektonskog oblikovanja na potrošnju energije u

zgradama kroz analizu navedenih čimbenika i koliko je za pojedine čimbenike moguće odstupiti od načela energetski učinkovitog oblikovanja.

Potrošnja energije za grijanje i hlađenje u zgradama određuje se računskim putem, u skladu s Algoritmom za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790. Ulazni podaci za proračun su brojčane vrijednosti geometrijskih i fizikalnih veličina ovisnih o karakteristikama zgrade u odnosu na energetsku učinkovitost. Prolazak topline kroz ovojnicu ovisi o debljinama i vrsti toplinske izolacije, toplinski gubici kroz ovojnicu ovise o ploštini građevnih dijelova, solarni dobici vezani su za orijentaciju, ploštinu prozora, vrstu ostakljenja i napravu za zaštitu od sunca. Svaki od promatranih čimbenika moguće je svesti na geometrijsku i fizikalnu numeričku vrijednost i računski iskazati utjecaj svakog čimbenika u energetskoj učinkovitosti zgrade.

Geometrijske vrijednosti zgrade ovise o njezinome arhitektonskom oblikovanju pa će se pojedine vrijednosti razlikovati ovisno o projektu. Primjerice, debljina toplinske izolacije u zidovima i vrsta zaštite od sunca možda su jednake u velikom broju slučajeva, ali zato se zasigurno razlikuju druge vrijednosti: ploštine elemenata ovojnice, orijentacije otvora, obujmi zgrada, faktori oblika, ploštine konstrukcija prema tlu itd. Kako bi se utvrdile prosječne geometrijske vrijednosti promatranih čimbenika, analizirani su projekti racionalne uporabe energije obiteljskih kuća u Hrvatskoj nakon 2015. godine. Tada je na snagu stupio još važeći Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 128/15), kojim su propisane dopuštene vrijednosti koeficijenata prolaska topline građevnih dijelova zgrade U (W/(m^{2}K)), specifična dopuštena godišnja potrošnja energije za grijanje $Q''_{H,nd}$ (kWh/(m^{2}a)) i hlađenje $Q''_{C,nd}$ (kWh/(m^{2}a)). O navedenim zahtjevima ovise potrebne debljine toplinske izolacije, ali i samo oblikovanje zgrade, kako bi se postigla godišnja potrošnja energije u skladu sa zahtjevima Tehničkog propisa. Kasnije dopune Tehničkog propisa i prelazak na *gotovo nula* energetski standard odnosio se primarno na uključivanje obnovljivih izvora energije, odnosno na primjenu suvremenih visokoučinkovitih termotehničkih sustava što nije predmet ovog istraživanja.

Ovim radom analiziran je 151 proračun iz projekata racionalne uporabe energije i toplinske zaštite u razdoblju od 2017. do 2025. godine, od toga 82 kuće u kontinentalnom klimatskom području i 69 kuća u primorskom području Hrvatske. Analizirane kuće su nove, samostojeće obiteljske kuće. Proračuni su prikupljeni od projektanta i projektantskih ureda koji se bave Projektima racionalne uporabe energije i oni su poslužili kao podloga za izradu baze numeričkih

podataka za promatrane čimbenike (Prilog 1). Statističkom obradom podataka iz analiziranih projekata prikupljene su i interpolirane prosječne vrijednosti i referentni intervali pojedinih čimbenika za svako klimatsko područje. Na taj način stvoreni su računalni modeli referentne obiteljske kuće za kontinent i primorje nakon 2017. godine.

Sljedeći korak bila je evaluacija arhitektonskog oblikovanja u odnosu na energetsku učinkovitost na način da se kod svih analiziranih kuća provjeravalo odstupanje svakog čimbenika od dobivenog prosjeka. Tako je ustanovljeno koliki je broj čimbenika i koliko je odstupanje od referentnog modela. Pritom je odstupanje moguće u smjeru koji povoljno utječe i u smjeru koji nepovoljno utječe na energetsku učinkovitost. U daljnjoj statistici promatrali su se parametri koji nepovoljno utječu na učinkovitost, pri čemu 100 % predstavlja maksimalno zabilježeno nepovoljno odstupanje. Za kuće u kontinentalnoj klimi, ispostavilo se da čak 95 % kuća ima bar jedan čimbenik koji odstupa više od 10 %, dok svega 10 % kuća ima bar jedan čimbenik koji odstupa u rasponu 90 % do 100 %. Promatramo li dva čimbenika, tada za 79 % kuća postoje barem dva čimbenika koja odstupaju više od 10 %, dok samo 4 % kuća ima dva čimbenika koja odstupaju u rasponu 90 % do 100 %. Za primorsku klimu, 97 % kuća ima barem jedan čimbenik s odstupanjem većim od 10 % i 10 % kuća s barem jednim čimbenikom odstupanja većeg od 90 %. Također, 90 % kuća ima barem dva čimbenika s odstupanjem većim od 10 % i 1 % kuća ima dva čimbenika s odstupanjem većim od 90 %. Tri čimbenika s odstupanjem većim od 90 % nije zabilježeno niti kod jedne kuće.

Iz ove analize moguće je zaključiti da je prilikom projektiranja zgrada gotovo zanemariva vjerojatnost da će svi parametri arhitektonskog oblikovanja biti vrlo nepovoljni u odnosu na energetsku učinkovitost, odnosno da je moguće očekivati svega jedan ili eventualno dva čimbenika s vrlo nepovoljnim utjecajem. Budući da su se promatrali čimbenici energetske učinkovitosti koji su ujedno i čimbenici arhitektonskog izričaja, možemo reći da čimbenici koji značajno odstupaju od prosjeka predstavljaju nositelje vizualnog identiteta zgrade. Primjerice kuća na stupovima ne ostvaruje kontakt s tlom, kao što će kuća s potpuno ostakljenom ovojnicom imati značajne gubitke topline zimi i pregrijavanje ljeti, odnosno ti parametri energetske učinkovitosti značajno odstupaju od prosjeka i istovremeno su dominantni elementi oblikovanja. Gledano kroz preklapanje čimbenika oblikovanja i učinkovitosti, možemo reći da je očekivano da će malen broj čimbenika energetske učinkovitosti biti nositelj vizualnog identiteta zgrade.

Utjecaj oblikovanja, odnosno vrednovanje pojedinog čimbenika u energetskoj učinkovitosti provedeno je računskim putem. Uspostavljen je matematički model kojim se generiraju geometrijski i fizikalni parametri kuće na osnovu ulaznih brojčanih vrijednosti promatranih čimbenika. Prilagodba vrijednosti pojedinog čimbenika unutar referentnog intervala rezultira promjenom ostalih ulaznih parametara proračuna, a time i različitom potrošnjom energije za grijanje i hlađenje. Takvim parametarskim modelom postignuta je usporedivost rezultata za svaki čimbenik.

Vrednovanje čimbenika u odnosu na energetsku učinkovitost obuhvaća i energiju za grijanje i energiju za hlađenje. U kontinentalnom području Hrvatske dominantna je potrošnja energije za grijanje, ali s obzirom na globalni rast temperatura, ljeti i hlađenje postaje nužno. U primorju hlađenje predstavlja znatno veći udio godišnje potrošnje, no grijanje također predstavlja nužnost u zimskim mjesecima. Termotehnički sustavi u novim kućama pretežito su dizalice topline s mogućnošću grijanja i hlađenja. Podjednako su učinkovite u grijanju i hlađenju (3,70 do 4,05), što znači da rezultiraju podjednakom potrošnjom električne energije za proizvodnju toplinske ili rashladne energije kao i podjednakim CO_2 emisijama (34,8 do 38,1 gCO_2/kWh). Kotlovi na pelete imaju znatno niže učinkovitosti (0,85), ali riječ je o drugom energentu sa znatno nižim specifičnim emisijama pa proizvodnja toplinske energije iz biomase rezultira sličnim emisijama (40,5 do 49,8 gCO_2/kWh). S obzirom na podjednake emisije te nadolazeći energetski standard kojem će fokus biti na CO_2 ispustima, energija za grijanje i hlađenje u ovom se radu vrednuju jednako.

Osim o geometrijsko-fizikalnim karakteristikama zgrade, potrošnja energije ovisi o klimatskim uvjetima na lokaciji zgrade i o navikama korisnika. Globalno zagrijavanje rezultira prosječnim porastom temperatura od približno 0,04 °C godišnje, dok Europa bilježi još brži rast od približno 0,06 °C godišnje. Aktualni klimatski podaci korišteni za proračune predstavljaju 30-godišnji prosjek klime. U posljednjih deset godina sve izmjerene godišnje temperature u Zagrebu i Splitu veće su od tog prosjeka. U ovome radu generirani su i korišteni satni meteorološki podaci koji odgovaraju prosjeku klime za posljednjih deset godina.

Osim promjene klimatskih uvjeta, proučio se i utjecaj korisnika u pogledu navika koje utječu na potrošnju energije. Analize temperatura koje postavljaju korisnici u novim zgradama, toplinski izoliranim prema važećim propisima, pokazuju odstupanja od onih utvrđenim propisima, odnosno temperature grijanja u pravilu su više od onih propisanih. Isti je slučaj s temperaturama hlađenja za koje postoji niz preporuka prema kojima više temperature ostvaruju

jednaku razinu ugode uz značajne uštede. Uštede u hlađenju postižu se i ljetnim noćnim provjetravanjem (pasivnim hlađenjem) koje je primjenjivo u svim klimatskim područjima Hrvatske uz veliki potencijal, ali nije obuhvaćeno metodologijom proračuna potrošnje energije kao što to nije slučaj niti s kombinacijom vanjske zaštite od sunca i unutarnje naprave za zaštitu od bliještanja, a koja ima utjecaj na energetsku učinkovitost.

Proračuni su provedeni za kuće kontinentalnog i primorskog područja Hrvatske u dva scenarija. Prvi scenarij, osnovni, u potpunosti je proveden prema zahtjevima važećih propisa koji kao meteorološke podatke koristi 30-godišnji prosjek klime s referentnim godinama od 2004. do 2013. Drugi scenarij proračuna, varijantni, uvažava navike korisnika i primjenjuje novije meteorološke podatke, odnosno 10-godišnji prosjek klime od 2015. do 2024. godine. Varijantni scenarij proračuna za kontinentalnu klimu rezultira s 23 % manjom ukupnom potrošnjom, a u primorskoj klimi s 21 % manjom potrošnjom u odnosu na osnovni scenarij.

Rezultati vrednovanja čimbenika u energetskoj učinkovitosti pokazali su da su najutjecajniji čimbenici u kontinentalnoj klimi: faktor oblika, toplinska izolativnost ovojnice i udio prozirnih otvora u ovojnici. Ovisno o scenariju proračuna, osnovnom ili varijantnom, varijacije u faktoru oblika mogu rezultirati do 15 % manjom i do 34 % većom potrošnjom energije za grijanje i hlađenje u odnosu na referentni model. Za izolativnost ovojnice rezultati variraju od 27 % ušteda do 55 % veće potrošnje, a za udio prozora u ovojnici od 20 % ušteda do 56 % veće ukupne potrošnje. Preostali čimbenici rezultiraju manjim varijacijama, ukupno do 30 %.

U primorskoj klimi najutjecajniji čimbenici su: udio prozirnih otvora u ovojnici, faktor oblika te podjednako toplinska izolativnost ovojnice i vrsta naprave za zaštitu od pregrijavanja. Daleko najutjecajniji čimbenik je udio otvora u ovojnici čije varijacije postižu uštede do 24 % i povećanje potrošnje do 175 %. Razlog tolikoj razlici je vrlo visoka gornja granica referentnog intervala za promatrani čimbenik, odnosno najveći udio otvora 4,5 puta je veći od prosjeka, što rezultira značajnim pregrijavanjem ljeti. Od ostalih čimbenika u primorskoj klimi, varijacije faktora oblika rezultiraju uštedama do 19 % i povećanjem potrošnje do 55 %. Varijacije izolativnosti ovojnice rezultiraju uštedama do 21 % i povećanjem potrošnje do 18 %, a vrsta zaštite od pregrijavanja daje sličan raspon rezultata, uštede do 8 % i povećanje potrošnje do 33 %. Preostali čimbenici rezultiraju varijacijama do ukupno 30 %.

Posljednja analiza ovog rada bila je potvrda mogućnosti nepovoljnog odstupanja jednog ili dva čimbenika uza zadržavanje referentne razine energetske učinkovitosti. Hipoteza je da je

pojedine elemente arhitektonskog oblikovanja moguće projektirati bez pridržavanja načela energetski učinkovitog oblikovanja te da se energetska učinkovitost zgrade neće narušiti ukoliko se ostali elementi oblikovanja do određene mjere prilagode načelima energetski učinkovitog oblikovanja. Ova hipoteza pokazala se točnom za 77 % slučajeva.

Za slučaj nepovoljnog odstupanja jednog čimbenika, u kontinentalnoj klimi bilo je moguće zadržati referentnu potrošnju energije prilagodbom ostalih čimbenika u većoj ili manjoj mjeri za osnovni i varijantni scenarij proračuna. Za slučaj nepovoljnog odstupanja dva čimbenika, za većinu kombinacija bilo je moguće zadržati potrošnju na referentnoj razini, ali u pojedinim slučajevima ne. Ovisno o scenariju proračuna, osnovnom ili varijantnom, maksimalno odstupanje faktora oblika i udjela otvora u ovojnici rezultira do 28 % većom potrošnjom, odstupanje izolativnosti ovojnice i udjela otvora rezultira do 12 % većom potrošnjom, najveći udio otvora i neučinkovita vrsta zaštite od pregrijavanja rezultiraju do 30 % većom potrošnjom te najslabija izolativnost ovojnice i najmanji kontakt ovojnice s tlom rezultiraju do 24 % većom potrošnjom. U svim opisanim varijantama, sve ostale čimbenike bilo je potrebno oblikovati maksimalno moguće u skladu s načelima energetski učinkovitog oblikovanja, ali njihov doprinos nije bio dovoljan za održavanje referentne razine potrošnje energije.

U primorskoj klimi bilo je moguće na isti način održati referentnu razinu energetske učinkovitosti za većinu slučajeva odstupanja jednog ili dva čimbenika. Kod najvećeg udjela otvora u ovojnici, uz prilagodbu ostalih čimbenika, došlo je do povećanja potrošnje do 48 %. Pri kombinaciji dva čimbenika s maksimalnim odstupanjem, i prilagodbom ostalih čimbenika, u svim kombinacijama koje uključuju udio otvora nije bilo moguće zadržati optimalnu razinu energetske učinkoviti. Kombinacija s faktorom oblika rezultira povećanjem potrošnje do 181 %, s izolativnosti ovojnice do 77 %, s orijentacijom do 37 %, s kontaktom sa tlom do 142 % i sa zaštitom od pregrijavanja do 218 %. U posljednjem slučaju, povećanje potrošnje je najveće od svih slučajeva, ali i očekivano iz razloga što veći udio otvora i lošiji faktor naprave zaštite od pregrijavanja rezultiraju deset puta većim solarnim dobicima u odnosu na referentni model.

Ovim radom vrednovani su čimbenici arhitektonskog oblikovanja na primjerima obiteljskih kuća projektiranih u razdoblju od 2017. do 2025. godine. Referentni modeli i referentni intervali svih čimbenika rezultat su analize stvarnih projekata. Dokazano je da je kod oblikovnog koncepta kuća, kod kojih izostaje usredotočenost na energetski učinkovitom oblikovanju, u 77 % slučajeva moguće ostvariti optimalnu ili bolju od optimalne razinu energetske učinkovitosti

kroz uravnoteženost ostalih čimbenika koji ne predstavljaju nositelje arhitektonskog izričaja zgrade.

Sadržaj

Podaci o mentoru I

Zahvala III

Sažetak IV

Prošireni sažetak V

Sadržaj XII

Popis oznaka i skraćenica XVI

Popis tablica XIX

Popis slika XXI

1 UVOD 1

1.1 Područje i tema istraživanja 1

1.2 Cilj rada 5

1.3 Hipoteza 5

1.4 Opis istraživanja 7

1.5 Istraživačke metode 9

1.6 Očekivani znanstveni doprinos 11

2 PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA 13

2.1 Elementi arhitektonskog oblikovanja 13

2.2 Čimbenici arhitektonskog oblikovanja i energetske učinkovitosti 15

2.2.1 Faktor oblika 15

2.2.2 Debljina toplinske izolacije i toplinska izolativnost ovojnice 18

2.2.3 Udio prozirnih otvora u ovojnici 21

2.2.4 Orijentacija 24

2.2.5 Zaštita od pregrijavanja 26

2.2.6 Kontakt ovojnice s tlom 28

2.3 Oblikovanje i energetska učinkovitost pasivnih, gotovo nula energetskih kuća i zgrada nulte emisije 32

2.4 Varijantni scenarij proračuna 34
2.4.1 Promjena klime 35
2.4.2 Projektne temperature grijanja i hlađenja 37
2.4.3 Pasivno hlađenje – noćno provjetravanje 40
2.4.4 Zaštita od blještanja sunca 41
2.5 Isporučena energija i CO_2 emisije grijanja i hlađenja 42
3 POSTAVKE PRORAČUNSKOG MODELA 45
3.1 Odnos arhitektonskog oblikovanja i numeričkih podataka 45
3.2 Izračun geometrijskih i fizikalnih veličina čimbenika arhitektonskog oblikovanja 50
3.2.1 Faktor oblika 50
3.2.2 Debljina toplinske izolacije i toplinska izolativnost ovojnice 52
3.2.3 Udio prozirnih otvora u ovojnici 54
3.2.4 Orijentacija otvora 55
3.2.5 Zaštita od pregrijavanja 57
3.2.6 Kontakt ovojnice s tlom 59
3.3 Izračun geometrijskih i fizikalnih veličina ostalih čimbenika energetske učinkovitosti potrebnih za proračun potrošnje energije 60
3.3.1 Obujam i ploština zgrade 61
3.3.2 Toplinska izolativnost elemenata ovojnice 63
3.3.3 Geometrijski parametri elemenata ovojnice 63
3.4 Postavke varijantnog scenarija proračuna 67
3.4.1 Promjena klime 67
3.4.2 Projektne temperature grijanja i hlađenja 70
3.4.3 Pasivno hlađenje – noćno provjetravanje 71
3.4.4 Zaštita od blještanja sunca 72
3.5 Isporučena energija i CO_2 emisije grijanja i hlađenja 72
4 REZULTATI I DISKUSIJA 75

4.1 Referentne vrijednosti čimbenika arhitektonskog oblikovanja 75
4.2 Referentni intervali čimbenika arhitektonskog oblikovanja 77
4.3 Zastupljenost čimbenika arhitektonskog oblikovanja sa nepovoljnim odstupanjem 80
4.4 Referentni model, geometrijske i fizikalne karakteristike 85
4.5 Promjena klime 87
4.6 Isporučena energija i CO_2 emisije grijanja i hlađenja 94
4.7 Potrošnja energije referentnog modela 97
4.7.1 Osnovni scenarij proračuna (kontinentalna klima) 98
4.7.2 Varijantni scenarij proračuna (kontinentalna klima) 99
4.7.3 Osnovni scenarij proračuna (primorska klima) 101
4.7.4 Varijantni scenarij proračuna (primorska klima) 102
4.8 Varijantni scenariji proračuna 104
4.9 Vrednovanje čimbenika arhitektonskog oblikovanja u odnosu na energetsku učinkovitost 109
4.9.1 Faktor oblika 110
4.9.2 Izolativnost ovojnice i debljina toplinske izolacije 112
4.9.3 Udio prozirnih otvora u ovojnici 115
4.9.4 Orijentacija otvora 117
4.9.5 Zaštita od pregrijavanja 120
4.9.6 Kontakt ovojnice s tlom 123
4.9.7 Usporedni utjecaj svih čimbenika na potrošnju energije 125
4.10 Prilagodba odstupanja jednog čimbenika u svrhu očuvanja energetske učinkovitosti 129
4.10.1 Faktor oblika 136
4.10.2 Izolativnost ovojnice i debljina toplinske izolacije 136
4.10.3 Udio prozirnih otvora u ovojnici 137
4.10.4 Orijentacija 138

4.10.5 Zaštita od pregrijavanja 138
4.10.6 Kontakt ovojnice s tlom 139
4.11 Prilagodba odstupanja dva čimbenika u svrhu očuvanja energetske učinkovitosti . 139
4.11.1 Kontinentalna klima 140
4.11.2 Primorska klima 149
5 ZAKLJUČAK 159
5.1 Izvorni znanstveni doprinos 164
5.2 Potencijal za daljnja istraživanja 164
Popis literature 166
Prilog 1: Baza numeričkih podataka iz projekata racionalne uporabe energije 182
1. Projekti obiteljskih kuća kontinentalnog područja Hrvatske 182
2. Projekti obiteljskih kuća primorskog područja Hrvatske 194
Prilog 2: Vrednovanje čimbenika arhitektonskog oblikovanja – utjecaj na mjesečnu potrošnju 204
1. Kontinentalna klima, osnovni scenarij proračuna 204
2. Kontinentalna klima, varijantni scenarij proračuna 207
3. Primorska klima, osnovni scenarij proračuna 210
4. Primorska klima, varijantni scenarij proračuna 213
Životopis 216
Popis objavljenih radova 217

Popis oznaka i skraćenica

a	Duljina stranice	m
A	Ploština oplošja (ovojnice) zgrade	m^2
A_f	Bruto ploština zgrade	m^2
$A_{gr,fl}$	Ploština poda na tlu	m^2
$A_{int,e}$	Ploština poda iznad vanjskog prostora	m^2
$A_{int,u}$	Ploština poda iznad negrijane prostorije	m^2
A_k	Korisna ploština zgrade	m^2
A_{roof}	Ploština krova	m^2
$A_{w,E,W,N,S}$	Ploština prozirnih otvora prema orijentacijama	m^2
$A_{w,tot}$	Ukupna ploština prozirnih otvora zgrade	m^2
$A_{wall,E,W,N,S}$	Ploština zidova prema orijentacijama	m^2
$A_{gr,wall}$	Ploština zida prema tlu	m^2
$A_{wall,u}$	Ploština zida prema negrijanoj prostoriji	m^2
C	Faktor pretvorbe za energent	gCO_2/kWh
cm	Akumulativnost topline	MJ/K
$CO_{2,C}$	Emisija stakleničkih plinova za hlađenje	gCO_2
$CO_{2,H}$	Emisija stakleničkih plinova za grijanje	gCO_2
COP	Deklarirani toplinski množitelj	-
d	Debljina	cm, m
$d_{ti,wall}$	Debljina toplinske izolacije vanjskog zida	cm
E_{del}	Isporučena energija	kWh
EER	Faktor energetske učinkovitosti rashladnog uređaja	-
f_0	Faktor oblika	m^{-1}
F_C	Faktor umanjenja prolaska sunčeva zračenja kroz napravu za zaštitu od pregrijavanja	-
$F_{C,G}$	Faktor umanjenja prolaska sunčeva zračenja kroz napravu za zaštitu od blještanja sunca	-
F_f	Udio ploštine ostakljenja u otvoru	-
$f_{int,e}$	Udio ploštine međukatne konstrukcije iznad vanjskog zraka	-

$f_{int,u}$	Udio ploštine međukatne konstrukcije iznad negrijane prostorije	-
f_{gr}	Udio ploštine poda i zida prema tlu u ovojnici	-
$f_{gr,fl}$	Udio ploštine poda prema tlu u ovojnici	-
$f_{gr,wall}$	Udio ploštine zida prema tlu u ovojnici	-
$f_{wall,u}$	Udio ploštine zidova prema negrijanoj prostoriji	-
f_{win}	Udio ploštine ostakljenih otvora u ovojnici	-
$f_{win,N,E,S,W}$	Udio ploštine otvora prema orijentacijama	-
f_{roof}	Udio krova u ovojnici	-
g_L	Koeficijent propuštanja ukupnog sunčevog zračenja kroz ostakljenje okomito na plohu	-
h	Visina etaže od poda do poda	M
$H_{g,int}$	Unutarnji dobici topline	W/m^2
H_{ve}	Koeficijent ventilacijske izmjene topline	W/K
H	Globalno sunčevo zračenje	Wh/m^2 MJ/m^2 kWh/m^2
I	Snaga (intenzitet) solarnog zračenja	W/ m^2
n	Broj, broj izmjena zraka	- h^{-1}
n_{pa}	Broj izmjena zraka pri pasivnom hlađenju	h^{-1}
P	Izloženi opseg tla, perimetar	m
PLV_{AV}	Prosječni faktor djelomičnog opterećenja	-
P_u	Izloženi opseg poda negrijane prostorije	m
$Q''_{C,nd}$	Specifična potrebna godišnja energija za hlađenje	$kWh/(m^2a)$
$Q''_{H,nd}$	Specifična potrebna godišnja energija za grijanje	$kWh/(m^2a)$
$Q''_{HC,nd}$	Specifična potrebna godišnja energija za grijanje i hlađenje	$kWh/(m^2a)$
$Q_{C,nd}$	Potrebna godišnja energija za hlađenje	kWh/a
$Q_{H,nd}$	Potrebna godišnja energija za grijanje	kWh/a
R_{se}	Vanjski plošni otpor prijelazu topline s vanjske plohe građevnog dijela	m^2K/W

R_{si}	Plošni otpor prijelazu topline na unutarnju plohu građevnog dijela	m^2K/W
SF	Solarni faktor, faktor propuštanja ukupnog sunčevog zračenja kroz ostakljenje okomito na plohu	%
t_i	Temperatura u određenom satu	°C
t_{sr}	Srednja dnevna temperatura	°C
U	Koeficijent prolaska topline	$W/(m^2K)$
U_w	Koeficijent prolaska topline prozora	$W/(m^2K)$
V	Volumen (obujam) grijanog zraka	m^3
V_e	Volumen (obujam) grijanog dijela zgrade	m^3
z	Visina zida prema tlu	m
α	Azimut	°
α_{zid}	Apsorpcijski koeficijent površine zida	-
δ	Deklinacija, kut otklona od ekvatora	°
Δ	Korak	-
$\eta_{gnr,Pint,corr}$	Korigirana učinkovitost kotla pri djelomičnom opterećenju	-
$\Theta_{int,C}$	Projektna temperatura hlađenja	°C
$\Theta_{int,H}$	Projektna temperatura grijanja	°C
λ	Koeficijent provodljivosti topline	W/(mK)

Popis tablica

Tablica 1: Geometrijski i fizikalni parametri zgrade (primjer) 47
Tablica 2: Izračun faktora oblika za kocke različite veličine 52
Tablica 3: Toplinske karakteristike najčešće korištenih toplinskih izolacija..... 53
Tablica 4: Plošni otpori prijelaza topline R (m^2K/W) [73]..... 53
Tablica 5: Solarna iradijacija, I (MJ/m^2) za Zagreb Maksimir 56
Tablica 6: Solarna iradijacija, I (MJ/m^2) za Split Marjan [10]..... 56
Tablica 7: Faktor umanjenja prolaska solarnog zračenja različitih naprava za zaštitu od pregrijavanja, F_C (-) [1]..... 58
Tablica 8: Dopuštene U_{max} ($W/(m^2K)$) vrijednosti za pojedine građevne dijelove [1] 63
Tablica 9: Razlike u postavkama osnovnog i varijantnog scenarija proračuna..... 67
Tablica 10: Referente vrijednosti promatranih čimbenika energetske učinkovitosti 75
Tablica 11: Referente vrijednosti ostalih čimbenika energetske učinkovitosti 76
Tablica 12: referentne vrijednosti čimbenika arhitektonskog oblikovanja obiteljskih kuća u kontinentalnoj Hrvatskoj 78
Tablica 13: referentne vrijednosti čimbenika arhitektonskog oblikovanja obiteljskih kuća u primorskoj Hrvatskoj..... 78
Tablica 14: Postotak analiziranih kuća s određenim brojem čimbenika koji nepovoljno odstupaju od prosjeka (kontinentalna Hrvatska)..... 81
Tablica 15: Postotak analiziranih kuća s određenim brojem čimbenika koji nepovoljno odstupaju od prosjeka (primorska Hrvatska) 83
Tablica 16: Geometrijske i fizikalne veličine referentnih modela 85
Tablica 17: Srednje dnevne temperature (°C) za Zagreb 88
Tablica 18: Srednje dnevne temperature (°C) za Split [11]..... 88
Tablica 19: Globalno solarno zračenje na horizontalnu plohu, H_{hor} (kWh/m^2a) – Zagreb [11]... 91
Tablica 20: Globalno solarno zračenje na horizontalnu plohu, H_{hor} (kWh/m^2a) – Split [11] 92
Tablica 21: Učinkovitosti proizvodnje toplinske i rashladne energije, ... 94
Tablica 22: Postavke proračuna – osnovni scenarij (kontinentalna klima)..... 98
Tablica 23: Potrošnja energije referentnog modela – osnovni scenarij proračuna (kontinentalna klima) 99
Tablica 24: Postavke proračuna – varijantni scenarij (kontinentalna klima) 99
Tablica 25: Potrošnja energije referentnog modela – varijantni scenarij proračuna (kontinentalna klima) 100

Tablica 26: Postavke proračuna – osnovni model (primorska klima) 101
Tablica 27: Potrošnja energije referentnog modela – osnovni scenarij proračuna (kontinentalna klima) 102
Tablica 28: Postavke proračuna – varijantni scenarij (primorska klima) 102
Tablica 29: Potrošnja energije referentnog modela – varijantni scenarij proračuna (primorska klima) 103
Tablica 30: Čimbenici vrednovani (rangirani) prema utjecaju na ukupnu potrošnju energije 127
Tablica 31: Numerička analiza projekata obiteljskih kuća (kontinentalna Hrvatska) 182
Tablica 32: Numerička analiza projekata obiteljskih kuća (primorska Hrvatska) 194

Popis slika

Slika 1: Batesina distribucija vjerojatnosti prosjeka 6 nasumičnih varijabli (iznosa od -1 do 1) po intervalima koraka 0,1 6
Slika 2: Kuća Köris, Zeller & Moye Architects, Berlin 17
Slika 3: Kuća Köris, Zeller & Moye Architects, Berlin, tlocrt prizemlja [3] 18
Slika 4: House in a Plum Grove, Kazuyo Sejima, Tokio [88] 20
Slika 5: House in a Plum Grove, tlocrt prizemlja [88] 20
Slika 6: Kuća Rieteiland, Hans van Heeswijk Arhitekti, Amsterdam 23
Slika 7: Kuća Rieteiland, Hans van Heeswijk Arhitekti, Amsterdam, tlocrt kata [4] 23
Slika 8: Passivhaus Design Dwelling, Surrey, Beech Architects Ltd 25
Slika 9: Passivhaus Design Dwelling, Surrey, Beech Architects Ltd, tlocrt prizemlja [5] 25
Slika 10: Moose Road House, Mork-Ulnes Architects, Oslo 27
Slika 11: Moose Road House, Mork-Ulnes Architects, Oslo, tlocrt [6] 28
Slika 12: Kuća na stupovima, B.HOUSSAIS Architecture, La Roche-Jaudy 30
Slika 13: Kuća na stupovima, B.HOUSSAIS Architecture, La Roche-Jaudy, tlocrt kata 30
Slika 14: Ukopana kuća, Kallos Turin office, London 31
Slika 15: Ukopana kuća, Kallos Turin office, London, tlocrt [8] 31
Slika 16: globalni rast temperature od 2000. godine do danas u odnosu na predindustrijsko doba (°C) [98] 35
Slika 17: a) i b) Obiteljska kuća, Tatjana Liktar Elez, okolica Samobora, Hrvatska 47
Slika 18: Forme (zgrade) različitog oblika, ali jednakog faktora oblika 49
Slika 19: Otvori različitog oblika i veličine, ali jednakog prosječnog otklona od ekvatora (jednake orijentacije) 49
Slika 20: Kocke različitog faktora oblika 51
Slika 21: Solarno zračenje za ljetni dan za različite orijentacije [125] 56
Slika 22: Toplinski gubitak preko izloženog opsega poda na tlu [130] 59
Slika 23: (a) dnevno globalno zračenje i pokrivenost oblacima, (b) pojačano globalno zračenje. [132] 69
Slika 24: Prosjek i najveća odstupanja čimbenika u analiziranim kućama (kontinentalna klima) 80
Slika 25: Broj kuća određenog prosjeka čimbenika i broj kuća u odnosu na očekivanu raspodjelu prema Bates (kontinentalna klima) 81
Slika 26: Prosjek i najveća odstupanja čimbenika u analiziranim kućama (primorska klima) 82

Slika 27: Broj kuća određenog prosjeka čimbenika i broj kuća u odnosu na očekivanu raspodjelu prema Bates (primorska klima) 83
Slika 28: Korigirane dnevne temperature za postaju Zagreb (°C) 89
Slika 29: Korigirane dnevne temperature za postaju Split (°C) 89
Slika 30: Globalno solarno zračenje, H_{hor} (kWh/m^2) Zagreb 93
Slika 31: Globalno solarno zračenje, H_{hor} (kWh/m^2) Split 93
Slika 32: Isporučena energija, E_{del} (kWh) za proizvodnju 1 kWh toplinske i rashladne energije 95
Slika 33: CO_2 emisije (gCO_2) za proizvodnju 1 kWh toplinske i rashladne energije 96
Slika 34: Potrebne mjesečne energije za grijanje $Q_{H,nd,mj}$ (kWh) i hlađenje $Q_{C,nd,mj}$ (kWh) – osnovni scenarij proračuna (kontinentalna klima) 98
Slika 35: Potrebne mjesečne energije za grijanje $Q_{H,nd,mj}$ (kWh) i hlađenje $Q_{C,nd,mj}$ (kWh) – varijantni scenarij proračuna (kontinentalna klima) 100
Slika 36: Potrebne mjesečne energije za grijanje $Q_{H,nd,mj}$ (kWh) i hlađenje $Q_{C,nd,mj}$ (kWh) – osnovni scenarij proračuna (primorska klima) 101
Slika 37: Potrebne mjesečne energije za grijanje $Q_{H,nd,mj}$ (kWh) i hlađenje $Q_{C,nd,mj}$ (kWh) – varijantni scenarij proračuna (primorska klima) 103
Slika 38: Potrošnja energije osnovnog scenarija, varijacija i varijantnog scenarija proračuna (kontinentalna klima) 105
Slika 39: Potrošnja energije osnovnog scenarija, varijacija i varijantnog scenarija proračuna (primorska klima) 106
Slika 40: Utjecaj faktora oblika na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (osnovni scenarij proračuna, kontinentalna klima) 110
Slika 41: Utjecaj faktora oblika na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (varijantni scenarij proračuna, kontinentalna klima) 110
Slika 42: Utjecaj faktora oblika na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (osnovni scenarij proračuna, primorska klima) 111
Slika 43: Utjecaj faktora oblika na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (varijantni scenarij proračuna, primorska klima) 111
Slika 44: Utjecaj debljine toplinske izolacije na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (osnovni scenarij proračuna, kontinentalna klima) 112
Slika 45: Utjecaj debljine toplinske izolacije na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (varijantni scenarij proračuna, kontinentalna klima) 113

Slika 46: Utjecaj debljine toplinske izolacije na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (osnovni scenarij proračuna, primorska klima) 113
Slika 47: Utjecaj debljine toplinske izolacije na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (varijantni scenarij proračuna, primorska klima) 114
Slika 48: Utjecaj udjela prozirnih otvora u ovojnici na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (osnovni scenarij proračuna, kontinentalna klima) 115
Slika 49: Utjecaj udjela prozirnih otvora u ovojnici na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (varijantni scenarij proračuna, kontinentalna klima) 115
Slika 50: Utjecaj udjela prozirnih otvora u ovojnici na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (osnovni scenarij proračuna, primorska klima) 116
Slika 51: Utjecaj udjela prozirnih otvora u ovojnici na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (varijantni scenarij proračuna, primorska klima) 116
Slika 52: Utjecaj orijentacije na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (osnovni scenarij proračuna, kontinentalna klima) 117
Slika 53: Utjecaj orijentacije na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (varijantni scenarij proračuna, kontinentalna klima) 118
Slika 54: Utjecaj orijentacije na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (osnovni scenarij proračuna, primorska klima) 118
Slika 55: Utjecaj orijentacije na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (varijantni scenarij proračuna, primorska klima) 119
Slika 56: Utjecaj zaštite od pregrijavanja na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (osnovni scenarij proračuna, kontinentalna klima) 120
Slika 57: Utjecaj zaštite od pregrijavanja na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (varijantni scenarij proračuna, kontinentalna klima) 121
Slika 58: Utjecaj zaštite od pregrijavanja na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (osnovni scenarij proračuna, primorska klima) 121
Slika 59: Utjecaj zaštite od pregrijavanja na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (varijantni scenarij proračuna, primorska klima) 122
Slika 60: Utjecaj kontakta s tlom na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (osnovni scenarij proračuna, kontinentalna klima) 123
Slika 61: Utjecaj kontakta s tlom na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (varijantni scenarij proračuna, kontinentalna klima) 123

Slika 62: Utjecaj kontakta s tlom na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (osnovni scenarij proračuna, primorska klima) 124
Slika 63: Utjecaj kontakta s tlom na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (varijantni scenarij proračuna, primorska klima) 124
Slika 64: Pojedinačni utjecaj čimbenika na potrošnju energije (kontinentalna klima, osnovni scenarij proračuna) 125
Slika 65: : Pojedinačni utjecaj čimbenika na potrošnju energije (kontinentalna klima, varijantni scenarij proračuna) 126
Slika 66: Pojedinačni utjecaj čimbenika na potrošnju energije (primorska klima, osnovni scenarij proračuna) 126
Slika 67: Pojedinačni utjecaj čimbenika na potrošnju energije (primorska klima, varijantni scenarij proračuna) 127
Slika 68: Korekcija potrošnje energije uslijed najnepovoljnijeg odstupanja jednog čimbenika (kontinentalna klima, osnovni scenarij proračuna) 130
Slika 69: Korekcija potrošnje energije uslijed najnepovoljnijeg odstupanja jednog čimbenika (kontinentalna klima, varijantni scenarij proračuna) 132
Slika 70: Korekcija potrošnje energije uslijed najnepovoljnijeg odstupanja jednog čimbenika (primorska klima, osnovni scenarij proračuna) 133
Slika 71: Korekcija potrošnje energije uslijed najnepovoljnijeg odstupanja jednog čimbenika (primorska klima, varijantni scenarij proračuna) 135
Slika 72: Korekcija potrošnje energije uslijed najnepovoljnijeg odstupanja dva čimbenika (kontinentalna klima, osnovni scenarij proračuna) 143
Slika 73: Korekcija potrošnje energije uslijed najnepovoljnijeg odstupanja dva čimbenika (kontinentalna klima, varijantni scenarij proračuna) 147
Slika 74: Korekcija potrošnje energije uslijed najnepovoljnijeg odstupanja dva čimbenika (primorska klima, osnovni scenarij proračuna) 152
Slika 75: Korekcija potrošnje energije uslijed najnepovoljnijeg odstupanja dva čimbenika (primorska klima, varijantni scenarij proračuna) 156
Slika 76: Faktor oblika analiziranih kuća (kontinentalna klima) 191
Slika 77: Debljina toplinske izolacije zida analiziranih kuća (kontinentalna klima) 191
Slika 78: Udio prozirnih otvora u ovojnici analiziranih kuća (kontinentalna klima) 192
Slika 79: Otklon otvora od ekvatora analiziranih kuća (kontinentalna klima) 192

Slika 80: Faktor naprave za zaštitu od pregrijavanja analiziranih kuća (kontinentalna klima) 193
Slika 81: Udio ovojnice u kontaktu s tlom analiziranih kuća (kontinentalna klima) 193
Slika 82: Faktor oblika analiziranih kuća (primorska klima) 201
Slika 83: Debljina toplinske izolacije zida analiziranih kuća (primorska klima) 201
Slika 84: Udio prozirnih otvora u ovojnici analiziranih kuća (primorska klima) 202
Slika 85: Otklon otvora od ekvatora analiziranih kuća (primorska klima) 202
Slika 86: Faktor naprave za zaštitu od pregrijavanja analiziranih kuća (primorska klima) ... 203
Slika 87: Udio ovojnice u kontaktu s tlom analiziranih kuća (primorska klima) 203
Slika 88: Utjecaj faktora oblika na mjesečnu potrošnju energije (kontinentalna klima, osnovni scenarij proračuna) 204
Slika 89: Utjecaj izolativnosti ovojnice na mjesečnu potrošnju energije (kontinentalna klima, osnovni scenarij proračuna) 204
Slika 90: Utjecaj udjela prozirnih otvora na mjesečnu potrošnju energije (kontinentalna klima, osnovni scenarij proračuna) 205
Slika 91: Utjecaj orijentacije na mjesečnu potrošnju energije (kontinentalna klima, osnovni scenarij proračuna) 205
Slika 92: Utjecaj zaštite od pregrijavanja na mjesečnu potrošnju energije (kontinentalna klima, osnovni scenarij proračuna) 206
Slika 93: Utjecaj kontakta ovojnice s tlom na mjesečnu potrošnju energije (kontinentalna klima, osnovni scenarij proračuna) 206
Slika 94: Utjecaj kontakta ovojnice s tlom na mjesečnu potrošnju energije (kontinentalna klima, varijantni scenarij proračuna) 207
Slika 95: Utjecaj izolativnosti ovojnice na mjesečnu potrošnju energije (kontinentalna klima, varijantni scenarij proračuna) 207
Slika 96: Utjecaj udjela prozirnih otvora na mjesečnu potrošnju energije (kontinentalna klima, varijantni scenarij proračuna) 208
Slika 97: Utjecaj orijentacije na mjesečnu potrošnju energije (kontinentalna klima, varijantni scenarij proračuna) 208
Slika 98: Utjecaj zaštite od pregrijavanja na mjesečnu potrošnju energije (kontinentalna klima, varijantni scenarij proračuna) 209
Slika 99: Utjecaj kontakta ovojnice s tlom na mjesečnu potrošnju energije (kontinentalna klima, varijantni scenarij proračuna) 209

Slika 100: Utjecaj faktora oblika na mjesečnu potrošnju energije (primorska klima, varijantni scenarij proračuna) 210
Slika 101: Utjecaj izolativnosti ovojnice na mjesečnu potrošnju energije (primorska klima, osnovni scenarij proračuna) 210
Slika 102: Utjecaj udjela prozirnih otvora na mjesečnu potrošnju energije (primorska klima, osnovni scenarij proračuna) 211
Slika 103: Utjecaj orijentacije na mjesečnu potrošnju energije (primorska klima, osnovni scenarij proračuna) 211
Slika 104: Utjecaj zaštite od pregrijavanja na mjesečnu potrošnju energije (primorska klima, osnovni scenarij proračuna) 212
Slika 105: Utjecaj kontakta ovojnice s tlom na mjesečnu potrošnju energije (primorska klima, osnovni scenarij proračuna) 212
Slika 106: Utjecaj faktora oblika na mjesečnu potrošnju energije (primorska klima, varijantni scenarij proračuna) 213
Slika 107: Utjecaj izolativnosti ovojnice na mjesečnu potrošnju energije (primorska klima, varijantni scenarij proračuna) 213
Slika 108: Utjecaj udjela prozirnih otvora na mjesečnu potrošnju energije (primorska klima, varijantni scenarij proračuna) 214
Slika 109: Utjecaj orijentacije na mjesečnu potrošnju energije (primorska klima, varijantni scenarij proračuna) 214
Slika 110: Utjecaj zaštite od pregrijavanja na mjesečnu potrošnju energije (primorska klima, varijantni scenarij proračuna) 215
Slika 111: Utjecaj kontakta ovojnice s tlom na mjesečnu potrošnju energije (primorska klima, varijantni scenarij proračuna) 215

1 UVOD

1.1 Područje i tema istraživanja

Dopuštena potrošnja energije u zgradama u Hrvatskoj propisana je Tehničkim propisom o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti zgrada (u daljnjem tekstu Tehnički propis). Energija se u zgradama koristi za održavanja potrebnih mikroklimatskih uvjeta u pogledu temperature, kvalitete zraka i rasvijetljenosti. Također, energija se koristi za pripremu potrošne tople vode (PTV) i za rad kućanskih aparata i radne opreme. Tehničkim propisom određene su dopuštene potrošnje energije za grijanje, hlađenje, pripremu potrošne tople vode, rasvjetu i ventilaciju zgrada za različite namjene dok energija za rad kućanskih aparata nije određena. Kod zgrada stambene namjene, obiteljskih kuća i višestambenih zgrada, u izračun isporučene i primarne energije ulaze samo energija za grijanje i pripremu potrošne tople vode (i ventilaciju ako postoji), dok se energija za rasvjetu i hlađenje ne uračunava [1], premda energija za hlađenje predstavlja najveći udio potrošnje u primorskoj klimi.

U Hrvatskoj postoje zahtjevi u pogledu energetske učinkovitosti od 1987. godine [2], koji se stalno nadopunjuju i unapređuju. U posljednjih 20 godina bilježimo povećanje energetske učinkovitosti zgrada kroz sve strože zahtjeve za kvalitetom ovojnice u pogledu toplinske zaštite i ograničenje potrebne energije za grijanje. Prema Tehničkom propisu iz 2015. godine, a u odnosu na Tehnički propis o uštedi toplinske energije i toplinskoj zaštiti u zgradama iz 2005. godine, dopuštena potrošnja energije za grijanje smanjila se za 17 % za zgrade u kontinentalnoj Hrvatskoj, dok kod zgrada u primorskoj Hrvatskoj nije bilo promjene. Zahtjevi za toplinsku zaštitu vanjske ovojnice zgrada povećali su se 25 % za zgrade u kontinentalnom području i 17 % za zgrade u primorju. [3]

Energetska učinkovitost zgrada u stalnom je napretku kroz unaprjeđenje zahtjeva regulative i tehničkih rješenja uštede energije. Međutim, energija za grijanje i hlađenje i dalje predstavlja značajan udio potrošnje energije u zgradama [4]. U Europskoj uniji 2022. godine 78 % ukupne potrošnje energije u zgradama predstavljala je energija za grijanje i pripremu potrošne tople vode [5]. U srednjoj i sjevernoj Europi većina energije otpada na grijanje dok je hlađenje zanemarivo [6]. U mediteranskom području dominantna je energija za hlađenje - do 40 %, dok je energija za grijanje niža - do 30 % od ukupne potrošnje. Od ostale potrošnje u zgradama 5-10 % otpada na energiju za rasvjetu i 20 % na pripremu PTV. [7]

Pojedini elementi arhitektonskog oblikovanja zgrada ujedno su i elementi energetske učinkovitosti. Povezanost arhitektonskog oblikovanja i energetske učinkovitosti najočitije je na primjerima pasivnih kuća. Da bi kuća bila klasificirana kao pasivna, potrebno je da ostvari godišnju specifičnu potrošnju energije za grijanje, $Q''_{H,nd}$, nižu od 15 kWh/(m^{2}a) [8]. Toliko niska potrošnja za grijanje postiže se kombinacijom termotehničkih sustava - ventilacije s povratom topline [9], ali i samim oblikovanjem zgrade. Za pasivne kuće je karakteristična vrlo velika debljina toplinske izolacije vanjskih konstrukcija radi minimiziranja toplinskih gubitaka kroz ovojnicu. Zatim, kompaktan oblik zgrade kojim se postiže optimalan odnos obujma grijanog prostora i površine ovojnice kroz koju se gubi toplina. Sljedeći bitan čimbenik je i veličina i orijentacija otvora odnosno maksimalno iskorištavanje pasivnih solarnih dobitaka zimi. [10] Dok su solarni dobici tijekom zime povoljni, tijekom ljeta potrebno se adekvatno zaštititi od istih. Najučinkovitija zaštita od pregrijavanja su pomične vanjske naprave za zaštitu od sunčeva zračenja [11]. U pasivnim kućama ušteda energije vrlo je ovisna o elementima energetske učinkovitosti koji su ujedno elementi arhitektonskog oblikovanja zgrade: obliku zgrade, debljini toplinske izolacije u zidovima, orijentaciji otvora, vrsti zaštite od sunca.

Pasivne zgrade predstavljaju najučinkovitiji standard u pogledu uštede energije, međutim prema trenutno važećim propisima to je standard koji je za korisnike izboran. U Europskoj uniji trenutno obvezujući energetski standard u zgradama su zgrade gotovo nulte energije (Nearly Zero Energy Buildings – nZEB) [12].

Prema Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, definicija zgrade gotovo nulte energije glasi: *„Zgrada gotovo nulte energije je zgrada koja ima vrlo visoka energetska svojstva. Ta gotovo nulta odnosno vrlo niska količina energije trebala bi se u vrlo značajnoj mjeri pokrivati energijom iz obnovljivih izvora, uključujući energiju iz obnovljivih izvora koja se proizvodi na zgradi ili u njezinoj blizini, a za koju su zahtjevi utvrđeni ovim propisom“* [1]. Pojednostavljeno rečeno, možemo reći da je za nZEB karakteristična niska, gotovo nulta, potrošnja energije iz fosilnih goriva s naglaskom na obnovljivim izvorima energije. U pogledu prihvatljivosti, nZEB trenutno predstavlja troškovno optimalan standard u okviru Europske unije [13]. Za postizanje niske potrošnje energije preporuča se energetski učinkovito oblikovanje kao kod pasivnih kuća, ali naglasak u nZEB-u je prvenstveno na termotehničkim sustavima baziranim na obnovljivim izvorima energije [14]. Uzmemo li u obzir specifičnu dozvoljenu potrošnju energije za grijanje za nZEB u Hrvatskoj možemo vidjeti da se kod obiteljskih i višestambenih zgrada dopuštene vrijednosti specifične energije za grijanje

(Q''$_{H,nd}$) kreću 40,50 do 75,00 kWh/(m^{2}a) za kontinentalnu Hrvatsku i 24,84 do 57,50 kWh/(m^{2}a) za primorsku Hrvatsku, dok dozvoljena specifična energija za hlađenje *(Q''$_{C,nd}$)* iznosi 50 kWh/(m^{2}a) za oba klimatska područja Hrvatske [1]. Ovakvu razinu potrošnje energije za grijanje i hlađenje znatno je lakše ostvariti nego pasivni standard, što znači da oblikovanje zgrade ne mora nužno biti podređeno načelima energetski učinkovitog oblikovanja.

Sljedeći obvezujući standard u Europskoj uniji su zgrade nulte emisije (Zero Emission Buildings – ZEB) koji stupa na snagu od 1. siječnja 2028. za nove zgrade u vlasništvu javnih tijela i od 1. siječnja 2030. za sve nove zgrade. Kao i u slučaju zgrada gotovo nulte energije, za zgrade nulte emisije očekuje se niska potrošnja operativne energije koja će se u potpunosti osiguravati iz obnovljivih izvora ili iz daljinskih energetski učinkovitih sustava grijanja i hlađenja, uz što će biti obavezna i analiza utjelovljene energije kroz izračun potencijala globalnog zagrijavanja u cjeloživotnom vijeku zgrade, a sve iskazano kroz ekvivalentne CO_2 emisije. [15] Udio operativne energije u cjeloživotnom vijeku zgrade može iznositi do 90 % [16], pri čemu energija za grijanje predstavlja 40 % - 50 % operativne energije [6]. Iz navedenog je moguće zaključiti da će energije za grijanje i hlađenje i dalje imati značajan udio u ukupnoj potrošnji energije u zgradama. Termotehnički sustavi koje koristimo u novim obiteljskim kućama pretežito su dizalice topline. Njihove učinkovitosti slične su u funkciji grijanja i hlađenja [17 - 21], a to znači sličnu potrošnju električne energije i slične CO_2 emisije za proizvodnju toplinske ili rashladne energije. Uz porast globalnih temperatura i promjenu odnosa udjela energije za grijanje i hlađenje u godišnjoj bilanci, energija za hlađenje postaje nezaobilazni čimbenik u analizi energetske učinkovitosti [22]. Iako trenutni propisi iz područja energetske učinkovitosti zgrada stambene namjene u Hrvatskoj naglasak stavljaju na grijanje [1], ovim radom jednakovrijedno se promatra i energija za hlađenje.

Prilikom oblikovanja zgrada, energetska učinkovitost samo je jedan od niza čimbenika u projektiranju [23], dok se u ponekim slučajevima energetska učinkovitost uopće ne uzima u obzir [24]. Prostor doživljavamo kroz niz psiholoških i neuroloških podražaja koji utječu na emocionalno blagostanje [25]. Subjektivni osjećaji poput ljepote i ugode u zgradama povezuju se s prostranošću, racionalnom i jasnom organizacijom prostora ili neuobičajenim i intrigantnim formama [26]. Doživljaj prostora koji afektivno ovisi o vizualnim podražajima vezan je za boju, robusnost oblika, prostranost, kontraste, organizaciju, jasnoću, jednostavnost, oblike itd. [27] odnosno vizualna pojavnost zgrade vezana je za arhitektonsko oblikovanje.

Niz istraživanja povezuju osnovne čimbenike arhitektonskog oblikovanja koji su ujedno i čimbenici energetske učinkovitosti. To su faktor oblika [28 - 31], debljina toplinske izolacije u građevnim dijelovima o kojoj ovisi toplinsko-izolacijska učinkovitost ovojnice [28 - 29, 32 - 34], veličina otvora i orijentacija [28, 30, 35 - 39], vrsta naprave za zaštitu od pregrijavanja [40 - 45], i kontakt ovojnice s tlom [46 - 49]. U ovome radu istražen je utjecaj arhitektonskog oblikovanja na energetsku učinkovitost kroz vrednovanje šest osnovnih čimbenika. Analizom projekata racionalne uporabe energije zgrada u kontinentalnoj i primorskoj Hrvatskoj utvrđene su referentne vrijednosti i intervali za svakog od njih, te su se temeljem istih kvantificirali i međusobno usporedili utjecaji svakog čimbenika na potrošnju energije.

S obzirom na globalni porast temperatura te potrebu i za grijanjem i za hlađenjem u oba klimatska područja Hrvatske, čimbenici se vrednuju u odnosu na ukupnu potrošnju energije. Proračun potrošnje energije proveden je u skladu s važećim propisima, ali i u varijanti koja preispituje trenutne postavke proračuna u pogledu klimatskih podataka i navika korisnika. Varijantni scenarij proračuna uključuje novije meteorološke podatke, više projektne temperature grijanja i hlađenja, noćno hlađenje ljeti i primjenu zaštite od blještanja sunca.

Klimatske prilike na lokaciji zgrade jedan su od najutjecajnijih čimbenika na potrošnju energije za grijanje i hlađenje. Europa se zagrijava brže od globalnog prosjeka [50 - 53]. Sve izmjerene godišnje temperature u posljednjih 10 godina u Zagrebu i Splitu veće su od onih korištenih u proračunima energetskih svojstava zgrada. Prema izmjerenim temperaturama i sunčevom zračenju Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) kreiran je 10-godišnji prosjek klime od 2015. do 2024. godine korišten u varijantnom scenariju proračuna, što je vremensko razdoblje kada su projektirane statistički obrađene kuće. Nadalje, izmjerene temperature grijanja u kućama veće su od onih definiranih propisima [54 - 61], kao što su i preporučene više temperature hlađenja [62 - 66], a što ima najznačajniji utjecaj na potrošnju energije. Nadalje, noćno ljetno hlađenje dugo je poznat i korišten koncept s potencijalom uštede značajnim za suvremene energetske standarde [67 - 71], kao i preporuke za primjenu različitih naprava za zaštitu od pregrijavanja i zaštitu od blještanja sunca [72]. Varijantni scenarij proračuna rezultira stvarnijom slikom potrošnje energije i utjecajem pojedinog čimbenika arhitektonskog oblikovanja na energetsku učinkovitost, te jasno prikazuje potencijalne uštede ostvarive kroz različite načine korištenja zgrade.

1.2 Cilj rada

Osnovni cilj rada je kvantifikacija čimbenika arhitektonskog oblikovanja kako bi se računskim putem došlo do sljedećih rezultata:

1. Utvrđivanje referentnih energetskih modela obiteljskih kuća za primorsku i kontinentalnu Hrvatsku nakon 2017. godine.
2. Utvrđivanje referentnih intervala i maksimalnih odstupanja pojedinih čimbenika arhitektonskog oblikovanja od referentnih vrijednosti te njihov utjecaj na energetsku učinkovitost zgrade.
3. Potvrda hipoteze da je nepovoljno odstupanje pojedinih čimbenika moguće nadoknaditi prilagodbom ostalih čimbenika.

Referentni energetski modeli izrađeni su na temelju analiziranih obiteljskih kuća u kontinentalnoj i primorskoj Hrvatskoj, odnosno proračuna u sklopu projekata racionalne uporabe energije i toplinske zaštite zgrade nakon 2017. godine. Na temelju tih projekata određena su maksimalna realna odstupanja pojedinih čimbenika od referentnih vrijednosti, odnosno raspon unutar kojeg se kreću vrijednosti pojedinog čimbenika arhitektonskog oblikovanja.

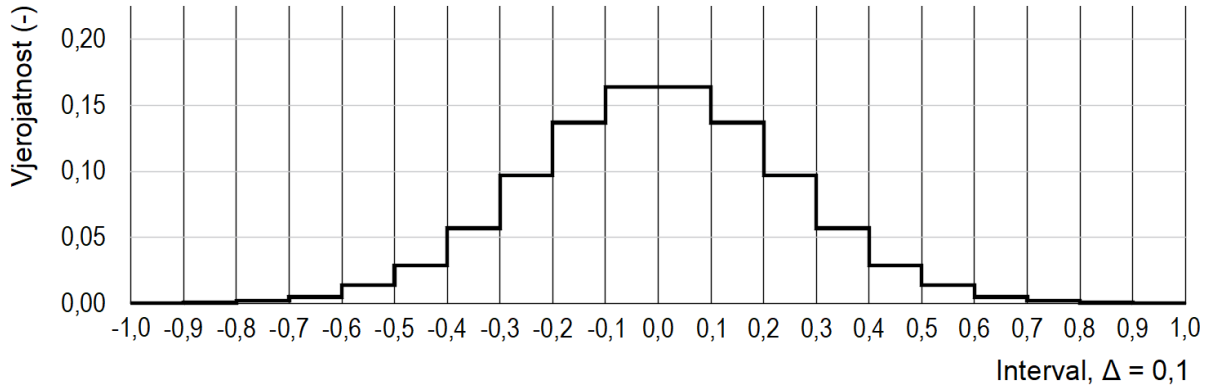
1.3 Hipoteza

1. Vjerojatnost istovremenog odstupanja velikog broja elemenata oblikovanja zgrade od načela energetski učinkovitog oblikovanja je statistički mala, a vjerojatnost odstupanja svih čimbenika je gotovo nepostojeća.
2. Narušenu energetsku učinkovitost zbog nepovoljnog odstupanja pojedinog čimbenika, ili malog broja čimbenika, koji se smatraju nositeljima arhitektonskog oblikovanja, moguće je nadoknaditi poboljšanjem ostalih čimbenika koji nisu nositelji arhitektonskog oblikovanja.

Čimbenici arhitektonskog oblikovanja zgrada koji se preklapaju s čimbenicima energetske učinkovitosti mogu se svesti na nekoliko elemenata: faktor oblika, debljina toplinske izolacije u građevnim dijelovima o kojoj ovisi toplinsko-izolacijska kvaliteta ovojnice, veličina otvora i orijentacija, zaštita od pregrijavanja te odnos zgrade prema tlu, odnosno kontakt ovojnice s tlom. Pri oblikovanju zgrada, energetska učinkovitost predstavlja jedan od niza brojnih faktora. Ukoliko se elementi energetske učinkovitosti ne uzimaju u obzir pri oblikovanju zgrada, ili se

stavljaju u drugi plan, prema zakonu vjerojatnosti dio čimbenika arhitektonskog oblikovanja biti će povoljan za energetsku učinkovitost, dio optimalan, a dio nepovoljan. Nadalje, vjerojatnost da su u jednoj zgradi svi ili velik broj čimbenika nepovoljni, eksponencijalno se smanjuje s brojem očekivanih nepovoljnih čimbenika.

Za potrebe proračuna potrošnje energije, sve čimbenike arhitekture koji utječu na energetsku učinkovitost potrebno je kvantificirati u mjerljivu vrijednost. Statističkom obradom 151 projekta racionalne uporabe kuća u Hrvatskoj određeni su prosjeci promatranih čimbenika i referentni intervali unutar kojih njihove vrijednosti variraju. Najpovoljnije granične vrijednosti intervala predstavljaju energetski najučinkovitiju vrijednost čimbenika i to odstupanje se iskazuje negativnom vrijednosti (-100 %), a najnepovoljnija vrijednost iskazuje se pozitivnom vrijednosti (100 %). Budući da su odstupanja od optimalnih rješenja iskazana matematički, za svaku zgrada moguće je izraziti aritmetičku sredinu (prosjek) promatranih čimbenika koja varira od -1 (-100%) do 1 (100%). Rezultati prema prosjeku čimbenika grupirani su u intervale s korakom $\Delta = 0{,}1$. Slika 1 prikazuje Batesinu distribuciju[1] vjerojatnosti prosjeka 6 nasumičnih varijabli (iznosa -1 do 1) po intervalima koraka $\Delta = 0{,}1$.



Slika 1: Batesina distribucija vjerojatnosti prosjeka 6 nasumičnih varijabli (iznosa od -1 do 1) po intervalima koraka 0,1 [2]

Prema takvoj raspodjeli vjerojatnosti, najočekivaniji prosjek svih čimbenika je u intervalu -0,1 do 0,1, dok je vjerojatnost za prosjek u intervalima -0,9 do -1,0 i 0,9 do 1,0 gotovo nepostojeća. Slika 1 prikazuje teorijsko očekivanje, iskazano prema zakonima statistike i vjerojatnosti s matematički idealnom nasumičnom distribucijom varijabli. Za razliku od takve distribucije,

[1] Batesina distribucija korištena je kao najprikladnija za ovu analizu zbog malog broja varijabli (čimbenika)
[2] Podaci za graf generirani uz pomoć ChatGPT-a (OpenAI), 2025.

vrijednosti varijabli prikupljenih iz stvarnih projekata kuća imaju empirijsku distribuciju koja nije idealno nasumična. Hipoteza 1 bazira se na pretpostavci da se teorijski očekivana i stvarna raspodjela prosjeka varijabli (čimbenika) podudara u krajnjim intervalima.

Značajno odstupanje pojedinog čimbenika od optimalnih vrijednosti može upućivati na željeno oblikovanje. Npr. vrlo visoka vrijednost faktora oblika rezultat je vrlo razvedene forme, jednako kao što velike staklene fasade rezultiraju velikim udjelom ostakljenja u ovojnici, a to znači da geometrijske vrijednosti tih čimbenika značajnije odstupaju od prosjeka. U oblikovanju zgrade, takvi čimbenici su najuočljiviji. Čimbenike energetske učinkovitosti koji značajno odstupaju od optimalnih vrijednosti na taj način može se promatrati kao nositelje arhitektonskog oblikovanja.

U ovom radu fokus je na čimbenicima koji imaju značajno negativno odstupanje u odnosu na optimalne vrijednosti i koji rezultiraju povećanom potrošnjom energije u zgradi. Očekivani broj takvih čimbenika na jednoj zgradi je minimalan i njih se smatra nositeljima arhitektonskog oblikovanja. Hipoteza je da je potrošnju energije moguće zadržati na optimalnoj razini uz manje prilagodbe svih ostalih čimbenika koji se ne smatraju nositeljima arhitektonskog oblikovanja.

1.4 Opis istraživanja

Istraživanje je podijeljeno u tri dijela:

1. Određivanje referentnih energetskih modela i referentnih geometrijskih i fizikalnih vrijednosti čimbenika energetske učinkovitosti.
2. Vrednovanje pojedinog čimbenika arhitektonskog oblikovanja u odnosu na energetsku učinkovitost.
3. Provjera mogućnosti odstupanja pojedinih čimbenika od načela energetski učinkovitog oblikovanja i prilagodbe ostalih čimbenika u svrhu zadržavanja optimalne razine energetske učinkovitosti.

Referentni energetski modeli obiteljskih kuća kreirani su za kontinentalno i primorsko klimatsko područje Hrvatske kao prosjek statističke obrade numeričkih podataka iz projekata racionalne uporabe energije i toplinske zaštite zgrade. Obrađeni su numerički podaci za 82 kuće iz kontinentalnog i 69 iz primorskog područja Hrvatske i tabelarno prikazani u Prilogu 1. Godišnja energija za grijanje i hlađenje kod referentnih modela kuća kontinentalnog i

primorskog područja Hrvatske smatra se optimalnom potrošnjom za daljnju analizu u ovom radu.

Elementi zgrada koji su u fokusu analize čimbenici su arhitektonskog oblikovanja i energetske učinkovitosti kao geometrijske i fizikalne veličine kvantificirane u mjerljive vrijednosti. Prepoznato je i analizirano šest čimbenika:

1. Faktor oblika
2. Debljina toplinske izolacije u zidovima
3. Udio ostakljenih otvora u ovojnici
4. Orijentacija ostakljenih otvora
5. Zaštita od pregrijavanja
6. Kontakt zgrade s tlom

Za svaki od navedenih čimbenika ustanovljene su najpovoljnije i najnepovoljnije geometrijske vrijednosti analizom projekata racionalne uporabe energije za ukupno 151 obiteljsku kuća u oba klimatska područja Hrvatske. Na taj način dobiveni su realni referentni intervali unutar kojih pojedini čimbenik može varirati. Za ostale čimbenike energetske učinkovitosti, koji nisu elementi arhitektonskog oblikovanja, a koji su potrebni za proračun potrošnje energije, definiran je parametarski način izračuna geometrijsko-fizikalnih vrijednosti koji kao ulazne varijable koristi geometrijske vrijednosti analiziranih čimbenika arhitektonskog oblikovanja.

Energetska učinkovitost zgrade u ovom istraživanju odnosi se na energiju za kondicioniranje prostora i jednako vrednuje potrebnu energiju za grijanje i hlađenje. Izrađena je analiza odnosa proizvodnje toplinske i rashladne energije u pogledu isporučene energije i CO_2 emisija na temelju učinkovitosti termotehničkih sustava u grijanju i hlađenju. Ova analiza poslužila je kako bi se dokazala jednakovrijednost grijanja i hlađenja iz ekološkog aspekta, odnosno CO_2 emisija koje predstavljaju osnovu nadolazećeg standarda.

Proračuni potrošnje energije provedeni su na dva načina. Prvi scenarij, osnovni, u potpunosti je u skladu sa važećom regulativom i predstavlja način proračuna korišten u projektima racionalne uporabe energije i toplinske zaštite zgrade. Drugi scenarij, varijantni, uzima u obzir promjene klime u posljednjih deset godina i pojedine navike korisnika koje utječu na potrošnju energije. Razlike između osnovnog i varijantnog scenarija proračuna su:

1. Korištenje 10-godišnjeg prosjeka klime umjesto 30-godišnjeg prosjeka

2. Više projektne temperature grijanja i hlađenja
3. Korištenje ljetnog noćnog provjetravanja
4. Primjena dodatne naprave za zaštitu od blještanja sunca

Varijantni scenarij proračuna rezultira realnijom slikom potrošnje, a time i realnijim utjecajem pojedinog čimbenika u energetskoj učinkovitosti.

Modifikacijom pojedinog čimbenika unutar referentnog intervala vrednovan je utjecaj svakog od čimbenika na ukupnu potrošnju energije za grijanje i hlađenje u osnovnom i varijantnom scenariju proračuna.

U posljednjem dijelu istraživanja analizirao se potencijal korekcije narušene energetske učinkovitosti uslijed odstupanja pojedinih čimbenika. Analiza je izvršena na način da se za jedan ili dva čimbenika odaberu najnepovoljnije vrijednosti, dok je cilj ostalim čimbenicima kompenzirati povećanje potrošnje kako bi se zadržala referentna razina energetske učinkovitosti ukoliko je moguće.

1.5 Istraživačke metode

Ovim istraživanjem povezuje se arhitektonsko oblikovanje i energetska učinkovitost. Budući da je za proračune energetske učinkovitosti potrebno kvantificirati elemente arhitekture kako bi ih međusobno usporedili, korišten je niz metoda karakterističnih za pojedini dio istraživanja.

Prvi korak bila je analitička raščlamba elemenata arhitekture na čimbenike oblikovanja i čimbenike energetske učinkovitosti. Identifikacija čimbenika arhitektonskog oblikovanja koji su ujedno i čimbenici energetske učinkovitosti provedena je komparativnim metodama kojima je utvrđeno preklapanje skupa čimbenika oblikovanja i skupa čimbenika energetske učinkovitosti. Čimbenici oblikovanja izdvojeni su deduktivnom metodom zaključivanja koji element utječe na potrošnju energije, a potvrđeni su induktivnom metodom iz postojećih istraživanja.

U sljedećem koraku su metodama kvantifikacije čimbenici oblikovanja pretvoreni u mjerljive veličine. Statističkom obradom velikog broja obiteljskih kuća, te induktivnim i komparativnim metodama određene su referentne vrijednosti i referentni intervali promatranih čimbenika arhitektonskog oblikovanja. Za svaku analiziranu kuću tada je bilo moguće odrediti prosjek odstupanja čimbenika arhitektonskog oblikovanja u odnosu na referentni model. Usporedbom

distribucije promatranih prosjeka (empirijskih rezultata) u odnosu na teorijsku (matematičku) raspodjelu potvrđena je hipoteza 1.

Vrednovanje čimbenika arhitektonskog oblikovanja provedeno je na način da njihove veličine u referentnom modelu variraju unutar referentnih intervala i na taj način mjerljivo utječu na energetsku učinkovitost. Promjenom veličine pojedinog čimbenika oblikovanja, unutar referentnog modela, može doći do promjene ostalih čimbenika koji nisu predmet ovog rada, ali su potrebni za proračun. Analitičkom metodom je sustav (referentni model) razložen na niz varijabli. Matematičko modeliranje je u ovom koraku ključna metoda za parametarski model odnosa ulaznih varijabli (čimbenika oblikovanja i energetske učinkovitosti) i izlaznih varijabli (ostalih čimbenika energetske učinkovitosti), a njihov odnos izražen je matematičkim formulama. Formule koje definiraju njihov odnos izvedene su deduktivnim metodama polazeći od prostornih zakonitosti izvedivosti koja ujedno predstavljaju i ograničenja modela. Ovim korakom dobiveni su referentni energetski modeli obiteljske kuće u kontinentalnom i primorskom području.

Sljedeće je analiziran utjecaj klimatskih promjena na temperature i globalno zračenje u posljednjih deset godina u Zagrebu i Splitu kao referentnim gradovima za kontinentalnu i primorsku klimu. Satni meteorološki podaci koji predstavljaju 30-godišnji prosjek klime prevedeni su u prosječne dnevne temperature po mjesecima i ukupno globalno zračenje po mjesecima. Statističkom obradom mjesečnih dnevnih temperatura i globalnog zračenja izmjereni u posljednjih deset godina u Zagrebu i Splitu određen je njihov prosjek i uspoređen s 30-godišnjim prosjecima. Nakon što su kvantificirane promjene mjesečnih vrijednosti promatranih razdoblja, generirali su se stvarni satni podaci za 10-godišnju klimu na temelju razlika između prosjeka mjesečnih dnevnih temperatura i globalnog zračenja. Ovakva aproksimacija klimatskog sustava rezultira reprezentativnim klimatskim uvjetima potrebnim za simulaciju potrošnje energije u varijantnom scenariju proračuna.

U postavke varijantnog scenarija proračuna također su uključene i navike korisnika koje imaju utjecaj na potrošnju energije, a čija primjena u proračunu nije predviđena propisima: više projektne temperature grijanja i hlađenja, pasivno hlađenje noćnim provjetravanjem ljeti i primjena posebne naprave za zaštitu od bliještanja sunca. Promjena navedenih parametara proračuna argumentirana je pregledom literature i usporedbom stvarnih i preporučenih načina korištenja od strane korisnika u odnosu na one definirane propisima.

Prije proračuna potrošnje energije referentnih modela, provedeno je uzajamno vrednovanje grijanja i hlađenja uz analize učinkovitosti termotehničkih sustava i kvantificirane CO_2 emisije čija je usporedba pokazala njihovu jednakovrijednost u energetskoj učinkovitosti iz ekološkog aspekta.

Izrađeni su proračuni potrošnje energije referentnih energetskih modela za kontinentalno i primorsko područje, te za osnovni i varijantni scenarij. Rezultati su verificirani i validirani usporedbom s rezultatima iz literature i zahtjevima Tehničkog propisa.

Referentni energetski model osmišljen je kao parametarski model ovisan o ulaznim varijablama (vrijednostima čimbenika arhitektonskog oblikovanja), čija promjena rezultira prilagodbom ostalih čimbenika energetskog modela koji nisu predmet ovog istraživanja, a potrebni su za proračun. Vrednovanje čimbenika arhitektonskog oblikovanja u odnosu na energetsku učinkovitost provedeno je kao parametarska analiza u kojoj su se sustavno mijenjale vrijednosti pojedinog čimbenika unutar njegova referentnog intervala nakon čega su se usporedili izlazni rezultati proračuna. Čimbenici su se međusobno vrednovali prema utjecaju na ukupnu potrošnju energije zasebno za oba klimatska područja i za oba scenarija proračuna.

Posljednja analiza uključivala je niz scenarija u kojima je vrijednost jednog ili dva čimbenika oblikovanja postavljena na najnepovoljniju vrijednost unutar referentnog intervala, dok se ostalim čimbenicima oblikovanja kompenziralo povećanje potrošnje uz zadržanu referentnu razinu energetske učinkovitosti ukoliko je bilo moguće. U ovoj analizi variraju sve ulazne varijable parametarskog modela (vrijednosti čimbenika arhitektonskog oblikovanja), a njihove varijacije ograničene su prostornim zakonitostima izvedivosti (npr. udjeli raznih elemenata ovojnice ne mogu biti veći od 1). Ova analiza poslužila je kako bi se djelomično potvrdila hipoteza 2.

1.6 Očekivani znanstveni doprinos

1. Dopuna postojećih kriterija energetski učinkovitog oblikovanja u smislu numeričkog vrednovanja pojedinog čimbenika koja jednakovrijedno promatra i grijanje i hlađenje.
2. Uspostava modela odstupanja od načela energetski učinkovitog oblikovanja bez narušavanja energetske učinkovitosti zgrade.

Pridržavanje načela energetski učinkovitog oblikovanja je preporučljivo, ali nije neophodno za trenutno obvezujući energetski standard zgrada gotovo nulte energije ili budući standard zgrada

nulte emisije. Detaljna usporedba elemenata oblikovanja u energetskoj učinkovitosti i njihov utjecaj na potrošnju energije u zgradama predstavlja mogućnost unaprjeđenja procesa oblikovanja zgrada. Mogućnosti odstupanja od načela energetske učinkovitog oblikovanja doprinose većoj slobodi arhitektonskog oblikovanja uz istovremeno zadržavanje optimalnih razina energetske učinkovitosti.

2 PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Brojna istraživanja bave se čimbenicima arhitektonskog oblikovanja i energetske učinkovitosti putem koje se analiziralo kako pojedini čimbenici utječu na potrošnju energije. Gotovo sva istraživanja prepoznaju velik broj čimbenika, ali proučavaju utjecaj samo pojedinog broja čimbenika, npr. samo orijentacija otvora i faktora oblika ili kvaliteta ovojnice, na način da se međusobno uspoređuje utjecaj različitih ulaznih vrijednosti pojedinog faktora ili određuju optimalne vrijednosti. Rezultati tih analiza su očekivani i dobro poznati, ali variraju u rezultatima ovisno o podneblju i namjeni zgrade. Čimbenici oblikovanja koji se više pridržavaju načela energetski učinkovitog oblikovanja uvijek će rezultirati nižom potrošnjom dok će odstupanje od tih načela rezultirati višom potrošnjom energije. Kroz dosadašnja istraživanja prepoznato je koji su čimbenici ujedno i element energetske učinkovitosti i arhitektonskog oblikovanja ili vizualnog identiteta zgrade. Većina znanstvenika u svojim istraživanjima navodi iste elemente: faktor oblika, kvalitetu ovojnice (koja je proporcionalno vezana za debljinu toplinske izolacije), veličinu otvora, orijentaciju, zaštitu od pregrijavanja te odnos zgrade prema tlu. Premda sva istraživanja prepoznaju veći broj čimbenika energetske učinkovitosti naglasak je najčešće na jednom ili nekoliko čimbenika.

Među ostalim relevantnim čimbenicima je i kolorit vanjskih ploha ovojnice i oblikovanje zgrade kroz korištenje prirodnog zelenila za kontrolu mikroklimatskih uvjeta u interijeru. Solarni dobici kroz neprozirne elemente ovojnice ovise o koloritu površine, ali i toplinskoj izolativnosti građevnog dijela. [73] Istraživanja odnosa boje i energetske učinkovitosti prvenstveno su vezana za tople klime sa zgradama bez toplinske izolacije u ovojnici. Suprotno tome, ovojnice zgrada u primorskoj i kontinentalnoj klimi Hrvatske, s obzirom na zahtjeve važećih propisa, moraju sadržavati toplinsku izolaciju [1]. Zelenilo u funkciji zaštite od pregrijavanja predstavlja nesiguran čimbenik kao i činjenica da zaštita od sunca stablima zahtijeva mnogo vremena budući da je potrebno 10 do 15 godina za rast od mladice do zrelosti. [74] Iz navedenih razloga, kolorit ovojnice i zelenilo u funkciji zaštite od pregrijavanja nisu predmet ovog istraživanja.

2.1 Elementi arhitektonskog oblikovanja

Le Corbusier (1923.) vjeruje da temelj arhitektonskog izražavanja leži u osnovnim geometrijskom oblicima kao što su kocka, kugla, cilindar i stožac. Njih smatra univerzalnim i prepoznatljivim oblicima koji vode do racionalne i čiste arhitekture. Uvođenjem skeletnog

konstruktivnog sustava oslobađa se fasada što omogućava formiranje traka prozora i stvaranje prozračnih modernističkih prostora. [75] Jedan od ključnih koncepata modernizma u arhitekturi bila je primjena stupova. Takav pristup omogućio je stvaranje slobodnog tlocrta oslobođenog masivnih nosivih zidova, funkcionalnu fleksibilnost, ali i promjenu u vizualnom izričaju zgrade kroz veće površine ostakljenja na fasadi. Le Corbusiereov „Pilotis“ bio je osnova za razvoj modernističkog izričaja temeljenog na stupovima i primijenjenog u projektu Villa Savoye. [76] Primjenom stupova u konstrukciji zgrade mijenja se odnos punih i praznih ploha u ovojnici, kao i omjer ploštine ovojnice u kontaktu s tlom.

Frampton (1992., 2001.) prepoznaje nekoliko ključnih elemenata koji definiraju vizualni identitet zgrada. Oblik i odnos volumena za njega su ključni element u slici zgrade. U *Kritičkoj povijesti moderne arhitekture*, istražuje kako su arhitekti moderne koristili čiste oblike u svom izričaju [77]. Frampton identificira materijal i teksturu plohe kao taktilnu i vizualnu kvalitetu zgrade. Naglašava da bi ovojnica zgrade svojim materijalima trebala dosljedno pratiti konstrukciju i način izgradnje. Struktura nosivih elemenata poput stupova, greda i njihovih spojeva je također element koji doprinosi vizualnom identitetu zgrade. Raspored otvora i njihova podjela definiraju ritam i artikuliraju fasadu svojom interakcijom sa svjetlom. Ostali elementi oblikovanja zgrada koje Frampton definira, poput kontekstualnog pristupa, svjetla i sjene ne preklapaju se s elementima energetske učinkovitosti. [78]

Ito (1999.) proučava i preispituje oblikovanje zgrade kroz ovojnicu za koju smatra da ne bi trebala predstavljati strogu granicu između unutarnjeg i vanjskog prostora. Takav odnos postiže korištenjem translucentnih materijala koji omogućuju vizualnu povezanost interijera i okoliša. Također smatra da u svom vizualnom identitetu zgrade trebaju odražavati dinamiku suvremenog društva kroz fluidnu i dinamičnu ovojnicu koja se stalno mijenja i prilagođava. [79]

Kuma (2008.) se zalaže za pristup u arhitekturi koji teži povezivanju arhitekture s okolišem reduciranjem ovojnice između zgrade i okoliša. Umjesto monolitnih i statičnih oblika predlaže oblikovanje koje se stapa u kontekst bez jasne granice. Prozirni elementi ovojnice doprinose dojmu stapanja s okolišem i kako bi se izgubile jasne granice oblika zgrade. [80]

Ando (2012.) kao vizualni identitet zgrada ističe jednostavnost i čistoću oblika (volumena) pri čemu su linije i geometrijski oblici primat oblikovanja. Otvori igraju značajnu ulogu u

oblikovanju ujedno kao ovojnica zgrade i kao simbolični elementi prijelaza iz „skloništa“ u vanjski svijet odnosno kao „okvira za pejzaž“. [81]

Ban (2014.) u svojoj knjizi „Shigeru Ban: Paper in Architecture“ razmatra važnost vizualnog identiteta zgrada kroz arhitektonske forme, materijale i strukture koje odražavaju kulturne, socijalne i ekološke vrijednosti. Vizualni elementi poput oblika, boje i prirodnih materijala ključni su u povezivanju zgrade i korisnika s okolišem. U svojim zgradama Shigeru Ban posvećuje posebnu pozornost ovojnici u odnosu na propuštanje prirodnog svjetla. Nju projektira kao laganu i translucentnu granicu, nerijetko korištenjem inovativnih materijala poput papira. [82]

2.2 Čimbenici arhitektonskog oblikovanja i energetske učinkovitosti

U nastavku je dan pregled dosadašnjih istraživanja prema čimbenicima koji su predmet ove analize. Prikazani su primjeri kuća i povezanost elemenata arhitektonskog oblikovanja i energetske učinkovitosti. U svakom od primjera ističe se pojedini nositelj arhitektonskog oblikovanja, a kvaliteta projekata odražava se u njihovom odstupanju od ustaljenih vrijednosti. Međutim, njihovim odstupanjem i naglašavanjem, u određenoj mjeri narušava se energetska učinkovitost zgrade. Ovaj rad usredotočen je na čimbenike oblikovanja koji nepovoljno odstupaju od prosječnih vrijednosti u smislu energetske učinkovitosti.

2.2.1 Faktor oblika

Prema Tehničkom propisu definicija faktora oblika je: *„Faktor oblika zgrade, $f_0 = A/V_e$* (m^{-1})*, je količnik oplošja, A (m^2), i obujma, Ve (m^3), grijanog dijela zgrade“* [1], odnosno faktor oblika pokazuje odnos grijanog prostora i ovojnice izložene vanjskom ili negrijanom prostoru.

Granadeiro et al. (2011.) pristupaju optimizaciji energetske učinkovitosti kroz parametarsko programiranje oblika zgrade uz simulaciju energetske učinkovitosti. Njihov cilj je razvoj alata koji će arhitektima pomoći pri projektiranju zgrada s naglaskom na energetskoj učinkovitosti uz zadržavanje kreativne slobode. Kroz ono što autori nazivaju „gramatikom oblika“ (*shape grammar*) stvaraju se različiti oblici zgrada dodavanjem osnovnih tlocrtnih oblika (kvadar, pravokutnik). Generiranjem oblika zgrade, istovremeno se provode analize energetske učinkovitosti, koje osim faktora oblika uključuju izolaciju ovojnice, orijentaciju i solarne dobitke. U svojim istraživanju pokazali su da računalna optimizacija oblika može rezultirati 15 % do 30 % boljom energetskom učinkovitošću. [31]

Pacheco et al. (2012.) analiziraju pristup energetski učinkovitoj gradnji kroz kombinaciju pasivnih i aktivnih rješenja u uštedi energije te pristup projektiranju zgrada koje uzima u obzir energetsku učinkovitost u najranijim fazama projekta. Uz niz aktivnih rješenja, poput mehaničke ventilacije, solarnih panela i obnovljivih izvora energije, naglašavaju važnost pasivnih rješenja poput orijentacija i toplinske izolacije, dok faktor oblika ističu kao jedan od ključnih elemenata za postizanje energetske učinkovitosti. [28]

Fallahtafti et al. (2015.) u svojim analizama dolaze do jednakih zaključaka. Oni se u svojem istraživanju usredotočuju na oblik i orijentaciju u odnosu na energetsku učinkovitost te daju smjernice za optimizaciju tih čimbenika. Zaključuju da oblik zgrade ima značajan utjecaj na potrošnju energije jer određuje ploštinu ovojnice izloženu vanjskim klimatskim uvjetima, kako u hladnim klimama tako i u toplim klimama. Optimizacija oblika i orijentacije, prema njihovim analizama može rezultirati 20 % - 40 % nižom potrošnjom energije u zgradama ukoliko se primjene u najranijim fazama projektiranja. [30]

Veršić et al. (2019.) analiziraju koliko faktor oblika utječe na specifičnu energiju za grijanje $Q''_{H,nd}$ (kWh/(m^{2}a)) kod zgrada različitog mjerila. Varijacija u faktoru oblika od 0,54 do 0,97 m^{-1} rezultira 72 % većom potrošnjom energije za grijanje. Ova analiza uključuje samo utjecaj faktora oblika na potrošnju energije za grijanje, no ne i za hlađenje. [72]

Gassar et al. (2021.) istražuju utjecaj optimizacije u ranim fazama projektiranja zgrada. Zaključuju da najveći potencijal energetski učinkovitog projektiranja leži u ranom planiranju kada se mogu donositi odluke o geometriji zgrade, orijentaciji i odabiru materijala. Naglašavaju ulogu alata za simulaciju i optimizaciju kao i prilagodbu oblikovanja za postizanje različitih ciljeva, ali istovremeno navode i ograničenja u provedbi zbog složenosti alata i potrebe za suradnjom multidisciplinarnih timova od samog početka projektiranja. [83]

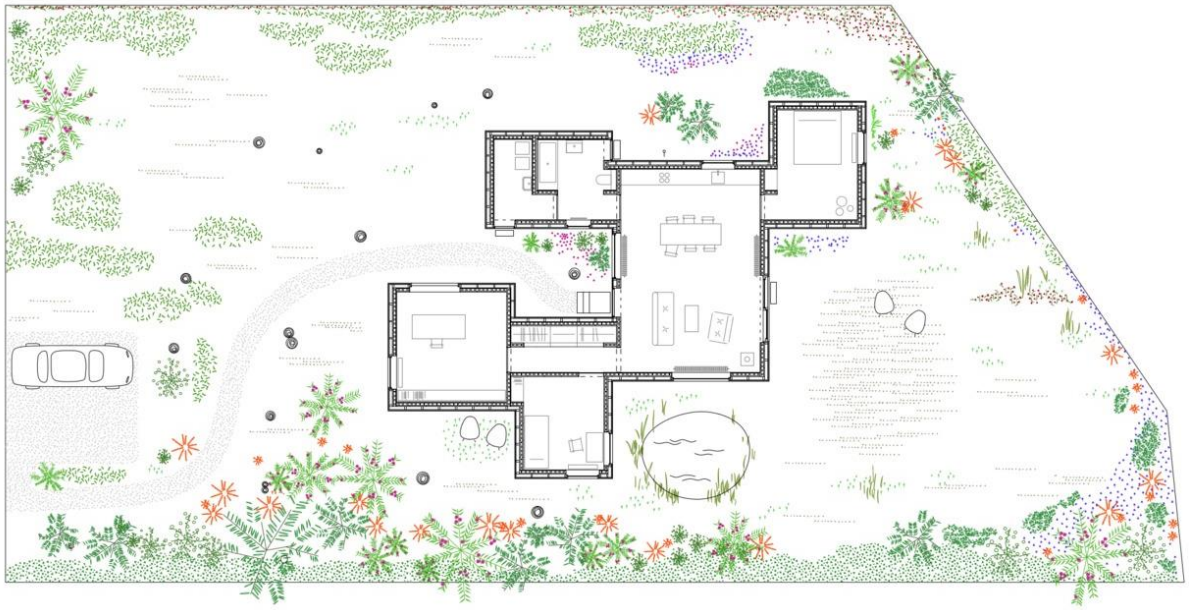
Abbas et al. (2022.) proučavaju kako različiti oblici zgrada utječu na energetsku učinkovitost pri čemu koriste računalne alate *Green Building Studio* i *Insight*. Analiziraju utjecaj kvalitete ovojnice, orijentacije zgrade, udio otvora u ovojnici i njihov položaj u zidu, dok u obliku zgrade uzimaju u obzir i simetriju oblika zgrade. Zaključuju da zgrade simetričnog oblika imaju manje razlike pri različitim orijentacijama pri čemu je evidentno da pod simetrijom podrazumijevaju oblik zgrade, ali i raspored otvora u ovojnici. [84]

Slika 2 i Slika 3 prikazuju primjer oblikovanja zgrade na temelju koncepta razvedenog tlocrta, odnosno velikog faktora oblika. Razvedenost je element arhitektonskog oblikovanja koji dominira ovom kućom. Vrijednost faktora oblika kod ovog primjera veća je od optimalnih ili prosječnih vrijednosti. Oblikovne karakteristike očituju se u vizualnom dojmu zgrade, ali i kroz tlocrt na kojem je vidljiva razvedenost oblika.



Slika 2: Kuća Köris, Zeller & Moye Architects, Berlin [3]

[3] Ljubazno dopuštenje autora: Zeller & Moye Architects, Berlin. Korišteno uz izričito dopuštenje za potrebe ovoga doktorskog rada



Slika 3: Kuća Köris, Zeller & Moye Architects, Berlin, tlocrt prizemlja [3]

2.2.2 Debljina toplinske izolacije i toplinska izolativnost ovojnice

Toplinsko-izolacijska kvaliteta građevnih dijelova koji odvajaju grijani dio zgrade od vanjskog ili negrijanog prostora iskazuje se koeficijentom prolaska topline, U (W/(m^{2}K)) koji je pokazatelj koliko topline prolazi kroz građevni dio ploštine 1 m^2 pri razlici temperatura od 1 °C (ili 1 K). On ovisi o vrsti toplinske izolacije i o njezinoj debljini. [85]

Pacheco et al. (2012.) analiziraju i važnost čimbenika toplinske izolacije u energetskoj učinkovitosti uz faktor oblika. Naglašavaju važnost debljine toplinske izolacije prikladno klimatskom području u kojem se zgrada nalazi, kao i činjenicu da pretanke izolacije dugoročno nisu financijski opravdane, a pretjerane debljine ne doprinose značajno energetskoj učinkovitosti. [28]

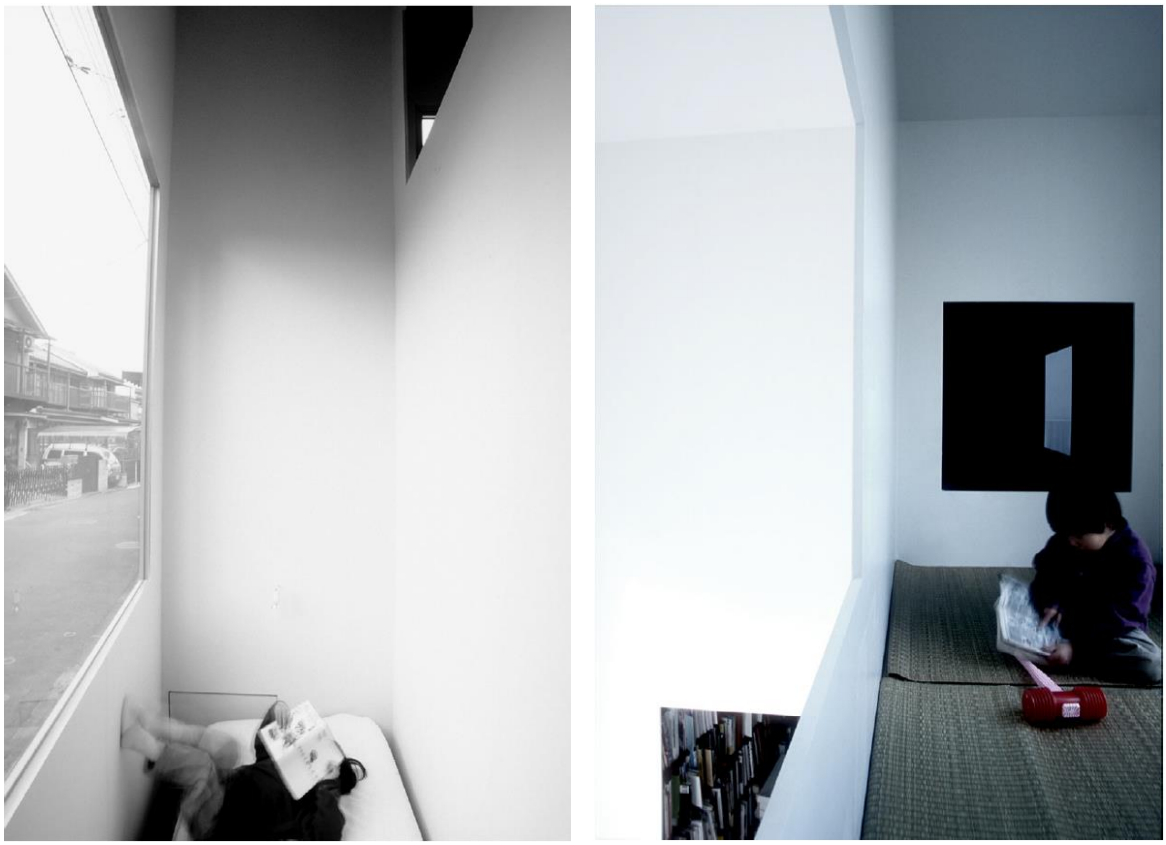
Omrany et al. (2015.) također ističu važnost toplinske izolacije kao temeljnu pasivnu mjeru za energetsku učinkovitost i zimi i ljeti. Za toplinsku izolaciju preporučaju se uobičajeni materijali poput mineralnih vuna, polistirena i poliuretana, a njihova debljina nije univerzalna već se optimizira za svako klimatsko područje. Osim debljine i vrste toplinske izolacije razmatraju i važnost izolacije u raznim građevnim dijelovima za zgrade u toplim ili hladnim klimama. Za tople klime preporučljiva je bolja izolacija u krovovima i zidovima (elementi izloženi sunčevom zračenju), dok je u hladnim klimama podjednako važna cijela ovojnica. [29]

Veršić et al. (2019.) obrađuju optimalne debljine toplinske izolacije za zgrade gotovo nulte energije. Izolacija ovojnice pri debljinama većim od 20 - 25 cm prestaje imati značajan utjecaj na uštedu energije za grijanje. Prikazuju primjer kod kojeg specifična energija za grijanje pri debljini izolacije od 10 cm iznosi 52 kWh/(m^2a), a pri debljini izolacije 20 cm iznosi 32 kWh/(m^2a), što predstavlja uštedu od 39 %. Kod većih debljina izolacije dolazi do eksponencijalnog zasićenja, odnosno povećanje uštede više nije proporcionalno. Tako za debljine toplinske izolacije od 15 cm do 30 cm dolazi do uštede od 31 %, a od 20 cm do 40 cm uštede od 22 %. Ova analiza nije obradila utjecaj debljine toplinske izolacije na energiju za hlađenje. [72]

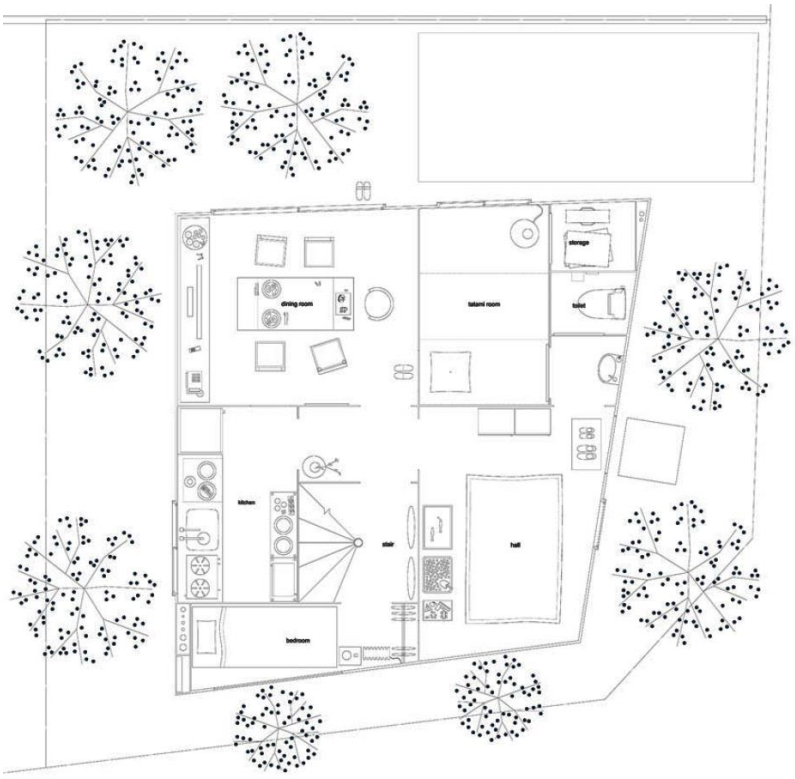
Bostancioglu (2020.) analizira utjecaj toplinske izolacije na zgrade različitog faktora oblika u Turskoj. Dolazi do rezultata pri kojem je optimalna debljina izolacije do 6 cm i zaključka da povećanje debljine izolacije neće značajno utjecati na potrošnju energije nakon optimalnih debljina. [86]

Ozbek et al. (2022.) također istražuju optimalne debljine toplinske izolacije u odnosu na klimatske uvjete u Turskoj. Dolaze do istih zaključaka – da će optimizirana debljina toplinske izolacije dugoročno dati najbolje rezultate, kao i da će pretjerane debljine imati zanemariv doprinos ukupnoj energetskoj učinkovitosti. U ovom slučaju analiziran je financijski aspekt, a optimalne debljine toplinske izolacije kreći se od 6 do 8 cm. [87]

Slika 4 i Slika 5 prikazuju primjer oblikovnog koncepta zgrade temeljenog na maksimalnom iskorištavanju tlocrtne površine kroz minimiziranje debljine unutarnjih zidova i zidova ovojnice. Navedeni oblikovni koncept odražava se i kroz nacrte zgrade (tlocrte) na kojima je vidljivo umanjenje debljine zidova.



Slika 4: House in a Plum Grove, Kazuyo Sejima, Tokio [88]



Slika 5: House in a Plum Grove, tlocrt prizemlja [88]

2.2.3 Udio prozirnih otvora u ovojnici

Solarno zračenje na površini atmosfere dostiže vrijednosti preko 1350 W/m^2 mjereno okomito na upad zračenja, četvrtina tog zračenja atmosferi se apsorbira i reflektira, stoga zračenje koje dolazi do površine Zemlje prosječno iznosi do 1000 W/m^2 [89], uz zabilježene minutne vrijednosti do 1183 W/m^2 [90]. Solarno zračenje koje dopire do ovojnice zgrade ostvaruje solarne dobitke u zgradi na dva načina, preko neprozirnih ploha i kroz ostakljene elemente [73]. Udio solarnog zračenja koje prolazi kroz ostakljene elemente, mjereno okomito na upad zračenja, ovisi o vrsti ostakljenja i izražava se $g_{\perp}$ (-) faktorom ili solarnim faktorom *SF* (%). Prema važećem Tehničkom propisu u Hrvatskoj, dozvoljeni koeficijent prolaska topline stakla iznosi $U_{stakla} \leq 1{,}10$ W/(m^{2}K) za kontinentalno područje i $U_{stakla} \leq 1{,}40$ W/(m^{2}K) za primorje. Toliko niske koeficijente prolaska topline moguće je postići samo kombinacijom inertnih plinova unutar IZO stakla i nanosom nisko-emitivnih slojeva na ostakljenje zbog kojih solarni faktor iznosi 60 % ili niže [1]. S obzirom na značajnu količinu solarnih dobitaka koje je moguće ostvariti kroz prozirne plohe, orijentacija i veličina otvora imaju važnu ulogu u postizanju energetske učinkovitosti u zgradama. Udio otvora u ovojnici često se analizira uz orijentaciju otvora.

Capozzoli et al. (2009.) analiziraju kako arhitektonsko oblikovanje utječe na energetsku učinkovitost zgrada, s posebnim naglaskom na solarne dobitke. Njihovi zaključci su da orijentacija zgrade i omjer staklenih površina u ovojnici značajno utječu na solarne dobitke i smanjuju potrebu za grijanjem, ali da je potrebno uzeti u obzir i mjere zaštite od pregrijavanja. Također zaključuju da mjere oblikovanja koje su učinkovite u jednom klimatskom području možda neće biti optimalne u drugom. [37]

Morrissey et al. (2011.) istražuju utjecaj veličine otvora i orijentacije stambenih zgrada na pasivne solarne dobitke u umjerenoj klimi s ciljem primjene pasivnog solarnog dizajna u oblikovanju zgrada. U pogledu veličine otvora u ovojnici kao optimalan omjer navode 0,3 - 0,4 za umjerene klime i zaključuju da povećanje preko tog omjera može rezultirati prekomjernim pregrijavanjem ljeti. [36]

Yaşa et al. (2014.) proučavaju na koji način različiti oblici zgrada s atrijima utječu na solarne dobitke i energetsku učinkovitost u različitim klimatskim područjima. Analizirali su utjecaj sunčevog zračenja na površine zgrada i dnevno kretanje sunca na toplinske performanse zgrada. Prema njihovim rezultatima, za vruće i suhe klime najbolji su otvori manjih dimenzija koji

smanjuju solarne dobitke, za vlažne klime oblici atrija koji omogućavaju provjetravanje, a za hladne klime oblici koji zadržavaju toplinu u atriju. [35]

Fallahtafti et al. (2015.) osim oblika zgrade istražuju i utjecaj solarnih dobitaka na energetsku učinkovitost. Njihov cilj je optimizacija oblika zgrade u umjerenoj kontinentalnoj klimi Irana kroz kontrolu faktora oblika, ali i udjela staklenih elemenata u ovojnici. Kroz varijaciju udjela ostakljenja u ovojnici, od 25 % do 75 %, njihovi rezultati pokazuju najmanju potrošnju energije za grijanje u slučaju zgrade s najvećim udjelom ostakljenja, međutim, njihova analiza ne obrađuje potrebnu energiju za hlađenje. [30]

Gercek i Güçü (2019.) također analiziraju na koji način veličina prozora utječe na energetsku učinkovitost zgrada u različitim klimatskim područjima te dobivaju rezultate koji pokazuju najmanju potrošnju za manje udjele ostakljenja u ovojnici. [38]

Chandrasekaran et al. (2022.) uz utjecaj vanjskih naprava istražuju i udio ostakljenih ploha u ovojnici. Njihovi rezultati pokazuju da smanjenje ostakljenja za 45 % rezultira do 23 % manjom potrošnjom energije za hlađenje. [45]

Slika 6 i Slika 7 primjer je oblikovnog koncepta s ostakljenom ovojnicom. Dematerijalizirana ovojnica bez neprozirnih građevnih dijelova ima nepovoljnije karakteristike u pogledu akumulacije topline i toplinskih gubitaka zimi, dok su povećani solarni dobici povoljni u sezoni grijanja, ali i nepovoljni u sezoni hlađenja. Udio ostakljenja u ovojnici za ovaj primjer značajno je veće od prosječnih vrijednosti.



Slika 6: Kuća Rieteiland, Hans van Heeswijk Arhitekti, Amsterdam [4]



Slika 7: Kuća Rieteiland, Hans van Heeswijk Arhitekti, Amsterdam, tlocrt kata [4]

[4] Ljubazno dopuštenje autora: Hans van Heeswijk Arhitekti, Amsterdam. Korišteno uz izričito dopuštenje za potrebe ovoga doktorskog rada.

2.2.4 Orijentacija

Morrissey et al. (2011.) analiziraju 81 primjer zgrade i zaključuju da su optimalne orijentacije prema ekvatoru za zgrade na obje polutke Zemlje. Utvrđuju da su zgrade boljih energetskih karakteristika manje osjetljive na nepovoljnu orijentaciju, odnosno da se manjak solarnih dobitaka i potencijalno veća potreba za grijanjem mogu umanjiti drugim čimbenicima poput toplinske izolacije. Njihovi rezultati pokazuju razlike do 20 % u potrošnji energije za s obzirom na nepovoljnu i povoljnu orijentaciju (prema ekvatoru). [36]

Pacheco et al. (2012.) u svojim se analizama osvrću i na solarne dobitke te zaključuju da optimalna orijentacija može osigurati solarne dobitke i smanjiti potrebu za grijanjem. [28]

Veršić et al. (2018.) naglašavaju važnost solarnih dobitaka za energetsku učinkovitost gotovo nula-energetskih zgrada (nZEB) u različitim klimatskim područjima Hrvatske. U kontinentalnom području solarni dobici su značajan izvor pasivnog solarnog grijanja tijekom zimskih mjeseci s pozitivnim učinkom na potrebnu energiju za grijanjem, dok u mediteranskom području, solarni dobici tijekom ljetnih mjeseci mogu uzrokovati pregrijavanje s negativnim učinkom na potrebnu energiju za hlađenje. Južna orijentacija zgrade maksimizira solarne dobitke zimi, ali tijekom ljeta potrebno je osigurati zaštitu od pregrijavanja. [39]

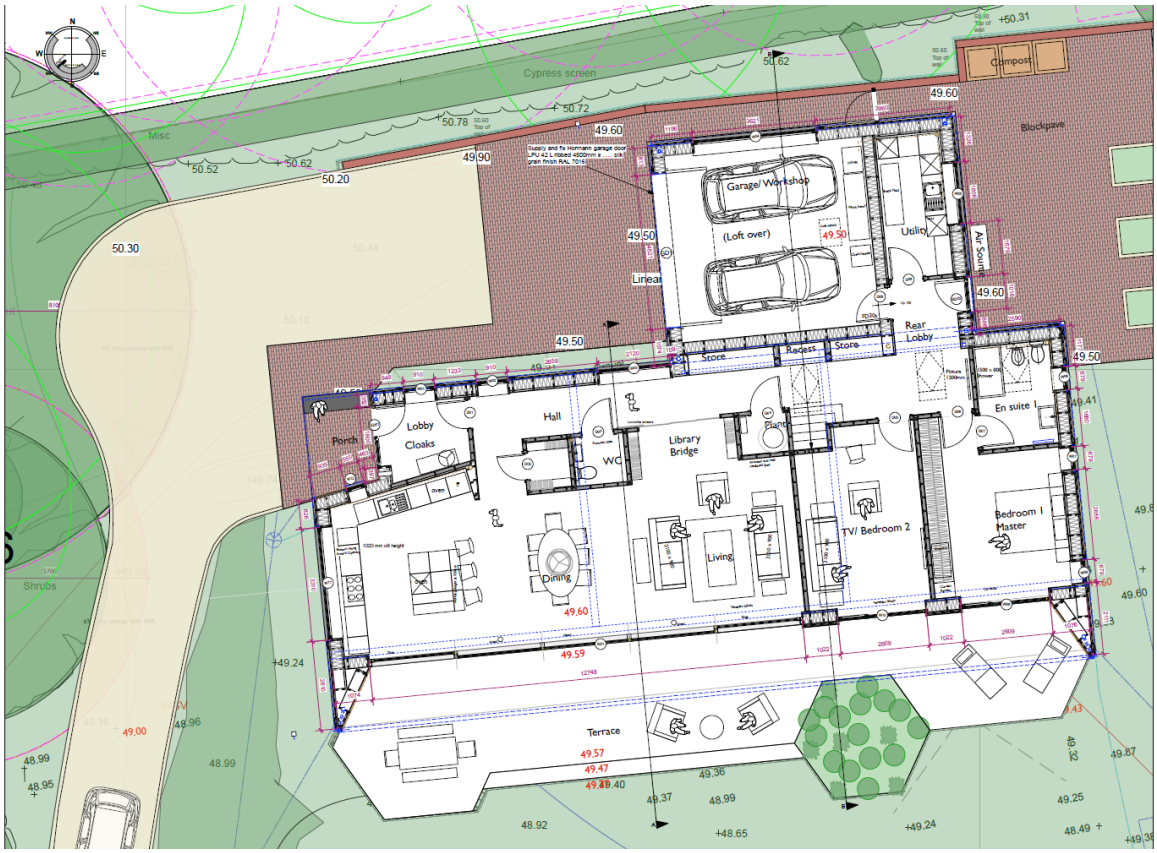
Gercek i Güçü (2019.) također analiziraju utjecaj orijentacije otvora na energetsku učinkovitost zgrada u različitim klimatskim područjima. Zaključuju da otvori orijentirani prema jugu u hladnim klimama ostvaruju solarne dobitke i smanjuju potrebu za grijanjem, dok u toplim klimama orijentacija prema sjeveru smanjuje potrebu za hlađenjem. Razlika između orijentacija može rezultirati uštedama u grijanju do 12 %. [38]

Veršić et al. (2019.) istražuju udio solarnih dobitaka u godišnjoj energetskoj bilanci obiteljskih kuća u kontinentalnoj i primorskoj Hrvatskoj. Od ukupne potrebne godišnje toplinske energije, u kućama kontinentalne klime solarni dobici pokrivaju 25 % topline, a primorskoj klimi 33 %. Ostatak potrebne topline nadoknađuju unutarnji dobici i sustav grijanja. Različite orijentacije u njihovoj analizi rezultiraju vrlo malim razlikama do 3%. [72]

Slika 8 i Slika 9 primjer je oblikovanja pasivne kuće s naglašenom orijentacijom velikih staklenih stijena prema jugu. Pasivni standard nemoguće je ostvariti bez maksimalnog iskorištavanja solarnih dobitaka zimi, odnosno orijentacije većine otvora prema ekvatoru.



Slika 8: Passivhaus Design Dwelling, Surrey, Beech Architects Ltd [5]



Slika 9: Passivhaus Design Dwelling, Surrey, Beech Architects Ltd, tlocrt prizemlja [5]

[5] Ljubazno dopuštenje autora: Beech Architects Limited, Suffolk. Korišteno uz izričito dopuštenje za potrebe ovoga doktorskog rada.

2.2.5 Zaštita od pregrijavanja

Zaštita od sunca može biti u funkciji sprječavanja bliještanja i sprječavanja pregrijavanja. Bliještanje ima utjecaj na ugodu korištenja prostora, dok zaštita od pregrijavanja utječe na potrošnju energije. U kontekstu ovoga rada, pod pojmom zaštite od sunca podrazumijeva se zaštita od pregrijavanja. Najučinkovitije naprave za zaštitu od pregrijavanja su one s vanjske strane ostakljenih ploha [1] što potvrđuju i brojna istraživanja.

Capeluto (2003.) istražuje način oblikovanja zgrada gdje se zasjenjenje otvora u funkciji zaštite od sunca postiže samim oblikom zgrade. Primjenom koncepta iskorištavanja solarnih dobitaka uz kontrolu zasjenjenja (koncept Solar Collection Envelope (SCE)) i kompjuterskog modela SustArc Capeluti je pokušao ostvariti oblik koji će u određeno doba dana bacati sjenu na otvore. Rezultati pokazuju uštede u potrebnoj energiji za hlađenje do 30 %, dok se grijanje u tom radu ne analizira već se samo napominje potreba za ostvarivanjem pasivnih solarnih dobitaka zimi. [40]

Chia et al. (2007.) na sličan način analiziraju oblik visokih zgrada koje dobivaju najmanju količinu sunčevog zračenja kroz godinu na svoju ovojnicu. Pri tome analiziraju razne omjere pravokutnih i zaobljenih tlocrtnih oblika. Njihovi rezultati pokazuju da tlocrtni oblik kruga godišnje dobiva najmanju količinu sunčevog zračenja, a kod pravokutnih oblika tlocrtni oblik kvadrata orijentiranog pod 45° u odnosu na ekvator. Kružni tlocrt zgrade ostvaruje oko 10 % manje solarnih dobitaka u odnosu na kvadratni i oko 25 % manje solarnih dobitaka u odnosu na izdužene tlocrte orijentirane dužim stranama na istok i zapad. Analiza se odnosi na visoke zgrade za koje nije uobičajena vanjska zaštita, stoga autori analiziraju samo oblik u funkciji zaštite od sunca, međutim naglašavaju važnost i učinkovitost vanjskih naprava. [41]

Yao (2014.) promatra osvijetljenost, unutarnje temperature i uštede u potrošnji energije u stambenoj zgradi nakon instalacije vanjskih elemenata za zaštitu od sunca. Nepomična zaštita ostvaruje uštede oko 15 %, a pomična 25 - 30 %, pri čemu se energija za grijanje smanjuje 24 %, a energija za hlađenje za 36 %. Uštede za hlađenje su očekivane uslijed ugradnje zaštite od pregrijavanja, dok pomična zaštita omogućava veće solarne dobitke zimi. [44]

Rana et al. (2022.) analiziraju potencijal naprava za zaštitu od pregrijavanja u zgradama komercijalne namjene u suptropskoj klimi. Uspoređuju uobičajene naprave poput roleta, istaka, brisoleja i zavjesa. Njihovi rezultati pokazuju da pravilan odabir zaštite od sunca može smanjiti

potrebu za hlađenjem do 40 %. Pritom prepoznaju istake kao najprikladnije za južne i sjeverne orijentacije, a vertikalne brisoleje za istočne i zapadne. [42]

Chandrasekaran et al. (2022.) istražuju utjecaj vanjskih naprava kao i udjela ostakljenih ploha u ovojnici. Njihovi rezultati pokazuju da primjena pomičnih vanjskih tendi rezultira uštedom do 23 %. Od ostalih elemenata za zaštitu od sunca obuhvaćaju horizontalne i vertikalne brisoleje, stakla nižeg solarnog faktora, te s njima postižu slabije rezultate. [45]

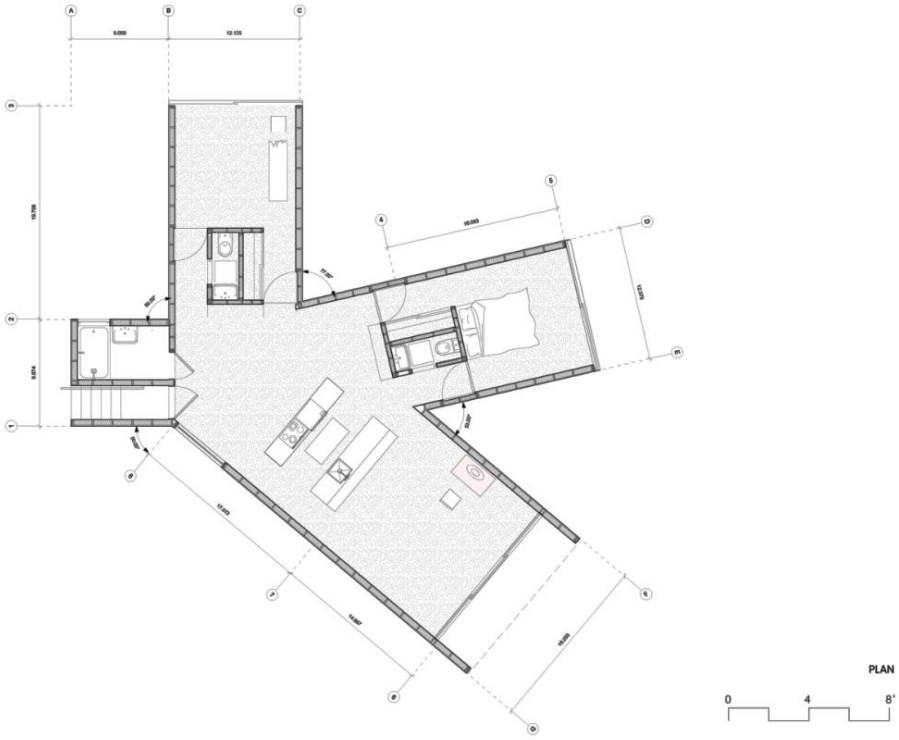
Perez et al. (2024.) također analiziraju razne vrste zaštite od sunca za obrazovne zgrade. Njihovo istraživanje obuhvaća istake, brisoleje, žaluzine podesivog nagiba te automatizirane sustave s pomičnim tendama i roletama. Njihovi rezultati pokazuju uštede od 50 % u slučaju istaka, 30 % u slučaju brisoleja i žaluzina, 60 % u slučaju automatiziranih pomičnih vanjskih naprava te svega 25 % za unutarnje zavjese. [43]

Slika 10 primjer je oblikovanja ostakljenih ploha ovojnice bez vanjske naprave za zaštitu od pregrijavanja. Ostakljene plohe bez vanjske zaštite od sunca ljeti ostvaruju značajne dobitke topline koji rezultiraju povećanom potrošnjom energije za hlađenje. Faktori zaštite od pregrijavanja kod vanjskih naprava puno su povoljniji nego kada takva zaštita uopće ne postoji.



Slika 10: Moose Road House, Mork-Ulnes Architects, Oslo [6]

[6] Ljubazno dopuštenje autora: Mork-Ulnes Architects, Oslo. Korišteno uz izričito dopuštenje za potrebe ovoga doktorskog rada.



Slika 11: Moose Road House, Mork-Ulnes Architects, Oslo, tlocrt [6]

2.2.6 Kontakt ovojnice s tlom

Zbog velike toplinske mase zemlje, tlo ima znatno manje dnevne i godišnje temperaturne oscilacije u odnosu na vanjski zrak. Iz tog razloga tlo na određenoj dubini ima podjednaku temperaturu tijekom cijele godine. Tijekom zime tlo je toplije od vanjskog zraka, a tijekom ljeta hladnije.

Minichreiter (2001.) proučava značajke starčevačke kulture i tipove građevina na području sjeverne Hrvatske iz razdoblja ranog i srednjeg neolitika. Naselja su se sastojala od poluukopanih kuća građenih drvenim prućem i obloženih ilovačom. Pretpostavka je da je ukopavanje služilo dijelom kao zaštita od tadašnjih klimatskih uvjeta (jaki zapadni vjetrovi). [46]

Okba (2015.) analizira elemente ovojnice s ciljem uštede energije za hlađenje. U istraživanju obrađuje nadzemne dijelove ovojnice, ali i dijelove ovojnice u kontaktu s tlom. Ukopavanjem dijela zgrade postiže se zaštite od klimatskih uvjeta – neželjene infiltracije vjetrom i smanjenje solarnih dobitaka. Također smanjuje se izmjena topline uslijed manje razlike u temperaturi između interijera i tla u odnosu na temperaturu interijera i vanjskog zraka. [47]

Mazarrón et al. (2012.) istražuju načine iskorištavanja toplinske inercije tla za unaprjeđenje energetske učinkovitosti u proizvodnim zgradama i hlađenim skladištima hrane. Njihova studija analizira različita građevinska rješenja koja iskorištavaju termalnu inerciju tla u svrhu uštede potrošnje energije. Najbolje rezultate pokazuju duboko ukopane konstrukcije (dublje od 10 m), konstrukcije na tlu zaštićene nasipima su dobra alternativa ukapanju uz jednostavniju izvedbu za zgrade velike površine, dok podrumi imaju zadovoljavajuću sposobnost ublažavanja toplinskih oscilacija u odnosu na složenost i cijenu izvedbe. U pogledu temperaturnih oscilacija i potrebe za kondicioniranjem nepovoljnije se pokazuju konstrukcije odignute od tla. [48]

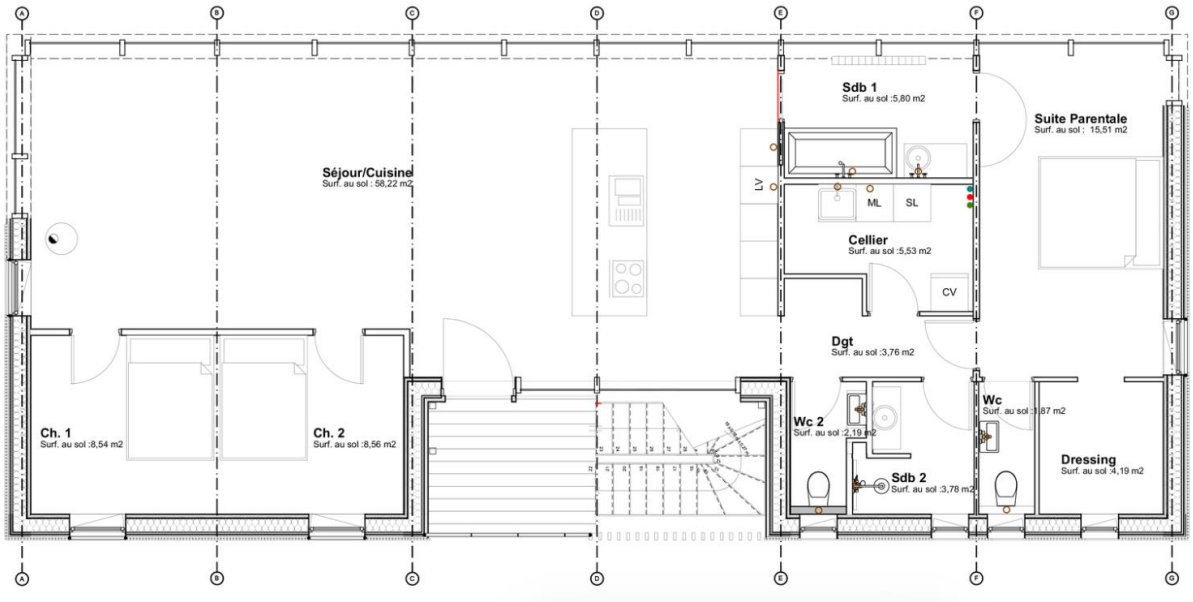
Mostafaeipour et al. (2019.) analiziraju utjecaj temperature tla na potrošnju energije za hlađenje u zgradama u toplim klimama. Dobivaju iste rezultate kao i ostali istraživači – ovojnica prema tlu umanjuje solarne dobitke i rezultira smanjenom potrošnjom energije u ljetnom razdoblju. Numerička analiza potrošnje energije iz zgrada različitih oblika i dubine ukapanja upućuje na to da ukopane zgrade imaju manju izmjenu topline s okolišem. Rezultati pokazuju da prostori zgrade ukopani na 4 m dubine imaju do 55 % manje gubitke topline u odnosu na prostore zgrade iznad tla. [91]

Baglivo i Congedo (2019.) istražuju metode optimizacije temeljnih konstrukcija u funkciji energetske učinkovitosti u zgradama sredozemnog podneblja. Računalnim postupcima analiziraju različita rješenja temeljenja zgrada na pločama. Uspoređuju povijesne konstrukcije prema tlu bez toplinske izolacije i dolaze do zaključka da toplinska izolacija u tlu doprinosi uštedi energije tijekom zime, a da tijekom ljeta ona umanjuje hlađenje zgrade putem tla. [49]

Slika 12 predstavlja primjer oblikovnog koncepta u kojem zgrada ostvaruje minimalan kontakt s tlom. Iskorištavanje prednosti toplinske inercije tla u ovom je projektu djelomično zanemareno u korist drugih čimbenika oblikovanja. Udio ovojnice u dodiru sa tlom je za ovaj primjer vrlo malen, što predstavlja značajno odstupanje od prosjeka. Suprotan primjer je ukopana kuća koja iskorištava prednosti tla u energetskoj učinkovitosti (Slika 14).



Slika 12: Kuća na stupovima, B.HOUSSAIS Architecture, La Roche-Jaudy [7]

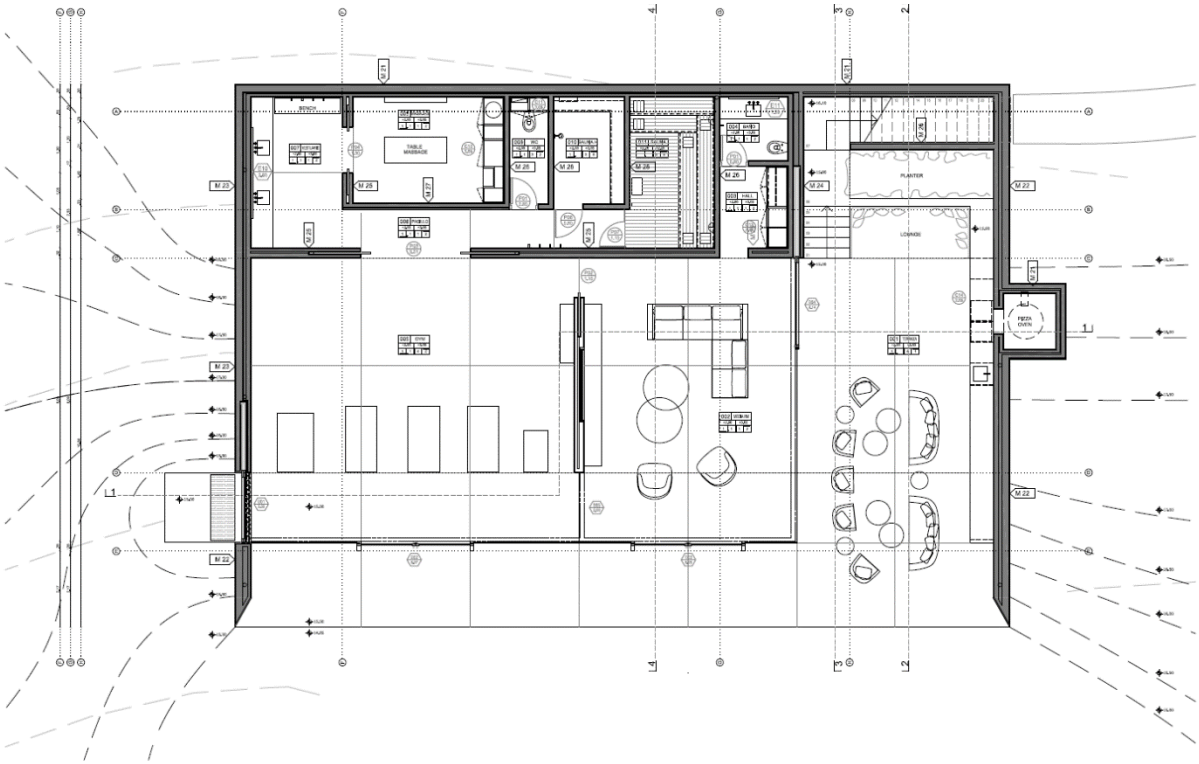


Slika 13: Kuća na stupovima, B.HOUSSAIS Architecture, La Roche-Jaudy, tlocrt kata [7]

[7] Ljubazno dopuštenje autora: B. HOUSSAIS Architecture, La Roche-Jaudy. Fotograf: Pascal Leopold. Korišteno uz izričito dopuštenje za potrebe ovoga doktorskog rada.



Slika 14: Ukopana kuća, Kallos Turin office, London [8]



Slika 15: Ukopana kuća, Kallos Turin office, London, tlocrt [8]

[8] Ljubazno dopuštenje autora: Kallos Turin office, London. Korišteno uz izričito dopuštenje za potrebe ovoga doktorskog rada.

2.3 Oblikovanje i energetska učinkovitost pasivnih, gotovo nula energetskih kuća i zgrada nulte emisije

Pasivne kuće su energetski najučinkovitiji energetski model i predstavljaju neodvojiv koncept oblikovanja i energentske učinkovitosti. Zahtjevi za potrošnju energije usredotočeni su na godišnju potrebnu energiju za grijanje i hlađenje. Kod pasivnih kuća oni su toliko zahtjevni da svi čimbenici oblikovanja moraju biti maksimalno podređeni energetskoj učinkovitosti kako bi se uopće mogli ispuniti traženi zahtjevi.

Dan et al. (2016.) istražuju primjenu pasivnog standarda na eksperimentalnoj kući u Rumunjskoj. Osim visokoučinkovitih sustava grijanja i prisilne ventilacije, elementi arhitektonskog oblikovanja podređeni su energetskoj učinkovitosti. Zgrada je vrlo kompaktnog oblika kako bi se postigla što manja površina ovojnice kroz koju se gubi toplina. Zidovi su vrlo velike debljine s 30 cm toplinske izolacije, a krov s 42 cm kako bi se minimizirali toplinski gubici kroz ovojnicu. Orijentacija velikih staklenih ploha je prema jugu kako bi se maksimalno ostvarili solarni dobici zimi. [92]

Schnieders et al. (2020.) analiziraju prilagodljivost pasivnih kuća različitim klimatskim područjima. Njihova analiza je uključivala devet klimatskih zona: Kanadu, SAD, Njemačku, Kinu, Grčku, Španjolsku, Tajvan, Meksiko i UAE. Za različita klimatska područja potrebne su određene prilagodbe elemenata energetske učinkovitosti, poput razlike u potrebnoj debljini toplinske izolacije ili vrsti ostakljenja. Svejedno principi energetski učinkovitog oblikovanja vrijede za većinu klimatskih podneblja: debljina toplinske izolacije, orijentacije otvora na način da omoguće iskorištavanje solarnih dobitaka zimi uz potrebu zaštite od pregrijavanja ljeti. U hladnim klimama povoljniji je kompaktan faktor oblika, dok se u toplim klimama preporučaju oblici zgrada koji omogućavaju bolje provjetravanje i hlađenje. [10]

Za razliku od pasivnih kuća, zgrade gotovo nulte energije usredotočene su na obnovljive izvore energije. Godišnja potrošnja fosilnih goriva u zgradi se svodi na gotovo nultu razinu, umjesto potrebne energije za grijanje i hlađenje. Takav pristup osigurava ekološku kvalitetu uz jednostavniju, troškovno optimalnu izvedbu zgrada koja ne mora biti u potpunosti podređena načelima energetski učinkovitog oblikovanja. [13] Usporedba zahtjeva za potrebnom energijom za grijanje pokazuje da gotovo nula energetske zgrade mogu imati i do pet puta veću potrošnju energije za grijanje, ali uz obaveznu primjenu obnovljivih izvora energije. [1] Premda u gotovo

nula energetskim kućama načela energetski učinkovitog oblikovanja nisu imperativ, ona su preporučljiva radi dugoročnih ušteda.

Li et al. (2019.) bave se razvojem i primjenom metodologije za projektiranje zgrada gotovo nulte energije u Kini. Načela energetski učinkovitog oblikovanja preporučaju se za sve kuće, pa tako i za zgrade gotovo nulte energije: kompaktan oblik, orijentacija prema jugu, zaštita od pregrijavanja itd. Međutim, optimalna rješenja postižu se odabirom sustava grijanja i hlađenja temeljem obnovljivih izvora energije. [14]

Daqiqnia et al. (2021.) analiziraju različite pristupe projektiranju zgrada gotovo nulte energije u Iranu. Analiziraju utjecaj orijentacije, različitih vrsta toplinske izolacije, faktor oblika itd. Njihovi zaključci također daju prednost načelima energetski učinkovitog oblikovanja, ali najznačajnije uštede postižu u kombinaciji s primjenom obnovljivih izvora energije: dizalice topline, solarni i fotonaponski paneli te sustavi pohrane energije. [93]

Li et al. (2022.) istražuju pristup projektiranju gotovo nula energetskih zgrada u različitim klimatskim područjima Kine. Premda se bave sustavima grijanja, naglasak također stavljaju na oblikovanje zgrade u funkciji energetske učinkovitosti. [94]

Veršić et al. (2018.) uspoređuju energetsku učinkovitost kuća u različitim klimatskim područjima Hrvatske. Analizirani primjeri obiteljskih kuća rezultiraju potrebnom specifičnom energijom za grijanje od 50,36 kWh/(m^2a) i 3,10 kWh/(m^2a) za hlađenje u kućama planinskog područja, te 9,27 kWh/(m^2a) za grijanje i 17,06 kWh/(m^2a) za hlađenje u primorskom području Hrvatske. [39]

Također, Veršić et al. (2019.) daju smjernice optimalnog oblikovanja kuća gotovo nulte energije s primjerima potrošnje energije. Prema njihovim rezultatima, godišnja potrebna energija za grijanje u kontinentalnoj Hrvatskoj iznosi 41,97 kWh/(m^2a) i 22,33 kWh/(m^2a) za hlađenje, dok u primorskoj Hrvatskoj one iznose 18,00 kWh/(m^2a) i 36,65 kWh/(m^2a). [72]

Zgrade gotovo nulte energije predstavljaju značajan korak u primjeni obnovljivih izvora energije i ušteda CO_2 emisija te predstavljaju bazu za slijedeći energetski standard, zgrade nulte emisije (Zero Emission Standard - ZEB). Dokazivanje ZEB standarda uključivat će analizu operativne i utjelovljene energije i njezinih emisija u cjeloživotnom vijeku zgrade. [15] Emisije operativne energije i dalje predstavljaju većinu CO_2 emisija iz zgrada, do 90 % [16], a od toga samo energija za grijanje predstavlja 40- 50 % [6] za većinu zemalja Europe. Iz navedenog je

očito da je udio grijanja i hlađenja u cjeloživotnim CO_2 emisijama značajan i da smanjenja potrošnje energije dugoročno ostvaruje velike uštede.

Cellura et al. (2014.) proučavaju omjer utjelovljene i operativne energije u zgradama nulte energije (Net Zero Energy Building – NZEB). Udio utjelovljene energije u energetski neučinkovitim zgradama iznosi 10 - 20 %, dok kod novih i energetski učinkovitih kuća udio utjelovljene energije iznosi 30 - 50 % iz razloga što je operativna energije znatno manja. Prema tome, kod novih zgrada udio operativne energije u cjeloživotnom vijeku zgrade iznosi 50 - 70 %, a budući da energija za grijanje i hlađenje iznose 40 - 60 % operativne energije, možemo zaključiti da na kondicioniranje zgrada otpada do 20 - 40 % ukupne energije u cjeloživotnom vijeku zgrade. [95]

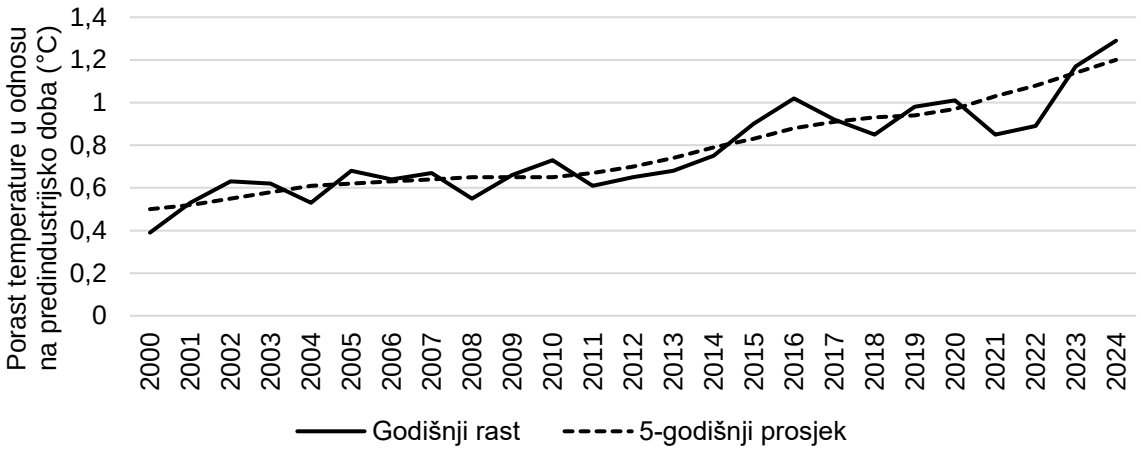
Veršić et al. (2026.) prikazuju potencijal ostvarivanja standarda nultih emisija kod obiteljskih kuća u kontinentalnoj i primorskoj Hrvatskoj optimalne potrošnje energije. Analizirane obiteljske kuće u kontinentalnom području imaju specifičnu potrošnju energije za grijanje $Q''_{H,nd}$ od 46,07 do 60,88 kWh/(m^{2}a) i specifičnu potrošnju energije za hlađenje $Q''_{C,nd}$ od 22,27 do 28,64 kWh/(m^{2}a). U primorju, specifična energija za grijanje iznosi od 22,99 do 29,99 kWh/(m^{2}a) i od 34,44 do 36,77 kWh/(m^{2}a) za hlađenje. Također, uspoređuju utjelovljeni i operativni ugljik za kuće različitih konstruktivnih sustava i materijala. Isporučena energija za grijanje i hlađenje iznosi 80 % operativne energije kod kuća kontinentalnog i 73 % kod kuća primorskog područja. Udio operativnog ugljika u cjeloživotnim emisijama varira od 36 % kod armiranobetonskih kuća, do 246 % kod kuća s negativnim utjelovljenim ugljikom, odnosno masivnih drvenih konstrukcija koje u svoju strukturu apsorbiraju veće količine CO_2 nego što se emitira za sve ostale materijale i procese gradnje i rekonstrukcije. [96]

2.4 Varijantni scenarij proračuna

Algoritmom za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790 (u daljnjem tekstu Algoritam) utvrđen je niz računskih vrijednosti kako bi se proračunima postigli usporedivi rezultati za različite zgrade, jednostavnost modela i proračun na strani sigurnosti. Međutim, zbog kompleksnosti proračuna potrebne energije u zgradama i niza ulaznih parametara, propisani način proračuna pojednostavljuje pojedine segmente ili izostavljaju utjecaj korisnika na potrošnju energije za potrebe izrade projekata. U ovom istraživanju analiziran je utjecaj promjene klime u posljednjih deset godina kao i navike korisnika koje utječu na potrošnju energije.

2.4.1 Promjena klime

Pariškim sporazumom iz 2014. godine države potpisnice obvezale su se na smanjenje emisija stakleničkih plinova i ograničavanje globalnog zagrijavanja do 2100. godine na 1,5 do 2 °C u odnosu na predindustrijsko doba. Ukoliko se emisije stakleničkih plinova ne smanje, trenutan rast globalnih temperatura takav je da će rezultirati 3 °C do 4 °C višim temperaturama do 2100. godine. [97] U posljednjih 10 godina zabilježene su najviše globalne temperature i godišnji prosjeci temperatura, a 2024. godine 5-godišnji prosjek globalnog zagrijavanja dostigao je 1,2 °C u odnosu na predindustrijsko doba (Slika 16).



Slika 16: globalni rast temperature od 2000. godine do danas u odnosu na predindustrijsko doba (°C) [98]

Van Oldenborgh et al. (2009.) opažaju brže zagrijavanje Europe od očekivanog. Godišnji trend porasta temperatura iznosi 0,04 °C/a do 0,06 °C/a što je dvostruko veće od onih predviđenih klimatskim modelima. Njihovi zaključci su da tadašnji modeli nisu dovoljno osjetljivi, odnosno da ne obuhvaćaju dovoljno klimatskih prilika koje uzrokuju zagrijavanje. [50]

Papakostas et al. (2010.) analiziraju utjecaj klimatskih promjena na potrebe za grijanjem i hlađenjem u dva grada u Grčkoj, Ateni i Solunu, u periodu od 1983. do 2002. godine. Njihovi rezultati za Atenu pokazuju smanjenje potrebe za grijanjem od 11,5 % i povećanje potrebe za hlađenjem 26 %. Rezultati za Solun pokazuju 5 % manju potrebu za grijanjem i 10 % veću potrebu za hlađenjem. [99]

Twardosz et al. (2021.) proučavaju porast temperatura od 1951. godine prema mjerenjima iz 210 meteoroloških postaja diljem Europe. Od 1985. godine bilježe linearan rast temperatura za

sva godišnja doba. Statistički porast temperatura pokazuje godišnje prosječno zagrijavanje od 0,055 °C/a, najbrže je zagrijavanje proljeća sa porastom temperature od otprilike 0,061 °C/a, dok jesen ima najmanji porast od otprilike 0,045 °C/a. Najjače zagrijavanje događa se u sjeveroistočnoj Europi tijekom zime i proljeća, a južni i jugozapadni dio imaju najjače zagrijavanje ljeti. Njihovi rezultati potvrđuju brže zagrijavanje Europe od globalnog prosjeka. [51]

Espinosa et al. (2022.) istražuju porast temperatura u Lisabonu od 1864. godine do 2021. godine. Dugoročno promatrano, godišnji porast temperature iznosi 0,01 °C/a do 0,02 °C/a s tim da je najveći dio porasta zabilježen nakon 1980. godine s trendom porasta do 0,03 °C/a. Slabije zagrijavanje oceanske obale povezano je s velikom toplinskom masom Atlantskog oceana koji se zagrijava sporije od kopna. [52]

D'Agostino et al. (2022.) analiziraju potrebe za grijanjem i hlađenjem zgrada u Europi do 2060. godine u odnosu na promjene klime. U studiji koriste predviđanja klimatskih scenarija te simuliraju potrošnju energije u zgradama. Prema njihovim rezultatima potreba za grijanjem u Europi smanjiti će se 28 % do 54 %, ali zato će potrošnja energije za hlađenje porasti 90 % do 280 % ovisno o lokaciji. Svojim istraživanjem stavljaju naglasak na zaštitu od pregrijavanja koja uključuje izolaciju krovova, vrste ostakljenja i sjenila te završne materijale fasade. [22]

Auld et al. (2023.) analiziraju temperaturne ekstreme u periodu od 1950. godine do 2018. godine. Topliji ekstremi postaju sve češći i intenzivniji. 100-godišnji ekstremi iz 1950. godina danas se događaju svakih šest godina, a porast ekstremnih temperatura je na razini od 2 °C u posljednjih 70 godina. Prema njihovim rezultatima, južna i zapadna Europa bilježe veći porast ekstremnih vrućina u odnosu na ostatak Europe. [53]

Kao i u slučaju globalnih temperatura, mjerenja solarnog zračenja na površini planete u posljednjih 30 godina također bilježe porast, ali u puno manjoj mjeri. Schwartz et al. (2020.) zaključuju da je razlog povećanja smanjena apsorpcija zračenja u atmosferi, dok je ukupno zračenje samog sunca gotovo nepromijenjeno. Smanjena apsorpcija zračenja rezultat je manjeg onečišćenja atmosfere aerosolima, dok vodena para i oblaci na godišnjoj razini uzrokuju veće varijacije u dozračenoj energiji. Prema njihovim rezultatima Europa bilježi značajan porast zračenja od 4 % do 8 % u proteklih 30 godina s najvećim povećanjem u sredozemnom predjelu i najmanjim u sjevernom dijelu Europe. [100]

Wang et al. (2023.) proučavaju kako se globalnu sunčevo zračenje mijenjalo na površini u razdoblju od 1980. do 2019. godine, uzimajući u obzir utjecaj oblaka i ostalih čimbenika. Njihov zaključak je da su promjene u posljednjih 40 godina posljedica promjene u oblacima uz dodatni utjecaj aerosola i atmosferskih uvjeta. Također, oblacima pripisuju razlog u varijabilnosti godišnjih rezultata. Dugoročno gledano, u Europi bilježe trend porasta globalnog zračenja od 1 % do 3 % u posljednjih 40 godina. [101]

Stamatis et al. (2023.) analiziraju promjene u globalnom zračenju cijele planete promatrajući i oceane u razdoblju od 1984. do 2018. godine. Kao razloge promjene u dozračenoj energiji prepoznaju iste čimbenike kao ostali: vodena para, oblaci i aerosoli. Njihovi rezultati pokazuju veću količinu dozračene sunčeve energije u Europi, Americi i Africi, dok Indija, Kina i Pacifički ocean bilježe pad zračenja. U promatranom razdoblju u Europi povećano je globalno zračenje 3 % do 7 % ovisno o regiji. [102]

2.4.2 Projektne temperature grijanja i hlađenja

Računske temperature grijanja i hlađenja zgrada stambene namjene u primorskoj i kontinentalnoj Hrvatskoj definirane su Algoritmom. Temperatura grijanja zimi definirana je na 20 °C za oba klimatska područja, dok je kod temperature hlađenja određeno 22 °C za kontinentalnu i 24 °C za primorsku Hrvatsku. [73] Ove temperature koriste se za ocjenu energetske učinkovitosti zgrade u projektima racionalne uporabe energije kao i za energetsko certificiranje zgrada. Stvarne temperature grijanja i hlađenja ovise o navikama i željama korisnika, što znači da mogu značajno varirati u odnosu na projektne temperature. U srednjoj i sjevernoj Europi energija za grijanje predstavlja veći udio godišnje potrošnje, stoga je promjena projektne temperature grijanja obrađena u nizu istraživanja. U južnom i mediteranskom predjelu Europe energija za grijanje čini mali udio potrošnje, stoga postoji mali broj radova koji se bave kvantitativnim analizama projektnih temperatura grijanja [103].

Audenaert et al. (2011.) preporučaju uključivanje navika korisnika u modele proračuna potrošnje energije. U svojim usporedbama razlike između stvarne i teoretske potrošnje energije u kućama u Belgiji dobivaju rezultate da je u 80 % kućanstava potrošnja niža od proračunate od 9 % do 49 %, i da unutarnje temperature u zimskom razdoblju variraju od 18,8 °C do 21 °C. [54]

Vávra et al. (2012.) proučavaju stvarne temperature grijanja u tri regije u Europi – Škotskoj, Njemačkoj i Češkoj. Za Škotsku utvrđuju niže temperatura grijanja, a više za ostale regije. U slučaju Češke, prosječna temperatura grijanja iznosi 21,7 °C. [55]

Bekö et al. (2016.) analiziraju izmjerene unutarnje temperature u energetski učinkovitim, obnovljenim, stambenim zgradama i njihove prosječne temperature u stanovima pokazuju 22,2 °C u sezoni grijanja. [56]

Mazhar et al. (2022.) dobivaju rezultate da u Njemačkoj prosječne temperature grijanja iznose 20,7 °C, dok je zakonski određena dnevna projektna temperatura 20 °C [57].

Pullinger et al. (2022.) proučavaju ostvarene sobne temperature tijekom zime u kućama u Škotskoj u razdoblju 2016. do 2018. godine. Dok projektne temperature u kućama u Britaniji iznose 21°C za dnevne prostore i 18°C za spavaće sobe, prosječne izmjerene temperature bile su niže, oko 19°C. [58]

Szalansky et al. (2023.) uspoređuju razlike u potrošnji energije za grijanje u stambenim zgradama pri povećanju projektne temperature za 1 °C. Njihovi rezultati pokazuju povećanje potrošnje energije za grijanje od 7 % do 13 %. [59]

Milovanović (2024.) analizira kvalitetu zraka u energetski obnovljenim stambenim zgradama u Hrvatskoj. Njegova mjerenja obuhvaćaju unutarnje uvjete vlage, zasićenosti zraka CO_2, hlapive organske spojeve i temperaturu. Zabilježene temperature u sezoni grijanja kreću se između 20 °C i 25 °C, odnosno većinu vremena iznose 24 – 25 °C, dok su u sezoni hlađenja unutarnje temperaturu u rasponu 25 – 30 °C. [60]

Nove, energetski učinkovite kuće omogućavaju veći komfor uz nižu potrošnju energije. Firlag et al. (2025.) proučavaju temperaturu grijanja u pasivnim kućama u Poljskoj i kao rezultat navode prosjek od 22 °C [61].

Na jugu Europe temperature grijanja znatno su niže, što je prvenstveno povezano a velikim brojem starih energetski neučinkovitih zgrada i energetskim siromaštvom. U Grčkoj temperature grijanja iznose u prosjeku 17,5 °C dnevno, a čak niti u novim zgradama ne dostižu se temperature grijanja od 20 °C zbog velike štednje na grijanju. [104]

U slučaju hlađenja, projektna temperatura od 22 – 24 °C koristi se za proračun energetskih potreba što je niže od optimalnih ili preporučenih temperatura. Prema HRN EN 12831-3:2020

projektna temperatura hlađenja iznosi 26 °C [62]. Norme HRN EN ISO 7730 i HRN EN ISO 15251 definiraju zahtjeve za toplinsku ugodnost u tipičnom rasponu od 23 °C do 26 °C [63, 64]. Prema smjernicama Fonda za zaštitu okoliša i energetsku učinkovitost, preporučena temperatura hlađenja ljeti iznosi minimalno 25 °C [65], kao i prema Metodologiji za identifikaciju i kartiranje urbanih toplinskih otoka. [66]

Papadopoulos et al. (2019.) istražuju potencijalne uštede s višim temperaturama hlađenja u poslovnim zgradama i dobivaju rezultat od 60 % ušteda pri rasponu temperatura hlađenje od 22°C do 27°C. [105]

Bienvenido-Huertas et al. (2020.) za tri klimatske zone Španjolske izrađuju 390 simulacija u kojima istražuju mogućnosti ušteda adaptivnim (prilagodljivim) postavkama projektne temperature grijanja i hlađenja. U slučaju visokih vanjskih temperatura, temperatura grijanja i hlađenja automatski se povećava (prilagođava), čime se ostvaruju ukupne uštede od 25,6 % do 48,9 %. [106]

Khalilnejad et al. (2021.), također analiziraju uštede u komercijalnim zgradama pri promjeni projektne temperature hlađenja. Njihovi rezultati pokazuju potencijalne uštede na godišnjoj razini od 11,6 % pri povećanju temperature hlađenja za 1 °C, pri čemu naglašavaju da je to potencijal uštede za zgrade komercijalne namjene. [107]

Kang et al. (2022.), dobivaju slične rezultate pri povećanju temperature hlađenja na 26 °C. Opterećenje sustava hlađenja smanjuje se za 40 %, a godišnja potrošnja energije za hlađenje za 26,8 %. [108]

Xiong et al. (2023.), analiziraju potencijal ušteda pri povećanju temperature hlađenja s 24 °C na 26 °C. Njihov zaključak je da u hlađenju mali pomak projektne temperature rezultira velikim uštedama, u prijelaznim mjesecima potreba za hlađenjem gotovo nestaje, a godišnje uštede u energiji za hlađenje mogu biti do 29%. Također, dobivaju rezultate koji pokazuju da promjena unutarnje projektne temperature od 2 °C ima puno veći potencijal uštede za hlađenje nego za grijanje. [109]

Mousavi et al. (2025.) istražuju utjecaj projektnih temperatura grijanja i hlađenja na primjeru stambene zgrade u Iranu. Snižavanje temperature grijanja sa 21 °C na 16 °C rezultira uštedama u potrošnji od 36,4 %, dok povećanje temperature hlađenja sa 22 °C na 27 °C ostvaruje uštede u od 35,7 %. [110]

2.4.3 Pasivno hlađenje – noćno provjetravanje

Tijekom posljednjih 20 godina bilježimo značajan pad u potrošnji energije za grijanje i hlađenje u većini Europe, osim u južnom i sredozemnom dijelu Europe [111]. Napretkom propisa u području energetske učinkovitosti u zgradama postrožili su se zahtjevi za kvalitetom ovojnice što za srednju i sjevernu Europu ima značajan utjecaj. Veće debljine toplinske izolacije rezultiraju manjim gubitkom topline što predstavlja povoljan utjecaj zimi, a suvremena stolarija minimizira neželjenu infiltraciju, koja ima značajan utjecaj na potrošnju energije u zgradama [112]. Tijekom ljeta, kada su noćne temperature do 15 stupnjeva niže od dnevnih, postoji mogućnost rashlađivanja kuće [113]. Rashlađivanje je moguće transmisijskim gubicima topline preko ovojnice i provjetravanjem. Međutim, u slučaju kvalitetno izolirane ovojnice, prema suvremenim propisima, dolazi do manjeg gubitka topline noću transmisijom, ali i dalje ostaje potencijal hlađenja provjetravanjem.

Pasivno noćno hlađenje dugo je poznat i korišten način rashlađivanja. Roulet et al. (1996.) razvijaju jednostavan alat za projektiranje pasivnog hlađenja kao zamjenu za kompleksne simulacije. Uz vanjsku zaštitu od pregrijavanja, noćno provjetravanje prepoznaju kao ključni mehanizam rashlađivanja i kao najefikasniju strategiju pasivnog hlađenja u umjerenim klimama. [67]

Santamouris i Kolokotsa (2007.) obrađuju rezultate niza studija o pasivnom hlađenju. U stambenim zgradama noćno provjetravanje može smanjiti potrošnju energije za hlađenje od 20 % do 25 %. Metodu pasivnog hlađenja opisuju kao posebno učinkovitu u suhim i toplim klimama, dok za urbana područja potencijal može biti smanjen zbog efekta toplinskih otoka. [68]

Rahman et al. (2014.) izrađuju model prostorije sa solarnim (toplinskim) dimnjakom i vodenim rashladnikom. U svojim mjerenjima bilježe temperature do 5 °C niže od vanjskog zraka i od 2 °C do 3 °C niže temperature u odnosu na prostoriju bez pasivnog hlađenja. [69]

Veršić et al. (2022.) analiziraju potencijal pasivnog hlađenja poslovnih zgrada u Hrvatskoj. Njihovi rezultati pokazuju moguće uštede od 43,5 % u kontinentalnoj Hrvatskoj i 32,2 % u primorskoj. Detaljna analiza uključuje broj izmjena zraka u slučaju poprečnog provjetravanja pod utjecajem brzine vjetra, visine zgrade i konfiguraciju okoliša zgrade. [70]

Hu et al. (2023.) proučavaju 42 rada o potencijalu pasivnog hlađenja kod stambenih zgrada i njegov utjecaj na smanjenje unutarnjih temperatura, rashladnog opterećenja i potrebnog broja sati hlađenja te uštede energije. Kao rezultat analize ističu pad unutarnje temperature za 2,2 °C i uštede od 29 %. [71]

2.4.4 Zaštita od blještanja sunca

Prema Algoritmu, u proračunu solarnih dobitaka u odnosu na zaštitu od sunca koriste se dva faktora, $F_{C,H}$ (-) faktor naprave za zaštitu od pregrijavanja kada je naprava za zaštitu od sunca u otvorenom položaju i $F_{C,C}$ (-) faktor naprave za zaštitu od sunca kada je naprava u zatvorenom položaju. Dok je dozračena solarna energija na plohu prozora niža od 300 W/m^2, pretpostavlja se da je naprava za zaštitu od sunca u otvorenom položaju, a za dozračenu energiju veću od 300 W/m^2 naprava je u zatvorenom položaju. [73]

Ukoliko je riječ o vanjskoj zaštiti od pregrijavanja, opisani način korištenja značajno umanjuje solarne dobitke u trenutku kada je naprava u zatvorenom položaju (umanjenje 50 % do 75 %). U ljetnim mjesecima toliko veliko smanjenje solarnih dobitaka je energetski vrlo povoljno, dok je u zimskim mjesecima nepovoljno. Prema meteorološkim podacima Ministarstva, u sezoni grijanja u Zagrebu postoji 1085 sati s dozračenom energijom na vertikalne plohe većom od 300 W/m^2, što iznosi 21 % od ukupnog broja sati sezone grijanja, dok u Splitu postoji 2361 sat što iznosi 46 % trajanja sezone grijanja. [114]

Tijekom zime sunčevo zračenje rijetko će izazvati pregrijavanje, ali može izazvati neugodno blještanje uslijed niskog upada sunčevih zraka. Ukoliko se radi o unutarnjoj zaštiti od sunca, smanjenje solarnih dobitaka biti će svega 10 % do 25 %, što znači da je tijekom sezone grijanja energetski povoljnija unutarnja zaštita od sunca.

Veršić et al. (2019.) preporučaju izvedbu vanjske zaštite od sunca u svrhu sprječavanja pregrijavanja, i unutarnje zaštite od sunca u svrhu zaštite od blještanja kao energetski najpovoljniju varijantu [72].

Fang et al. (2024.) analiziraju zaštitu od blještanja sunca i uštede u ukupnoj potrošnji energije kroz pasivne mjere oblikovanja fasade, odnosno nagiba ostakljenih elemenata ili zasjenjenja s ciljem kontrole kuta upada sunca i blještanja. Veći nagibi fasade ili duži elementi zasjenjenja povoljni su za istočne i zapadne orijentacije otvora, a manji nagibi ili kraći elementi za južne.

Ukupna ušteda potrošnje energije primjenom istaka ili nagiba fasade u njihovom istraživanju varira od 5 % do 25 %. [115]

Gonçalves et al. (2024.) istražuju potencijal uštede energije dinamičnim fasadama, odnosno sustavima zaštite od sunca i provjetravanja koji se u realnom vremenu prilagođavaju vremenskim uvjetima. Automatizirani sustavi u njihovim analizama ostvaruju ukupne godišnje uštede od 10 % do 40 % pri čemu vanjska zaštita od sunca ima velik doprinos u zaštiti od pregrijavanja i blještanja. Međutim, upozoravaju da je potrebno ostvariti ravnotežu tih sustava jer u zimskom razdoblju vanjske naprave za zaštitu od blještanja umanjuju pasivne solarne dobitke ključne za uštede u sezoni grijanja. [116]

Trząski i Rucińska (2025.) na sličan način analiziraju uštede u energiji za rasvjetu uz korištenje automatiziranih sustava kontrole rasvjete, zaštite od sunca i reflektirajućih površina. Ukupne ostvarene uštede variraju od 46 % do 54 %, što uključuje potrošnju energije za grijanje, hlađenje, rasvjetu i pomoćne sustave, s tim da su najveće uštede ostvarene za hlađenje i rasvjetu. U svom radu također prepoznaju problem korištenja vanjske zaštite od sunca kao zaštite od blještanja radi smanjivanja pasivnih solarnih dobitaka. [117]

2.5 Isporučena energija i CO_2 emisije grijanja i hlađenja

Trenutno obavezan energetski standard u Europskoj uniji su zgrade gotovo nulte energije, a nadolazeći standard su zgrade nulte emisije. Oba tipa zgrada karakteriziraju optimalna razina energetske učinkovitosti i korištenje obnovljivih izvora energije. [13, 15] U obiteljskim kućama uobičajeni termotehnički sustavi koji upotrebljavaju obnovljive energente su dizalice topline i kotlovi na biomasu - drvene pelete ili sječku. S obzirom na nadolazeći energetski standard utemeljen na emisijama, bitno je razumijevanje odnosa isporučene energije i CO_2 emisija koje nastaju pri proizvodnji toplinske i rashladne energije kod raznih vrsta termotehničkih sustava i korištenih energenata.

Dizalice topline povoljne su u pogledu CO_2 emisija jer su emisije povezane s energentom, a potrošnja energenta ovisi o učinkovitosti sustava. Dizalice topline koriste se električnom energijom za predavanje ili preuzimanje toplinske energije iz okoliša. Njihova učinkovitost zbog toga je vrlo visoka. [17] Kod dizalica topline najčešće se iskorištava toplinska energija iz zraka za zagrijavanje vode za grijanje i hlađenje (dizalice topline zrak-voda) ili zračno grijanje ili hlađenje (dizalice topline zrak-zrak). Izračun CO_2 emisija nastalih korištenjem električne

energije mijenjaju se na godišnjoj razini i značajno se razlikuju od države do države (7 gCO_2/kWh u Švedskoj do 585 gCO_2/kWh u Estoniji), a razlog je različita zastupljenost fosilnih, obnovljivih i nuklearnih izvora u proizvodnji električne energije [118].

S obzirom na doseg tehnologije koja se primjenjuje u termotehničkim sustavima, njihove učinkovitosti prema vrstama puno su sličnijih vrijednosti. Staffell et al. (2012.) rade pregled dizalica topline za kućnu upotrebu u Europi. Zanima ih proizvodnja toplinske energije za grijanje i pripremu tople vode raznim vrstama dizalice topline. Prema njihovim rezultatima sezonske učinkovitosti dizalica topline zrak-voda za grijanje variraju od 1,8 do 3,2 uz tipične vrijednosti 2,8 do 3,0. [17]

Willem et al. (2017.) obrađuju karakteristike dizalica topline u Americi. Učinkovitosti raznih vrsta dizalica topline za grijanje prema njihovom istraživanju može varirati od 2,8 do 5,5 s tim da za suvremene dizalice topline s funkcijom grijanja i hlađenja prikazuju učinkovitost od 3,9. [18]

Priarone et al. (2020.) modeliraju potrošnju raznih vrsta dizalica topline u grijanju i hlađenju. Prema njihovim rezultatima za dizalice topline zrak-zrak, učinkovitosti u grijanju za hladne klimatske uvjete iznose od 4,2 do 5,0 dok učinkovitosti u hlađenju za tople klimatske uvjete iznose 3,3 do 4,2. [19]

Carroll et al. (2021.) daju pregled učinkovitosti dizalica topline za proizvodnju toplinske energije u realnim uvjetima. Raspon učinkovitosti koji bilježe varira od 1,2 do 3,2 za primjere u Engleskoj i Škotskoj. Slučajeve s niskim učinkovitostima obrazlažu kao pogreške u projektiranju i korištenju sustava, dok za idealne uvjete očekivane učinkovitosti variraju od 3,0 do 3,5. [20]

Wang et al. (2021.) analiziraju učinkovitosti dizalica topline u grijanju za različite klimatske uvjete i prema njihovim rezultatima učinkovitosti kreću se od 3,1 do 3,6 za hladne klime. Također daju i podatak o prosječnoj učinkovitosti u hlađenju od 4,2 za tople klime. [21]

Kotlovi na biomasu iskorištavaju toplinsku energiju sadržanu u energentu, najčešće drvenim peletima ili sječki. Zbog nesavršenosti procesa proizvodnje toplinske energije, učinkovitost kotlova znatno je niža u odnosu na dizalice topline [119]. Sagorijevanjem biomase nastaju velike količine lokalnog zagađenja, stoga kotlovi na biomasu nisu dozvoljeni u gusto naseljenim i visoko urbaniziranim područjima. [72]

Chandrasekaran et al. (2012.) bave se mjerenjem učinkovitosti komercijalnih visokoučinkovitih kotlova na biomasu. Prema njihovim rezultatima, za kotlove snage 150 kW učinkovitosti se kreću od 0,70 do 0,86 dok se za kotlove snage 500 kW učinkovitosti kreću od 0,75 do 0,91. [120]

Nocoń et al. (2024.) u laboratorijskim uvjetima analiziraju karakteristike suvremenog automatiziranog kotla na biomasu s nadograđenim izmjenjivačima topline. Ovisno o konfiguraciji nadogradnji postižu učinkovitosti od 0,84 do 0,96. [121]

Učinkovitosti kotlova na biomasu višestruko su manje od učinkovitosti dizalica topline. Svejedno, u pogledu emisija predstavljaju vrlo povoljno rješenje jer specifične emisije drvenih peleta i sječke variraju od 34,4 do 42,4 gCO_2/kWh u odnosu na specifične emisije električne energije od 234,8 gCO_2/kWh u Hrvatskoj prema važećim faktorima CO_2 emisija. [122]

3 POSTAVKE PRORAČUNSKOG MODELA

Referentni računski model obiteljske kuće za ovo istraživanje rezultat je numeričke analize proračuna iz projekata racionalne uporabe energije i računskih vrijednosti promatranih čimbenika za obiteljske kuće projektirane u razdoblju od 2017. do 2025. godine. Statistička obrada podataka uključila je proračune potrošnje energije za 151 projekt obiteljske kuće u kontinentalnom i primorskom području republike Hrvatske iz ukupno 84 različitih mjesta i 70 arhitekta kao autora kuća, a referentni energetski modeli dobiveni su kao prosjek statističke obrade analiziranih kuća. Numerički podaci svih analiziranih projekata racionalne uporabe energije potrebnih za generiranje referentnog energetskog modela prikazani su tabelarno u Prilogu 1. U ovom poglavlju opisani su načini obrade podataka i izračuna ulaznih vrijednosti potrebnih za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje.

3.1 Odnos arhitektonskog oblikovanja i numeričkih podataka

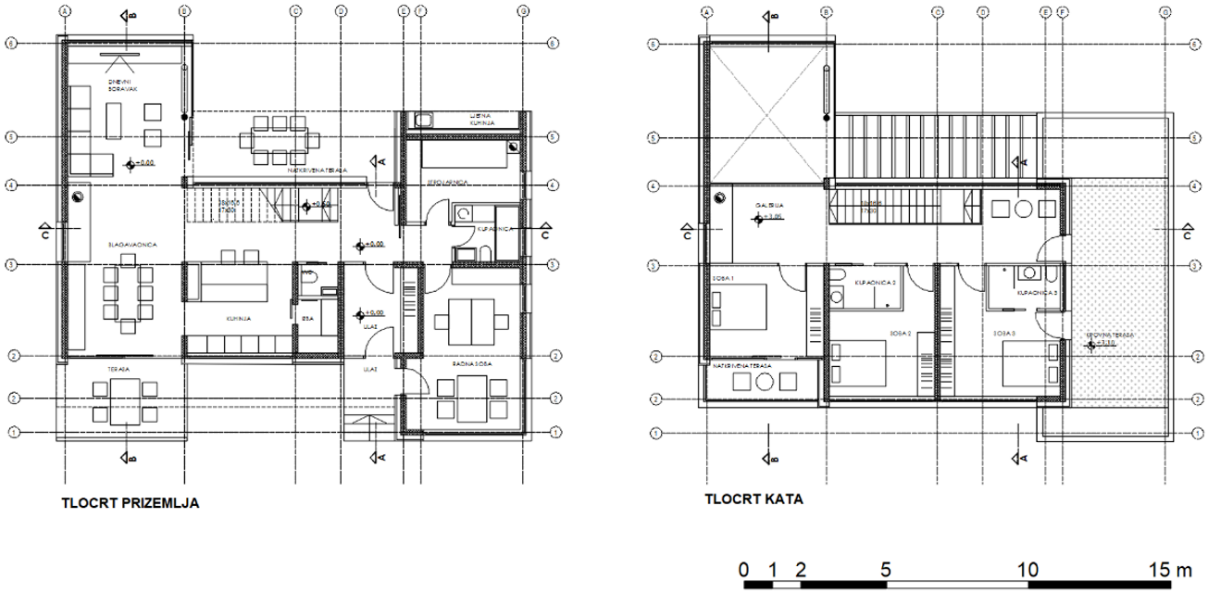
Proračun potrošnje energije u zgradama provodi se računskim putem. Ulazni parametri sastoje se od niza geometrijskih i fizikalnih vrijednosti pojedinih čimbenika energetske učinkovitosti koje ovise o fizičkim karakteristikama zgrade i njezinih sastavnih elemenata. To znači da svaki od čimbenika arhitektonskog oblikovanja, a koji je vezan za energetsku učinkovitost, možemo kvantificirati u jednu geometrijsku ili fizikalnu vrijednost. Primjerice, debljina toplinske izolacije, ploština prozirnih otvora, faktor naprave za zaštitu od pregrijavanja itd. Na taj način dobivamo niz numeričkih vrijednosti potrebnih za proračun potrošnje energije.

U projektima racionalne uporabe energije analizirale su se geometrijske i fizikalne vrijednosti sljedećih čimbenika, od kojih su prvi navedeni oni koji predstavljaju i elemente arhitektonskog oblikovanja:

1. Faktor oblika, f_0 (m^{-1})
2. Debljina toplinske izolacije u zidovima, d_{TI} (cm)
3. Udio otvora u ovojnici, f_{win} (-)
4. Orijentacija otvora, δ (°)
5. Faktor naprave za zaštitu od pregrijavanja, F_C (-)
6. Udio poda na tlu u ovojnici, $f_{gr,fl}$ (-) i udio zida prema tlu u ovojnici, $f_{gr,wall}$ (-)
7. Volumen grijanog prostora, V_e (m^3)
8. Visina etaže, h (m)

9. Izloženi opseg zidova u kontaktu s tlom, P (m)
10. Udio ovojnice iznad vanjskih prostora, $f_{int,e}$ (-)
11. Udio krova u ovojnici, f_{roof} (-)
12. Udio zidova u ovojnici prema negrijanim prostorijama, $f_{wallt,u}$ (-)
13. Udio poda u ovojnici iznad negrijanih prostora, $f_{int,u}$ (-)

Slika 17 i Tablica 1 prikazuju primjer kvantifikacije arhitektonskog oblikovanja u geometrijske i fizikalne vrijednosti potrebne za proračun. Geometrijske karakteristike dobivene su očitavanjem ploština i ostalih dimenzija konstrukcijskih elemenata zgrade. Fizikalne karakteristike elemenata određuju su jednim dijelom iz geometrijskih podataka, a drugim dijelom iz fizikalnih karakteristika korištenih materijala. Tablica 1 prikazuje sve geometrijske i fizikalne parametre potrebne za proračun godišnje energije za grijanje i hlađenje.



a) tlocrti



b) pročelja

Slika 17: a) i b) Obiteljska kuća, Tatjana Liktar Elez, okolica Samobora, Hrvatska [9]

Tablica 1: Geometrijski i fizikalni parametri zgrade (primjer)

Geometrijske karakteristike

V_e (m^3)	Volumen grijanog dijela zgrade	868,98
V (m^3)	Volumen grijanog zraka	604,15
A_f (m^2)	Bruto ploština zgrade	279,34
A_K (m^2)	Korisna ploština zgrade	208,00
$A_{wall,N}$ (m^2)	Ploština zida prema sjeveru	51,00
$A_{wall,S}$ (m^2)	Ploština zida prema jugu	54,76
$A_{wall,E}$ (m^2)	Ploština zida prema istoku	40,30
$A_{wall,W}$ (m^2)	Ploština zida prema zapadu	75,19
$d_{TI,wall}$ (cm)	Debljina toplinske izolacije zida	16,0
$A_{win,N}$ (m^2)	Ploština prozora prema sjeveru	50,16
$A_{win,S}$ (m^2)	Ploština prozora prema jugu	49,52
$A_{win,E}$ (m^2)	Ploština prozora prema istoku	37,04
$A_{win,W}$ (m^2)	Ploština prozora prema zapadu	2,20

[9] Ljubazno dopuštenje autora: Tatjana Liktar Elez, Zagreb. Korišteno uz izričito dopuštenje za potrebe ovoga doktorskog rada

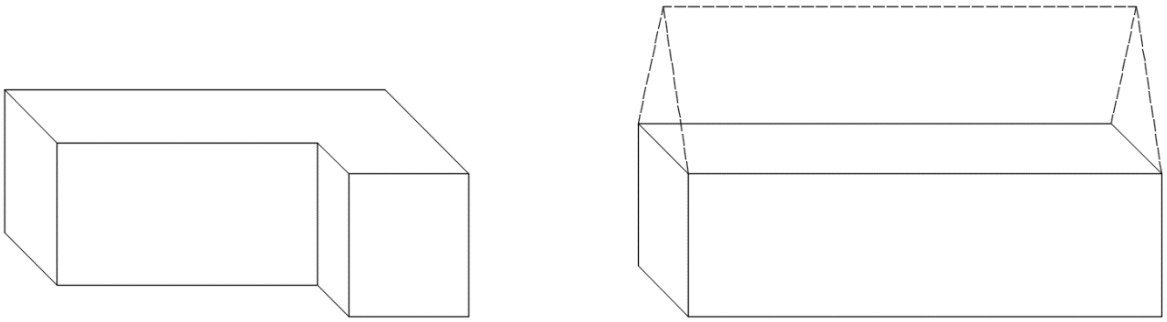
F_f (-)	Udio ostakljenja u otvorima	0,81
A_{roof} (m^2)	Ploština krova	169,87
$A_{int,e}$ (m^2)	Ploština poda iznad vanjskog prostora	0,00
$A_{gr,fl}$ (m^2)	Ploština poda na tlu	129,90
$A_{gr,wall}$ (m^2)	Ploština zida prema tlu	0,00
P (m)	Izloženi opseg poda grijanog prostora	65,40
$A_{wall,u}$ (m^2)	Ploština zida prema negrijanoj prostoriji	0,00
$A_{int,u}$ (m^2)	Ploština poda iznad negrijane prostorije	0,00
P_u (m)	Izloženi opseg poda negrijane prostorije	0,00

Fizikalne karakteristike

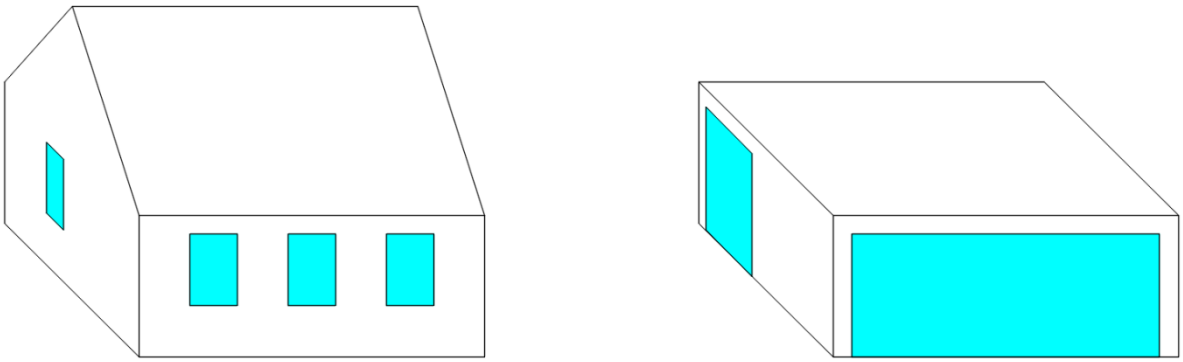
cm (MJ/K)	Akumulativnost topline	72,63
$H_{g,int}$ (W/m^2)	Unutarnji dobici topline	5
n (h^{-1})	Broj izmjena zraka	0,5
n_{pas} (h^{-1})	Broj izmjena zraka pri pasivnom hlađenju	0,5
$t_{start,HC}$ (h)	Početak rada sustava grijanja/hlađenja	7
$t_{op,HC}$ (h)	Vrijeme rada sustava grijanja/hlađenja	17
$n_{op,week}$ (h)	Broj dana rada sustava u tjednu	7
U_{wall} ($W/(m^2K)$)	Koeficijent prolaska topline zida	0,21
α_{zid} (-)	Apsorpcijski koeficijent površine zida	0,6
U_{win} ($W/(m^2K)$)	Koeficijent prolaska topline prozora	1,48
g_L (-)	Propuštanje ukupnog sunčevog zračenja okomito na površinu	0,5
$F_{C,C}$ (-)	Faktor naprave za zaštitu od pregrijavanja	0,3
$F_{C,G}$ (-)	Faktor naprave za zaštitu od blještanja	-
U_{roof} ($W/(m^2K)$)	Koeficijent prolaska topline krova	0,17
U_{floor} ($W/(m^2K)$)	Koeficijent prolaska topline poda na tlu	0,34
$U_{gr,wall}$ ($W/(m^2K)$)	Koeficijent prolaska topline zida prema tlu	-
Ψ (W/(mK))	Linijski koeficijent toplinskog mosta na spoju poda na tlu i vanjskog zida	0,25
$U_{int,e}$ ($W/(m^2K)$)	Koeficijent prolaska topline poda iznad vanjskog zraka	-

$U_{wall,u}$ (W/(m^{2}K))	Koeficijent prolaska topline zida prema negrijanoj prostoriji	-
$U_{int,u}$ (W/(m^{2}K))	Koeficijent prolaska topline poda iznad negrijane prostorije	-

Povezivanje arhitektonskog oblikovanja i numeričkih podataka moguće je samo u smjeru generiranja numeričkih vrijednosti iz oblikovanja. Obrnuti proces, u kojem bi iz numeričkih vrijednosti željelo ekstrapolirati oblikovanje zgrade pokazao bi se nemogućim. Podaci potrebni za proračun potrošnje energije ne obuhvaćaju dovoljno podataka iz kojih bi se moglo precizno zaključiti ili izračunati kakvo je oblikovanje zgrade. Primjerice, ploha određene ploštine može imati oblik kvadrata, pravokutnika ili neki drugi nepravilni oblik. Nadalje, iz ploštine otvora u vanjskim zidovima nije moguće zaključiti o kakvom obliku prozora je riječ i na kojem mjestu u plohi zida se nalazi. Skice u nastavku prikazuju nekoliko primjera različitog arhitektonskog oblikovanja, ali jednakih geometrijskih i fizikalnih vrijednosti potrebnih za proračun:



Slika 18: Forme (zgrade) različitog oblika, ali jednakog faktora oblika



Slika 19: Otvori različitog oblika i veličine, ali jednakog prosječnog otklona od ekvatora (jednake orijentacije)

Budući da je arhitektonsko oblikovanje, odnosno izgled zgrade, nemoguće odrediti samo iz brojčanih vrijednosti pojedinih čimbenika, ali potrošnju energije je moguće, vrednovanje čimbenika arhitektonskog oblikovanja i njihova utjecaja na energetsku učinkovitost zgrade provedeno je isključivo računskim putem.

3.2 Izračun geometrijskih i fizikalnih veličina čimbenika arhitektonskog oblikovanja

3.2.1 Faktor oblika

Faktor oblika odnos je ploštine ovojnice i volumena grijanog prostora. Manje vrijednosti faktora oblika su energetski povoljnije jer to znači manju ploštinu ovojnice kroz koju se gubi toplina u odnosu na grijani volumen. Pri određivanju prosječnog faktora oblika za referentni model potrebno je uzeti u obzir da u izračun ovog faktora ulaze dvodimenzionalne i trodimenzionalne veličine. Ukoliko bismo od svih promatranih kuća uzeli prosjek volumena, ploštine ovojnice i faktora oblika, primijetili bismo pogrešku u izračunu, odnosno dobiveni prosjeci ne bi odgovarali formuli:

$$f_o = \frac{A}{V_e} \, (\mathrm{m}^{-1}) \qquad (1)\ [1]$$

gdje su:

f_o – faktor oblika (m^{-1}),

A – ploština ovojnice zgrade (m^2),

V_e – volumen grijanog prostora (m^3).

Prosjek veličine zgrade određen je prema obujmu grijanog prostora V_e (m^3) budući da prilikom percipiranja zgrada prvenstveno primjećujemo voluminoznost. Iz tog razloga bilo je potrebno veličinu svake analizirane zgrade usporediti s prosječnim obujmom grijanog prostora V'_e (m^3) kako bi se mogao odrediti prosječni faktor oblika za referentni model. Svaka analizirana zgrada drugačije je veličine od prosjeka, a isto vrijedi i za ploštinu ovojnice i faktor oblika. Budući da ploština ovojnice ovisi o duljini, širini i visini zgrade, potrebno je uzeti u obzir promjenu veličine u sve tri dimenzije. Linearna promjena duljina jednaka je trećem korijenu promjene volumena. Primjerice, povećanje volumena kocke za 20 % rezultira produljenjem stranica za 6,3 %. Nadalje, promjena ploštine vezana je za promjenu duljine s drugom potencijom. Dakle povećanje duljine stranice kocke za 6,3 % rezultira povećanjem ploštine za 12,9 %. Nakon što

smo odredili koliko se mijenja ploština ovojnice u skladu s promjenom obujma zgrade, a bez promjene oblika, možemo izračunati faktor oblika za uprosječeni volumen:

$$f'_o = \sqrt[3]{\left(\frac{V'_e}{V_e}\right)^2}\,\frac{A}{V'_e}\,(\mathrm{m}^{-1}) \tag{2}$$

Ploštinu ovojnice promatrane zgrade možemo supstituirati izrazom:

$$A = f_o\,V_e\,(\mathrm{m}^2) \tag{3}$$

$$f'_o = \sqrt[3]{\left(\frac{V'_e}{V_e}\right)^2}\,\frac{f_o\,V_e}{V'_e}\,(\mathrm{m}^{-1}) \tag{4}$$

Pojednostavljivanje izraza daje nam formulu za izračun koja uključuje volumen i faktor oblika promatrane zgrade te prosječan volumen:

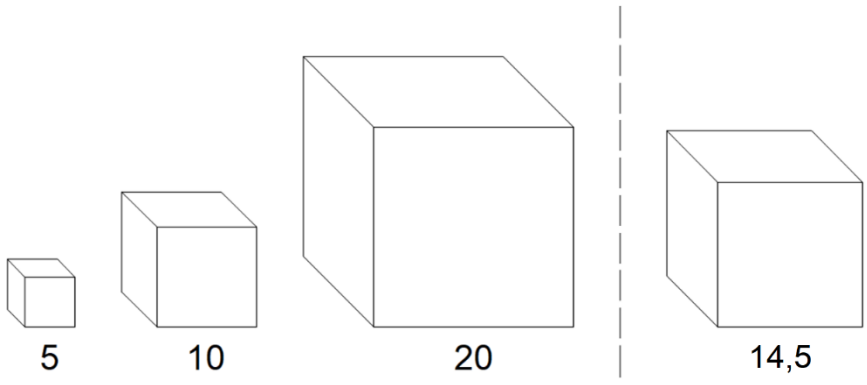
$$f'_o = f_o\sqrt[3]{\frac{V_e}{V'_e}}\,(\mathrm{m}^{-1}) \tag{5}$$

gdje su:

f'_o – faktor oblika za promatranu zgradu čiji je obujam usklađen sa prosječnim obujmom, a bez promjene oblika zgrade (m^{-1}),

V'_e – prosječan obujam grijanih prostora (m^3).

Na primjeru kocaka različitih dimenzija moguće je vidjeti primjenu opisane formule. Kad bismo obujam svake od kocaka povećali ili smanjili na prosječan obujam, izračun novog faktora oblika bio bi u skladu sa svim ostalim dimenzijama koje definiraju oblik kocke.



Slika 20: Kocke različitog faktora oblika

Tablica 2: Izračun faktora oblika za kocke različite veličine

R. br.	**Duljina stranice** a **(m)**	**Oplošje kocke** A **(m²)**	**Volumen** V **(m³)**	**Faktor oblika** f_o **(m⁻¹)**
1.	5,0	150	125	1,20
2.	10,0	600	1000	0,60
3.	20,0	2400	8000	0,30
	Geometrijske vrijednosti kocke čiji je volumen jednak prosjeku kocaka 1 do 3			
4.	14,5	1259,6	3041,7	0,41

Na ovaj način, za sve analizirane zgrade, izračunat je faktor oblika za obujam grijanog prostora sveden na prosječnu vrijednost, uz zadržavanje izvornog oblika. Tako izračunati faktori oblika za sve zgrade mogu se koristiti za izračun prosjeka faktora oblika, odnosno za određivanje referentnog faktora oblika.

3.2.2 Debljina toplinske izolacije i toplinska izolativnost ovojnice

Vanjski zidovi u prosjeku predstavljaju najveći dio ovojnice zgrade. Iz tog razloga toplinska izolativnost zidova, ovisna o debljini i vrsti toplinske izolacije, ima velik utjecaj na energetsku učinkovitost jer su gubici kroz vanjske zidove najveći transmisijski gubici u zgradi. Veće debljine toplinske izolacije umanjuju transmisijske gubitke topline kroz zidove. Međutim, prilikom projektiranja zgrada potrebno je ostvariti što bolju tlocrtnu dispoziciju i omjer korisne i bruto površine. Debljina toplinske izolacije u vanjskim zidovima smanjuje korisnu površinu zgrade i predstavlja veću inicijalnu investiciju za investitora, stoga u oblikovanju katkad nisu poželjne prevelike debljine u odnosu na one propisane tehničkim propisom.

Potrebna debljina izolacije u zidu ovisi o dozvoljenom koeficijentu prolaska topline U_{max} (W/(m²K)) i vrsti toplinske izolacije koja se primjenjuje, odnosno njezinom koeficijentu provodljivosti topline λ (W/mK). Najčešća izolacija zidova je mineralna vuna i ekspandirani polistiren. Tablica 3 prikazuje karakteristike najčešće korištenih toplinskih izolacija zidova u pogledu provodljivosti topline.

Tablica 3: Toplinske karakteristike najčešće korištenih toplinskih izolacija

Toplinska izolacija	**λ (W/mK)**
Ekspandirani polistiren, EPS	0,039
Grafitni ekspandirani polistiren, EPS GO	0,032
Mineralna vuna, MW fasadne ploče	0,035

Koeficijent prolaska topline U (W/(m^{2}K)) građevnog dijela pokazatelj je koliko topline prolazi kroz građevni dio površine 1 m^2 pri razlici temperatura od 1 °C. Što je veća debljina toplinske izolacije d_{ti} (cm), U koeficijent je manji. Odnos U koeficijenta i debljine toplinske izolacije je obrnuto proporcionalan. Koeficijent prolaska topline građevnog dijela određuje se prema formuli:

$$U = \frac{1}{R_{si}+\sum_i^n \frac{d}{\lambda}+R_{se}} \text{ (W/(m}^2\text{K))} \qquad (6)\ [73]$$

gdje su:

R_{si} – plošni otpor prijelazu topline na unutarnju plohu građevnog dijela (m^{2}K/W),

R_{se} – vanjski plošni otpor prijelazu topline s vanjske plohe građevnog dijela (m^{2}K/W),

d – debljina pojedinog sloja građevnog dijela (m).

Plošni otpori prijelaza topline ovise o smjeru kretanja topline. Tablica 4 prikazuje plošne otpore prijelazu topline.

Tablica 4: Plošni otpori prijelaza topline R (m^{2}K/W) [73]

Plošni otpori prijelaza topline		**R (m^{2}K/W)**
Unutarnji plošni otpori, R_{si} (m^{2}K/W)	Toplinski tok prema gore	0,10
	Toplinski tok prema vodoravan	0,13
	Toplinski tok prema dolje	0,17
Vanjski plošni otpor, R_{se} (m^{2}K/W)		0,04

Budući da se u vanjskim zidovima koriste razni građevni materijali i toplinske izolacije različitih karakteristika, toplinsko-izolacijska kvaliteta vanjskih zidova iskazana je kroz prosječne *U* vrijednosti, a prosječna debljina toplinske izolacije iskazana u odnosu na toplinsku izolaciju od mineralne vune toplinske provodljivosti λ = 0,035 W/mK prema formuli:

$$d_{ti} = 100\,\lambda\left(\frac{1}{U} - R_{si} - R_{se}\right)(\text{cm}) \tag{7}$$

gdje je debljina toplinske izolacije d_{ti} iskazana u cm.

Debljina toplinske izolacije i vanjskog zida izračunata je iz željene *U* vrijednosti zida prema formuli:

$$d_{wall} = \lambda\left(\frac{1}{U_{wall}} - R_{si} - R_{se}\right) + 0{,}25\ (\text{m}) \tag{8}$$

gdje je:

U_{wall} –koeficijent prolaska topline zida (W/(m^{2}K))

d_{wall} – debljina vanjskog zida (m)

R_{si}, R_{se} – plošni otpori prijelaza topline (m^{2}K/W)

λ – koeficijent provodljivosti topline (W/mK), debljina zida se računa se u odnosu na provodljivost topline mineralne vune, λ = 0,035 W/mK.

Pretpostavljena debljina nosive konstrukcije je 25 cm, a toplinski otpor iste je zanemaren iz razloga što masivne nosive konstrukcije (blok opeka bez ispune mineralnom vunom i armirani beton) imaju desetke puta veću provodljivost topline u odnosu na mineralnu vunu.

Energetska učinkovitost ovojnice vezana je s fizikalnima karakteristikama, dok je arhitektonsko oblikovanje vezano za geometrijske karakteristike zgrade i njezinih elemenata.

3.2.3 Udio prozirnih otvora u ovojnici

Akumulativnost topline grijanih prostora jedan je od najbitnijih parametara pri dimenzioniranju sustava grijanja [123]. Fizikalno ponašanje ovojnice u pogledu prolaska i akumulativnosti topline značajno se razlikuje za masivne zidove i staklene plohe. Današnji doseg tehnologije je takav da zidovi s toplinskom izolacijom u prosjeku postižu pet puta bolja toplinsko izolacijska

svojstva od prozora u pogledu zaštite od gubitka topline [124]. Međutim, prozirni dijelovi ovojnice omogućavaju solarne dobitke koji mogu imati pozitivan utjecaj na energetsku učinkovitost. Udio ostakljenja iskazan je u odnosu na ovojnicu grijanog prostora:

$$f_{win} = \frac{A_{win.N}+A_{win.E}+A_{win.S}+A_{win.W}}{A} \text{ (-)} \quad (9)$$

Toplinsko-fizikalne karakteristike prozirnih građevnih dijelova koje su potrebne za izračun su:

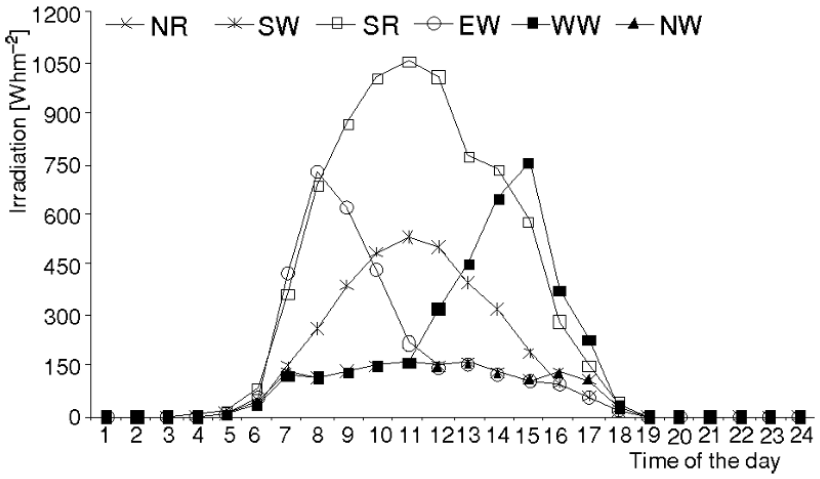
1. Koeficijent prolaska topline prozora U_w (W/(m^{2}K))
2. Koeficijent propuštanja sunčevog zračenja kroz ostakljenje $g_{\perp}$ (-)
3. Udio ostakljenja u otvoru F_f (-)
4. Faktor naprave za zaštite od sunca F_C (-)

Koeficijent prolaska topline U_w (W/(m^{2}K)) određen je kao prosjek promatranih primjera. Prosječne vrijednosti sugeriraju da je u oba slučaja riječ o prozorima s dvostrukim IZO staklima s jednim staklom niske emisije, low-e. Za takva ostakljenja karakterističan je koeficijent propuštanja sunčevog zračenja kroz ostakljenje $g_{\perp} = 0,6$. Udio ostakljenja u otvoru F_f (-) za klasične prozore i staklene stijene iznosi 0,7. Faktor zaštite naprave od pregrijavanja obrađen je u poglavlju Zaštita od pregrijavanja.

3.2.4 Orijentacija otvora

Solarni dobici topline u zgradama iskorištavaju se najvećim dijelom kroz prozirne elemente ovojnice i zanemarivim dijelom kroz neprozirne građevne dijelove. Zimi oni smanjuju potrebu za grijanjem i poželjno ih je maksimalno iskoristiti, dok ljeti povećavaju potrebu za hlađenjem pa je potrebna adekvatna zaštita od pregrijavanja. Upravo zato orijentacija zgrade ima bitnu ulogu u energetskoj učinkovitosti, a najpovoljnija orijentacija je prema suncu, odnosno na sjevernoj polutci prema jugu, a na južnoj prema sjeveru.

Kretanje Sunca preko horizonta rezultira različitim razinama zračenja za različite orijentacije u različito doba dana. Slika 21 prikazuje dnevno solarno zračenje na geografskoj širini 44° (za orijentaciju jug oznaka SW, istok EW, zapad WW i sjever NW).



Slika 21: Solarno zračenje za ljetni dan za različite orijentacije [125]

Usporedimo li mjesečno solarno zračenje za meteorološku postaju Zagreb Maksimir (Tablica 5) i Split Marjan (Tablica 6) možemo vidjeti da je zimi najmanja količina zračenja na sjevernoj orijentaciji, a najveća na južnoj, dok je ljeti najmanja količina zračenja na sjevernoj orijentaciji a najveća na istoku i zapadu.

Tablica 5: Solarna iradijacija, *I* (MJ/m^2) za Zagreb Maksimir [10]

nagib	orijentacija	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
90	S	166	227	307	309	315	299	324	339	349	323	180	119
90	SE	135	193	290	336	373	365	395	386	347	280	148	97
90	SW	135	193	290	336	373	365	395	386	347	280	148	97
90	E	87	136	238	319	396	410	435	383	296	202	97	63
90	W	87	136	238	319	396	410	435	383	296	202	97	63
90	NE	51	72	125	185	291	327	328	239	136	95	56	41
90	NW	51	72	125	185	207	327	214	239	135	95	56	41
90	N	51	72	125	164	207	214	214	187	135	95	56	41

Tablica 6: Solarna iradijacija, *I* (MJ/m^2) za Split Marjan [10]

nagib	orijentacija	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
90	S	335	376	398	339	330	316	342	376	418	476	347	298
90	SE	263	313	378	377	406	413	444	445	422	409	276	232
90	SW	263	313	378	377	406	413	444	445	422	409	276	232
90	E	153	207	304	360	440	480	504	447	358	284	165	130
90	W	153	207	304	360	440	480	504	447	358	284	165	130
90	NE	64	81	133	202	319	374	370	265	143	104	68	57
90	NW	64	81	133	202	208	374	210	265	140	104	68	57
90	N	64	81	133	168	208	211	210	186	140	104	68	57

[10] Tablice iz računalnog softvera EnCert-HR3 ver.: 3.12, Klimatski podaci

Orijentacija se izražava kao azimut α (°) gdje azimut od 0° odgovara orijentaciji prema sjeveru, 90° prema istoku, 180° prema jugu i 270° prema zapadu [126]. Budući da su dozračene energije sunčevog zračenja za istok i zapad gotovo jednake, možemo ih smatrati jednakovrijednim u pogledu solarnih dobitaka i energetske učinkovitosti. Na taj način orijentaciju možemo vrednovati u odnosu na ekvator, sjever i jug. Kut koji označava otklon od ekvatora naziva se kut deklinacije δ (°) [127]. Deklinacija od +90° označava sjevernu orijentaciju, 0° orijentaciju prema ekvatoru (istok ili zapad) i -90° prema jugu. Za referentne modele izračunata je ploština otvora ovisno o orijentaciji temeljem čega je određen prosječni otklon otvora od ekvatora prema formuli:

$$\delta = \frac{0°A_{win.E}+0°A_{win,W}+90°A_{win,N}-90°A_{win,S}}{A_{w,tot}} (°) \quad (10)$$

Odnosno:

$$\delta = 0°f_{win,E} + 0°f_{win,W} + 90°f_{win,N} - 90°f_{win,S} (°) \quad (11)$$

gdje je:

δ – kut otklona od ekvatora (°)

$A_{w,E,W,N,S}$ – ploština prozirnih otvora prema orijentacijama svijeta (m^2)

$A_{w,tot}$ – ukupna ploština prozirnih otvora zgrade (m^2)

$f_{win,N,E,S,W}$ – udio ostakljenih otvora prema orijentaciji (-)

Nakon određivanja orijentacije svake analizirane zgrade, izračunat je udio otvora prema orijentacijama te prosječna orijentacija kuća u kontinentalnoj i primorskoj klimi.

3.2.5 Zaštita od pregrijavanja

Efekt staklenika uzrokovan je sunčevim zračenjem koje pretežito sadrži kratkovalno zračenje (vidljiva svjetlost), i dugovalno zračenje (infracrveno zračenje - IC). IC zračenje apsorbira se u pojedinim plinovima u atmosferi i na površini planeta. Vidljivi spektar zračenja gotovo uopće se ne apsorbira u plinovima atmosfere, već na površini planeta. Apsorpcijom vidljivog spektra zračenja dolazi do povećanja temperature i otpuštanja dugovalnog, infracrvenog zračenja. [128] Jednak efekt uzrokuje zagrijavanje u zgradama kroz prozirne dijelove ovojnice. Vidljiva

svijetlost koja kroz ostakljenje ulazi u unutarnji prostor većinom će se apsorbirati, a jedan vrlo malen dio će se reflektirati van. Apsorbirani dio vidljivog zračenja rezultira povećanjem topline ploha, odnosno zagrijavanjem interijera. Iz tog razloga najučinkovitija vrsta zaštite od solarnog zračenja je ona koja će spriječiti njegov prolaz kroz ostakljenje. Tablica 7 prikazuje udio solarnog zračenja koje prolazi u interijer kroz određenu napravu za zaštitu od sunca.

Tablica 7: Faktor umanjenja prolaska solarnog zračenja različitih naprava za zaštitu od pregrijavanja, F_C (-) [1]

Redni broj	Naprava za zaštitu od sunčeva zračenja	F_c (-)
1.	Bez naprave za zaštitu od sunčeva zračenja	1
2.	Naprava s unutrašnje strane ili između stakala	
2.1	– bijele ili reflektirajuće površine i malene transparentnosti[a)]	0,75
2.2	– svijetle boje ili malene transparentnosti	0,80
2.3	– tamne boje ili povišene transparentnosti	0,90
3.	Naprava s vanjske strane	
3.1	– žaluzine, lamele koje se mogu okretati, otraga provjetravano	0,25
3.2	– žaluzine, rolete, kapci (škure, grilje)	0,30
4.	Strehe, lođe[b)]	0,50
5.	Markize, gore i bočno provjetravane[b)]	0,40

[a)] Transparentnost naprave za zaštitu od sunčeva zračenja manja od 15% smatra se malenom, a transparentnost u iznosu 15% ili većem smatra se povišenom.

[b)] Navedena vrijednost primjenjuje se za slučaj kad je spriječeno direktno osunčanje prozora.

Iz navedenih faktora umanjenja prolaska sunčeva zračenja, F_C (-) za pojedinu napravu vidljivo je da su najučinkovitije vanjske naprave, a najmanje učinkovite unutarnje. Oznaka $F_{C,H}$ (-) koristi se za faktor umanjenja prolaska sunčeva zračenja u sezoni grijanja (engl. *Heating*), a $F_{C,C}$ (-) u sezoni hlađenja (engl. *Cooling*).

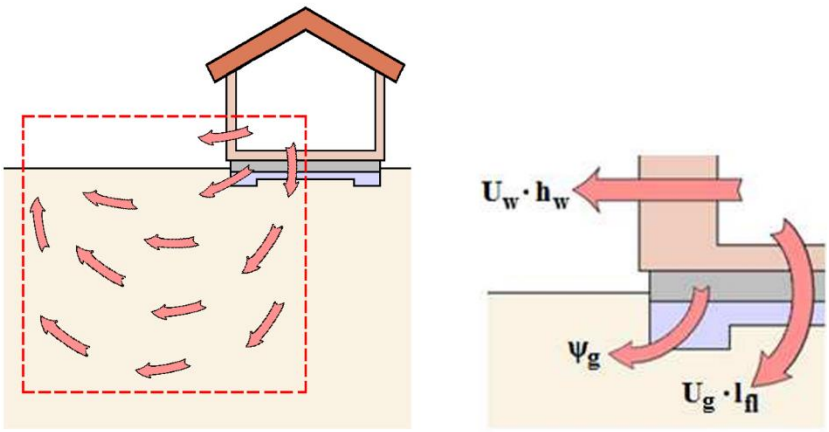
Tablica 5 i Tablica 6 prikazuju dozračenu energiju za različite orijentacije u kontinentalnoj i primorskoj klimi. Tijekom ljeta najveća količina dozračene energije je na istočnoj i zapadnoj orijentaciji, zatim na južnoj i najmanje na sjevernoj. Budući da otvori sjeverne orijentacije nisu izloženi izravnom zračenju njihov doprinos zagrijavanju interijera je minimalan. Za svaku zgradu određen je prosječan faktor umanjenja prolaska sunčeva zračenja naprave zaštite od sunca u zatvorenom položaju, F_C (-), kao težinski faktor za sve orijentacije osim sjevera prema formuli:

$$F_C = \frac{F_{C,E}A_{win.E}+F_{C,W}A_{win,W}+F_{C,S}A_{win,S}}{A_{win,E}+A_{win,W}+A_{win,S}} \text{ (-)} \qquad (12)$$

3.2.6 Kontakt ovojnice s tlom

Zbog velike toplinske inercije, već na malim dubinama, temperature tla kroz godinu se znatno manje mijenjaju nego temperatura zraka. Na dubini od 2 m, godišnje oscilacije temperature iznose do 5 °C dok temperature zraka na godišnjoj razini variraju u rasponu od 30 do 40 °C. [129] Toplinski gubici preko tla zimi znatno su manji nego prema vanjskom zraku, a tijekom ljeta niža temperatura tla hladi zgradu. Iz tog razloga možemo zaključiti da je kontakt s tlom povoljan čimbenik u energetskoj učinkovitosti.

Gubitak topline preko tla ovisi o više faktora: vrsti tla, koeficijentu prolaska topline ovojnice prema tlu, ploštini poda u dodiru s tlom, ploštini zidova prema tlu, dubini ukapanja u tlo i izloženom opsegu tla ili temelja, mjesečnim i godišnjim temperaturama itd. Izloženi opseg tla predstavlja kontakt poda grijanog i vanjskog prostora. Na tom mjestu toplinski gubitak ovisi i o toplinskom mostu na mjestu spoja temelja i vanjskog zida. [130]



Slika 22: Toplinski gubitak preko izloženog opsega poda na tlu [130]

Dio ovojnice u dodiru s tlom računat je kao udio poda $f_{fl,gr}$ (-) i udio zida prema tlu $f_{gr,wall}$ (-) u ovojnici zgrade. Izloženi opseg poda, P (m), za svaku analiziranu zgradu izračunat je u odnosu na referentni obujam V'_e (m^3).

$$P' = P \cdot \sqrt[3]{\frac{V'_e}{V_e}} \text{ (m)} \tag{13}$$

3.3 Izračun geometrijskih i fizikalnih veličina ostalih čimbenika energetske učinkovitosti potrebnih za proračun potrošnje energije

Potrebni podaci za proračun potrošnje energije uključuju i niz čimbenika koji nisu predmet ovog istraživanja. Ostali podaci koji su potrebni za izračun su ploštine i koeficijenti prolaska topline sljedećih građevnih dijelova:

1. Međukatna konstrukcija iznad otvorenog prostora
2. Krov
3. Ovojnica prema negrijanoj prostoriji

Vrednovanje pojedinog čimbenika arhitektonskog oblikovanja u energetskoj učinkovitosti provedeno je za njihove najpovoljnije, prosječne i najnepovoljnije geometrijske i fizikalne vrijednosti. Sve ostale geometrijske vrijednosti i fizikalne karakteristike energetskog modela izračunate su temeljem 6 identificiranih čimbenika arhitektonskog oblikovanja prema formulama opisanim u ovom poglavlju.

Ulazne varijable u izračun fizikalno-geometrijskih karakteristika modela su:

- faktor oblika, f_o (m^{-1})
- koeficijent prolaska topline zida, U ($W/(m^2K)$)
- udio ostakljenih otvora u ovojnici, f_{win} (-)
- udio otvora prema orijentacijama, $f_{win,N,E,S,W}$ (-)
- faktor zaštite naprave od pregrijavanja, $F_{C,C}$ (-)
- udio poda na tlu, $f_{gr,fl}$ (-)
- udio zida prema tlu, $f_{gr,wall}$ (-)

Konstante u izračunu fizikalno-geometrijskih karakteristika su prosječne vrijednosti:

- volumen grijanog prostora V_e (m^3)
- volumen grijanog zraka V (m^3)
- bruto površina, A_f (m^2)
- korisna površina, A_k (m^2)
- akumulativnost topline, cm (MJ/K)
- udio međukatne konstrukcije iznad vanjskog zraka, $f_{int,e}$ (-)
- udio zidova prema negrijanoj prostoriji, $f_{wall,u}$ (-)

- udio međukatne konstrukcije iznad negrijane prostorije, $f_{int,u}$ (-)

3.3.1 Obujam i ploština zgrade

Volumen grijanog prostora V_e (m^3) predstavlja dio zgrade unutar ovojnice prema vanjskom ili negrijanom prostoru. To je bruto volumen, odnosno onaj koji obuhvaća volumen grijanog zraka V (m^3), sve zidove i horizontalne konstrukcije. Volumen grijanog prostora referentnog modela V'_e (m^3) određen je kao prosjek obujma grijanog prostora promatranih zgrada.

Temeljem prosječnog volumena grijanog prostora i visine etaže h (m) određene su bruto površine A_f (m^2) i korisne površine kuća A_k (m^2), te volumen grijanog zraka. Svi ovi parametri imaju utjecaj na potrošnju energije u zgradi. Akumulativnost topline, cm (MJ/K), ovisi o bruto površini zgrade A_f (m^2) i plošnoj masi zidova. Plošna masa zidova nije analizirana već je pretpostavljena srednja plošna masa od 250 do 400 kg/m^2. [73]

Bruto površina zgrade izračunata je iz volumena grijanog prostora i visine etaže:

$$A_f = \frac{V_e}{h} \text{ (m}^2\text{)} \tag{14}$$

gdje su:

A_f – bruto površina (m^2),

Ve – volumen grijanog prostora (m^3),

h – visina etaže od poda do poda (m).

Visina etaže referentnog modela izračunata je kao težinski prosjek u odnosu na volumen grijanog prostora:

$$h = \frac{\sum_{i=1}^{n}(h_i V_{e,i})}{\sum_{i=1}^{n} V_{e,i}} \text{ (m)} \tag{15}$$

gdje je n – broj promatranih zgrada (-).

Unutarnji dobici topline $H_{g,int}$ (W/m^2) ovise o korisnoj površini zgrade i namjeni prostora. Također, u odnosu na korisnu površinu iskazuje se specifična godišnja energija za grijanje $Q''_{H,nd}$ (kWh/(m^2a)) i hlađenje $Q''_{C,nd}$ (kWh/(m^2a)). Prema Algoritmu, ploština korisne površine zgrade može se procijeniti iz formule:

$$A_k = 0.32\ V_e\ (\mathrm{m}^2) \qquad (16)\ [73]$$

gdje je:

A_k – korisna površina zgrade (m^2)

Statističkom obradom promatranih kuća, ustanovljen je znatno niži omjer ploštine korisne površine u odnosu na bruto volumen u iznosu 0,23. Stoga je za izračun A_k (m^2) korištena formula:

$$A_k = 0.23\ V_e\ (\mathrm{m}^2) \qquad (17)$$

U prostorima u kojima ljudi rade i borave potrebno je osigurati povoljne mikroklimatske uvjete. Zrak u zatvorenim prostorima zasićuje se hlapivim spojevima iz materijala, a korisnici zasićuju zrak ugljičnim dioksidom. Iz tog razloga u takve prostore potrebno je dovoditi svježi zrak i odvoditi potrošeni. Minimalna potrebna izmjena zraka u prostorima u kojima borave korisnici mora iznositi 0,5 volumena zraka u satu. Svježi zrak koji dovodimo u prostor je vanjske temperature, što znači da ga je u zimskom i ljetnom periodu potrebno zagrijati ili rashladiti. Ventilacijski gubici topline iz tog razloga ovise o količini zraka, a iskazuju se ventilacijskim koeficijentom izmjene topline H_{ve} (W/K).

Prema Algoritmu, volumen grijanog zraka može se procijeniti iz formule:

$$V = 0.76\ V_e\ (\mathrm{m}^2) \qquad (18)\ [73]$$

gdje je:

V – volumen grijanog zraka (m^3)

Statističkom obradom promatranih kuća, također je ustanovljen znatno niži omjer neto i bruto volumena u iznosu 0,65 za kontinentalnu klimu i 0,64 za primorsku. Stoga se za izračun V (m^3) koristi formula:

$$\mathrm{V} = 0.65\ V_e\ (\mathrm{m}^3) \qquad (19)$$

3.3.2 Toplinska izolativnost elemenata ovojnice

Koeficijenti prolaska topline ostalih građevnih dijelova procijenjeni su u odnosu na karakteristike vanjskog zida, uz pretpostavku da je kvaliteta toplinske izolacije ovojnice proporcionalno jednaka za sve elemente ovojnice. Njihovi koeficijenti prolaska topline određeni su prema formuli:

$$U_i = \frac{U_{wall}\, U_{max,i}}{U_{wall,max}} \text{ (W/(m}^2\text{K))} \tag{20}$$

gdje su:

U_i – koeficijent prolaska topline pojedinog građevnog dijela (W/(m^{2}K)),

$U_{max,i}$ – dopušteni koeficijent prolaska topline pojedinog građevnog dijela (W/(m^{2}K)),

$U_{wall,max}$ – dopušteni koeficijent prolaska topline zida (W/(m^{2}K)).

Tablica 8 prikazuje maksimalne dopuštene koeficijente prolaska topline U_{max} (W/(m^{2}K)) za različite građevne dijelove u zgradama kontinentalnog i primorskog područja.

Tablica 8: Dopuštene U_{max} (W/(m^{2}K)) vrijednosti za pojedine građevne dijelove [1]

Klimatsko područje	**Kontinent**	**Primorje**
Vanjski zidovi	0,30	0,45
Krov	0,25	0,30
Međukatna konstrukcija iznad vanjskog zraka	0,25	0,30
Pod na tlu	0,40	0,50
Zid prema tlu	0,40	0,50
Pod prema negrijanoj prostoriji	0,40	0,60
Zid prema negrijanoj prostoriji	0,40	0,60

3.3.3 Geometrijski parametri elemenata ovojnice

Površine pojedinih elemenata ovojnice izračunate su iz ukupne površine ovojnice i statističkih udjela pojedinih građevnih dijelova u ovojnici. Ukupna površina ovojnice grijanog prostora A (m^2) određena je iz volumena grijanog prostora V_e (m^3) i faktora oblika f_o (m^{-1}) prema formuli:

$$A = f_o \, V_e \ (\mathrm{m}^2) \tag{21}$$

Orijentacije otvora referentnog modela svedene su na orijentacije prema osnovnim stranama svijeta. Udjeli otvora prema orijentacijama izračunati su prema formulama:

$$f_{win,N} = \frac{A_{win,N} + 0.5A_{win,NW} + 0.5A_{win,NE}}{A} (-) \tag{22}$$

$$f_{win,E} = \frac{A_{win,E} + 0.5A_{win,SE} + 0.5A_{win,NE}}{A} (-) \tag{23}$$

$$f_{win,S} = \frac{A_{win,S} + 0.5A_{win,SW} + 0.5A_{win,SE}}{A} (-) \tag{24}$$

$$f_{win,W} = \frac{A_{win,W} + 0.5A_{win,NW} + 0.5A_{win,SW}}{A} (-) \tag{25}$$

Ploštine otvora prema stranama svijeta referentnog modela izračunate su prema formuli:

$$A_{win,N,E,S,W} = A \, f_{win,N,E,S,W} \, f_{win} \ (\mathrm{m}^2) \tag{26}$$

gdje su:

$A_{win,N,E,S,W}$ – ploštine otvora prema osnovnim orijentacijama (m^2),

$A_{win,NW,NE,SW,SE}$ – ploštine otvora s otklonom 45° od osnovnih orijentacija (m^2),

$f_{win,N,E,S,W}$ – udio otvora prema osnovnim orijentacijama (-),

f_{win} – udio otvora u ovojnici (-).

Ploština konstrukcija u kontaktu s tlom računate su prema formulama:

$$A_{fl,gr} = A \, f_{fl,gr} \ (\mathrm{m}^2) \tag{27}$$

$$A_{wall,gr} = A \, f_{wall,gr} \ (\mathrm{m}^2) \tag{28}$$

gdje su:

$A_{gr,fl}$ – ploština poda na tlu (m^2),

$A_{gr,wall}$ – ploština zida prema tlu (m^2),

$f_{gr,fl}$ – udio poda na tlu u ovojnici (-),

$f_{gr,wall}$ – udio zida prema tlu u ovojnici (-).

Visina zida prema tlu z (m) izračunata je iz ploštine zida prema tlu $A_{gr,wall}$ (m^2)

i izloženog opsega tla P (m):

$$z = \frac{A_{wall,gr}}{P} \text{ (m)} \tag{29}$$

Ploština međukatne konstrukcije iznad vanjskog prostora:

$$A_{int,e} = A \ f_{int,e} \ (m^2) \tag{30}$$

gdje su:

$f_{int,e}$ – udio poda iznad vanjskog prostora u negrijanoj prostoriji u ovojnici (-),

$A_{int,e}$ – ploština poda iznad vanjskog prostora (m^2).

Podaci o negrijanoj prostoriji:

$$A_{int,u} = A \ f_{int,u} \ (m^2) \tag{31}$$

$$A_{wall,u} = A \ f_{wall,u} \ (m^2) \tag{32}$$

gdje su:

$A_{int,u}$ – ploštine poda iznad negrijane prostorije (m^2),

$A_{wall,u}$ – ploštine zida prema negrijanoj prostoriji (m^2),

$f_{int,u}$ – udio poda iznad negrijane prostorije u ovojnici (-),

$f_{wall,u}$ – udio zida prema negrijanoj prostoriji u ovojnici (-).

S obzirom da negrijana prostorija predstavlja vrlo malen udio u ovojnici i toplinskim gubicima te građevni dijelovi prema negrijanoj prostoriji moraju biti adekvatno toplinski izolirani, ostali podaci o negrijanoj prostoriji nisu analizirani već je pretpostavljeno da je ploština ovojnice negrijane prostorije prema van jednaka ploštini ovojnice prema grijanom prostoru i da je tlocrtni oblik negrijane prostorije kvadrat. Tada je izloženi opseg poda:

$$P_u = 2\sqrt{A_{int,u}}\ (\mathrm{m}) \tag{33}$$

gdje je:

P_u – izloženi opseg poda negrijane prostorije (m)

Formula za izračun ploštine krova primjenjuje podatak o udjelu krova u ovojnici:

$$A_{roof} = A\ f_{roof}\ (\mathrm{m}^2) \tag{34}$$

gdje su:

A_{roof} – ploština krova (m^2),

f_{roof} – udio krova u ovojnici (-).

Formule za izračun ploštine zidova:

$$A_{wall,r} = A - \left(A_{win,N,E,S,W} + A_{fl,gr} + A_{wall,gr} + A_{int,e} + A_{int,u} + A_{wall,u} + A_{roof} + \left|A_{win,N} - A_{win,S}\right| + \left|A_{win,E} - A_{win,W}\right|\right)\ (\mathrm{m}^2) \tag{35}$$

$$A_{wall,NS} = \frac{A_{wall,r}}{4} + max\left(0;\ A_{win,SN} - A_{win,NS}\right)\ (\mathrm{m}^2) \tag{36}$$

$$A_{wall,EW} = \frac{A_{wall,r}}{4} + max\left(0;\ A_{win,WE} - A_{win,EW}\right)\ (\mathrm{m}^2) \tag{37}$$

gdje su:

$A_{wall,r}$ – pomoćna varijabla u izračunu (m^2) koja uključuje različite ploštine otvora prema stranama svijeta,

$A_{wall,NSEW}$ – ploštine vanjskih zidova prema različitim orijentacijama (m^2).

3.4 Postavke varijantnog scenarija proračuna

Kako bi se dobio što realniji uvid u utjecaj pojedinog čimbenika, uključujući promjenu klime i utjecaj korisnika, izrađena su dva scenarija proračuna: osnovni i varijantni. Razlika između njih je u meteorološkim podacima koji uvažavaju porast globalnih temperatura u posljednjih deset godina i ulaznim postavkama proračuna (različite temperature grijanja i hlađenja, pasivno hlađenje provjetravanjem noću i uvođenje dodatne naprave za zaštite od blještanja sunca). U pogledu geometrijskih i fizikalnih parametara između ova dva proračuna nema razlike. Tablica 9 prikazuje razlike u postavkama proračuna osnovnog i varijantnog scenarija:

Tablica 9: Razlike u postavkama osnovnog i varijantnog scenarija proračuna

	Osnovni scenarij	**Varijantni scenarij**
Klimatski podaci	30-godišnji prosjek	10-godišnji prosjek
Projektna temperatura grijanja, $\Theta_{int,set,H}$ (C°)	20	22
Projektna temperatura hlađenja, $\Theta_{int,set,C}$ (C°)	Kontinent: 22 Primorje: 24	26
Broj izmjena zraka pri pasivnom hlađenju, n_{pas} (h^{-1})	n*	1,5
Faktor naprave za zaštitu od blještanja, $F_{C,G}$ (-)	$F_{C,C}$**	0,9

* Ne koristi se pasivno hlađenje provjetravanjem ljeti, broj izmjena zraka je potreban higijenski minimum n = 0,5 h^{-1}.

** Za zaštitu od blještanja tijekom zime koristi se ista naprava kao za zaštitu od pregrijavanja $F_{C,C}$ (-)

3.4.1 Promjena klime

Analize rasta godišnjih temperature u Europi pokazuju trend zagrijavanja do 1,8 °C u posljednjih 30 godina [50]- [53]. Povećanjem globalnih temperatura smanjuje se potreba za grijanjem i povećava potreba za hlađenjem [22]. Očekivane promjene u potrošnji energije potrebno je promatrati u odnosu na trenutni omjer potrošnje energije u Europi. S obzirom da je današnja potrošnja energije za grijanje dominantna u odnosu na hlađenje, očekivane promjene upućuju na promjenu njihova omjera, no ne nužno i povećanje ukupne potrošnje. Trenutno

energija za grijanje predstavlja 60 % ukupne potrošnje [5], a hlađenje 20 % [7], dok je očekivani budući omjer 30 % energije za grijanje i 50 % energije za hlađenje u ukupnoj potrošnji. S obzirom da je pristup toplinskoj zaštiti u odnosu na grijanje i hlađenje značajno različit, trenutni klimatski scenarij primjenjen je u varijantnom scenariju proračuna.

Proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje izrađen je prema HRN EN ISO 13790 korištenjem stvarnih satnih podataka, odnosno 8760 podataka za cijelu godinu. Stvarne satne podatke prikupio je i pripremio Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ), a objavilo ih je Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine za meteorološke postaje Zagreb Maksimir i Split Marjan kao reprezentativne godine koje najtočnije predstavljaju 30-godišnji prosjek klime [114]. Za Zagreb reprezentativna godina obuhvaća niz mjeseci iz razdoblja od 1.3.2004. do 28.2.2013., a za Split od 1.10.2003. do 30.9.2012.

Kako bi se dobio pokazatelj što realnije klime, srednje dnevne temperature reprezentativnih godina za Zagreb i Split uspoređene su s izmjerenim srednjim dnevnim temperaturama zraka za posljednjih deset godina za meteorološke postaje u Zagrebu i Splitu. Srednja dnevna temperatura sagledava temperature u tri točke u danu i računa se prema formuli:

$$t_{sr} = \frac{(t_7 + t_{14} + 2t_{21})}{4} \text{ (°C)} \tag{38}$$

gdje su:

t_{sr} – srednja dnevna temperatura (°C),

t_i – temperatura u određenom satu (°C) pri čemu 7, 14 i 21 označavaju sate u danu.

Temeljem razlika u mjesečnim srednjim dnevnim temperaturama, satne temperature u pojedinom mjesecu za 10-godišnji prosjek klime računati su prema formuli:

$$t_{h,mj,10} = t_{h,mj,30} + t_{sr,mj,10} - t_{sr,mj,30} \text{ (°C)} \tag{39}$$

gdje su:

$t_{h,mj,10}$ – satna temperatura pojedinog mjeseca za 10-godišnje klimatske podatke (°C),

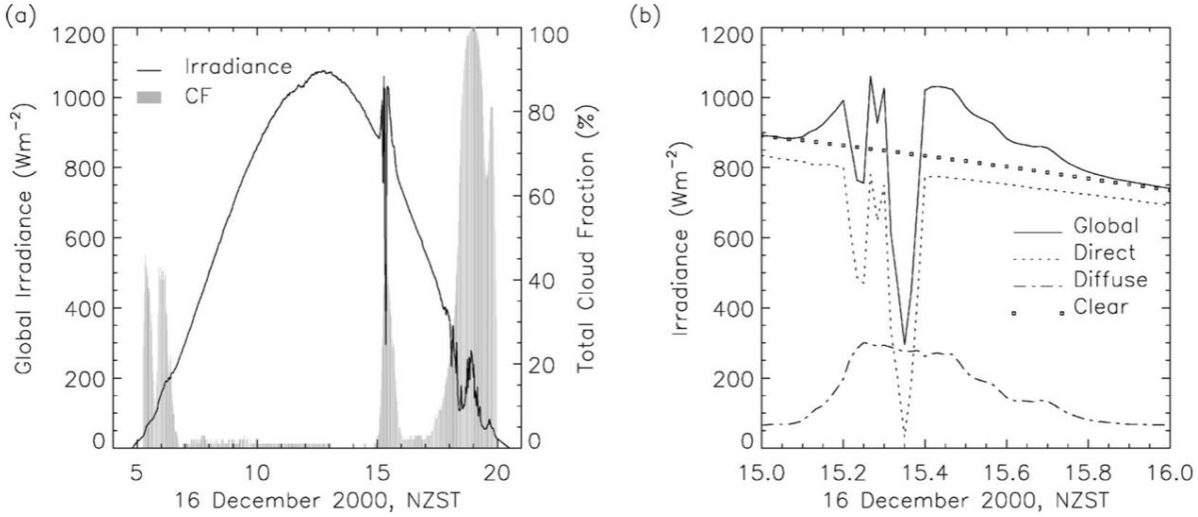
$t_{h,mj,30}$ – satna temperatura pojedinog mjeseca za 30-godišnje klimatske podatke (°C),

$t_{sr,mj,10}$ – srednja dnevna temperatura pojedinog mjeseca u odnosu na 10-godišnji prosjek (°C),

$t_{sr,mj,30}$ – srednja dnevna temperatura pojedinog mjeseca u odnosu na 30-godišnji prosjek (°C).

Osim povećanja globalnih temperatura u posljednjih 10 godina, analize sunčeva zračenja također pokazuju povećanu količinu dozračene energije. U Europi, povećanje globalnog sunčeva zračenja iznosi 1 % do 8 % od 1980. godine, s tim da je najveći porast zračenja u južnoj, a najmanji u sjevernoj Europi. [100 – 102] Solarni dobici u energetskoj bilanci zgrade imaju značajnu ulogu, a iskorištavaju se u najvećoj mjeri kroz prozirne i manje kroz neprozirne građevne dijelove. Kod obiteljskih kuća, koje su toplinski izolirane prema trenutno važećim zahtjevima tehničkog propisa, omjer toplinskih gubitaka i dobitaka je takav da solarni dobici nadoknađuju oko trećinu potrebne energije za grijanje.

Snaga solarnog zračenja, I (W/m^2) nije konstantna, već se mijenja kroz 11-godišnje solarne cikluse, pri čemu su amplitude promjena vrlo male, približno 2 W/m^2 [131]. Najznačajniji utjecaj na solarno zračenje na površini Zemlje imaju atmosferske prilike, odnosno zasjenjenje od oblaka. Tanki sloj oblaka može pojačati difuzno i globalno zračenje, dok će debeli sloj oblaka značajno umanjiti ukupno sunčevo zračenje (Slika 23). [132]



Slika 23: (a) dnevno globalno zračenje i pokrivenost oblacima, (b) pojačano globalno zračenje. [132]

U ovom istraživanju provedena je usporedba izmjerenog solarnog zračenja u proteklih deset godina za Zagreb i Split i meteoroloških podataka za 30-godišnji prosjek klime. Prema analiziranim podacima generirano je prosječno globalno zračenje za razdoblje nakon 2014. godine. Satni podaci solarnog zračenja u pojedinom mjesecu za 10-godišnji prosjek klime računati su prema formuli:

$$H_{t,h,10} = H_{t,h,30} \frac{H_{hor,mj,10}}{H_{hor,mj,30}} \text{ (Wh/m}^2\text{)} \quad (40)$$

gdje su:

$H_{t.h,10}$ – satno globalno sunčevo zračenje na plohu određenog nagiba za 10-godišnji prosjek (Wh/m^2),

$H_{t,h,30}$ – satno globalno sunčevo zračenje na plohu određenog nagiba za 30-godišnji prosjek (Wh/m^2),

$H_{hor.mj,10}$ – mjesečno globalno sunčevo zračenje na horizontalnu plohu za 10-godišnji prosjek (Wh/m^2),

$H_{hor.mj,30}$ – mjesečno globalno sunčevo zračenje na horizontalnu plohu za 30-godišnji prosjek (Wh/m^2).

3.4.2 Projektne temperature grijanja i hlađenja

Iz dostupnih istraživanja, vidljivo je da temperature grijanja znatno variraju u raznim dijelovima Europe ovisno o socijalnim, gospodarskim i regionalnim čimbenicima kao i razini energetske učinkovitosti same zgrade. U novim, energetski učinkovitim zgradama, bilježe se više temperature od onih projektnih, a dostupni podaci za Hrvatsku pokazuju prosječne temperature grijanja u stanovima od 22 °C. [54 – 61] U pogledu hlađenja, preporučene temperature više su od onih propisanih Algoritmom [62 – 66], a dostupna istraživanja upućuju na značajne uštede u potrošnji energije za hlađenje pri projektnim temperaturama od 26 °C [105 – 109].

U ovoj računskoj analizi koristi se stvarna satna metoda proračuna u skladu sa HRN EN ISO 13790, Prilog A. Dinamičkom metodom proračuna za 8760 sati u godini, utjecaj toplinskih gubitaka i dobitaka utječe na zagrijavanje i hlađenje zgrade što rezultira ostvarenom temperaturom zraka u pojedinom satu. Ovaj način proračuna je točniji od mjesečnog proračuna koji se temelji na manje preciznim faktorima iskorištenja toplinskih gubitaka i dobitaka. [73] Iz tog razloga, satna metoda proračuna daje značajno realnije (i veće) rezultate u pogledu hlađenja jer se potrošnja energije, za bilo koju projektnu temperaturu hlađenja, proračunava u svakom satu.

Prema rezultatima dostupnih istraživanja u pogledu izmjerenih temperatura grijanja u novim kućama [54] – [61], odabrana projektna temperatura grijanja $\Theta_{int,H}$ (°C) za varijantni scenarij proračuna iznosi 22 °C.

Prema dostupnim istraživanjima [105 – 109] i preporukama [62 – 66] temperatura hlađenja, odabrana projektna temperatura hlađenja $\Theta_{int,C}$ (°C) za varijantni scenarij proračuna iznosi 26 °C.

3.4.3 Pasivno hlađenje – noćno provjetravanje

Izmjena unutarnjeg i vanjskog zraka jedan je od čimbenika koji utječe na potrebu za hlađenjem. Minimalan potreban broj izmjena zraka po satu u zgradama stambene namjene iznosi 0,5 h^{-1} [73]. Taj broj izmjena zraka postiže se neželjenom infiltracijom zraka kroz reške otvora i otvaranjem prozora. Tijekom sezone hlađenja, veći broj izmjena zraka od minimalno potrebnog koristan je tijekom noći kada su vanjske temperature zraka niže od onih unutarnjih. Noćne temperature u srpnju za Zagreb iznose ispod 20 °C, što je značajno niže u odnosu na projektnu temperaturu hlađenja od 26 °C. Tolika razlika unutarnje i vanjske temperature predstavlja potencijal za pasivno rashlađivanje zgrade noću. Potencijal pasivnog noćnog hlađenja provjetravanjem obrađen je u nizu radova prema kojima moguće uštede iznose do 43,5 % [67 – 71].

Za korištenje pasivnog noćnog hlađenja u varijantnom scenariju proračuna potrebno je odrediti broj izmjena zraka i način korištenja. Algoritam za proračun potrebne energije za primjenu ventilacijskih i klimatizacijskih sustava kod grijanja i hlađenja prostora zgrade definira utjecaj otvora na izmjenu zraka. Prema HRN EN ISO 13789, broj izmjena zraka kroz otvore u ovojnici može se procijeniti na tri izmjene po satu u sljedećem slučaju: „Zrakopropusnog prostora zbog lokalnih otvorenih spojeva između komponenti ili trajnih ventilacijskih otvora" [133].

Pretpostavka je da će samo dio otvora na kući biti otvoren tijekom noći. Primjerice, očekivano je da će otvori u prizemlju biti zatvoreni iz sigurnosnih razloga, dok oni na višim etažama mogu biti otvoreni. Iz tog razloga broj izmjena zraka u vremenu pasivnog hlađenja pretpostavljen je na n_{pas} = 1,5 h^{-1}, odnosno pola od broja definiranog prema HRN EN ISO 13789. Režim korištenja pasivnog noćnog hlađenja predviđen je u periodu od 23 do 6 sati u sezoni hlađenja.

3.4.4 Zaštita od bliještanja sunca

Tablica 7 prikazuje faktore raznih naprava za zaštitu od pregrijavanja u zatvorenom položaju. Vanjske naprave za zaštitu od sunca najučinkovitije su u sprječavanju pregrijavanja, dok su unutarnje naprave puno manje učinkovitosti.

Tehnički propis razlikuje tri vrste unutarnje zaštite od sunca:

1. bijele ili reflektirajuće površine male transparentnosti,
2. svijetle boje ili male transparentnosti i
3. tamne boje ili povišene transparentnosti,

pri čemu se transparentnost manja od 15 % smatra malom transparentnosti.

S obzirom da se projekti racionalne uporabe energije izrađuju u skladu s Algoritmom, oni koriste samo dva faktora, naprava u otvorenom položaju kada je sunčevo zračenje na plohu otvora manje od 300 W/m^2 i zatvorenom položaju kada je veće [73]. Dostupna istraživanja zaštite od bliještanja prepoznaju problem umanjivanja solarnih dobitaka u sezoni grijanja kod vanjskih naprava [116, 117]. Za zgrade suvremenih energetskih standarda preporuča se izvedba i vanjske i unutarnje naprave s ciljem maksimalnog iskorištavanja solarnih dobitaka tijekom sezone grijanja [72].

Kada se proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje dopunjava zaštitom od bliještanja, potrebno je pretpostaviti faktor te naprave i način korištenja iste. Kao odabrana zaštita od bliještanja odabrana je naprava pod br. 3. (naprava s unutrašnje strane – tamne boje ili povišene transparentnosti) sa faktorom $F_{C,C}$ od 0,9. Oznaka ove varijable u radu je $F_{C,G}$ (-), gdje oznaka G predstavlja bliještanje (engl. Glare). Naprava se koristi samo u sezoni grijanja kada je sunčevo zračenje na plohu otvora veće od 300 W/m^2.

3.5 Isporučena energija i CO_2 emisije grijanja i hlađenja

U ovom poglavlju predstavljena je analiza odnosa isporučene energije i CO_2 emisija koje nastaju pri proizvodnji toplinske i rashladne energije kod raznih termotehničkih sustava i energenata. Potrošnja energenta ovisi o učinkovitosti termotehničkog sustava, koja se računa prema Algoritmu za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama. U ovom radu analizirane su isporučene energije i CO_2 emisije proizvodnje toplinske i rashladne energije dizalica topline i kotlova na biomasu kao termotehničkih sustava

karakterističnih za zgrade gotovo nulte energije (nZEB) i za budući standard zgrada nulte emisije (ZEB). Isporučena energija i specifične CO_2 emisije grijanja i hlađenja računaju se prema učinkovitosti termotehničkog sustava i specifičnim emisijama korištenog energenta. Ovisno o vrsti sustava, učinkovitosti variraju od 0,75 za kotlove do 5,5 za dizalice topline topline [17 - 21, 120 - 122]. S obzirom da emisije proizvodnje električne energije u državama Europske unije variraju od 7 do 585 gCO_2/kWh [118], nemoguće ih je međusobno uspoređivati, već su CO_2 emisije izračunate za Hrvatsku prema Algoritmu za proračun potrebne energije za primjenu ventilacijskih i klimatizacijskih sustava kod grijanja i hlađenja prostora zgrade [133], Algoritmu za proračun dizalice topline zrak-zrak [134] i Algoritmu za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama [135]. Specifične emisije biomase iznose od 34,4 do 42,4 gCO_2/kWh [122], a specifične emisije za korištenje električne energije iz mreže 2024. godine za Hrvatsku iznose 141,0 gCO_2/kWh [118]. Ekonomska analiza cijene isporučenih energenata nije predmet ovog istraživanja.

Isporučena energija za grijanje računa se prema formuli:

$$E_{del,H} = \frac{Q_{H,gen}}{COP;\eta_{gnr}} \text{ (kWh)} \qquad (41)\ [135]$$

gdje su:

$E_{del,H}$ – isporučena energija za grijanje (kWh),

$Q_{H,gen}$ – proizvedena toplinska energija (kWh),

COP – deklarirani toplinski množitelj (-),

η_{gnr} –učinkovitost kotla (-).

Za proizvodnju toplinske energije, CO_2 emisije računaju se prema formuli:

$$CO_{2,H} = E_{del,H}\, C \text{ } (gCO_2) \qquad (42)\ [135]$$

gdje su:

$CO_{2,H}$ – emisija stakleničkih plinova za grijanje (gCO_2),

C – faktor pretvorbe za energent (gCO_2/kWh).

Isporučena energija za hlađenje računa se prema formuli:

$$E_{del,C} = \frac{Q_{C,gen}}{EER\ PLV_{AV}} \text{ (kWh)} \qquad (43)\ [133, 134]$$

gdje su:

$E_{del,C}$ – isporučena energija za hlađenje (kWh),

$Q_{C,gen}$ – proizvedena rashladna energija (kWh),

EER – faktor energetske učinkovitosti rashladnog uređaja (-),

PLV_{AV} – prosječni faktor djelomičnog opterećenja (-).

Za proizvodnju rashladne energije, CO_2 emisije izračunate su prema formuli:

$$CO_{2,C} = E_{del,C}\ C \text{ (gCO}_2\text{)} \qquad (44)\ [133, 134]$$

gdje je:

$CO_{2,C}$ – emisija stakleničkih plinova za proizvodnju rashladne energije (gCO_2),

Za navedene sustave poznate su CO_2 emisije korištenog energenta za proizvodnju 1 kWh toplinske ili rashladne energije [122]. Energenti koji se koriste u ovim sustavima i njihove specifične CO_2 emisije za 1 kWh energije su *C* (gCO_2/kWh):

- električna energija 141,0 gCO_2/kWh (podatak za 2024. godinu) [118],
- drveni peleti 34,4 gCO_2/kWh [122],
- drvena sječka 42,4 gCO_2/kWh [122].

4 REZULTATI I DISKUSIJA

U ovom poglavlju prikazan je niz rezultata i diskusija analiza obrađenih ovim radom:

- Referentne vrijednosti čimbenika arhitektonskog oblikovanja
- Referentni intervali čimbenika arhitektonskog oblikovanja
- Zastupljenost čimbenika arhitektonskog oblikovanja s nepovoljnim odstupanjem
- Referentni model, geometrijske i fizikalne karakteristike
- Promjena klime
- Isporučena energija i CO_2 emisije grijanja i hlađenja
- Potrošnja energije referentnog modela
- Varijacije referentnog modela
- Vrednovanje čimbenika arhitektonskog oblikovanja u odnosu na energetsku učinkovitost
- Prilagodba odstupanja jednog čimbenika u svrhu očuvanja energetske učinkovitosti
- Prilagodba odstupanja dva čimbenika u svrhu očuvanja energetske učinkovitosti

4.1 Referentne vrijednosti čimbenika arhitektonskog oblikovanja

U prethodnim poglavljima opisan je način na koji su utvrđene referentne vrijednosti pojedinih čimbenika energetske učinkovitosti, a koji ujedno predstavljaju i čimbenike arhitektonskog oblikovanja. Referentne vrijednosti prikazane u ovom poglavlju koriste se i za osnovni i varijantni scenarij proračuna.

Tablica 10 prikazuje prosječne, referentne vrijednosti za energetski model obiteljske kuće u kontinentalnoj i primorskoj klimi za svaki čimbenik koji je predmet ovog istraživanja.

Tablica 10: Referente vrijednosti promatranih čimbenika energetske učinkovitosti

		Klimatsko područje	
		Kontinent	Primorje
1	Faktor oblika, f_o (m^{-1})	0,75	0,78
2	Koeficijent prolaska topline zida, U (W/(m2K))	0,20	0,31
	Debljina toplinske izolacije, d_{TI} (cm)	18,1	11,2
3	Udio ploštine ostakljenih otvora u ovojnici, f_{win} (-)	0,10	0,12
4	Orijentacija, kut otklona od ekvatora, δ' (°)	-12,4	-5,8

	Udio otvora prema orijentacijama, $f_{win,N,E,S,W}$ (-)	N	0,20	0,24
		E	0,23	0,22
		S	0,34	0,30
		W	0,24	0,24
5	Faktor zaštite naprave od pregrijavanja, F_C (-)		0,39	0,42
6	Udio poda na tlu u ovojnici, $f_{gr.fl}$ (-)		0,16	0,20
	Udio zida prema tlu u ovojnici, $f_{gr.wall}$ (-)		0,04	0,05
	Udio ovojnice u kontaktu s tlom ukupno, f_{gr} (-)		0,19	0,24

Tablica 11 prikazuje prosječne vrijednosti ostalih čimbenika potrebnih za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje.

Tablica 11: Referente vrijednosti ostalih čimbenika energetske učinkovitosti

	Klimatsko područje	
	Kontinent	Primorje
Volumen grijanog prostora, V_e (m^3)	926,54	992,04
Neto grijano obujam, V (m^3)	602,25	644,83
Bruto podna površina, A_f (m^2)	284,98	310,2
Korisna površina, A_k (m^2)	213,10	228,17
Visina etaže od poda do poda, h (m)	3,3	3,2
Udio krova u ovojnici, f_{roof} (-)	0,24	0,22
Udio međukatne konstrukcije iznad vanjskog zraka, $f_{int,e}$ (-)	0,02	0,02
Udio zidova prema negrijanoj prostoriji, $f_{wall,u}$ (-)	0,01	0,02
Udio međukatne konstrukcije iznad negrijane prostorije, $f_{int,u}$ (-)	0,01	0,02
Izloženi opseg tla, P (m)	57,8	63,1
Koeficijenti prolaska topline		
Krov, U_{roof} (W/(m^2K))	0,16	0,20
Međukatna konstrukcija iznad vanjskog zraka, $U_{int,e}$ (W/(m^2K))	0,16	0,20

Pod na tlu, $U_{gr,fl}$ (W/(m^{2}K))	0,26	0,34
Zid prema tlu, $U_{gr;walll}$ (W/(m^{2}K))	0,26	0,34
Pod prema negrijanoj prostoriji, $U_{int,u}$ (W/(m^{2}K))	0,26	0,41
Zid prema negrijanoj prostoriji $U_{wall,u}$ (W/(m^{2}K))	0,26	0,41

U ovom radu identificirani su elementi zgrada koji definiraju arhitektonsko oblikovanje [75 – 82] te ujedno predstavljaju i čimbenike energetske učinkovitosti zgrade. Isti su prepoznati i analizirani u nizu znanstvenih radova: faktor oblika [28, 30, 31, 83], toplinska izolativnost ovojnice ovisna o debljini toplinske izolacije [28, 29, 79, 86], udio otvora u ovojnici i orijentacija [28, 30, 35 – 39], naprave za zaštitu od sunca [40 – 45] i kontakt zgrade s tlom [46 – 49, 91]. U ovom radu, njihov utjecaj na energetsku učinkovitost vrednovan je računskim putem. Svaki čimbenik moguće je kvantificirati kao geometrijsku ili fizikalnu vrijednost s obzirom da se odnosi na pojedini element zgrade (ovojnicu, napravu za zaštitu od sunca, debljinu izolacije…). Kako bi se utvrdile referentne vrijednosti pojedinog čimbenika, provedena je analiza 82 obiteljske kuće u kontinentalnoj klimi i 69 obiteljskih kuća u primorskoj klimi Hrvatske. Statistička obrada izrađena je na proračunima potrošnje energije iz projekata racionalne uporabe energije i toplinske zaštite zgrade.

4.2 Referentni intervali čimbenika arhitektonskog oblikovanja

Referentni modeli obiteljske kuće za kontinentalno i primorsko klimatsko područje služe kako bi se odredila prosječna (optimalna) potrošnje energije za grijanje i hlađenje. S obzirom da je jedan od ciljeva rada i vrednovanje svakog od promatranih čimbenika, iz analiziranih kuća bilo je potrebno utvrditi maksimalna povoljna i nepovoljna odstupanja pojedinog čimbenika. Referentni intervali prikazani u ovom poglavlju koriste se i za osnovni i varijantni scenarij proračuna.

Tablica 12 i Tablica 13 prikazuju kvantificirane intervale geometrijskih i fizikalnih čimbenika arhitektonskog oblikovanja koji ujedno predstavljaju i čimbenike energetske učinkovitosti. Najpovoljnije i najnepovoljnije vrijednosti su zabilježeni minimumi ili maksimumi pojedinog čimbenika u analiziranim primjerima kuća, odnosno u proračunima projekata racionalne uporabe energije i toplinske zaštite zgrade.

Niže vrijednosti znače bolju energetsku učinkovitost za sljedeće čimbenike: faktor oblika, udio otvora u ovojnici, kut otklona od ekvatora i faktor naprave za zaštitu od pregrijavanja, dok više vrijednosti znače bolju učinkovitost za: udio ovojnice prema tlu i debljine toplinske izolacije. Odstupanje od +100 % za pojedini čimbenik znači najnepovoljniju vrijednost, a -100 % najpovoljniju.

Tablica 12: referentne vrijednosti čimbenika arhitektonskog oblikovanja obiteljskih kuća u kontinentalnoj Hrvatskoj

		Najpovoljnije (-100 %)	**Prosjek (±0 %)**	**Najnepovoljnije (+100 %)**
1	Faktor oblika, f_o (m^{-1})	0,60	0,75	1,10
2	Debljina toplinske izolacije, $d_{TI,wall}$ (cm)	30,9	18,1	11,9
3	Udio otvora u ovojnici, f_{win} (-)	0,19	0,10	0,03
4	Kut otklona od ekvatora, δ' (°) *	-86,9	-12,4	39,5
	Udio otvora sjever, $f_{win,N}$ (-) *	0,00	0,20	0,60
	Udio otvora istok, $f_{win,E}$ (-) *	0,03	0,23	0,08
	Udio otvora jug, $f_{win,S}$ (-) *	0,97	0,33	0,16
	Udio otvora zapad, $f_{win,W}$ (-) *	0,00	0,24	0,17
5	Faktor zaštite naprave od pregrijavanja, $F_{C,C}$ (-)	0,25	0,39	0,83
6	Udio poda na tlu, $f_{gr,fl}$ (-) **	0,23	0,16	0,01
	Udio zida prema tlu, $f_{gr,wall}$ (-) **	0,19	0,035	0,00
	Izloženi opseg tla, P (m) **	60,2	53,8	19,0
	Udio ovojnice prema tlu, f_{gr} (-)	0,39	0,19	0,01

Tablica 13: referentne vrijednosti čimbenika arhitektonskog oblikovanja obiteljskih kuća u primorskoj Hrvatskoj

		Najpovoljnije (-100 %)	**Prosjek (±0 %)**	**Najnepovoljnije (+100 %)**
1	Faktor oblika, f_o (m^{-1})	0,58	0,78	1,13

2	Debljina toplinske izolacije, $d_{TI,wall}$ (cm)	16,9	11,2	7,6
3	Udio otvora u ovojnici, f_{win} (-)	0,45	0,12	0,04
4	Kut otklona od ekvatora, δ' (°) *	-61,3	-5,8	49,1
	Udio otvora sjever, $f_{win,N}$ (-) *	0,00	0,24	0,60
	Udio otvora istok, $f_{win,E}$ (-) *	0,17	0,21	0,19
	Udio otvora jug, $f_{win,S}$ (-) *	0,68	0,30	0,05
	Udio otvora zapad, $f_{win,W}$ (-) *	0,14	0,24	0,16
5	Faktor zaštite naprave od pregrijavanja, $F_{C,C}$ (-)	0,25	0,42	1,00
6	Udio poda na tlu, $f_{gr,fl}$ (-) **	0,39	0,20	0,08
	Udio zida prema tlu, $f_{gr,wall}$ (-) **	0,24	0,05	0,00
	Izloženi opseg tla, P (m) **	69,0	63,1	29,6
	Udio ovojnice prema tlu, f_{gr} (-)	0,49	0,24	0,10

* Otklon otvora od ekvatora ovisi o orijentaciji svih otvora u ovojnici. Kao granice referentnih intervala preuzeti su udjeli otvora prema stranama svijeta iz analiziranih primjera s najvećim pozitivnim i negativnim otklonom. Za referentni otklon od ekvatora korišteni su prosječni udjeli otvora prema stranama svijeta.

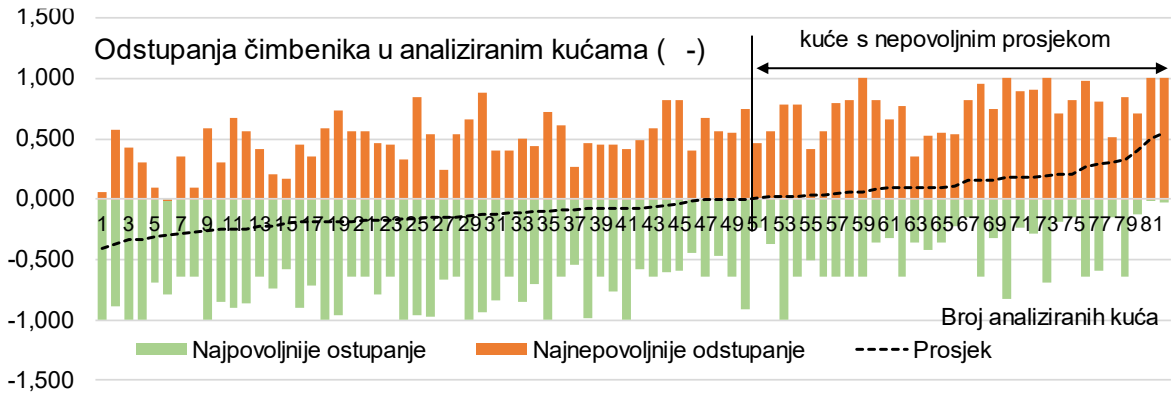
** Izmjena topline između grijanog prostora i tla ovisi o ploštini poda na tlu, zida prema tlu i izloženom opsegu tla. Kao granice referentnih intervala za te čimbenike, preuzeti su podaci iz analiziranih primjera s najmanjim i najvećim ukupnim udjelom ovojnice prema tlu. Za referentni model korišten je prosjek svih analiziranih primjera.

Temeljem analize stvarnih projekata, dobiveni su realni intervali pojedinog čimbenika korišteni u daljnjoj analizi i vrednovanju. Na taj način sagledan je omjer pozitivnih i negativnih odstupanja čimbenika za sve zgrade, kao i broj čimbenika koji više ili manje nepovoljno odstupaju od prosjeka. Fokus rada je na čimbenicima koji nepovoljno odstupaju od prosjeka jer oni predstavljaju oblikovanje koje se ne pridržava načela energetski učinkovitog arhitektonskog oblikovanja, već drugih načela oblikovanja (estetika, uvažavanje konteksta i dr.). Jedan od ciljeva rada je utvrđivanje mogućnosti očuvanja referentne potrošnje energije uslijed odstupanja pojedinih čimbenika.

4.3 Zastupljenost čimbenika arhitektonskog oblikovanja sa nepovoljnim odstupanjem

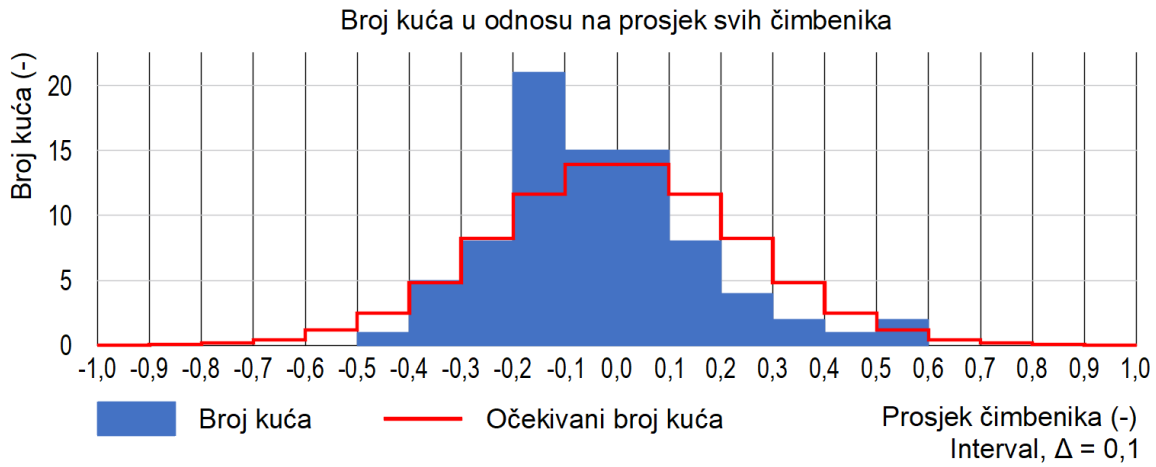
Nakon utvrđivanja referentnih vrijednosti i referentnih intervala svakog od promatranih čimbenika, moguće je odrediti broj i magnitudu odstupanja čimbenika od prosjeka za svaku od analiziranih zgrada.

Referentni intervali pojedinog čimbenika određeni su minimalnom i maksimalnom očitanom vrijednosti iz analiziranih projekata racionalne energije obiteljskih kuća. Povoljnija odstupanja rezultiraju manjom ukupnom potrošnjom energije i ta odstupanja označena su negativno, dok nepovoljna odstupanja znače povećanje potrošnje i označena su pozitivno.



Slika 24: Prosjek i najveća odstupanja čimbenika u analiziranim kućama (kontinentalna klima)

Za kontinentalnu Hrvatsku prosjek čimbenika svih analiziranih kuća iznosi -4 %, a ako promatramo samo kuće s nepovoljnim prosjekom, njihov prosjek čimbenika je 15 %. Kuća s najnepovoljnijim odstupanjem ima prosjek čimbenika od 55 %.



Slika 25: Broj kuća određenog prosjeka čimbenika i broj kuća u odnosu na očekivanu raspodjelu prema Bates (kontinentalna klima)

Slika 25 prikazuje broj analiziranih kuća sa prosjekom vrijednosti svih čimbenika u određenom rasponu intervala s korakom $\Delta = 0{,}1$ i očekivani broj kuća u istim intervalima prema Batesinoj raspodjeli za kuće kontinentalne klime.

Tablica 14: Postotak analiziranih kuća s određenim brojem čimbenika koji nepovoljno odstupaju od prosjeka (kontinentalna Hrvatska)

Broj čimbenika koji odstupaju	**Odstupanje čimbenika (nepovoljno)**								
	>10 %	**>20 %**	**>30 %**	**>40 %**	**>50 %**	**>60 %**	**>70 %**	**>80 %**	**>90 %**
1	95 %	94 %	89 %	82 %	63 %	41 %	35 %	23 %	10 %
2	79 %	60 %	49 %	33 %	22 %	12 %	6 %	6 %	4 %
3	43 %	24 %	12 %	10 %	7 %	5 %	-	-	-
4	12 %	7 %	6 %	5 %	1 %	-	-	-	-
5	5 %	1 %	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-

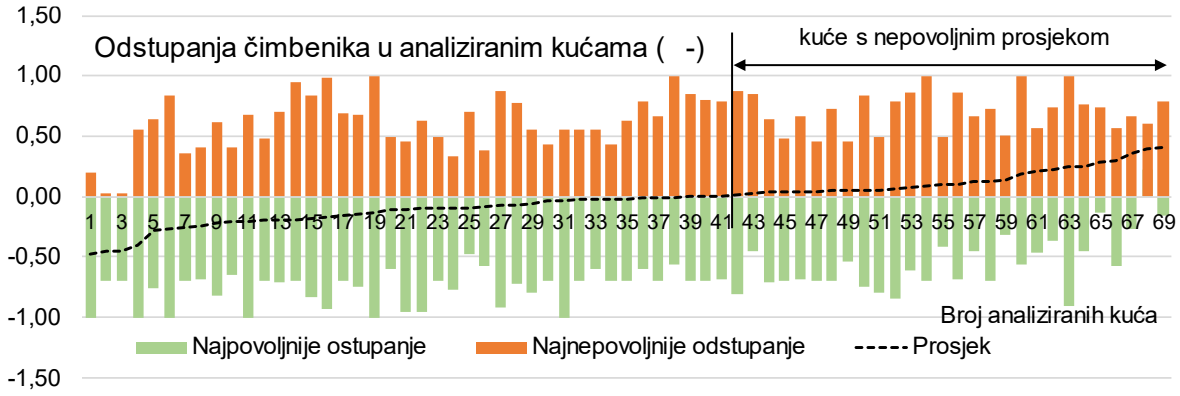
Tablica 14 prikazuje postotak kuća prema broju čimbenika koji imaju određeno nepovoljno odstupanje od prosjeka za kontinentalnu Hrvatsku. Promotrimo li broj čimbenika s minimalnim nepovoljnim odstupanjem većim od 10 %, dobivamo sljedeće rezultate:

- 95 % kuća ima barem 1 čimbenik s nepovoljnim odstupanjem većim od 10 %,

- 79 % kuća ima barem 2 čimbenika s nepovoljnim odstupanjem većim od 10 %,
- 40 % kuća ima barem 3 čimbenika s nepovoljnim odstupanjem većim od 10 %,
- 12 % kuća ima barem 4 čimbenika s nepovoljnim odstupanjem većim od 10 %,
- 5 % kuća ima barem 5 čimbenika s nepovoljnim odstupanjem većim od 10 %,
- ne postoje kuće sa svih 6 čimbenika koji nepovoljno odstupaju više od 10 %.

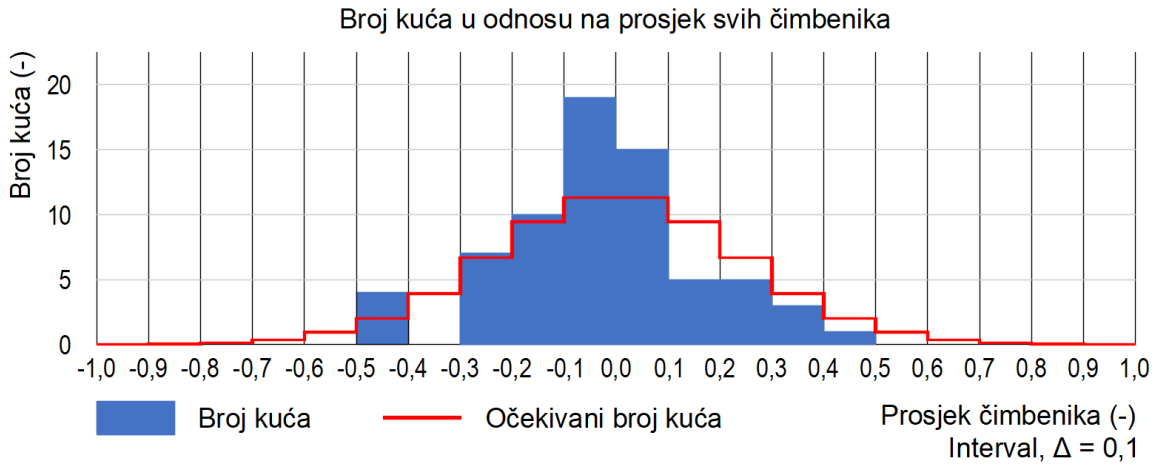
U slučaju maksimalnog nepovoljnog odstupanja u rasponu 90 % do 100 % su sljedeći rezultati:

- 10 % kuća ima barem 1 čimbenik s nepovoljnim odstupanjem većim od 90 %,
- 4 % kuća ima 2 čimbenika s nepovoljnim odstupanjem većim od 90 %,
- ne postoje kuće s 3 ili više čimbenika s nepovoljnim odstupanjem većim od 90 %.



Slika 26: Prosjek i najveća odstupanja čimbenika u analiziranim kućama (primorska klima)

Za primorsku Hrvatsku prosjek čimbenika svih analiziranih kuća iznosi -3 %, a promatramo li samo kuće s nepovoljnim odstupanjem, njihov prosjek čimbenika je 15 %. Kuća s najnepovoljnijim odstupanjem ima prosjek čimbenika od 41 %.



Slika 27: Broj kuća određenog prosjeka čimbenika i broj kuća u odnosu na očekivanu raspodjelu prema Bates (primorska klima)

Tablica 15: Postotak analiziranih kuća s određenim brojem čimbenika koji nepovoljno odstupaju od prosjeka (primorska Hrvatska)

Broj čimbenika koji odstupaju	**Odstupanje čimbenika (nepovoljno)**								
	>10 %	**>20 %**	**>30 %**	**>40 %**	**>50 %**	**>60 %**	**>70 %**	**>80 %**	**>90 %**
1	97 %	96 %	96 %	91 %	72 %	61 %	42 %	25 %	10 %
2	90 %	87 %	80 %	59 %	36 %	9 %	3 %	3 %	1 %
3	59 %	51 %	32 %	25 %	6 %	-	-	-	-
4	20 %	14 %	12 %	4 %	-	-	-	-	-
5	6 %	6 %	4 %	-	-	-	-	-	-
6	1 %	1 %	-	-	-	-	-	-	-

Tablica 15 prikazuje podatke za primorsku Hrvatsku na jednak način kao što Tablica 14 prikazuje podatke za kontinentalnu, odnosno podaci se očitavaju na jednak način.

Vrijednosti čimbenika arhitektonskog oblikovanja u proračunu potrošnje energije, koji su ujedno i čimbenici energetske učinkovitosti, variraju ovisno o polaznoj ideji oblikovanja kuće. Kod zgrada kod kojih energetska učinkovitost nije prioritet, očekivan je nasumični raspon vrijednosti čimbenika promatranih u ovom radu. Zgrade koje imaju razvedeno oblikovanje uslijed funkcionalne dispozicije imaju nepovoljan faktor oblika, ili zgrade koje komuniciraju s okolišem posredstvom velikih ostakljenih ploha imati će nepovoljan udio otvora u ovojnici.

Svaki čimbenik koji je značajno odstupa od prosjeka ističe se u vizualnom dojmu zgrade, odnosno postaje nositelj arhitektonskog oblikovanja. S druge strane, zgrade kod kojih je niska razina potrošnje energije prioritet, arhitektonsko oblikovanje mora biti usklađeno s načelima energetski učinkovitog oblikovanja. Takvo usklađenje je nužno zato što oblikovanje ima značajan utjecaj na potrošnju energije. Primjer takvog oblikovanja su pasivne kuće koje imaju sve, ili gotovo sve geometrijske parametre povoljnije od prosjeka. To su vrlo kompaktne kuće, orijentirane prema jugu, s vanjskim zaštitama od sunca, velikim debljinama toplinske izolacije. Drugim riječima, kod takvih kuća arhitektonsko oblikovanje mora se pridržavati načela energetski učinkovitog oblikovanja. Trenutni i budući obvezujući energetski standardi u Europskoj uniji zahtjevni su u pogledu izvora energije koji u velikoj mjeri moraju biti obnovljivi, ali potrebna energija za grijanje i hlađenje može biti na optimalnim razinama. Zato arhitektonsko oblikovanje nije nužno podređeno načelima energetski učinkovitog oblikovanja.

Slika 1 prikazuje vjerojatnost određenog računskog prosjeka za 6 čimbenika arhitektonskog oblikovanja koji variraju od -1,0 do 1,0 u intervalima koraka 0,1. Najočekivaniji prosjek za takve vrijednosti je interval najbliži 0 dok za ostale prosjeke vjerojatnost geometrijski pada. Za prosjek u intervalu 0,0 do 0,1 vjerojatnost je 16 %, za prosjek u intervalu 0,4 do 0,5 vjerojatnost je 3 %, a vjerojatnost za prosjek u intervalu 0,9 do 1,0 iznosi svega 0,001 %.

Slika 25 i Slika 27 prikazuju broj kuća čiji prosjek promatranih čimbenika pripada intervalima u koraku 0,1 za kontinentalnu i primorsku Hrvatsku. Kod kuća u oba klimatska područja vidljivo je da su prosjeci čimbenika zastupljeniji u području bolje energetske učinkovitosti od očekivanog prosjeka. U kontinentalnom području, 21 kuća (od očekivanih 12) ima prosjek čimbenika u intervalu od -0,2 do -0,1, dok je u primorskom predjelu 19 kuća (od očekivanih 11) s prosjekom čimbenika u intervalu od -0,1 do 0, i 15 kuća (od očekivanih 11) a prosjekom čimbenika u intervali 0 do 0,1. Nepostojanje uzoraka u području ekstremnih vrijednosti je očekivano i potvrđeno ovom raspodjelom za oba klimatska područja.

Za šest čimbenika, mala je vjerojatnost da će velik broj njih značajno nepovoljno odstupati, a gotovo nepostojeća vjerojatnost da će svi značajno nepovoljno odstupati. Slika 25 i Slika 27 potvrđuju Batesinu raspodjelu očekivanih odstupanja u odnosu na broj kuća, pogotovo u području ekstremnih nepovoljnih vrijednosti koje su predmet ovog istraživanja.

Tablica 14 i Tablica 15 prikazuju postotak kuća s određenim brojem čimbenika koji nepovoljno odstupaju od prosjeka. Promatramo li maksimalno nepovoljno odstupanje (u rasponu 90 % do

100 %), tada 10 % kuća u kontinentalnoj i primorskoj Hrvatskoj ima jedan takav čimbenik. Dva čimbenika s tolikim odstupanjem ima samo 4 % kuća u kontinentalnoj i 1 % u primorskoj Hrvatskoj, dok 3 čimbenika u tom rasponu nema niti jedna kuća. Od ukupnog broja analiziranih kuća, njih 13 % ima čimbenike u rasponu odstupanja 90 % do 100 %. Manja odstupanja čimbenika ima značajno veći broj kuća – jedan čimbenik s nepovoljnim odstupanjem od minimalno 10 % ima 95 % kuća u kontinentalnom području, ali svih šest čimbenika s tolikim nepovoljnim odstupanjem ima samo 1 % kuća u primorju.

Statističkom obradom proračuna potrošnje energije u sklopu projekta racionalne uporabe energije za 82 kuće iz kontinentalnog područja i 69 kuća iz primorskog područja Hrvatske određene su geometrijske referentne vrijednosti i intervali pojedinog čimbenika arhitektonskog oblikovanja i energetske učinkovitosti. Analizom rezultata, prosjeka odstupanja, broja kuća te čimbenika koji odstupaju, potvrđena je hipoteza 1, odnosno da je vjerojatnost istovremenog odstupanja velikog broja elemenata oblikovanja zgrade od načela energetski učinkovitog oblikovanja statistički mala, a vjerojatnost odstupanja svih čimbenika je gotovo nepostojeća.

4.4 Referentni model, geometrijske i fizikalne karakteristike

Za referentni oblikovni i energetski model određen je niz varijabli i formula potrebnih za izračun svih potrebnih čimbenika energetske učinkovitosti. Tablica 16 prikazuje geometrijske i fizikalne parametre kuća, a čiji je način izračuna prikazan u poglavlju Postavke proračunskog modela.

Tablica 16: Geometrijske i fizikalne veličine referentnih modela

		Klimatsko područje	
		Kontinent	**Primorje**
V_e (m^3)	Volumen grijanog dijela zgrade	926,54	992,04
V (m^3)	Volumen grijanog zraka	602,25	644,83
A_f (m^2)	Bruto ploština zgrade	284,98	310,20
A_k (m^2)	Korisna ploština zgrade	213,10	228,17
$A_{wall,N}$ (m^2)	Ploština zida prema sjeveru	82,60	83,36
$A_{wall,S}$ (m^2)	Ploština zida prema jugu	73,32	77,69
$A_{wall,E}$ (m^2)	Ploština zida prema istoku	74,18	80,03

$A_{wall,W}$ (m^2)	Ploština zida prema zapadu	73,32	77,69
$d_{TI,wall}$ (cm)	Debljina toplinske izolacije zida	18,10	11,16
$A_{win,N}$ (m^2)	Ploština prozora prema sjeveru	13,23	20,92
$A_{win,S}$ (m^2)	Ploština prozora prema jugu	22,51	26,59
$A_{win,E}$ (m^2)	Ploština prozora prema istoku	15,32	18,74
$A_{win,W}$ (m^2)	Ploština prozora prema zapadu	16,18	21,08
F_f (-)	Udio ostakljenja u otvorima	0,70	0,70
A_{roof} (m^2)	Ploština krova	169,83	171,39
$A_{int,e}$ (m^2)	Ploština poda iznad vanjskog prostora	12,50	18,86
$A_{fl,gr}$ (m^2)	Ploština poda na tlu unutar obodnih zidova	111,06	152,25
$A_{wall,gr}$ (m^2)	Ploština zida prema tlu	24,47	35,98
P (m)	Izloženi opseg poda grijanog prostora	53,79	63,13
$A_{wall,u}$ (m^2)	Ploština zida prema negrijanoj prostoriji	10,29	5,43
$A_{int,u}$ (m^2)	Ploština poda iznad negrijane prostorije	12,38	5,73
P_u (m)	Izloženi opseg poda negrijane prostorije	7,04	4,79

cm (MJ/K)	Akumulativnost topline	47,02	51,18
$H_{g,int}$ (W/m^2)	Unutarnji dobici topline	5,00	5,00
n (h^{-1})	Broj izmjena zraka	0,50	0,50
n_{pas} (h^{-1})	Broj izmjena zraka pri pasivnom hlađenju	1,50	1,50
$t_{start,HC}$ (h)	Početak rada sustava grijanja/hlađenja	7,00	7,00
$t_{op,HC}$ (h)	Vrijeme rada sustava grijanja/hlađenja	17,00	17,00
$n_{op,week}$ (h)	Broj dana rada sustava u tjednu	7,00	7,00
U_{wall} ($W/(m^2K)$)	Koeficijent prolaska topline zida	0,19	0,30
α_{zid} (-)	Apsorpcijski koeficijent površine zida	0,60	0,60
U_{win} ($W/(m^2K)$)	Koeficijent prolaska topline prozora	1,22	1,53
g_L (-)	Propuštanje ukupnog sunčevog zračenja okomito na površinu	0,60	0,60
$F_{C,C}$ (-)	Faktor naprave za zaštitu od pregrijavanja	0,39	0,42
$F_{C,G}$ (-)	Faktor naprave za zaštitu od bliještanja	0,90	0,90

U_{roof} (W/(m^{2}K))	Koeficijent prolaska topline krova	0,16	0,20
U_{floor} (W/(m^{2}K))	Koeficijent prolaska topline poda na tlu	0,25	0,33
$U_{wall,gr}$ (W/(m^{2}K))	Koeficijent prolaska topline zida prema tlu	0,25	0,33
Ψ (W/(mK))	Linijski koeficijent toplinskog mosta na spoju poda na tlu i vanjskog zida	0,25	0,25
$U_{int,e}$ (W/(m^{2}K))	Koeficijent prolaska topline poda iznad vanjskog zraka	0,16	0,20
$U_{wall,u}$ (W/(m^{2}K))	Koeficijent prolaska topline zida prema negrijanoj prostoriji	0,25	0,40
$U_{int,u}$ (W/(m^{2}K))	Koeficijent prolaska topline poda iznad negrijane prostorije	0,25	0,40

Referentni oblikovni model za kontinentalnu i primorsku klimu formiran je kao prosjek geometrijskih vrijednosti promatranih čimbenika, dok je za ostale parametre utvrđen niz matematičkih formula koje osiguravaju prostornu izvedivost modela. U pogledu fizikalno-tehničkih parametara, izrađena su dva scenarija proračuna za svako klimatsko područje: osnovni i varijantni. Na taj način uspoređen je trenutno obvezujući način proračuna energetskih svojstava zgrade i detaljniji način koji daje realnije rezultate, a uključuje niz dodatnih parametara poput recentnijih klimatskih podataka, korigiranih projektnih temperatura, pasivnog hlađenja te razlikovanje zaštite od pregrijavanja i blještanja sunca. Oba načina proračuna upotrebljavaju jednake geometrijske i fizikalne karakteristike modela.

4.5 Promjena klime

U osnovnom scenariju proračuna korišteni su meteorološki podaci reprezentativni za 30-godišnji prosjek klime, dok varijantni model primjenjuje meteorološke podatke reprezentativne za 10-godišnji prosjek. Podaci o temperaturama i sunčevom zračenju za razdoblje od 2015. godine rezultat su mjerenja meteoroloških postaja u Zagrebu i Splitu. Tablica 17 i Tablica 18 prikazuju srednje dnevne temperature proteklih deset godina i reprezentativnih godina za Zagreb i Maksimir. Za Zagreb reprezentativna godina obuhvaća niz mjeseci iz razdoblja od 1.3.2004. do 28.2.2013., a za Split iz razdoblja od 1.10.2003. do 30.9.2012., što znači da vremenski razmak promatranih meteoroloških podataka iznosi otprilike deset godina.

Tablica 17: Srednje dnevne temperature (°C) za Zagreb [11]

Mj / God	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Prosj.*	Repr. God**	Razlika
1	3,3	1,3	-3,2	5,2	1,5	1,1	2,8	2,0	4,9	2,0	2,1	-1,2	+3,3
2	2,5	6,9	5,2	0,2	4,8	7,6	5,7	5,7	4,2	9,2	5,2	2,3	+2,9
3	7,8	8,0	10,1	5,2	9,5	7,8	6,8	6,3	9,0	10,4	8,1	7,4	+0,7
4	11,9	13,0	12,4	16,1	12,4	13,2	9,8	11,1	10,8	13,8	12,4	12,7	-0,3
5	17,5	16,1	17,7	19,5	13,7	15,7	14,7	18,5	16,5	17,7	16,8	16,7	±0,0
6	20,8	21,1	22,5	21,4	23,8	20,3	23,3	23,3	21,1	22,4	22,0	20,9	+1,1
7	24,1	23,4	24,0	22,5	22,9	21,8	24,0	24,0	23,5	24,9	23,5	22,2	+1,3
8	23,0	20,8	23,7	23,7	23,5	22,9	21,4	23,5	22,0	25,3	23,0	23,4	-0,4
9	17,6	18,6	15,4	17,7	17,3	18,1	17,9	16,8	19,9	17,9	17,7	18,2	-0,5
10	11,2	10,4	11,9	13,7	13,2	12,6	10,1	14,3	15,6	13,5	12,7	12,6	+0,1
11	8,2	6,8	7,3	7,9	9,2	5,7	6,5	7,9	7,3	5,4	7,2	8,8	-1,6
12	3,2	-0,4	4,0	2,8	4,6	4,1	3,6	4,7	4,8	3,1	3,4	2,0	1,4
Prosj	12,6	12,2	12,6	13,0	13,0	12,6	12,2	13,2	13,3	13,8	12,8	12,2	+0,7

* Prosječna godišnja i dnevna temperature po mjesecima za posljednjih deset godina (°C)

** Prosječne godišnje i dnevne temperature po mjesecima za reprezentativnu godinu korištenu za 30-godišnji prosjek klime (°C)

Tablica 18: Srednje dnevne temperature (°C) za Split [11]

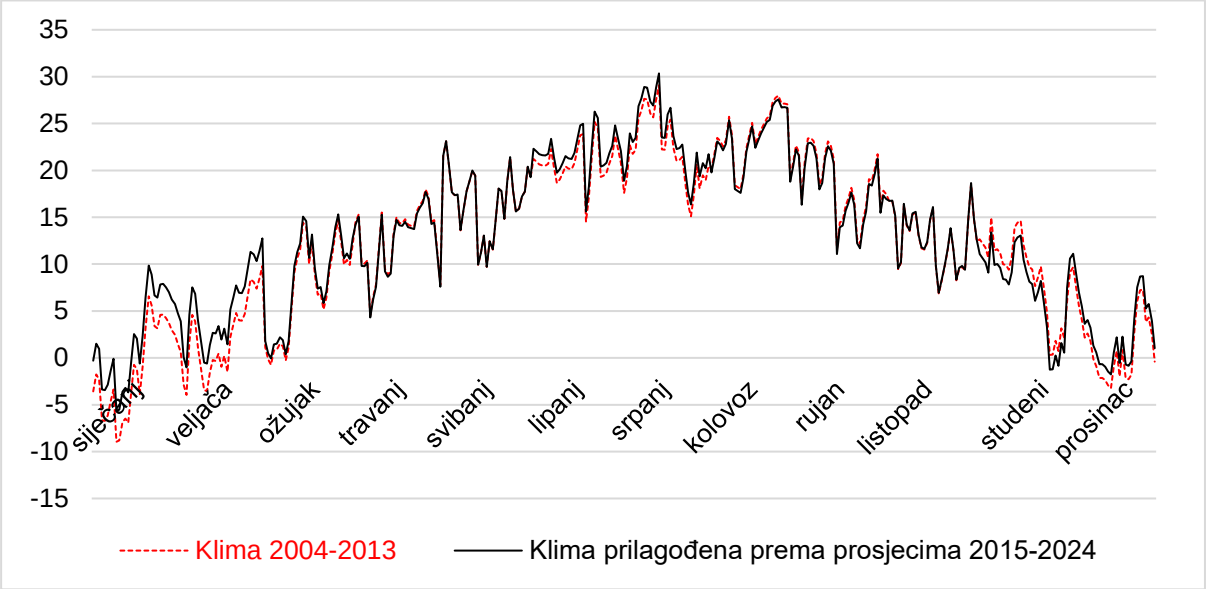
Mj / God	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Prosj.*	Repr. God**	Razlika
1	8,6	8,8	4,6	10,0	6,3	9,7	7,7	8,6	9,7	9,9	8,4	8,6	-0,3
2	8,8	11,5	10,5	7,0	10,0	11,0	10,3	10,1	8,9	12,7	10,1	7,7	+2,4
3	11,3	11,6	13,4	10,6	12,9	11,8	10,5	10,3	12,4	13,4	11,8	10,4	+1,5
4	14,3	16,5	14,4	18,0	15,6	15,9	12,9	14,0	14,0	17,2	15,3	15,5	-0,2
5	20,4	18,7	20,1	22,3	16,3	19,8	19,2	21,7	19,8	20,5	19,9	20,5	-0,6
6	24,4	24,2	25,8	24,6	26,5	23,0	26,0	27,4	24,2	26,2	25,2	25,5	-0,3
7	29,5	27,7	27,5	27,5	27,0	26,4	28,6	28,7	28,6	29,5	28,1	27,1	+1,0
8	27,6	25,7	28,8	28,2	28,2	27,7	27,3	27,4	27,1	29,5	27,8	27,6	+0,2
9	22,6	22,2	20,6	23,4	22,8	23,6	22,9	21,7	24,6	22,3	22,7	22,9	-0,2
10	17,4	16,3	17,1	19,1	18,8	17,0	16,4	19,9	20,6	19,4	18,2	15,8	+2,4
11	13,7	12,8	12,2	14,4	15,6	13,7	14,5	14,4	13,7	13,3	13,8	11,9	+2,0
12	11,1	9,7	8,9	9,0	11,1	11,3	9,8	12,0	11,4	10,4	10,5	10,7	-0,2
Prosj	17,5	17,1	17,0	17,8	17,6	17,6	17,2	18,0	17,9	18,7	17,6	17,0	+0.6

* Prosječna godišnja i dnevna temperature po mjesecima za posljednjih deset godina (°C)

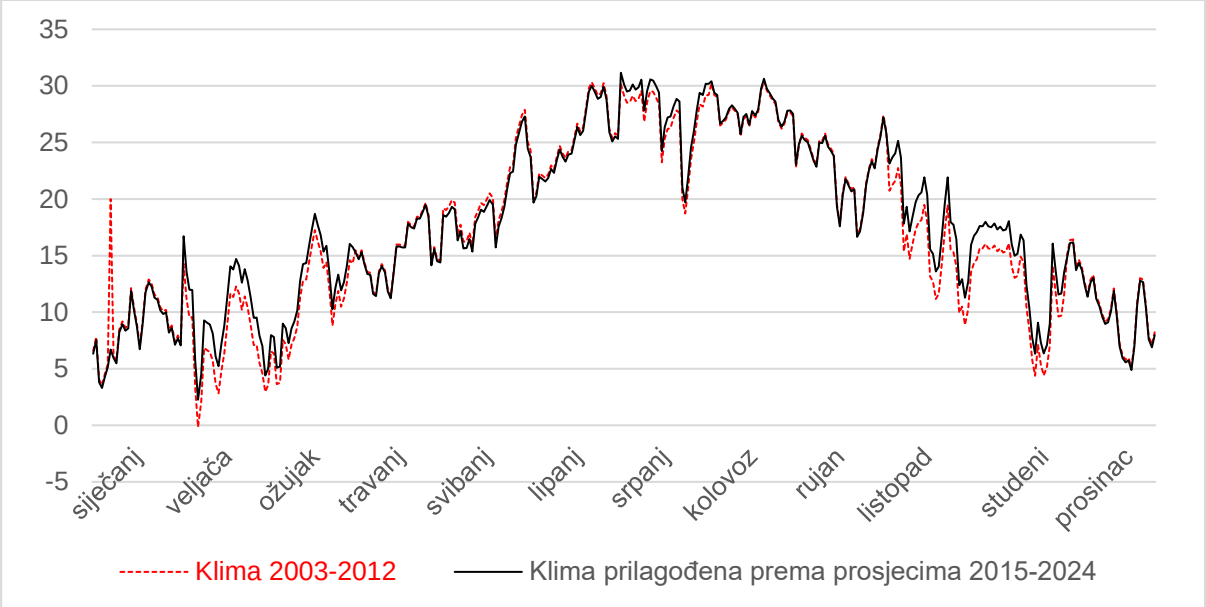
** Prosječne godišnje i dnevne temperature po mjesecima za reprezentativnu godinu korištenu za 30-godišnji prosjek klime (°C)

[11] Podaci dobiveni ljubaznošću Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ). Korišteno uz izričito dopuštenje za potrebe ovoga doktorskog rada

S obzirom na trend rasta globalnih temperatura posljednjih godina i relevantnost ovog rada za buduće zgrade i energetske standarde, analizirane su i uspoređene varijante potrošnje energije s 30-godišnjim prosjekom klime i prosjekom klime za posljednjih deset godina. Satni podaci reprezentativne godine korigirani su na način opisan u poglavlju Postavke proračunskog modela i odgovaraju prosječnim izmjerenim vrijednostima u posljednjih deset godina (Slika 28 i Slika 29).



Slika 28: Korigirane dnevne temperature za postaju Zagreb (°C)



Slika 29: Korigirane dnevne temperature za postaju Split (°C)

Mjerenja temperatura u Zagrebu pokazuju da su prosječne godišnje temperature u posljednjih deset godina varirale od 12,2 °C do 13,8 °C, odnosno sve godine od 2015. bile su jednako tople ili toplije u odnosu na reprezentativnu godinu za 30-godišnji prosjek klime. Varijacije u mjesečnim temperaturama još su veće u sezonama grijanja i hlađenja. Veljača 2024. godine bila je 6,9 °C toplija, a studeni 2024. 3,4 °C hladniji promatrano u sezoni grijanja, dok je u sezoni hlađenja lipanj 2019. godine topliji za 2,9 °C a svibanj iste godine hladniji za 3,0 °C od mjesečnih temperatura reprezentativnih godina. Promatraju li se mjesečni prosjeci za posljednjih deset godina u odnosu na reprezentativnu godinu, u sezoni grijanja mjesečne temperature variraju od -1,6 °C do +3,3 °C, a u sezoni hlađenja od -0,5 °C do +1,3 °C. 10-godišnji prosjek godišnjih temperatura veći je za 0,7 °C u odnosu na 30-godišnji prosjek klime.

U Splitu u posljednjih deset godina prosječne godišnje temperature variraju od 17,0 °C do 18,7 °C što također pokazuje da su sve godine od 2015. bile jednako tople ili toplije u odnosu na reprezentativnu godinu. Veljača 2024. godine bila je 5,0 °C toplija, a siječanj 2017. 4,0 °C hladniji promatrano u sezoni grijanja, dok je u sezoni hlađenja srpanj 2024. godine topliji za 2,4 °C, a svibanj iste godine hladniji za 4,0 °C od mjesečnih temperatura reprezentativne godine. Mjesečni prosjeci za posljednjih deset godina u odnosu na reprezentativnu godinu u sezoni grijanja pokazuju mjesečne varijacije od -0,3 °C do +2,4 °C, a u sezoni hlađenja od -0,6 °C do +2,4 °C. 10-godišnji prosjek godišnjih temperatura veći je za 0,6 °C u odnosu na 30-godišnji prosjek klime.

Trend rasta globalnih temperatura iznosi 0,4 °C na 10 godina [98], dok izmjerene temperature u Zagrebu i Splitu pokazuju znato veći rast, 0,7 °C u Zagrebu i 0,6 °C u Splitu za razdoblje od deset godina. To je u skladu s rezultatima dosadašnjih istraživanja koja pokazuju brže zagrijavanje Europe od ostatka svijeta [50, 51, 53]. Van Oldenborgh et al. (2009.) navode trend rasta temperatura od 0,04 °C/a do 0,06 °C/a što bi za 10-godišnje razdoblje iznosilo 0,4 °C do 0,6 °C [50] gdje je povećanje od 0,6 °C približno onima izmjerenim u Zagrebu i Splitu. Twardosz et al. (2021.) dobivaju rezultate prema kojima bi porast temperatura za Europu trebao iznositi od 0,55 °C u 10 godina, s tim da bi najveći rast trebao biti u jeseni za 0,61 °C a najmanji u proljeće za 0,45 °C uz mogućnost većih lokalnih odstupanja, a za južnu i jugozapadnu Europu očekuju najveće zagrijavanje ljeti [51]. Godišnji izmjereni porast temperatura u Hrvatskoj donekle odgovara njihovom ukupnom trendu porasta, ali prema godišnjim dobima u Zagrebu najveći je rast temperatura u zimi, a u Splitu u zimi i jeseni. Različito zagrijavanje pojedinih

dijelova Europe potvrđuju analize temperatura atlantske obale gdje je trend rasta godišnjih temperatura 0,03 °C/a [52], odnosno upola sporije u odnosu na Hrvatsku.

Meteorološki podaci koji se koriste u proračunu potrošnje energije za grijanje i hlađenje uključuju i solarno zračenje. Izmjereno solarno zračenje u proteklih deset godina u Zagrebu i Splitu, za dostupne godine, pokazuje značajna odstupanja od reprezentativnih godina u pojedinim mjesecima i godinama. Ali ako promatramo godišnji prosjek mjerenja, odstupanja su ipak vrlo mala, 1,4 % manje solarno zračenje u Zagrebu i 3,6 % veće u Splitu u posljednjih deset godina. Tablica 18 i Tablica 19 prikazuju usporedbu izmjerenih vrijednosti solarnog zračenja od 2015. godine u odnosu na reprezentativnu godinu.

Tablica 19: Globalno solarno zračenje na horizontalnu plohu, H_{hor} (kWh/m^{2}a) – Zagreb [11]

Mj / God	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**Prosjek***	**Repr. God.****	**Razlika**
1	30	37	33	33	32	40	34	-	-	34	25	+9
2	46	38	51	38	66	61	67	-	-	53	46	+6
3	102	79	113	74	105	104	119	-	-	99	101	-1
4	141	127	130	151	120	174	129	-	-	139	126	+13
5	157	156	174	175	119	166	169	-	-	159	179	-20
6	194	181	197	162	202	175	227	-	-	191	188	+3
7	195	182	204	179	187	198	195	-	-	191	181	+10
8	168	167	180	168	163	163	175	-	-	169	195	-26
9	104	123	80	119	111	80	138	-	-	108	113	-5
10	52	60	85	78	81	74	75	-	-	72	81	-9
11	50	37	33	30	30	29	32	-	-	34	39	-5
12	27	28	33	29	26	18	28	-	-	27	21	+6
Uk.	**1.265**	**1.214**	**1.312**	**1.237**	**1.242**	**1.284**	**1.389**	**-**	**-**	**1.278**	**1.296**	**-18**

* Prosječno globalno zračenje po mjesecima za zadnjih 10 godina (kWh/m^{2}a)

** Prosječno globalno zračenje po mjesecima za reprezentativnu godinu korištenu za 30-godišnji prosjek klime (kWh/m^{2}a)

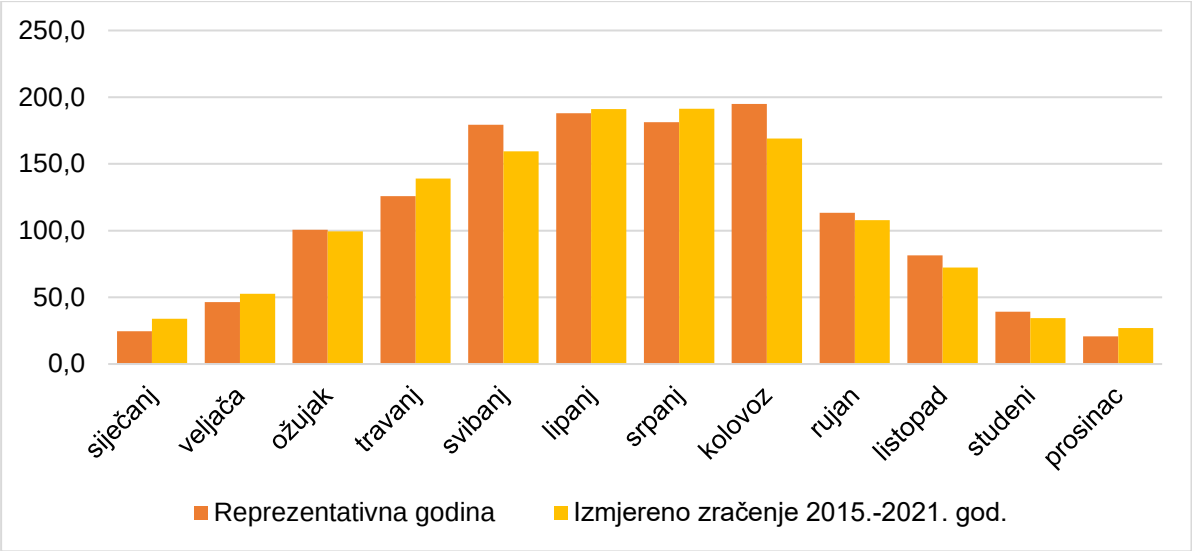
Tablica 20: Globalno solarno zračenje na horizontalnu plohu, H_{hor} (kWh/m^{2}a) – Split [11]

Mj / God	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**Prosjek***	**Repr. God.****	**Razlika**
1	53	37	60	54	50	64	41	62	47	52	44	+8
2	70	55	67	61	80	82	73	75	77	71	65	+6
3	120	109	138	94	134	124	132	137	123	123	115	+8
4	155	155	150	165	150	173	156	169	157	159	146	+13
5	192	190	208	206	153	171	200	203	173	188	200	-12
6	218	206	226	194	217	206	219	226	201	213	216	-3
7	234	229	233	223	217	217	222	231	230	226	215	+11
8	190	199	203	193	203	187	197	188	197	195	200	-5
9	146	142	89	150	138	140	157	133	146	138	135	+3
10	84	94	113	91	104	94	101	109	100	99	84	+15
11	68	52	54	55	45	64	39	52	49	53	51	+3
12	59	57	43	39	42	38	42	33	45	44	37	+7
Uk.	**1.589**	**1.524**	**1.584**	**1.525**	**1.534**	**1.561**	**1.578**	**1.620**	**1.546**	**1.562**	**1.508**	**+54**

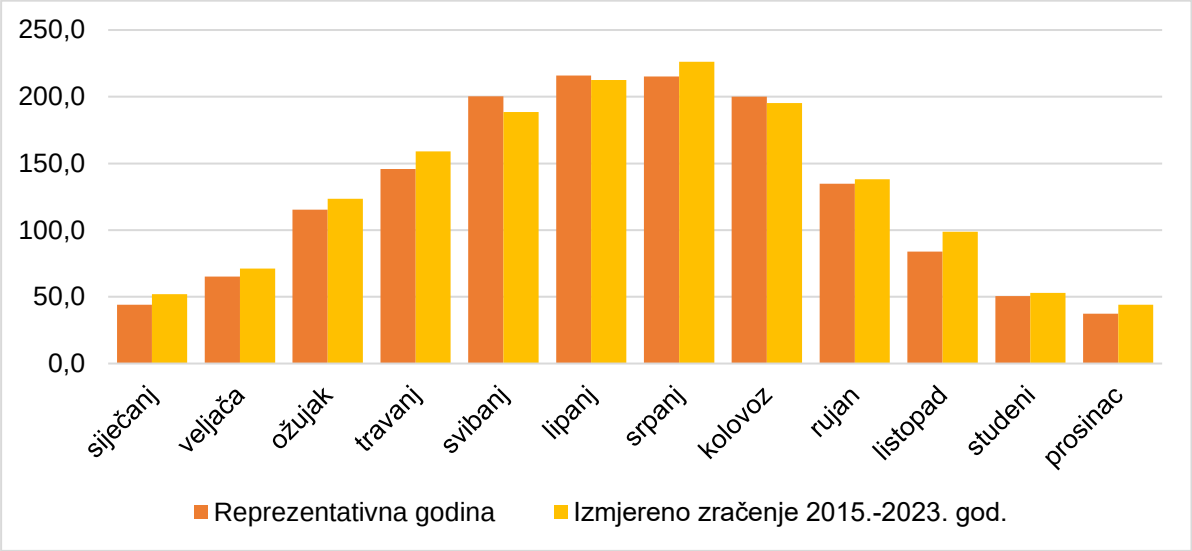
* Prosječno globalno zračenje po mjesecima za posljednjih deset godina (kWh/m^{2}a)

** Prosječno globalno zračenje po mjesecima za reprezentativnu godinu korištenu za 30-godišnji prosjek klime (kWh/m^{2}a)

Tijekom zimskih mjeseci u Zagrebu je solarno zračenje u prosjeku bilo do 38 % veće od prosjeka za razdoblje 2015. – 2021. godine, a u Splitu do 18 % za razdoblje 2015. – 2023. godine, dok su ljetna odstupanja značajno manja za oba grada – približno 6 %. Unatoč velikim razlikama u pojedinim mjesecima, na razini godine razlika u solarnom zračenju znatno je manja (Slika 30 i Slika 31). Godišnje globalno zračenje u Zagrebu bilo je 2016. godine 6 % manje od prosjeka, 2021. godine 7 % veće od prosjeka, a prosjek za razdoblje 2015. – 2021. godine manji je za 1,4 % od reprezentativne godine. U Splitu sve godine bilježe 1 do 7 % veće globalno zračenje, a prosjek za razdoblje 2015. – 2023. godine iznosi 4% više od reprezentativne godine.



Slika 30: Globalno solarno zračenje, H_{hor} (kWh/m^2) Zagreb



Slika 31: Globalno solarno zračenje, H_{hor} (kWh/m^2) Split

Istraživanja promjene solarnog zračenja pokazuju povećano globalno zračenje u Europi u posljednjih 30 godina. Schwartz et al. (2020.) zaključuju da povećanje solarnog zračenja u Europi iznosi 4 % do 8 % u proteklih 30 godina, s tim da je najveći porast zračenja u Sredozemlju [100], Wang et al. (2023.) koriste drugi model izračuna i prikazuju znatno manji porast od 1 % do 3 % u 35 godina [101] dok Stamatis et al. (2023.) također dobivaju rezultate povećanja zračenja od 4 % do 7 % ovisno o regiji [102]. Rezultati mjerenja u Zagrebu i Splitu pokazuju godišnje varijacije do 7% u odnosu na 30-godišnji prosjek klime. Prosječno povećanje globalnog zračenja za Split od 2015. – 2023. godine pokazuje povećanje od 4 % što je u skladu s dosadašnjim istraživanjima, dok je prosjek globalnog zračenja 2015. – 2021. godine za Zagreb

niži za 1,4 % od 30-godišnjeg prosjeka, a čije se odstupanje može objasniti godišnjom varijabilnošću klimatskog sustava.

4.6 Isporučena energija i CO_2 emisije grijanja i hlađenja

Tablica 21 prikazuje učinkovitosti proizvodnje toplinske i rashladne energije raznih termotehničkih sustava grijanja i hlađenja određenih prema Algoritmu za proračun potrebne energije za primjenu ventilacijskih i klimatizacijskih sustava kod grijanja i hlađenja prostora zgrade [133], Algoritmu za proračun dizalice topline zrak-zrak [134] i Algoritmu za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama [135].

Izračun specifičnih CO_2 emisija proizvodnje toplinske i rashladne energije obuhvaća dva čimbenika. Jedan čimbenik je učinkovitost termotehničkih sustava, a drugi specifične CO_2 emisije energenta korištenog u termotehničkom sustavu. Način izračuna specifičnih CO_2 emisija grijanja i hlađenja opisan je u poglavlju Postavke proračunskog modela.

Tablica 21: Učinkovitosti proizvodnje toplinske i rashladne energije,

GRIJANJE		
Dizalica topline zrak-voda (A2/W30)	*COP* (-)	4,03
Dizalica topline zrak-zrak (VRF sustav) (A2/T20)		4,05
Kotao na biomasu	$\eta_{gnr,Pint,corr}$ (-)	0,85
HLAĐENJE		
Dizalica topline zrak-voda	*EER* (-)	2,80
	PLV_{AV} (-)	1,32
	Uk. učinkovitost	3,70
Dizalica topline zrak-zrak (Split sustav)	*EER* (-)	2,90
	PLV_{AV} (-)	1,37
	Uk. učinkovitost	3,97

Gdje su:

COP – deklarirani toplinski množitelj (-),

$\eta_{gnr,Pint,corr}$ – korigirana učinkovitost kotla pri djelomičnom opterećenju (-),

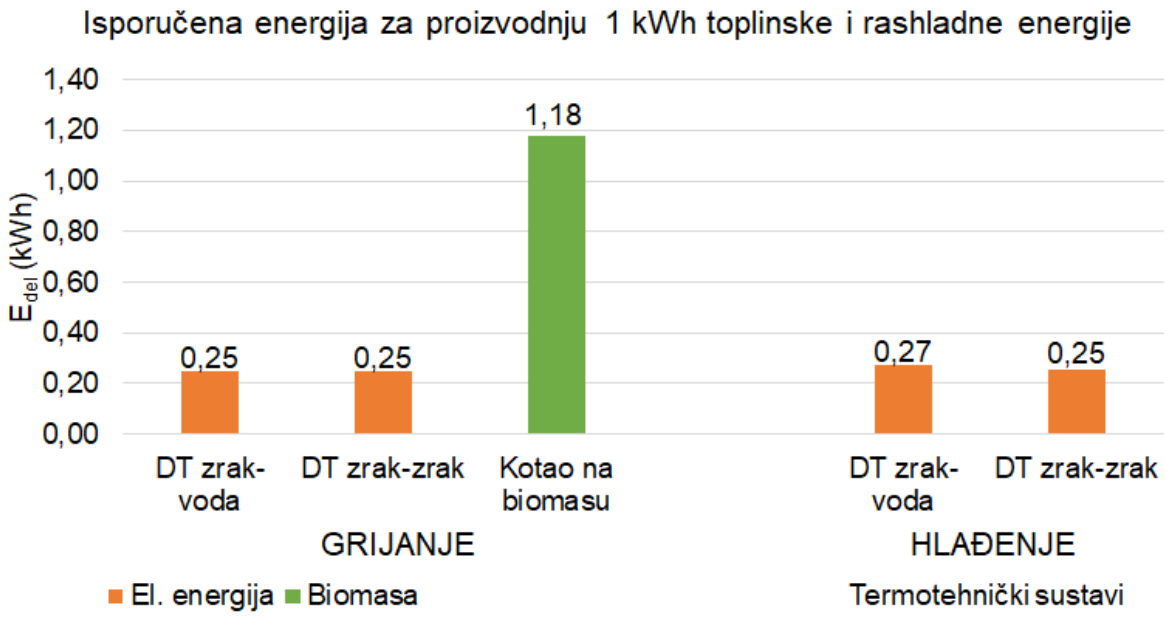
EER - faktor energetske učinkovitosti rashladnog uređaja (-),

PLV_{AV} - prosječni faktor djelomičnog opterećenja (-).

Za proizvodnju toplinske energije kod dizalice topline zrak-voda iskazan je toplinski množitelj (COP) za temperaturu zraka 2 °C i temperaturu prolaza vode za grijanje 30 °C, određen prema Algoritmu za izračun za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama [135]. Za dizalicu topline zrak-zrak iskazan je toplinski množitelj za temperaturu zraka 2 °C i temperaturu grijanja 20 °C [134]. Kod kotla na biomasu, učinkovitost kotla pri djelomičnom opterećenju izračunata je za kotao na biomasu s ventilatorskim plamenikom poslije 1994. godine prema navedenom Algoritmu. Izračun je izrađen za djelomično opterećenje budući da je kotao većinu vremena u tom načinu rada. [135]

Za proizvodnju rashladne energije kod dizalice topline zrak-voda, faktor energetske učinkovitosti rashladnog uređaja iskazan je za zrakom hlađeni kompresorski sustav, a prosječni faktor djelomičnog opterećenja za regulaciju "uklj./isklj." s akumulacijskim spremnikom. Kod dizalice topline zrak-zrak faktor energetske učinkovitosti rashladnog uređaja iskazan je za zrakom hlađeni sobni rashladni sustav (split-sustavi s više unutarnjih jedinica), a prosječni faktor djelomičnog opterećenja za frekventnu regulaciju. [133]

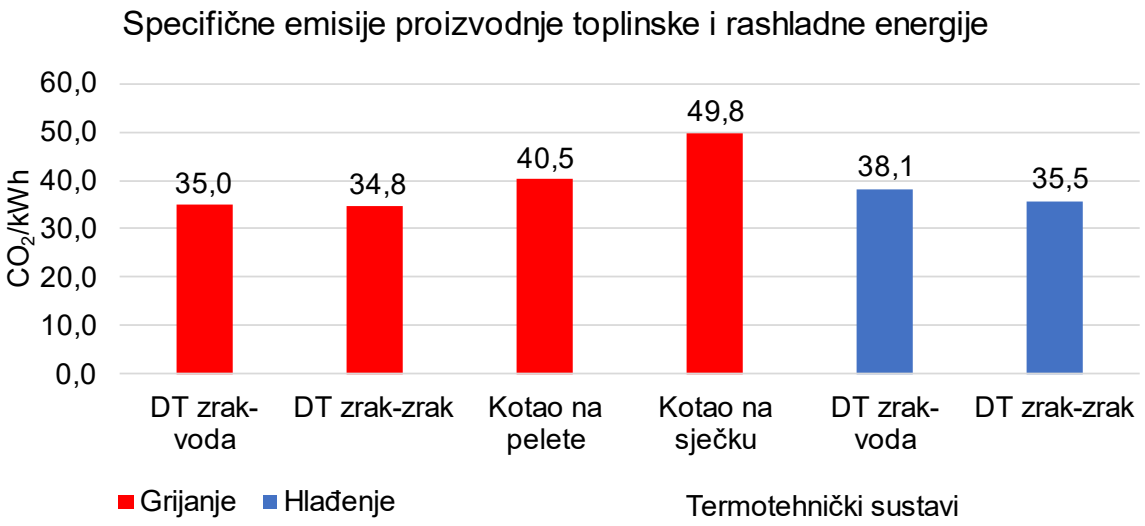
Isporučena energija za 1 kWh grijanja i hlađenja podjednaka je u slučaju dizalica topline, dok kotlovi na biomasu znatno odstupaju zbog manje učinkovitosti sustava, ali riječ je o drugom energentu. Ekonomska analiza koja bi obuhvatila cijene isporučenih energenata nije predmet ovog rada.



Slika 32: Isporučena energija, E_{del} (kWh) za proizvodnju 1 kWh toplinske i rashladne energije

Za navedene sustave poznate su CO_2 emisije korištenog energenta za proizvodnju 1 kWh toplinske ili rashladne energije. Energenti koji se koriste u ovim sustavima i njihove specifične CO_2 emisije za 1 kWh energije su *C* (gCO_2/kWh):

- električna energija 141,0 gCO_2/kWh (podatak za 2024. godinu) [118],
- drveni peleti 34,4 gCO_2/kWh [122],
- drvena sječka 42,4 gCO_2/kWh [122].



Slika 33: CO_2 emisije (gCO_2) za proizvodnju 1 kWh toplinske i rashladne energije

Slika 33 prikazuje odnos CO_2 emisija ovisno o termotehničkom sustavu i energentu ostvarene za proizvodnju 1 kWh potrebne toplinske i rashladne energije. Emisije za potrebe grijanja u slučaju biomase kreću se od 40,5 do 49,8 gCO_2/kWh, a kod dizalica topline od 34,8 do 35,0 gCO_2/kWh. Emisije za potrebe hlađenja kreću se od 59,1 do 63,5 gCO_2/kWh.

Isporučena energija i specifične CO_2 emisije grijanja i hlađenja određene su temeljem učinkovitosti raznih vrsta termotehničkih sustava te specifičnim emisijama energenata. Izračunate učinkovitosti dizalica topline u grijanju iznose 4,03 do 4,05 što se nalazi unutar raspona vrijednosti prikazanim u dosadašnjim istraživanjima. Willem et al. (2017.) za suvremene dizalice topline s funkcijom grijanja i hlađenja navode vrijednost od 3,9 [18], Priarone et al. (2020.) prikazuju vrijednosti učinkovitosti 4,2 do 5,0 [19]. Staffell et al. (2012.) iznose nešto niže vrijednosti od 2,8 do 3,0 [17], Carroll et al. (2021.) prezentiraju vrijednosti od 3,0 do 3,5 za idealne uvjete [20] kao i Wang et al. (2021.) koji za hladne klime navode učinkovitosti od 3,1 do 3,6 [21]. Izračunata korigirana učinkovitost kotla na biomasu pri

djelomičnom opterećenju iznosu 0,85 što također odgovara učinkovitostima obrađenim u dosadašnjim radovima. Chandrasekaran et al. (2012.) prikazuju rezultate za kotlove na biomasu različite snage koji postižu učinkovitosti u rasponu 0,70 do 0,91 [120], dok Nocoń et al. (2024.) u laboratorijskim uvjetima postižu učinkovitosti od 0,84 do 0,96 [121]. Izračunata učinkovitost dizalica topline u hlađenju iznosi 3,70 do 3,97 što je također unutar raspona prezentiranog u obrađenim radovima. Priarone et al. (2020.) iznose učinkovitosti u hlađenju od 3,3 do 4,2 za tople klimatske uvjete [19] što odgovara rezultatima Wang et al. (2021.) koji prikazuju podatak o učinkovitosti hlađenja od 4,20 također za tople klime [21]. Specifične emisije energenata korištenih u izračunu obuhvaćaju drvene pelete i sječku te električnu energiju. Emisije iz različitih energenata iz biomase podjednake su [122] dok emisije električne energije variraju i na godišnjoj razini i između država članica Europske unije [118]. Izračun CO_2 emisija električne energije korištene u dizalicama topline izračunat je prema podacima o emisijama električne energije za Hrvatsku iz 2024. godine [118].

Isporučena energija za proizvodnju toplinske i rashladne energije kod dizalica topline, kao najčešće korištenih sustava u novim zgradama, je podjednaka. U slučaju kotlova na biomasu isporučena energija znatno je veća zbog manje učinkovitosti sustava, ali bitno je naglasiti da je riječ o drugom energentu. Analiza cijena energenata i isporučene energije nije daljnji predmet ovog istraživanja.

Iz prikazanih rezultata vidljivo je da su emisije grijanja i hlađenja podjednake kod dizalica topline, dok proizvodnja toplinske energije iz biomase ostvaruje nešto veće emisije. S obzirom na CO_2 emisije kao osnove za nadolazeći energetski standard, Zgrade nulte emisije, i s obzirom na to da su emisije proizvodnje energije podjednake kod dizalica topline i kotlova na biomasu, grijanje i hlađenje vrednovalo se jednako u evaluaciji energetske učinkovitosti. Detaljnija analiza CO_2 emisija nije predmet ovog rada.

4.7 Potrošnja energije referentnog modela

Za kontinentalnu i primorsku klimu ustanovljena je referentna potrošnja energije za grijanje i hlađenje za osnovni i varijantni scenarij proračuna. Proračun je izrađen prema Algoritmu za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790, Prilog A, Jednostavna satna metoda. Software za proračun napisan je u programskom jeziku Visual Basic.

4.7.1 Osnovni scenarij proračuna (kontinentalna klima)

U nastavku su prikazani rezultati potrošnje osnovnog scenarija za kontinentalnu klimu. Tablica 22 prikazuje podatke o korištenim meteorološkim podacima i postavke proračuna za osnovni model kontinentalne klime.

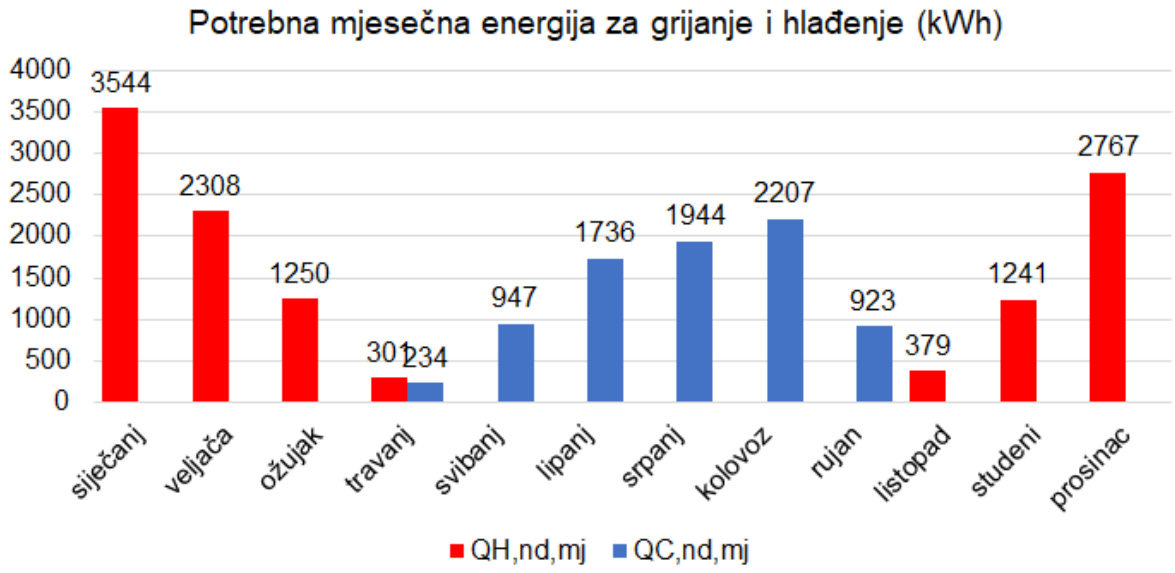
Tablica 22: Postavke proračuna – osnovni scenarij (kontinentalna klima)

Klimatski podaci	30-godišnji prosjek, reprezentativna godina 2004. do 2013.
Projektna temperatura grijanja, $\Theta_{int,set,H}$ (C°)	20
Projektna temperatura hlađenja, $\Theta_{int,set,C}$ (C°)	22
Broj izmjena zraka pri pasivnom hlađenju, n_{pas} (h^{-1})	n*
Faktor naprave za zaštitu od bliještanja, $F_{C,G}$ (-)	$F_{C,C}$**

* Ne koristi se pasivno hlađenje provjetravanjem ljeti, broj izmjena zraka potreban je higijenski minimum n = 0,5 h^{-1}.

** Za zaštitu od bliještanja tijekom zime koristi se ista naprava kao za zaštitu od pregrijavanja $F_{C,C}$ (-)

Slika 34 i Tablica 23 prikazuju rezultate potrošnje – godišnju potrebnu energiju za grijanje i hlađenje osnovnog scenarija proračuna kontinentalne klime.



Slika 34: Potrebne mjesečne energije za grijanje $Q_{H,nd,mj}$ (kWh) i hlađenje $Q_{C,nd,mj}$ (kWh) – osnovni scenarij proračuna (kontinentalna klima)

Tablica 23: Potrošnja energije referentnog modela – osnovni scenarij proračuna (kontinentalna klima)

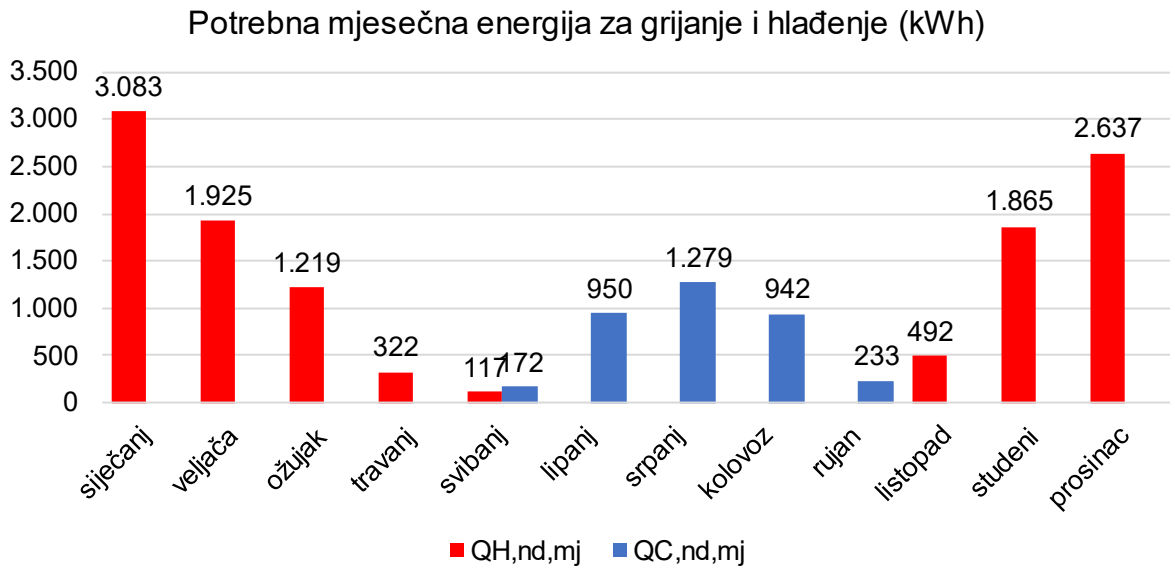
Pokazatelj	**Rezultat**
Godišnja potrebna energija za grijanje, $Q_{H,nd}$ (kWh/a)	11.789,98
Godišnja potrebna energija za hlađenje, $Q_{C,nd}$ (kWh/a)	7.991,65
Korisna površina zgrade, A_k (m^2)	213,10
Spec. godišnja potrebna energija za grijanje, $Q''_{H,nd}$ (kWh/(m^2a))	55,33
Spec. godišnja potrebna energija za hlađenje, $Q''_{C,nd}$ (kWh/(m^2a))	37,50
Specifična godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje, $Q''_{HC,nd}$ (kWh/(m^2a))	92,82

4.7.2 Varijantni scenarij proračuna (kontinentalna klima)

Tablica 24 prikazuje podatke o korištenim meteorološkim podacima i postavke proračuna za varijantni scenarij.

Tablica 24: Postavke proračuna – varijantni scenarij (kontinentalna klima)

Klimatski podaci	10-godišnji prosjek, 2015. do 2024.
Projektna temperatura grijanja, $\Theta_{int,set,H}$ (C°)	22
Projektna temperatura hlađenja, $\Theta_{int,set,C}$ (C°)	26
Broj izmjena zraka pri pasivnom hlađenju, n_{pas} (h^{-1})	1,5
Faktor naprave za zaštitu od bliještanja, $F_{C,G}$ (-)	0,9



Slika 35: Potrebne mjesečne energije za grijanje $Q_{H,nd,mj}$ (kWh) i hlađenje $Q_{C,nd,mj}$ (kWh) – varijantni scenarij proračuna (kontinentalna klima)

Tablica 25: Potrošnja energije referentnog modela – varijantni scenarij proračuna (kontinentalna klima)

Pokazatelj	**Rezultat**
Godišnja potrebna energija za grijanje, $Q_{H,nd}$ (kWh/a)	11.658,67
Godišnja potrebna energija za hlađenje, $Q_{C,nd}$ (kWh/a)	3.576,33
Korisna površina zgrade, A_K (m^2)	213,10
Spec. godišnja potrebna energija za grijanje, $Q''_{H,nd}$ (kWh/(m^2a))	54,71
Spec. godišnja potrebna energija za hlađenje, $Q''_{C,nd}$ (kWh/(m^2a))	16,78
Specifična godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje, $Q''_{HC,nd}$ (kWh/(m^2a))	71,49

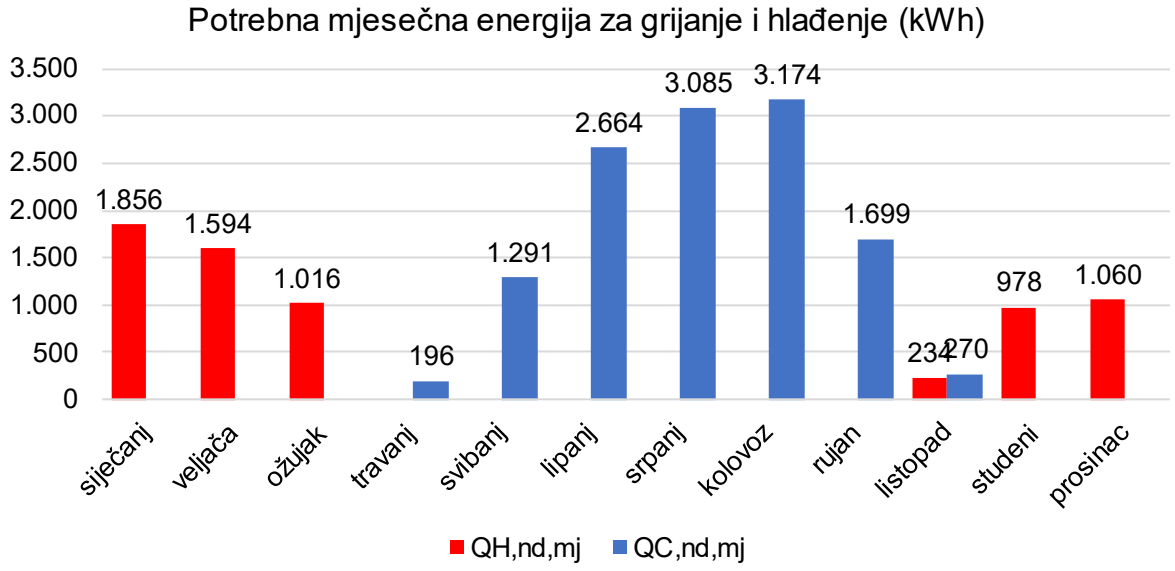
4.7.3 Osnovni scenarij proračuna (primorska klima)

Tablica 26: Postavke proračuna – osnovni model (primorska klima)

Klimatski podaci	**30-godišnji prosjek, reprezentativna godina 2004. do 2012.**
Projektna temperatura grijanja, $\Theta_{int,set,H}$ (C°)	20
Projektna temperatura hlađenja, $\Theta_{int,set,C}$ (C°)	24
Broj izmjena zraka pri pasivnom hlađenju, n_{pas} (h^{-1})	n*
Faktor naprave za zaštitu od bliještanja, $F_{C,G}$ (-)	$F_{C,C}$**

* Ne koristi se pasivno hlađenje provjetravanjem ljeti, broj izmjena zraka je potrebni higijenski minimum n = 0,5 h^{-1}.

** Za zaštitu od bliještanja tijekom zime se koristi ista naprava kao za zaštitu od pregrijavanja $F_{C,C}$ (-)



Slika 36: Potrebne mjesečne energije za grijanje $Q_{H,nd,mj}$ (kWh) i hlađenje $Q_{C,nd,mj}$ (kWh) – osnovni scenarij proračuna (primorska klima)

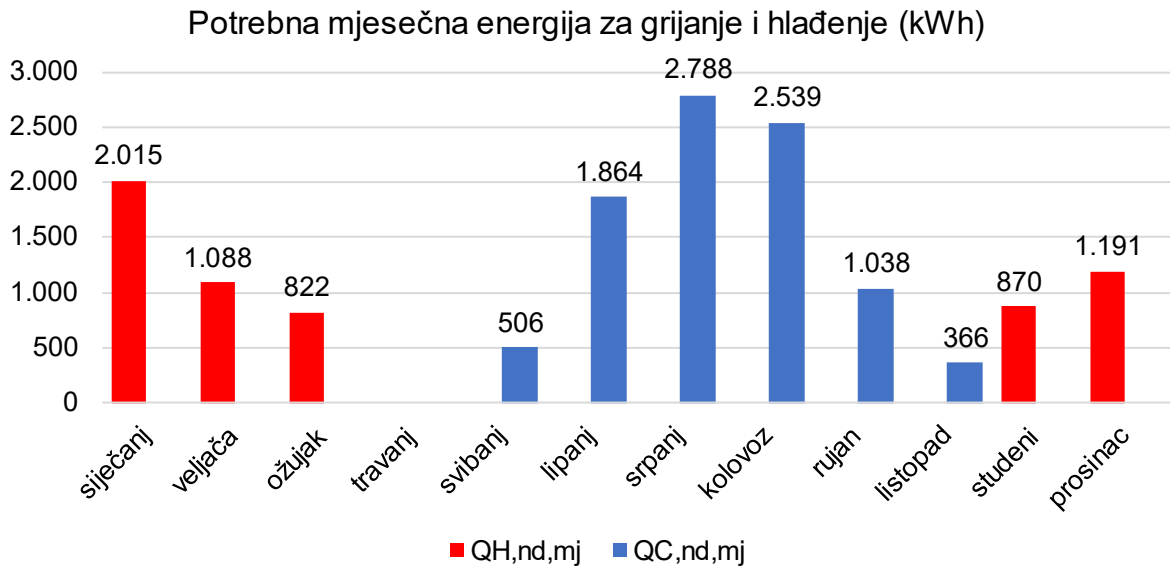
Tablica 27: Potrošnja energije referentnog modela – osnovni scenarij proračuna (kontinentalna klima)

Pokazatelj	**Rezultat**
Godišnja potrebna energija za grijanje, $Q_{H,nd}$ (kWh/a)	6.739,92
Godišnja potrebna energija za hlađenje, $Q_{C,nd}$ (kWh/a)	12.379,97
Korisna površina zgrade, A_k (m^2)	228,17
Spec. godišnja potrebna energija za grijanje, $Q''_{H,nd}$ (kWh/(m^2a))	29,53
Spec. godišnja potrebna energija za hlađenje, $Q''_{C,nd}$ (kWh/(m^2a))	54,26
Specifična godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje, $Q''_{HC,nd}$ (kWh/(m^2a))	83,79

4.7.4 Varijantni scenarij proračuna (primorska klima)

Tablica 28: Postavke proračuna – varijantni scenarij (primorska klima)

Klimatski podaci	**10-godišnji prosjek, 20015. do 2024.**
Projektna temperatura grijanja, $\Theta_{int,set,H}$ (C°)	22
Projektna temperatura hlađenja, $\Theta_{int,set,C}$ (C°)	26
Broj izmjena zraka pri pasivnom hlađenju, n_{pas} (h^{-1})	1,5
Faktor naprave za zaštitu od bliještanja, $F_{C,G}$ (-)	0,9



Slika 37: Potrebne mjesečne energije za grijanje $Q_{H,nd,mj}$ (kWh) i hlađenje $Q_{C,nd,mj}$ (kWh) – varijantni scenarij proračuna (primorska klima)

Tablica 29: Potrošnja energije referentnog modela – varijantni scenarij proračuna (primorska klima)

Pokazatelj	**Rezultat**
Godišnja potrebna energija za grijanje, $Q_{H,nd}$ (kWh/a)	5.986,72
Godišnja potrebna energija za hlađenje, $Q_{C,nd}$ (kWh/a)	9.102,01
Korisna površina zgrade, A_k (m^2)	228,17
Spec. godišnja potrebna energija za grijanje, $Q''_{H,nd}$ (kWh/(m^2a))	26,24
Spec. godišnja potrebna energija za hlađenje, $Q''_{C,nd}$ (kWh/(m^2a))	39,89
Specifična godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje, $Q''_{HC,nd}$ (kWh/(m^2a))	66,13

Potrošnja energije referentnog modela predstavlja prosjek analiziranih kuća i promatra se kao optimalna razina energetske učinkovitosti. proračuni potrošnje energije provedeni su za osnovni i varijantni scenarij. Varijantni scenarij bliži je stvarnom načinu korištenja i daje povoljnije rezultate u odnosu na osnovni model za oba klimatska područja.

Za referentni model kontinentalne Hrvatsku, izračunata je specifična godišnja potrebna energija za grijanje, $Q''_{H,nd}$, iznosi od 54,72 (varijantni model) do 55,33 kWh/(m^{2}a) (osnovni model), dok specifična potrebna energija za hlađenje, $Q''_{C,nd}$, iznosi 16,78 do 37,50 kWh/(m^{2}a). Tehnički propis predviđa specifičnu potrošnju energije za grijanje od 40,50 do 75,00 kWh/(m^{2}a) za kontinent, i maksimalno 50,00 kWh/(m^{2}a) specifične energije za hlađenje [1]. Veršić et al. (2018., 2019., 2026.) u svojim analizama specifične potrošnje energije obiteljskih kuća kontinentalnog područja, projektiranih u skladu s važećim Tehničkim propisom, dobivaju rezultate od 41,97 do 60,88 kWh/(m^{2}a) za grijanje i 3,10 do 29,99 kWh/(m^{2}a) za hlađenje [39, 72, 96]. Vrlo niska potrošnja energije za hlađenje rezultat je analize kuća u planinskom predjelu Hrvatske, stoga, ako se planinsko područje izuzme iz analize, specifična energija za hlađenje varira od 22,33 do 29,99 kWh/(m^{2}a). Iz prikazanih rezultata, vidljivo je da je energija za grijanje referentnog modela u skladu s trenutnim zahtjevima Propisa kao i do sada provedenim istraživanjima potrošnje specifične energije za grijanje u Hrvatskoj.

U primorskoj Hrvatskoj, izračunata specifična godišnja potrebna energija za grijanje referentnog modela, $Q''_{H,nd}$, iznosi od 26,23 do 29,53 kWh/(m^{2}a), dok specifična potrebna energija za hlađenje, $Q''_{C,nd}$, iznosi 39,89 do 54,25 kWh/(m^{2}a). Tehničkim propisom predviđena je specifična potrošnja energije za grijanje 24,84 do 45,99 kWh/(m^{2}a), i do 50,00 kWh/(m^{2}a) za hlađenje [1]. U slučaju osnovnog scenarija proračuna energija za hlađenje veća je 9 % od dopuštene. Veršić et al. (2018., 2019., 2026.) dobivaju rezultate potrošnje specifične energije od 9,27 do 36,65 kWh/(m^{2}a) za grijanje i 17,06 do 36,77 kWh/(m^{2}a) za hlađenje [39, 72, 96]. Značajno niske potrošnje energije za grijanje i hlađenje u analiziranim primjerima mogu se obrazložiti različitim metodama proračuna. Satna metoda u pravilu daje značajno veće rezultate, pogotovo u pogledu hlađenja. Specifična energija za grijanje referentnog modela u skladu je s rezultatima dosadašnjih istraživanja, dok je energija za hlađenje viša od 9 % (varijantni scenarij proračuna) do 48 % (osnovni scenarij proračuna).

U kontinentalnoj klimi, energija za grijanje dominantna je u ukupnoj energiji za održavanje unutarnjih temperatura i iznosi 60 % do 77 %. U primorskoj klimi dominantna je energija za hlađenje i iznosi 60 % do 65 %.

4.8 Varijantni scenariji proračuna

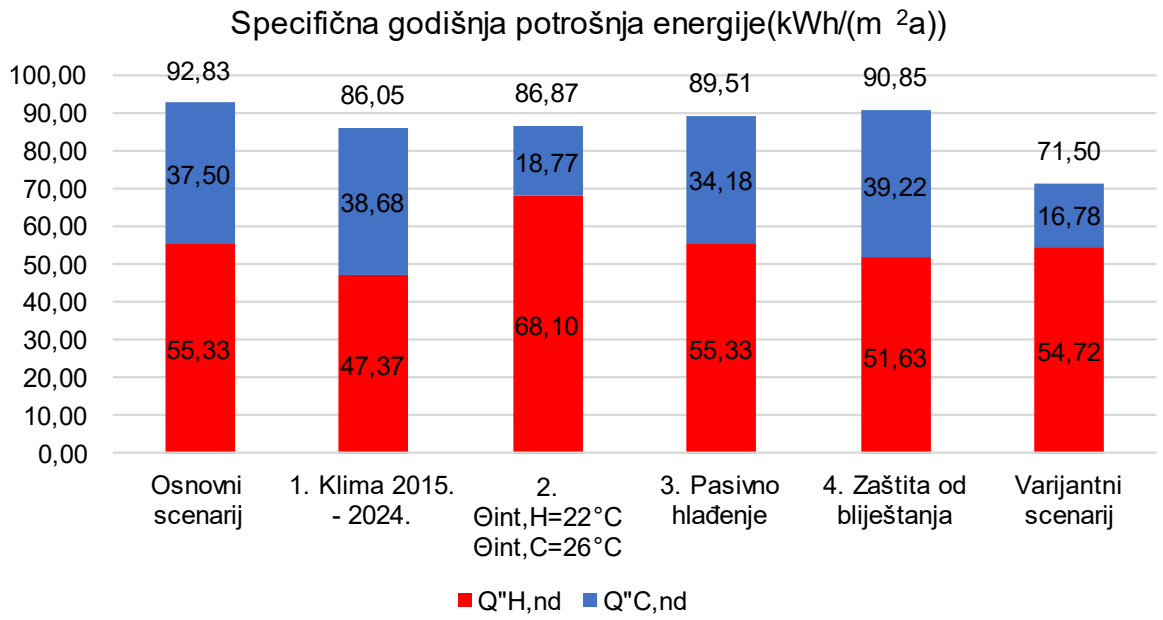
Razlika osnovnog i varijantnog scenarija proračuna je u ulaznim parametrima (klimatski podaci) i postavkama proračuna (temperature grijanja i hlađenja, utjecaj pasivnog hlađenja i

dodatna zaštita od bliještanja) dok u geometrijskim i fizikalnim parametrima nema razlike. Svaka od varijacija ima određen učinak na potrošnju energije za grijanje i hlađenje. Potrošnja energije varijantnog scenarija prikazana je u prethodnom poglavlju za slučaj kada su primijenjene sve varijacije, dok je u ovom poglavlju prikazan utjecaj pojedine varijacije.

U nastavku je prikazan opis varijacija modela za kontinentalnu klimu:

1. Zamjena klimatskih podataka, umjesto 30-godišnjeg prosjeka klime koristi se 10-godišnji prosjek
2. Povećanje projektne temperature grijanja, $\Theta_{int,set,H}$ (C°), sa 20 °C na 22 °C
   Povećanje projektne temperature hlađenja, $\Theta_{int,set,C}$ (C°), sa 22 °C na 26 °C
3. Primjena pasivnog hlađenja (noćno provjetravanje) s brojem izmjena zraka, n_{pas} (h^{-1}), od 1,5 po satu
4. Primjena dodatne naprave za zaštitu od bliještanja s faktorom $F_{C,G} = 0,9$.

Slika 38 prikazuje utjecaj svake varijacije br. 1. do 4. zasebno na osnovni scenarij proračuna, a Varijantni scenarij prikazuje rezultate sa svim primijenjenim varijacijama. Kombinacija svih varijacija proračuna rezultira 1 % nižom potrošnjom energije za grijanje, 55 % nižom potrošnjom energije za hlađenje, a ukupna potrošnja energije niža je za 23 %.

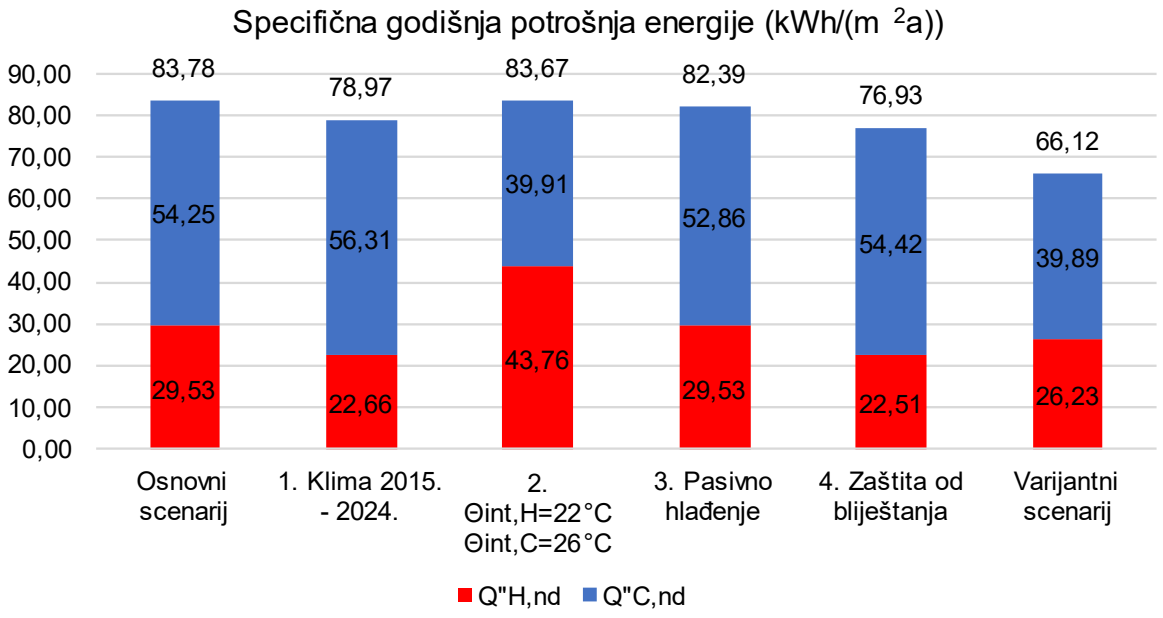


Slika 38: Potrošnja energije osnovnog scenarija, varijacija i varijantnog scenarija proračuna (kontinentalna klima)

U nastavku je prikazan opis varijacija za model primorske klime:

1. Zamjena klimatskih podataka, umjesto 30-godišnjeg prosjeka klime koristi se 10-godišnji prosjek
2. Povećanje projektne temperature grijanja, $\Theta_{int,set,H}$ (C°), sa 20 °C na 22 °C
   Povećanje projektne temperature hlađenja, $\Theta_{int,set,C}$ (C°), sa 24 °C na 26 °C
3. Primjena pasivnog hlađenja (noćno provjetravanje) s brojem izmjena zraka, n_{pas} (h^{-1}), od 1,5 po satu
4. Primjena dodatne naprave za zaštitu od blještanja s faktorom $F_{C,G} = 0,9$.

Slika 39 prikazuje utjecaj svake varijacije br. 1. do 4. zasebno na osnovni scenarij, a Varijantni scenarij prikazuje rezultate sa svim primijenjenim varijacijama. Kombinacija svih varijacija proračuna rezultira 11 % nižom potrošnjom energije za grijanje, 26 % nižom potrošnjom energije za hlađenje, a ukupna potrošnja energije niža je za 21 %.



Slika 39: Potrošnja energije osnovnog scenarija, varijacija i varijantnog scenarija proračuna (primorska klima)

S obzirom na različite ulazne klimatske podatke i postavke proračuna, različita je i konačna potrošnja energije za oba klimatska područja.

Tablica 17 i Tablica 18 prikazuju usporedbu temperaturnih prosjeka klime za zadnjih 30 i 10 godina. Više zimske temperature rezultiraju manjom potrošnjom energije za grijanje, dok su promjene u ljetnim temperaturama slične za oba klimatska područja. Slika 38 i Slika 39, varijanta 1. prikazuju potrošnju energije u kontinentalnoj i primorskoj klimi za 10-godišnji prosjek klime. U odnosu na 30-godišnji prosjek klimatskih podataka, na kontinentu je potrošnja energije za grijanje 14 % niža, a energija za hlađenje 3 % veća, dok je ukupna potrošnja energije niža za 7 %. U primorju je potrošnja energije za grijanje je 23 % niža, energija za hlađenje 4 % veća, a ukupna potrošnja energije je niža za 6 %. Uzmemo li u obzir linearan rast globalnih temperatura, ovi rezultati u pogledu grijanja u skladu su s istraživanjem D'Agostina et al. (2022.) prema čijoj analizi će do 2060. godine u gradovima Europske unije potrošnja energije pasti 38 % do 57 %. U pogledu energije za hlađenje, njihovo istraživanje rezultira znatno većom potrošnjom energije do 2060. od 99 % - 380 %, ali potrebno je uzeti u obzir da oni obrađuju i gradove na sjeveru Europe u kojima hlađenje trenutno ima malen udio u godišnjoj bilanci. [22] Papakostas et al. (2010.) na sličan način razmatraju promjene u energetskim potrebama stambenih zgrada u Grčkoj za razdoblje od 20 godina. Njihovi rezultati pokazuju 5 % do 11 % pad u potrebi za grijanje i povećanje u potrebi hlađenja od 10 % do 26 %. [99]

Slika 38 i Slika 39, varijanta 2. prikazuje rezultate s projektnom temperaturom grijanja 22 °C i temperaturom hlađenja 26 °C. Potrošnja energije za grijanje na kontinentu veća je za 23 %, a za hlađenje je 50 % niža, dok je ukupna potrošnja energije niža za 6 % u odnosu na projektne temperature prema Algoritmu. Za primorsku klimu, potrošnja energije za grijanje veća je za 48 %, a za hlađenje je 26 % niža, dok je ukupna potrošnja energije jednaka. Szalansky et al. (2023.) uspoređuju razlike u energiji za grijanje u stambenim zgradama promjenom projektne temperature i dobivaju rezultate od 7 % do 13 % razlike za 1°C promjene što bi bilo u skladu s rezultatima ovog rada u odnosu na kontinentalnu klimu. [59] Za primorsku klimu vidljiva je veća relativna razlika u potrošnji uslijed povećanja projektne temperature grijanja, ali i dalje energija za grijanje u primorskoj klimi čini mali udio potrošnje i malu apsolutnu potrošnju energije. Iz tog razloga postoji mali broj istraživanja koji se bave grijanjem u mediteranskoj klimi i kvantitativnom analizom utjecaja projektne temperature grijanja. [103] Rezultati u pogledu ušteda energije za hlađenje u skladu su i s rezultatima Mousavi et al. (2025.) koji za povećanje projektne temperature hlađenja za 5 °C postižu rezultate od 35,7 % ušteda. [110]

Slika 38 i Slika 39, varijanta 3. prikazuje rezultate kada se primjenjuje pasivno hlađenje ljeti – noćno provjetravanje. U noćnim satima kada su vani relativno niske temperature zraka u odnosu

na interijer, moguće je rashlađivanje kuće provjetravanjem. Ova mjera ne utječe na potrošnju energije za grijanje već se koristi samo u sezoni hlađenja. Potrebnu energiju za hlađenje na kontinentu smanjuje za 9 %, a ukupna potrošnja energije niža je za 4 % u odnosu na način provjetravanja propisan Algoritmom. Za primorje ušteda u hlađenju iznosi 3 %, a ukupna ušteda manja je za 2 %. U prikazanom slučaju pasivnog hlađenja razlike su vrlo male jer se radi o projektnoj temperaturi od 22 °C za kontinent i 24 °C za primorje prema Algoritmu što smanjuje potencijal pasivnog hlađenja. Istraživanja koja se bave pasivnim hlađenjem pokazuju veći potencijal pri projektnim temperaturama hlađenja od 26 °C. Santamouris i Kolokotsa (2007.) prikazuju potencijalne uštede u hlađenju do 25 % [68], Veršić et al. (2022.) dobivaju rezultate znatno većeg potencijala kod poslovnih zgrada - 43,5 % u kontinentalnoj i 32,2 % u primorskoj Hrvatskoj [70], dok Hu et al. (2023.) rade pregled 42 studije o pasivnom dizajnu stambene arhitekture u toplim klimama, koje prikazuje uštede do 31 % mjerama koje uključuju i pasivno hlađenje. [71]

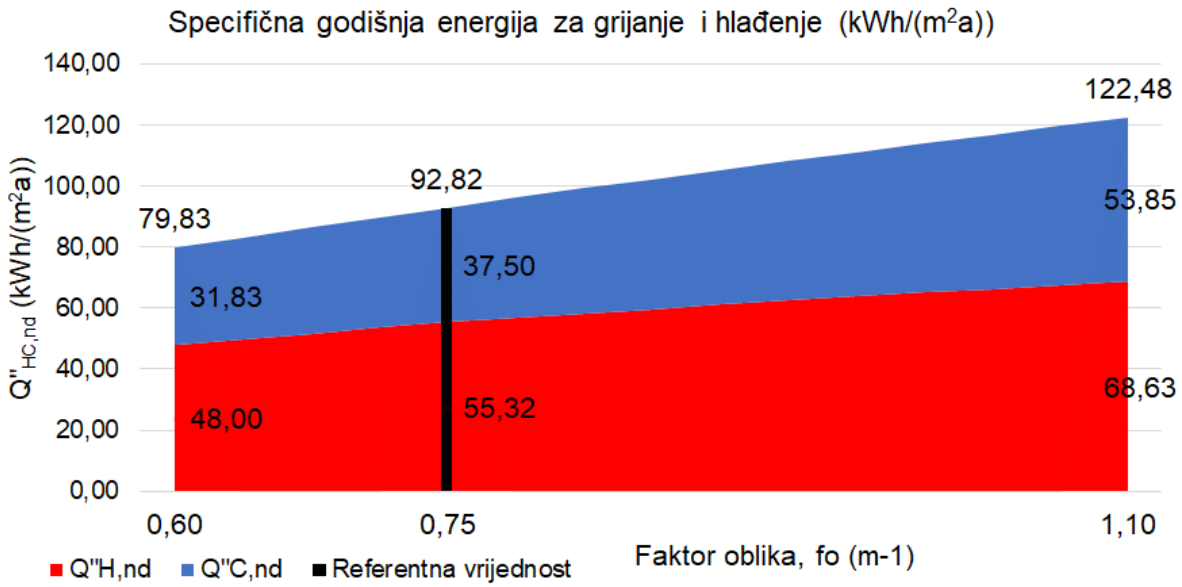
Slika 38 i Slika 39, varijanta 4. prikazuje rezultate kada se koriste različite naprave za zaštitu od pregrijavanja u sezoni hlađenja i za zaštitu od bliještanja sunca u sezoni grijanja. Unutarnja naprava za zaštitu od bliještanja rezultira boljim iskorištavanjem solarnih dobitaka zimi i nižom potrošnjom energije za grijanje, međutim u prijelaznom razdoblju rezultira povećanjem energije za hlađenje. Primjenom ove mjere u kontinentalnom području, potrošnja energije za grijanje smanjuje se za 7 %, ali potrošnja energije za hlađenje povećava se za 5 %. Ukupna potrošnja manja je za 2 % u odnosu na postavke zaštite od sunca prema Algoritmu. U primorskoj klimi energija za grijanje manja je za 24 %, energija za hlađenje gotovo nepromijenjena (razlika < 1 %), a ukupna potrošnja manja je za 8 %. Veršić et al. (2019.) preporučaju izvedbu unutarnje zaštite od sunca u svrhu zaštite od bliještanja kao energetski najpovoljniju varijantu, ali ne daju podatke o potencijalu uštede [72]. Ostali radovi koji obrađuju zaštitu od bliještanja ne promatraju je odvojeno od zaštite od pregrijavanja stoga dobivaju puno veće potencijale uštede. Fang et al. (2024.) analiziraju zasjenjenja istacima i nagibima fasade te postižu potencijal uštede ukupne potrošnje energije od 5 % do 25 % [115], Gonçalves et al. (2024.) proučavaju utjecaj dinamičnih fasada i njihovi rezultati pokazuju mogućnosti ukupne uštede od 10 % do 40 % [116], Trząski i Rucińska (2025.) istražuju mogućnosti ušteda u energiji za rasvjetu uz korištenje automatiziranih sustava kontrole rasvjete, zaštite od sunca i reflektirajućih površina te dobivaju rezultate od 46 % do 54 % [117].

Slika 38 i Slika 39, Varijantni model prikazuje kombinaciju svih varijacija. U kontinentalnoj klimi energija za grijanje je 1 % manja, energija za hlađenje manja je za 55 %, a ukupna potrošnja energije niža je za 23 %. U primorskoj klimi energija za grijanje manja je za 11 %, energija za hlađenje za 26 % i ukupna potrošnja energije manja je za 21 %. Primijenjene korekcije imaju najveći utjecaj na energiju za hlađenje, posebno povećana projektna temperatura hlađenja. Varijantni scenarij s prilagođenim postavkama proračuna i novijim klimatskim podacima predstavlja detaljniji način proračuna i smatra se da daje realniju sliku potrošnje.

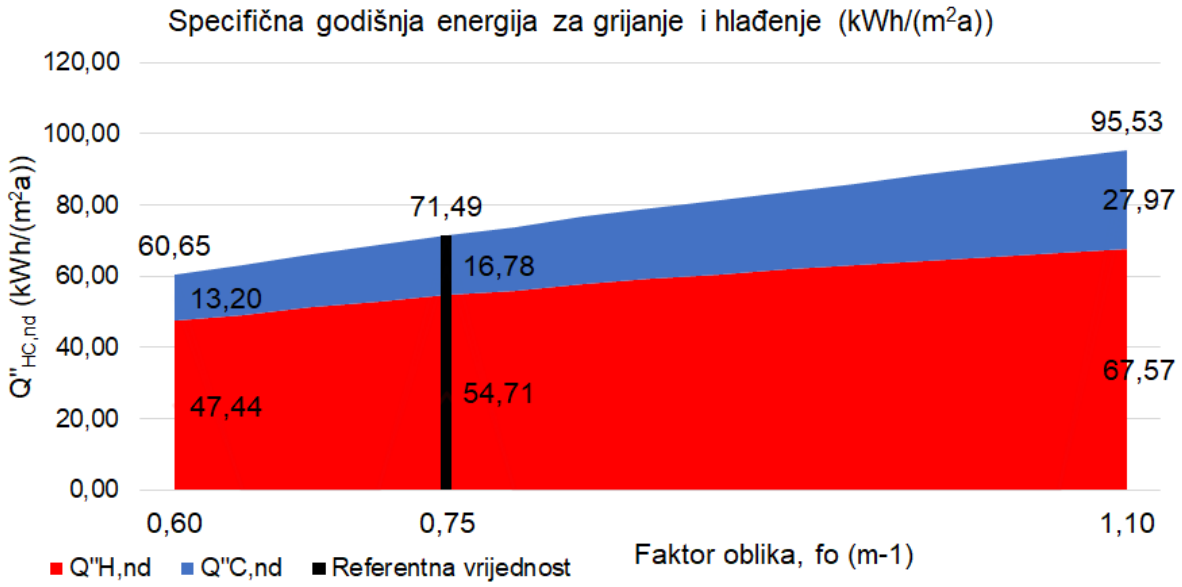
4.9 Vrednovanje čimbenika arhitektonskog oblikovanja u odnosu na energetsku učinkovitost

Vrednovanje čimbenika energetske učinkovitosti provedeno je korištenjem prosječne, najnepovoljnije i najpovoljnije vrijednosti čimbenika arhitektonskog oblikovanja u proračunu, te međusobnom usporedbom rezultata. Najnepovoljnije i najpovoljnije vrijednosti predstavljaju granice referentnih intervala geometrijskih i fizikalnih parametara utvrđenih analizom obiteljskih kuća u kontinentalnoj i primorskoj klimi. Promjena vrijednosti pojedinog čimbenika utječe na niz geometrijskih i fizikalnih parametara, dok je dio parametara konstantan u svim varijantama proračuna. Vrednovanje je provedeno za osnovni i varijantni scenarij. U nastavku je prikazan utjecaj čimbenika na ukupnu potrošnju energije, dok Prilog 2 prikazuje utjecaj na potrošnju energije po mjesecima.

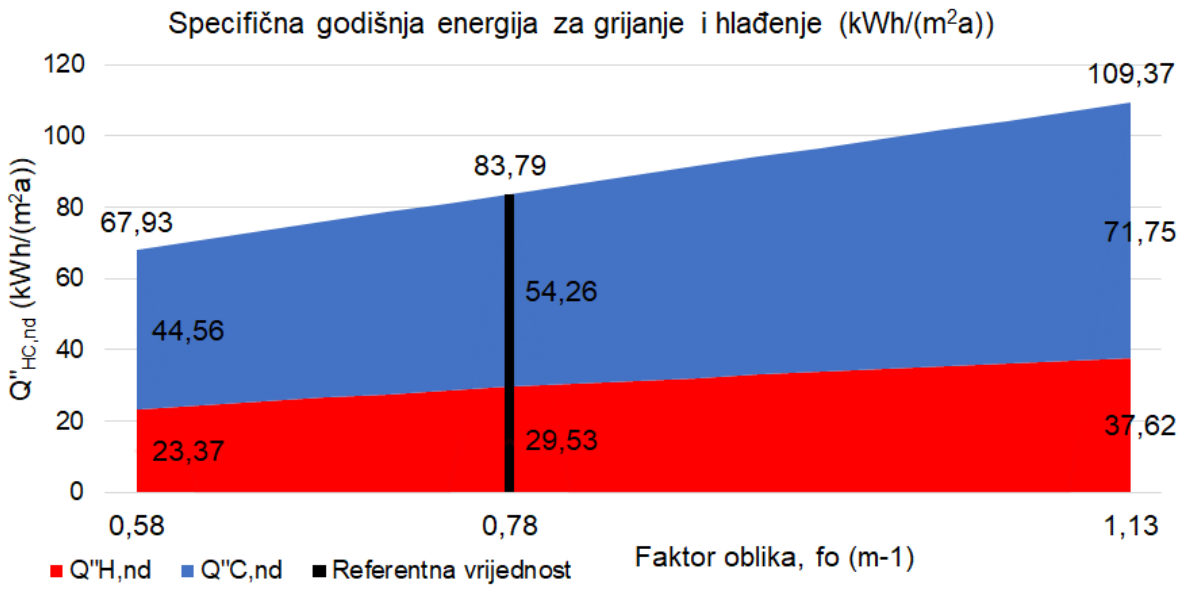
4.9.1 Faktor oblika



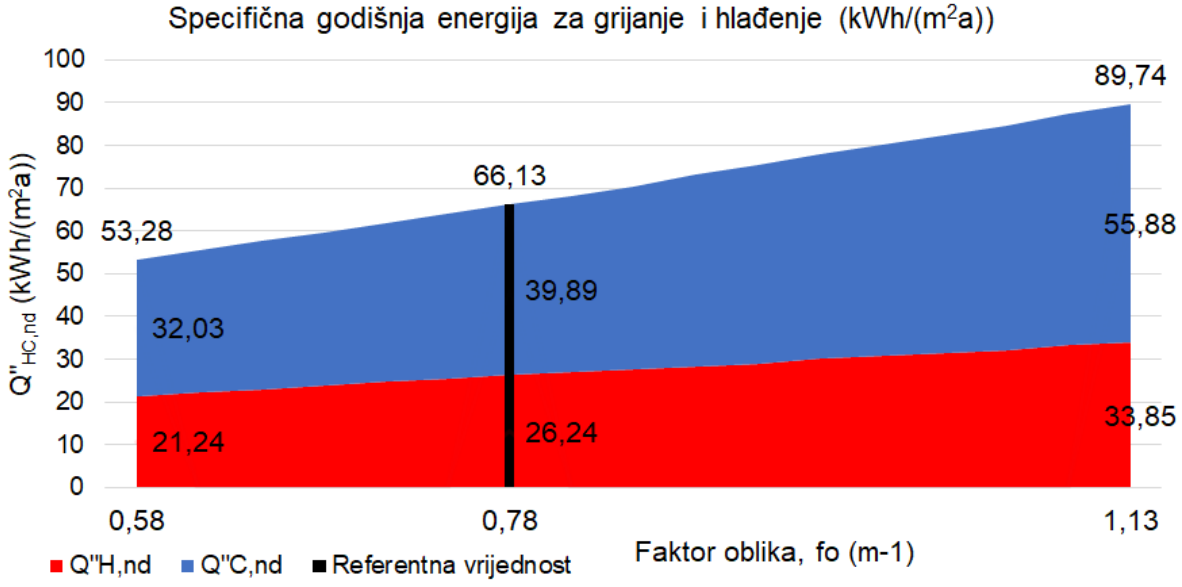
Slika 40: Utjecaj faktora oblika na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (osnovni scenarij proračuna, kontinentalna klima)



Slika 41: Utjecaj faktora oblika na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (varijantni scenarij proračuna, kontinentalna klima)



Slika 42: Utjecaj faktora oblika na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (osnovni scenarij proračuna, primorska klima)

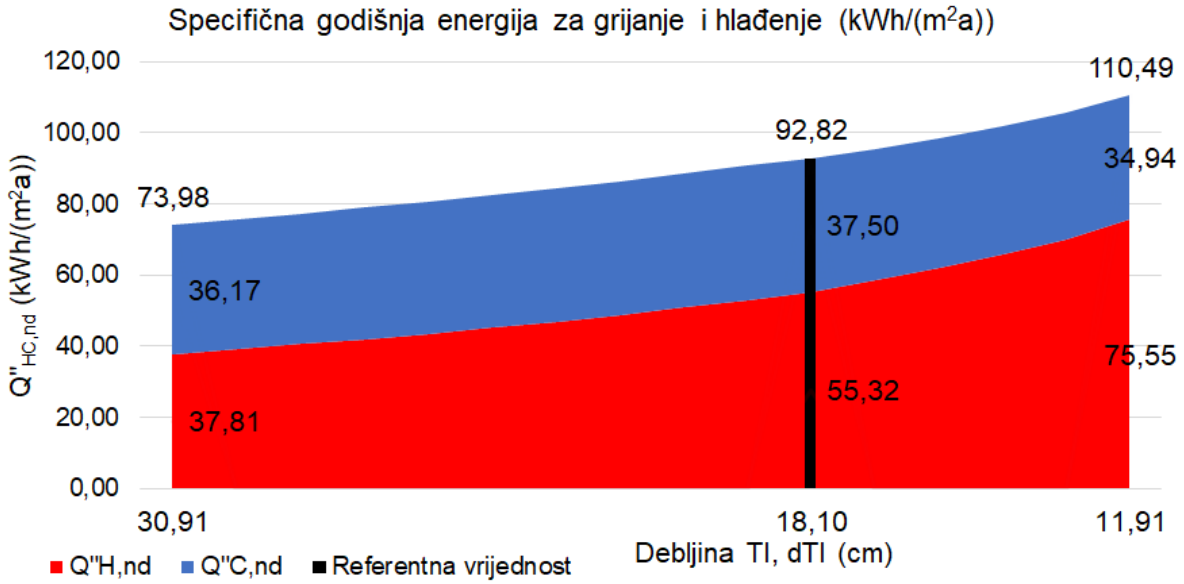


Slika 43: Utjecaj faktora oblika na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (varijantni scenarij proračuna, primorska klima)

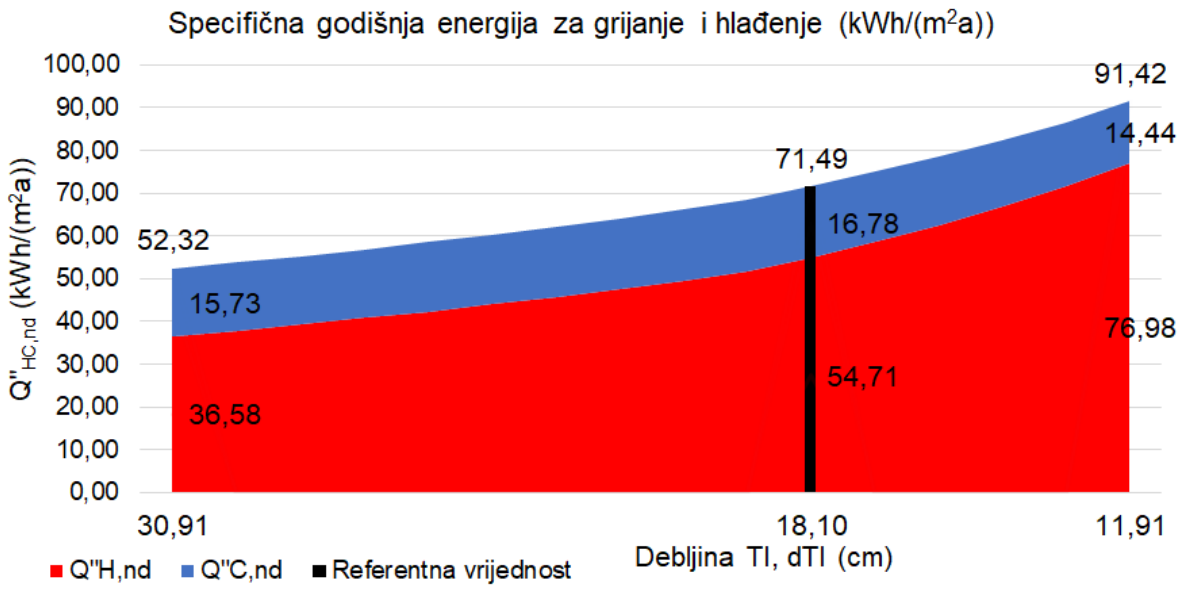
Utjecaj faktora oblika na potrošnju energije proveden je usklađenjem ploštine ovojnice sa željenom vrijednošću f_o (m^{-1}). Pri tome su udjeli pojedinih elemenata ovojnice zadržani kao konstanta (udio otvora, udio krova, itd.), što znači da se promjenom faktora oblika

proporcionalno mijenja i ploština otvora, ploština vanjskih zidova, zidova prema tlu itd. Faktor oblika varira od 0,6 m^{-1} do 1,10 m^{-1} za kuće kontinentalne klime i 0,58 m^{-1} do 1,13 m^{-1}. Energija za grijanje i hlađenje proporcionalno se mijenjaju s faktorom oblika. U kontinentalnoj klimi ukupna potrošnja varira od -14 % do +32 % za osnovni scenarij proračuna i -15 % do +3 % za varijantni scenarij. U primorskoj klimi ukupna potrošnja varira od -19 % do +31 % za osnovni scenarij i -19 % do +36 % za varijantni scenarij. Povećanjem ploštine ovojnice povećava se i količina ploha kroz koju se gubi toplina. U ovom slučaju dodatan utjecaj je i povećanje ploštine otvora kod modela s većim faktorom oblika. Važnost faktora oblika u energetskoj učinkovitosti i ostvareni rezultati u skladu su s rezultatima dosadašnjih istraživanja tog čimbenika [28, 84]. Dio istraživanja daje načelne podatke o uštedama primjenom različitih mjera od kojih je jedan i faktor oblika [30], dok samo pojedina istraživanja prikazuju rezultate samo za faktor oblika. Granadeiro et al. (2011.) optimizacijom oblika zgrade postižu uštede 15 % do 30 % [31]. Fallahtafti et al. (2015.) u svojim analizama oblika i orijentacije postižu 20 % do 40 % nižu potrošnju energije [30]. Veršić et al. (2019.) kod zgrada različitog mjerila i raspona vrijednosti faktora oblika od 0,54 do 0,97 m^{-1} dobivaju razliku u potrošnji energije za grijanje od 72%. Toliko veliku razliku u potrošnji objašnjava razlika promatranih modela – male obiteljske kuće i velike stambene zgrade. [72]

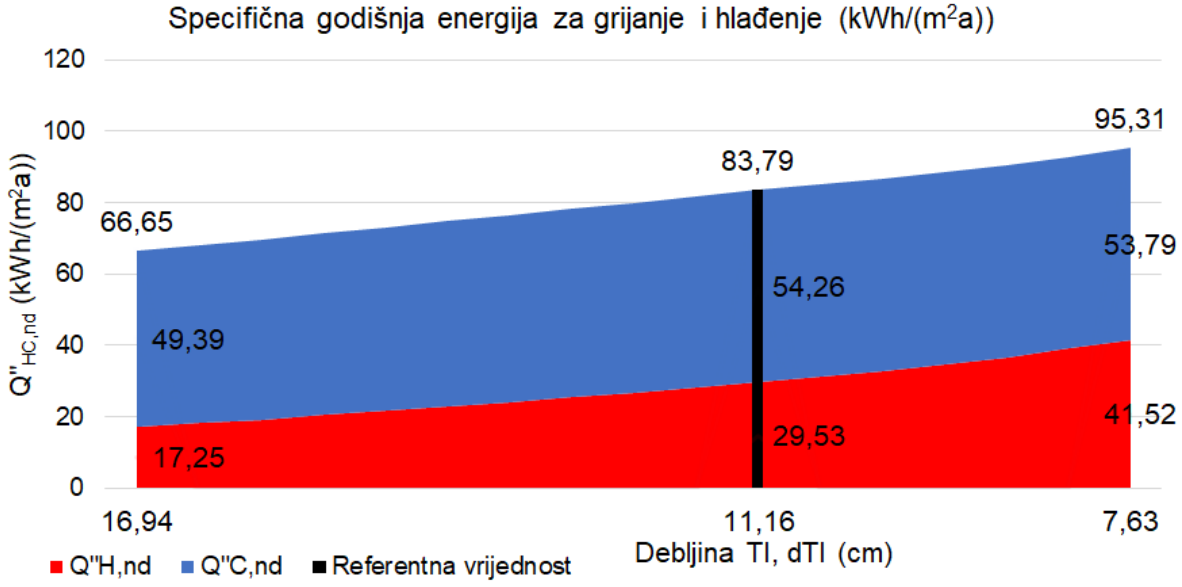
4.9.2 Izolativnost ovojnice i debljina toplinske izolacije



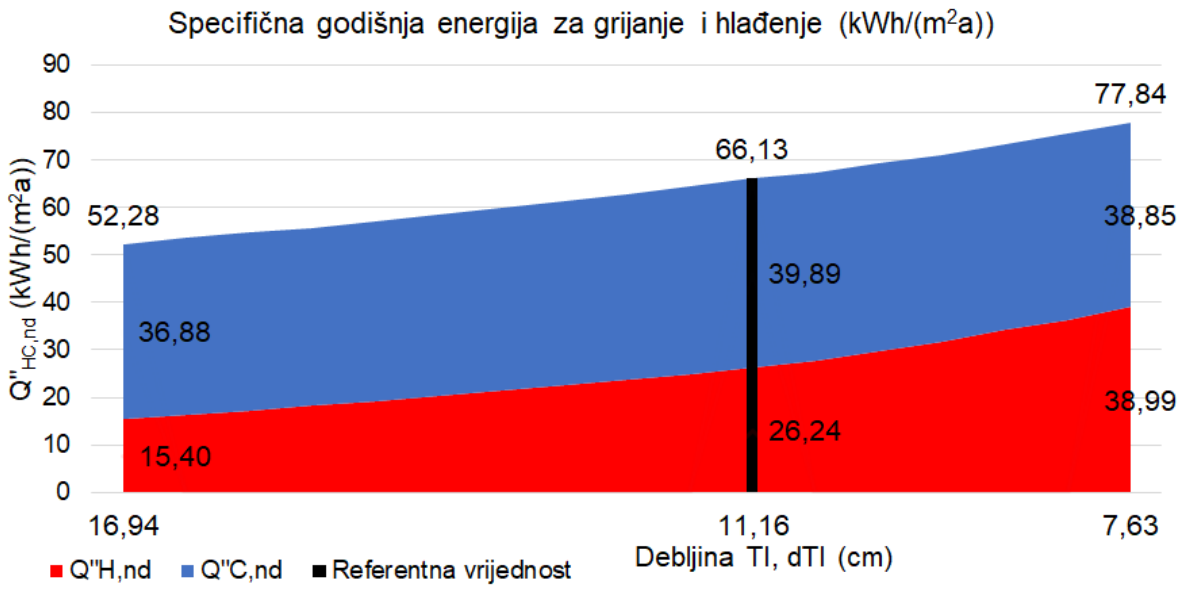
Slika 44: Utjecaj debljine toplinske izolacije na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (osnovni scenarij proračuna, kontinentalna klima)



Slika 45: Utjecaj debljine toplinske izolacije na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (varijantni scenarij proračuna, kontinentalna klima)



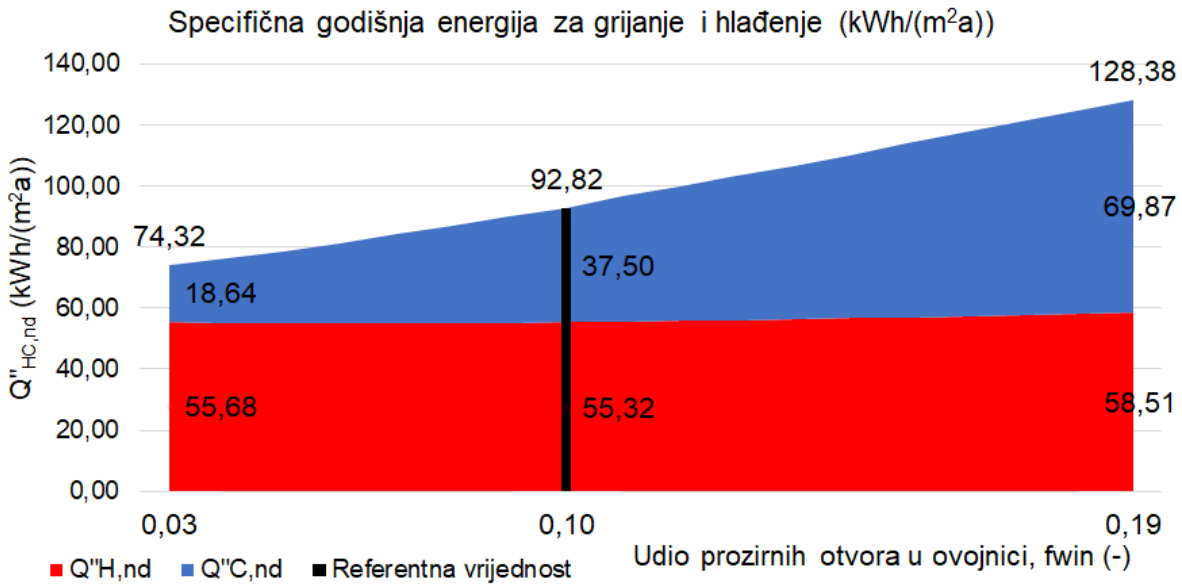
Slika 46: Utjecaj debljine toplinske izolacije na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (osnovni scenarij proračuna, primorska klima)



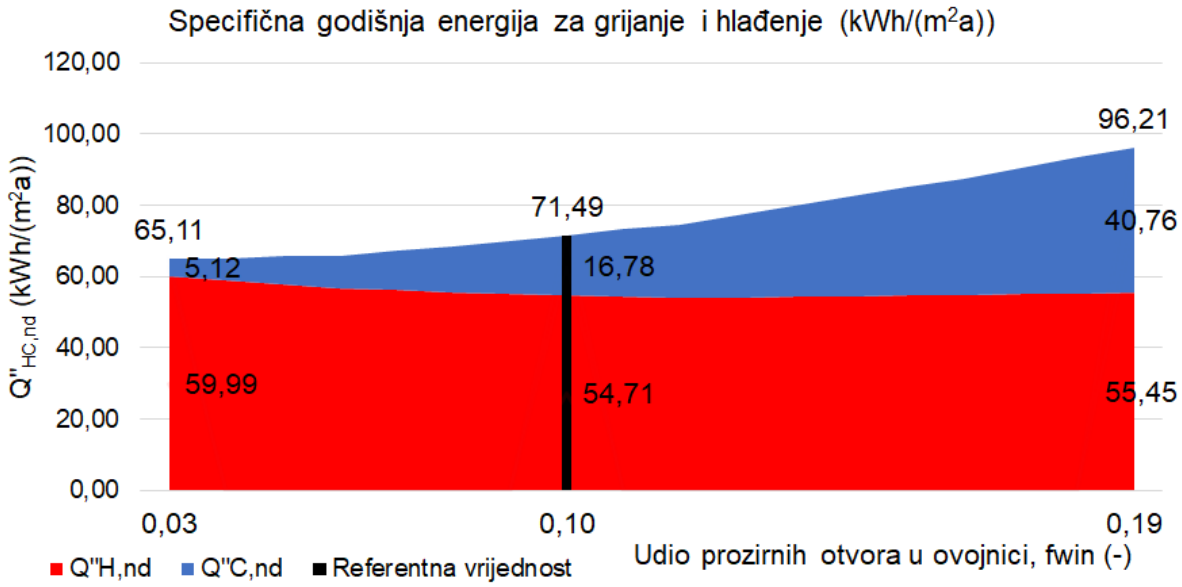
Slika 47: Utjecaj debljine toplinske izolacije na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (varijantni scenarij proračuna, primorska klima)

Debljina toplinske izolacije u ovojnici također je čimbenik sa značajnim utjecajem na energetsku učinkovitost. Varijacija u toplinsko-izolacijskoj kvaliteti obodnih konstrukcija primijenjena je proporcionalno na cijelu ovojnicu (zidovi, krov, prozori, itd.). Debljina toplinske izolacije varira od 11,9 cm do 30,9 cm kod kuća kontinentalne klime i 7,6 cm do 16,9 cm za primorsku klimu. Ovisno o debljini izolacije, u kontinentalnoj klimi ukupna potrošnja varira od -20 % do +19 % za osnovni scenarij proračuna i -27 % do +28 % za varijantni scenarij. U primorskoj klimi ukupna potrošnja varira od -20 % do +14 % za osnovni scenarij i -21 % do +18 % za varijantni scenarij. Razlog tolikom rasponu je postojanje uzoraka s minimalnim debljinama toplinske izolacije prema Tehničkom propisu do najbolje izoliranih s 30 cm izolacije u zidovima, što je karakteristično za pasivne kuće. Primjenom proporcionalnih debljina izolacije na ostale građevne dijelove ovojnice postignut je raspon od minimalno potrebne kvalitete ovojnice do pasivnog standarda. Utjecaj toplinske izolacije obrađen je u nizu znanstvenih radova [28, 29, 72, 86, 87], a rezultati ostvareni u ovom radu u skladu su s radovima usredotočenim na kvantifikaciju utjecaja ovojnice u potrošnji energije – Veršić et al. (2019.) pri povećanju debljine toplinske izolacije s 15 cm na 30 cm ostvaruju uštede u grijanju od 31 %, [72] što odgovara rasponu debljina izolacija u ovom istraživanju.

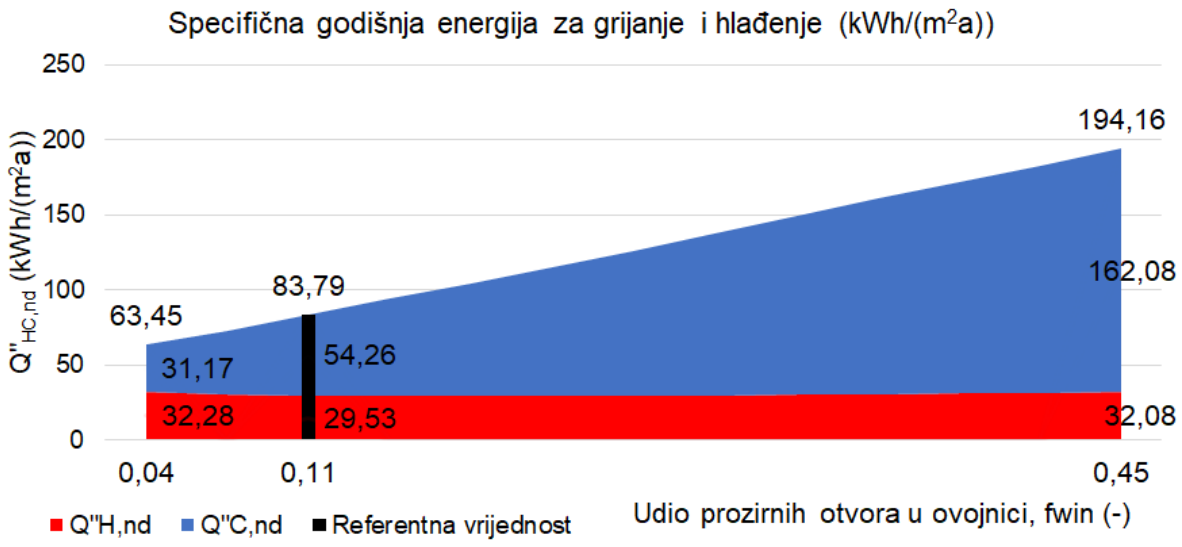
4.9.3 Udio prozirnih otvora u ovojnici



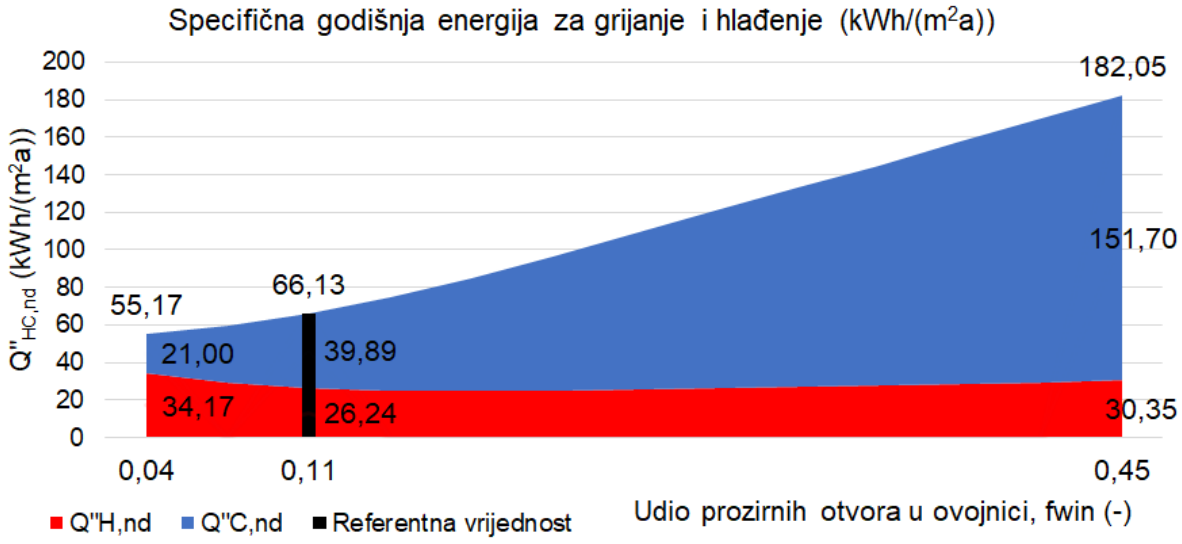
Slika 48: Utjecaj udjela prozirnih otvora u ovojnici na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (osnovni scenarij proračuna, kontinentalna klima)



Slika 49: Utjecaj udjela prozirnih otvora u ovojnici na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (varijantni scenarij proračuna, kontinentalna klima)



Slika 50: Utjecaj udjela prozirnih otvora u ovojnici na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (osnovni scenarij proračuna, primorska klima)

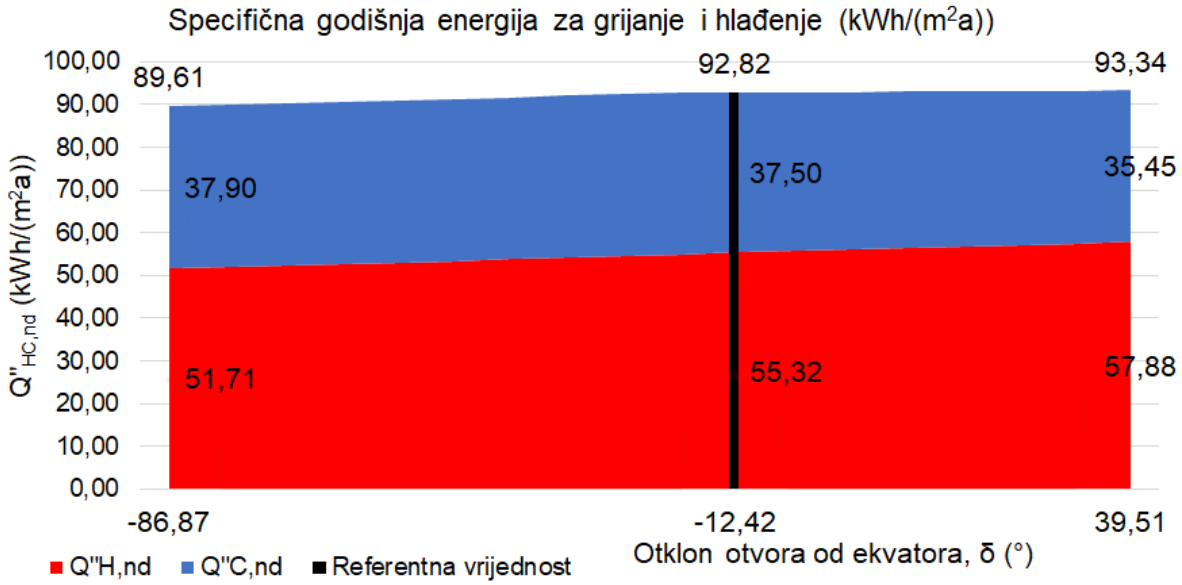


Slika 51: Utjecaj udjela prozirnih otvora u ovojnici na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (varijantni scenarij proračuna, primorska klima)

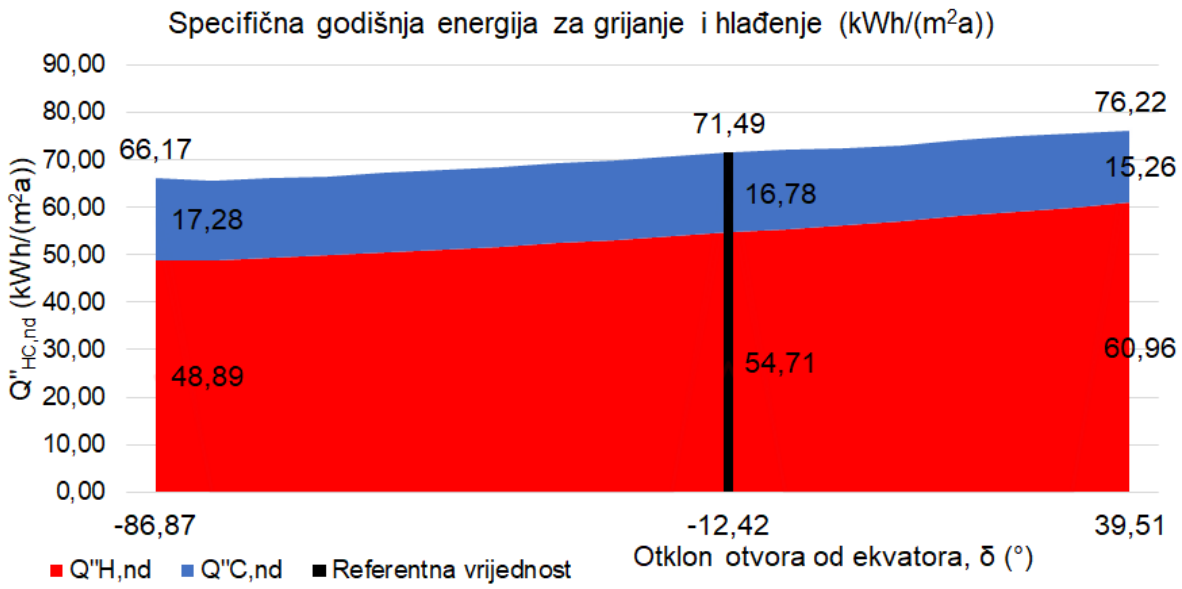
Udio otvora u ovojnici pokazao se kao čimbenik s najvećim utjecajem na potrošnju energije, posebno u primorskoj klimi. Udio otvora u ovojnici varira od 3 % do 19 % kod kuća kontinentalne klime i 4 % do 45 % kod kuća primorske klime. U osnovnom scenariju proračuna za kontinentalnu klimu potrošnja energije varira od -20 % do +38 %, a u varijantnom od -9 %

do 35 %. Za kuće primorske varijacije iznose od -24 % do +132 % kod osnovnog scenarija proračuna i od -17 % do +175 % kod varijantnog scenarija. Toliko veliko odstupanje uzrokovano je energijom za hlađenje koja se povećava do +380 % kod uzroka s najvećom površinom ostakljenja. Udio otvora u primorskoj klimi iznosi od 4 % do 45 % što je razlika od deset puta. Povećanjem ploštine otvora u ovojnici ostvaruju se veći solarni dobici i zimi i ljeti, a zbog lošijih toplinsko-izolacijskih svojstava njihovo povećanje znači i povećanje transmisijskih gubitaka zgrade. Budući da je riječ o prosječno orijentiranim zgradama, povećanje broja otvora podjednako će povećati solarne dobitke i transmisijske gubitke zimi pa će u konačnoj energiji za grijanje biti male razlike. U ljetnom razdoblju povećanje otvora proporcionalno povećava i solarne dobitke, dok je transmisijska razmjena topline s okolišem relativno malena u odnosu na zimsku jer su temperature interijera podjednake ili malo niže od vanjskih temperatura zraka. Iz tog razloga, veća ploština otvora znači višestruko veće pregrijavanje i potrebu za hlađenjem. Niz dosadašnjih istraživanja prepoznaje važnost otvora u ovojnici u energetskoj učinkovitosti [30, 35 – 39], međutim malen broj njih kvantitativno analizira njihov utjecaj na godišnju potrošnju energije za hlađenje. Chandrasekaran et al. (2022.) dobivaju rezultate da smanjenje ostakljenja za 45 % rezultira do 23 % manjom potrošnjom energije za hlađenje. [45]

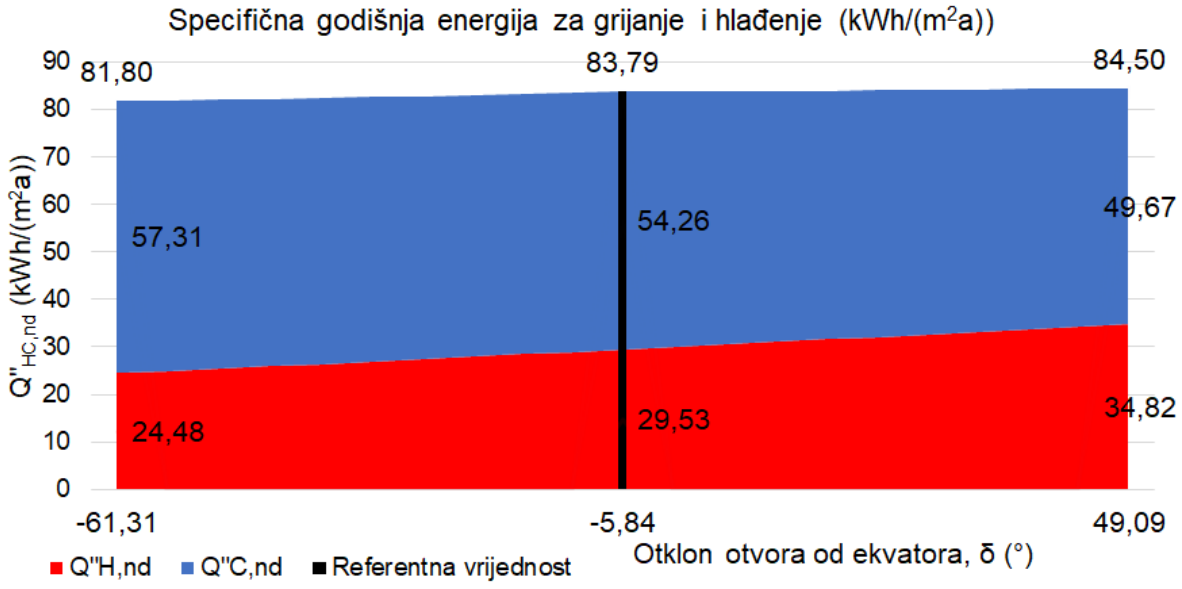
4.9.4 Orijentacija otvora



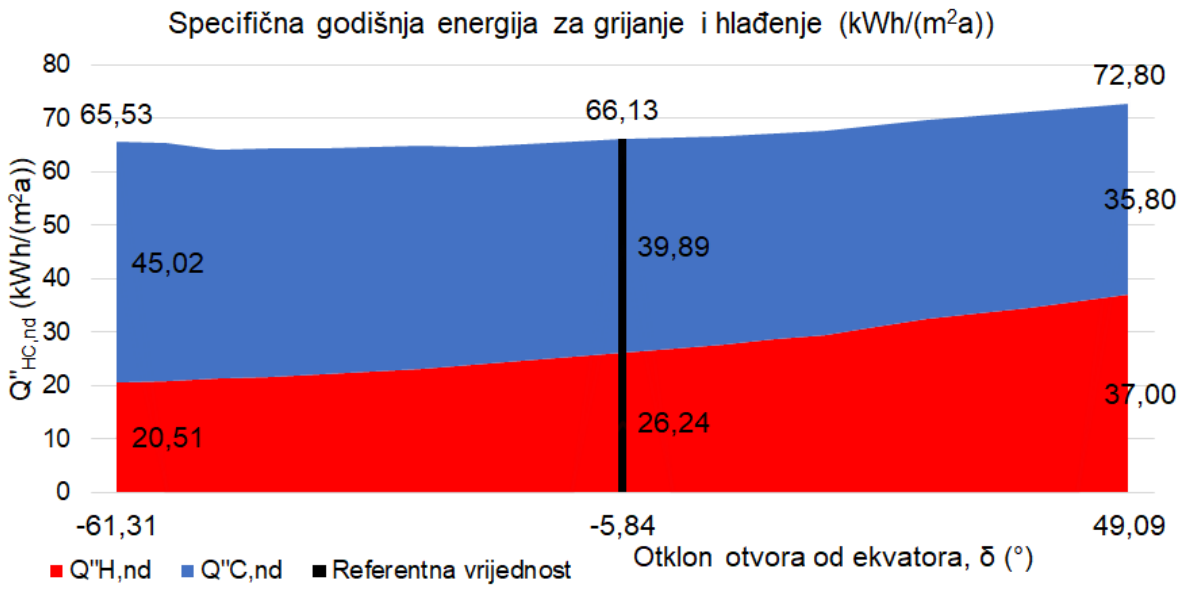
Slika 52: Utjecaj orijentacije na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (osnovni scenarij proračuna, kontinentalna klima)



Slika 53: Utjecaj orijentacije na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (varijantni scenarij proračuna, kontinentalna klima)



Slika 54: Utjecaj orijentacije na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (osnovni scenarij proračuna, primorska klima)



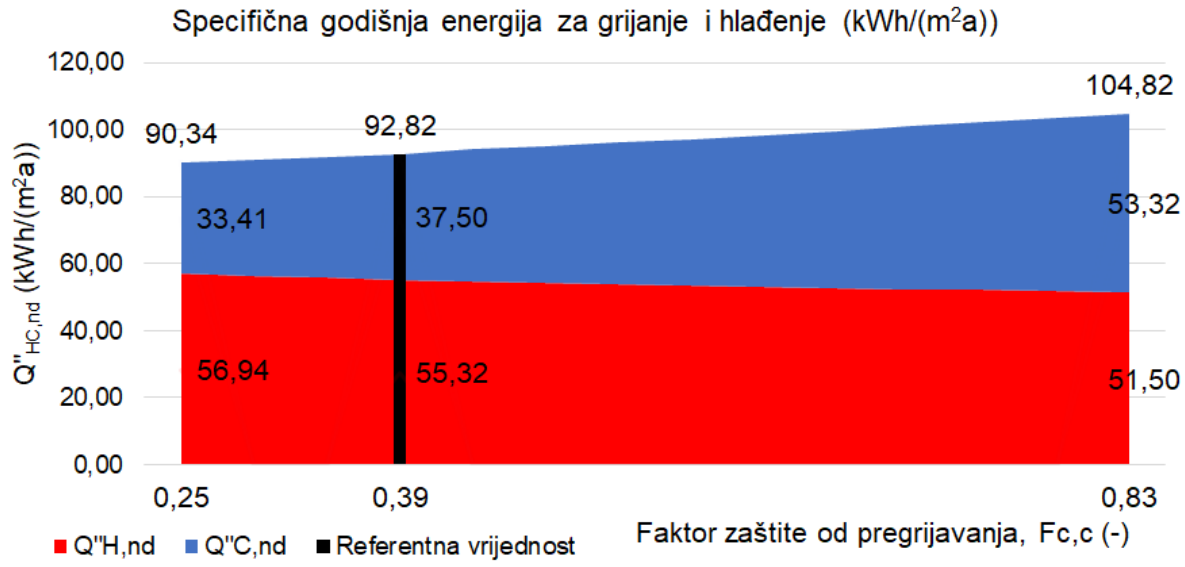
Slika 55: Utjecaj orijentacije na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (varijantni scenarij proračuna, primorska klima)

Orijentacija otvora na promatranim modelima zgradama ima vrlo malen utjecaj na konačnu potrošnju energije. Otklon od ekvatora varira od -86,9° do +39,5° kod kuća kontinentalne klime i od -61,3° do +49,1° kod kuća primorske klime. U osnovnom scenariju proračuna kontinentalne klime, ovisno o orijentaciji, potrošnja varira od -3 % do +1 % u odnosu na prosjek, a u varijantnom scenariju -7 % do +7 %. U primorskoj klimi, osnovni scenarij varira od -2 % do +1 %, a varijantni od -1 % do +10 %. Tako malen utjecaj orijentacije može se objasniti relativno malenim udjelom otvora u ovojnici (približno 10 % za oba klimatska područja) i činjenicu da najpovoljnije i najnepovoljnije zabilježene orijentacije iz stvarnih primjera zgrada nisu u potpunosti jug i sjever.

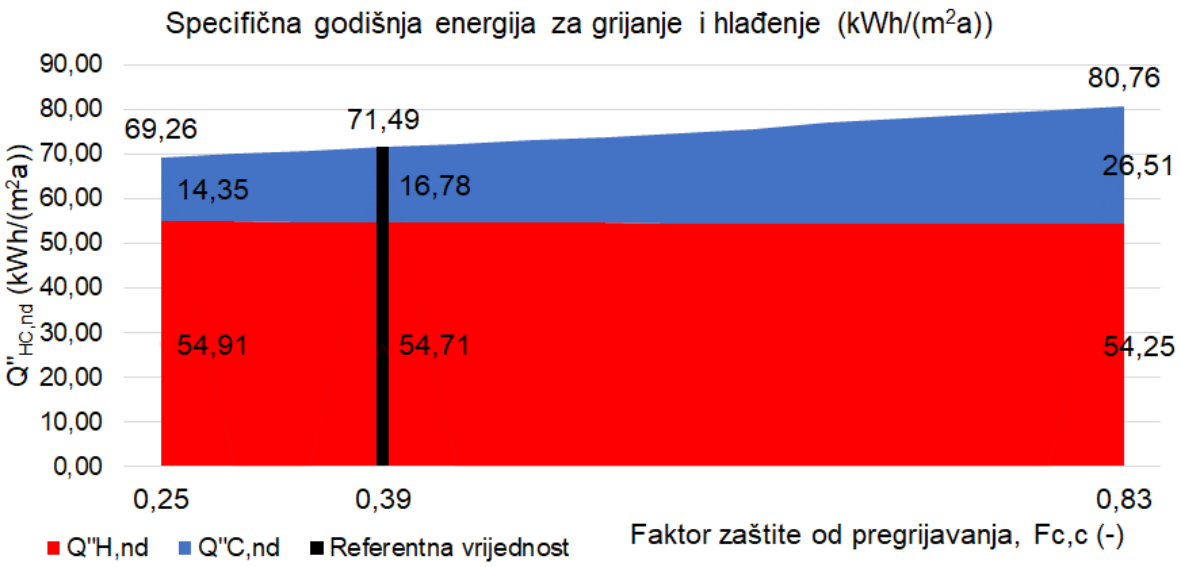
Slika 53 i Slika 55 prikazuju potrošnju energije ovisno o orijentaciji za varijantni scenarij proračuna. Vidljiv je pad potrošnje u području između referentne vrijednosti i donje granice intervala, koja se promatra kao energetski najpovoljnija. Međutim, porast potrošnje kako se približavamo južnoj orijentaciji znači da ukupna najmanja potrošnja energije ipak nije pri najvećem otklonu prema jugu kako je bilo pretpostavljeno. Čisto južna orijentacija smanjuje potrebnu energiju za grijanje, ali više povećava potrebnu energiju za hlađenje. U slučaju najvećeg otklona prema sjeveru, energija za grijanje povećava se više nego što se smanjuje energija za hlađenje. U varijantnim scenarijima orijentacija ima značajniji utjecaj na potrošnju

energije za grijanje, što se može objasniti primjenom zaštite od blještanja (tamne unutarnje zavjese malene prozirnosti) koje omogućavaju bolje iskorištavanje solarnih dobitaka zimi. Orijentacija kao čimbenik energetske učinkovitosti analizirala se u nizu istraživanja čiji su rezultati u skladu s ovim radom [30, 35 – 39, 72]. Dio radova kvantificira utjecaj orijentacije u potrošnji energije. Morrissey et al. (2011.) prikazuju razlike do 20 % u potrošnji energije za grijanje između povoljne i nepovoljne orijentacije [36]. Gercek i Güçü (2019.) u svojim analizama ostvaruju nešto manji utjecaj orijentacije, do 12 % [38]. Veršić et al. (2019.) u svojim analizama postižu utjecaj od svega 3 % na energiju za grijanje [72]. Toliko malen utjecaj moguće je objasniti sličnom količinom otvora na svim orijentacijama.

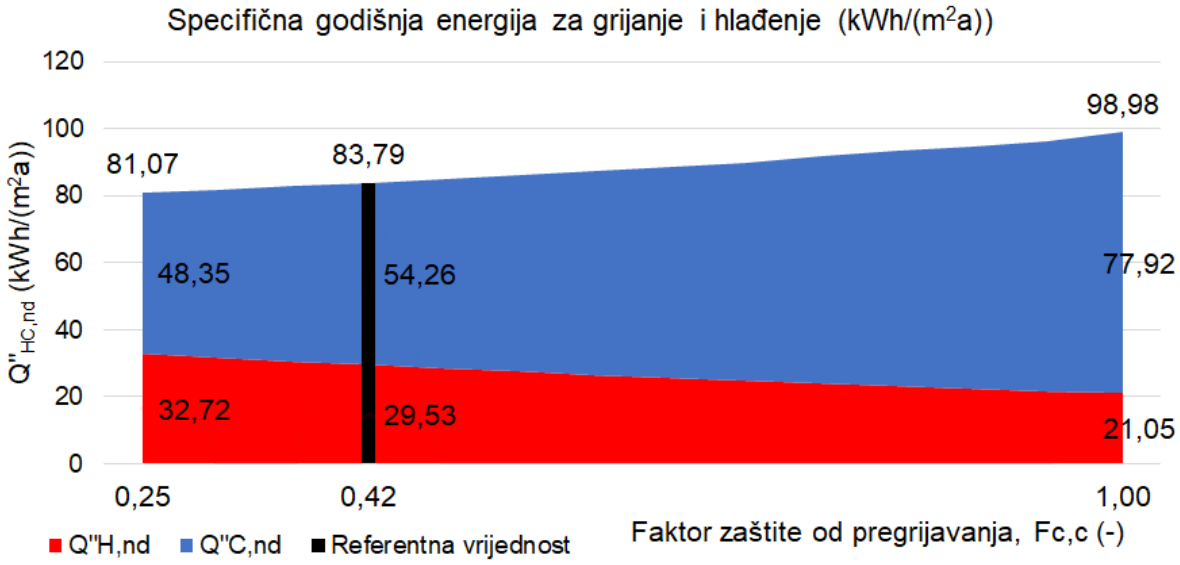
4.9.5 Zaštita od pregrijavanja



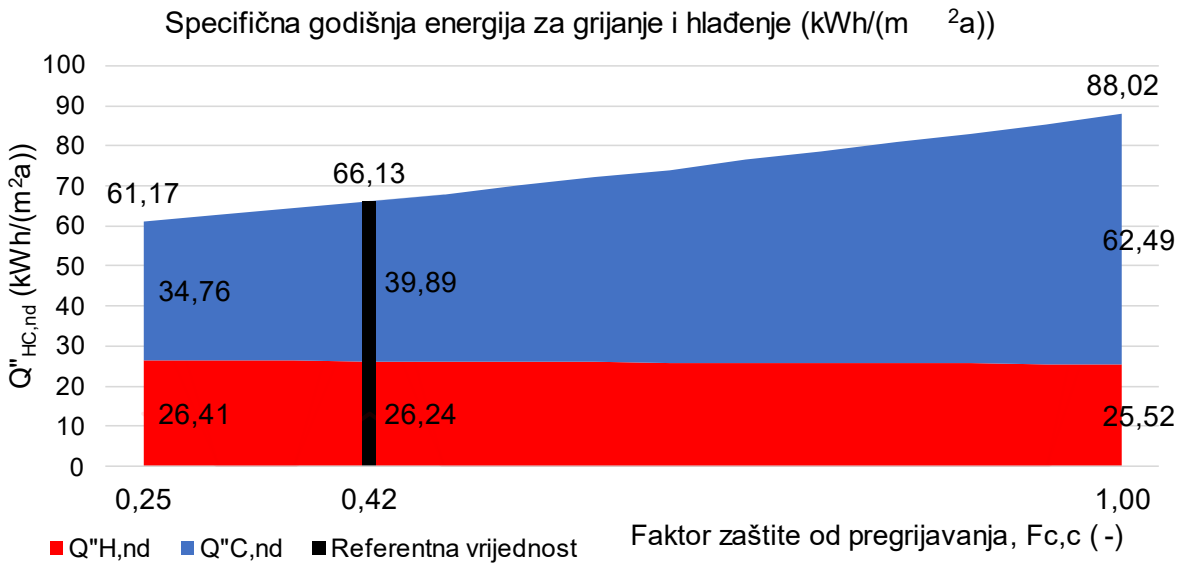
Slika 56: Utjecaj zaštite od pregrijavanja na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (osnovni scenarij proračuna, kontinentalna klima)



Slika 57: Utjecaj zaštite od pregrijavanja na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (varijantni scenarij proračuna, kontinentalna klima)



Slika 58: Utjecaj zaštite od pregrijavanja na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (osnovni scenarij proračuna, primorska klima)

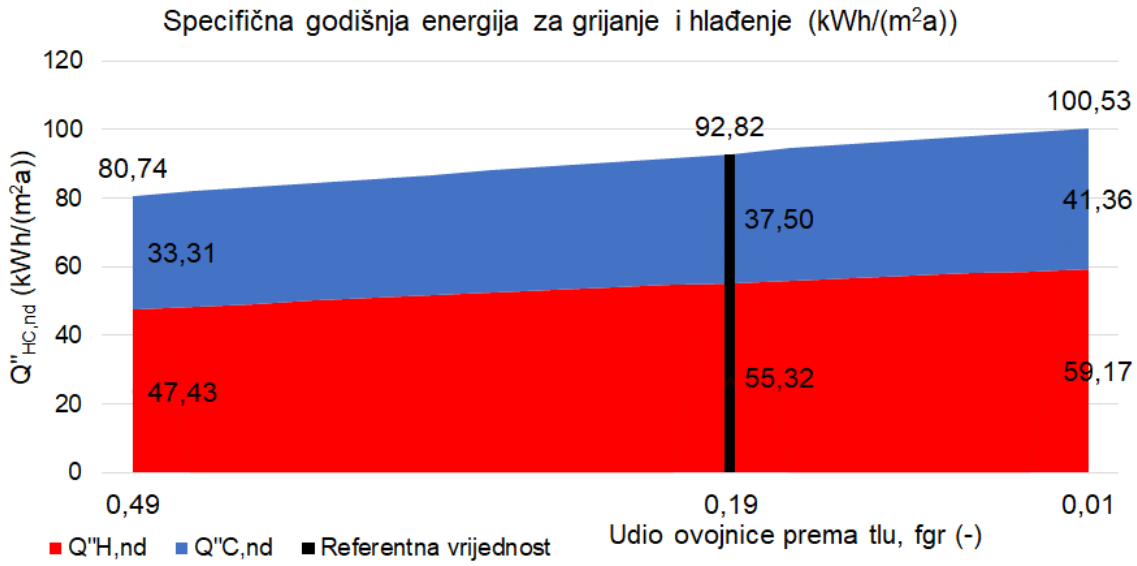


Slika 59: Utjecaj zaštite od pregrijavanja na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (varijantni scenarij proračuna, primorska klima)

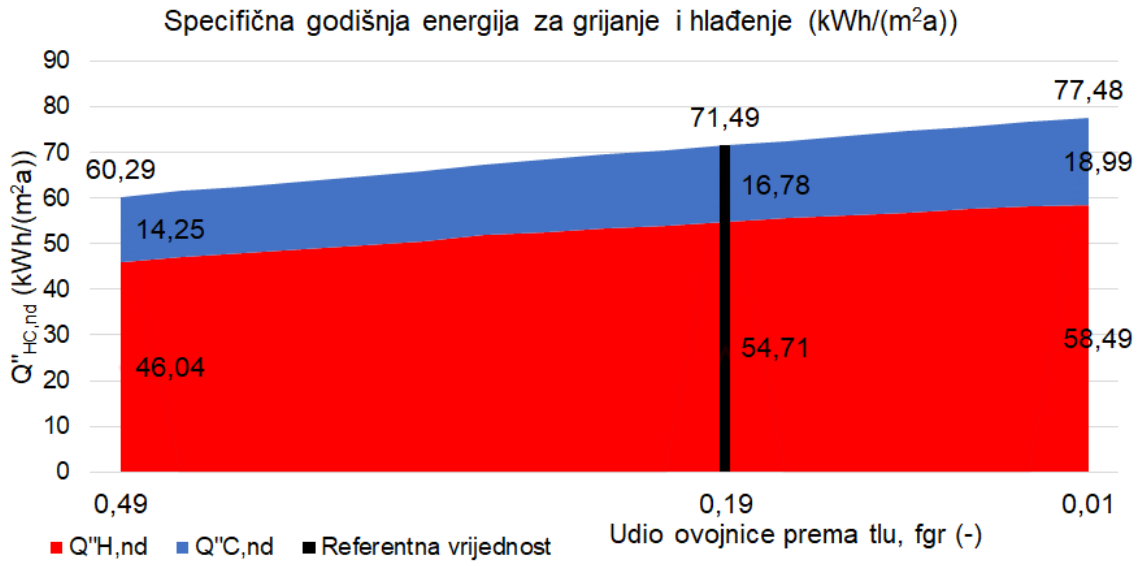
Faktor naprave za zaštitu od pregrijavanja varira od 0,25 do 0,83 za kontinentalno područje Hrvatske i 0,25 do 1,00 za primorsku klimu. Utjecaj vrste naprave za zaštitu od pregrijavanja varira ovisno o klimatskom području, od -3 % do +13 % za osnovni i varijantni scenarij proračuna u kontinentalnoj klimi i od -3 % do +18 % za osnovni scenarij u primorskoj klimi i od -8 % do +33 % za varijantni scenarij. Pretežit utjecaj ovog čimbenika je na energiju za hlađenje, premda postoji i neznatan utjecaj na energiju za grijanje u prijelaznim mjesecima kada se povremeno koristi i zaštita od sunca i zaštita od bliještanja sunca. Manji utjecaj u kontinentalnoj klimi može se objasniti relativno malenim udjelom otvora u ovojnici, manjom potrošnjom energije za hlađenje te zato što najnepovoljniji faktor naprave iznosi 0,83. U primorskoj klimi veća je potrošnja energije za hlađenje i najnepovoljniji faktor iznosi 1,00 (što znači otvore bez naprave za zaštitu od pregrijavanja), stoga je i utjecaj zaštite od sunca u primorju jedan od najznačajnijih čimbenika. Niz istraživanja prepoznaje zaštitu od sunca kao jedan od najbitnijih čimbenika pogotovo u toplim klimama, a raspon rezultata postojećih istraživanja u skladu je s rezultatima ovog rada. Capeluto (2003.) primjenjuje zaštitu od pregrijavanja samim oblikom zgrade i postiže uštede u potrošnji energije za hlađenje od 30 % [40]. Yao (2014.) analizira utjecaj pomične zaštite sunca i prikazuje uštede od 24 % u energiji za grijanje i 36 % u energiji za hlađenje [42]. Rana et al. (2022.) uspoređuju razne naprave za zaštitu od sunca i dolaze do zaključka da pravilan odabir naprave može smanjiti potrošnju

energije za hlađenje do 40 % [44]. Chandrasekaran et al. (2022.) dolaze do rezultata da vanjske pomične tende smanjuju potrošnju 23 % [45]. Perez et al. (2024.) analiziraju razne vrste zaštite od sunca i njihovi rezultati pokazuju uštede od 50 % u slučaju istaka, 30 % u slučaju brisoleja i žaluzina, 60 % u slučaju automatiziranih pomičnih vanjskih naprava te svega 25 % za unutarnje zavjese [43].

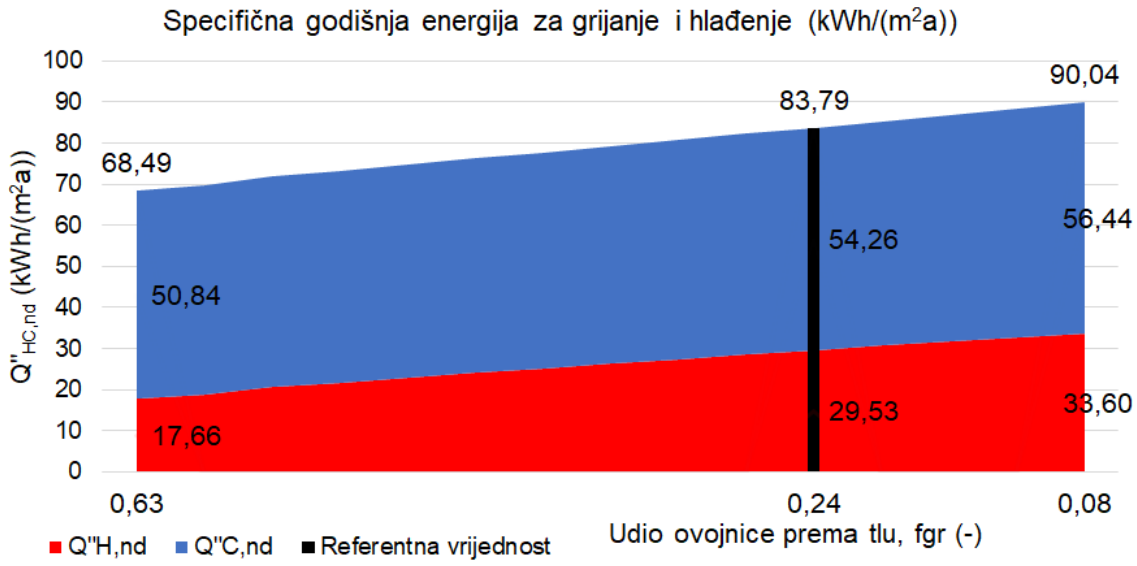
4.9.6 Kontakt ovojnice s tlom



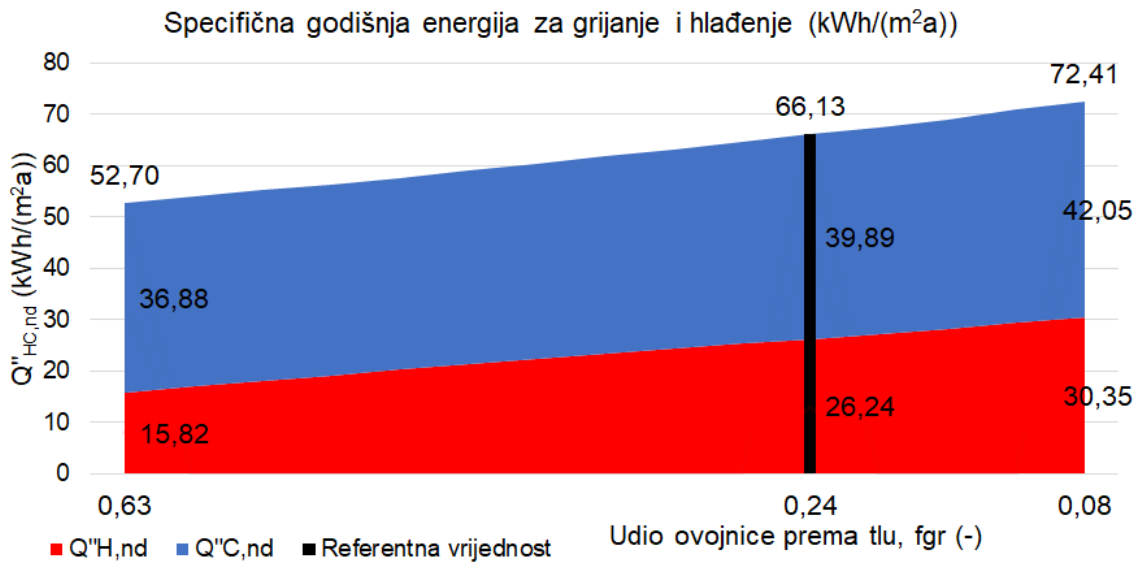
Slika 60: Utjecaj kontakta s tlom na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (osnovni scenarij proračuna, kontinentalna klima)



Slika 61: Utjecaj kontakta s tlom na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (varijantni scenarij proračuna, kontinentalna klima)



Slika 62: Utjecaj kontakta s tlom na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (osnovni scenarij proračuna, primorska klima)

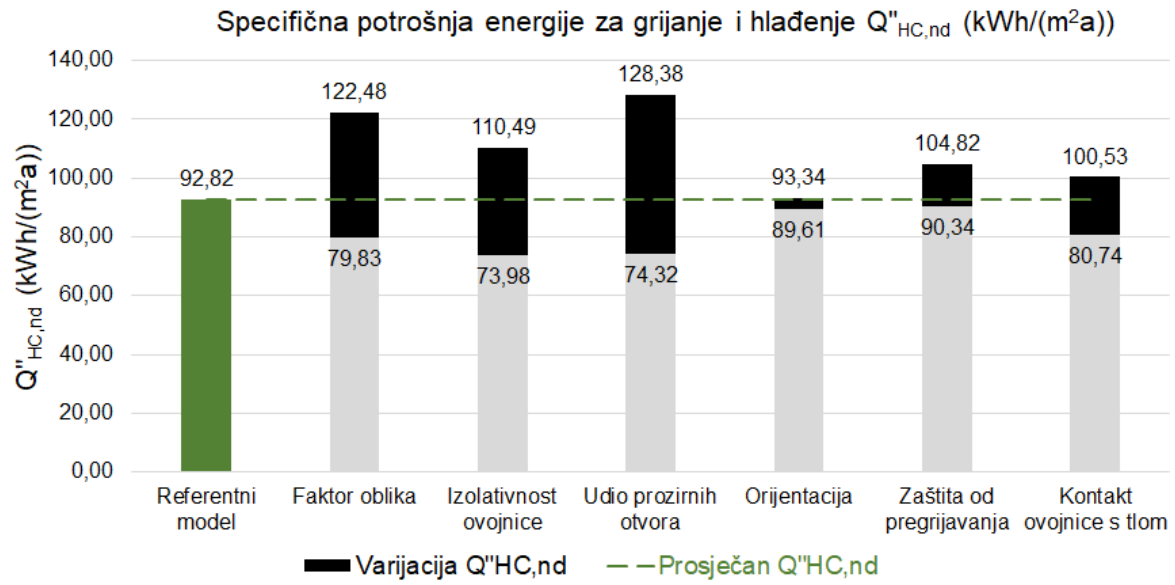


Slika 63: Utjecaj kontakta s tlom na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (varijantni scenarij proračuna, primorska klima)

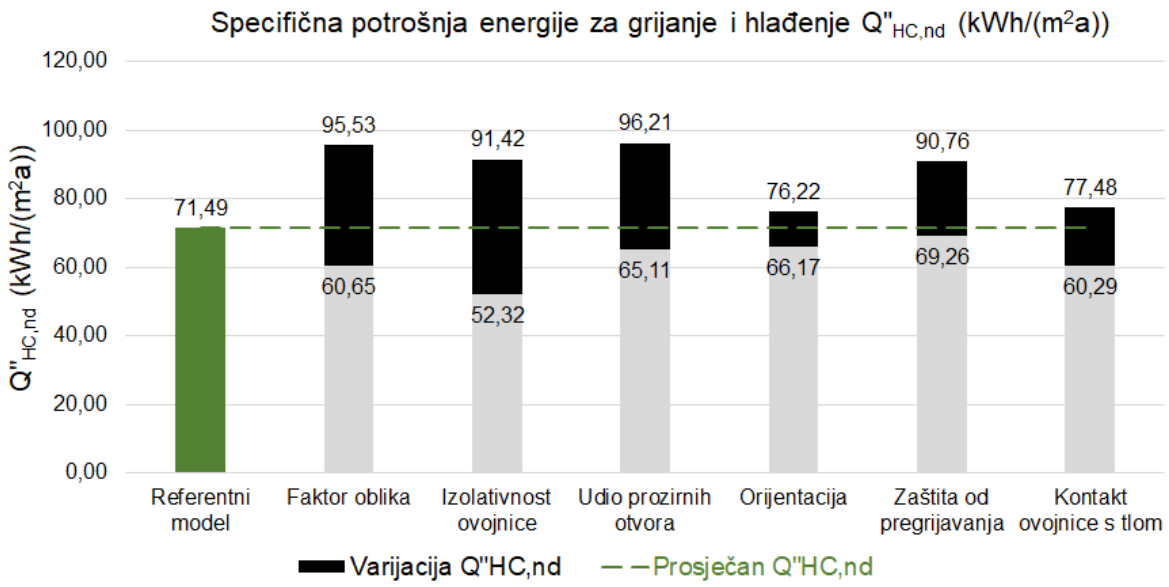
Utjecaj ovojnice u kontaktu s tlom pokazuje manji utjecaj na ukupnu potrošnju energije od većine ostalih čimbenika. Kod kuća kontinentalne klime, udio ovojnice u kontaktu s tlom varira

od 49 % do 1 %, a za primorje od 63 % do 8 %. Godišnja potrošnja energije osnovnog scenarija proračuna u kontinentalnoj klimi varira od -13 % do +8 %, a varijantnog scenarija od -16 % do +8 % u odnosu na prosjek. U primorskoj klimi potrošnja osnovnog scenarija varira od -18 % do +7 %, a varijantnog od -20 % do +9 %. Tlo na određenoj dubini ima znatno manje godišnje oscilacije temperature u odnosu na vanjski zrak. Temperatura tla podjednaka je prosječnoj godišnjoj temperaturi na lokaciji zgrade uz odstupanje od nekoliko stupnjeva. To znači da je zimi manji gubitak topline prema tlu u odnosu na vanjski zrak, a tijekom ljeta niža temperatura tla od temperature interijera hladi zgradu. Povoljan utjecaj temperature tla u kontinentalnoj klimi ipak nije toliko izražen u ukupnoj potrošnji energije zbog bolje izolativnosti ovojnice prema tlu. U primorju, gdje su manje debljine toplinske izolacije prema tlu, utjecaj tla je više izražen na potrošnju, pogotovo energiju za hlađenje. Postojeća istraživanja koja se bave pozitivnim utjecajem tla u energetskoj učinkovitosti prikazuju značajne uštede za duboko ukopane zgrade (do 55 % manji gubici topline kod zgrada ukopanih do 4 m dubine) [91], dok niz istraživanja daje samo općenite zaključke o povoljnom utjecaju tla u energetskoj učinkovitosti [46, 48, 49].

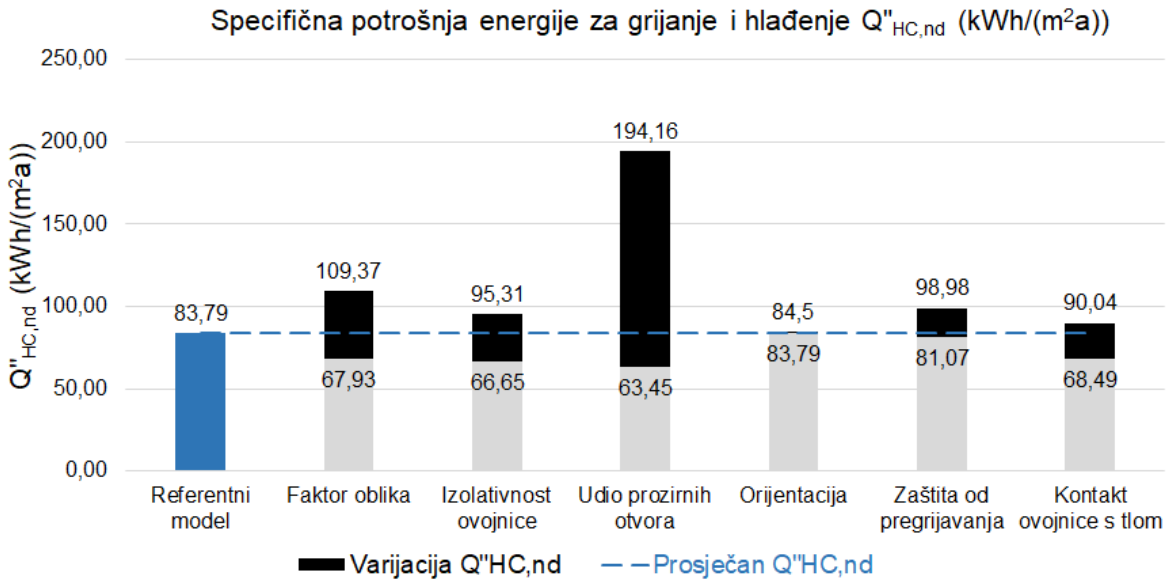
4.9.7 Usporedni utjecaj svih čimbenika na potrošnju energije



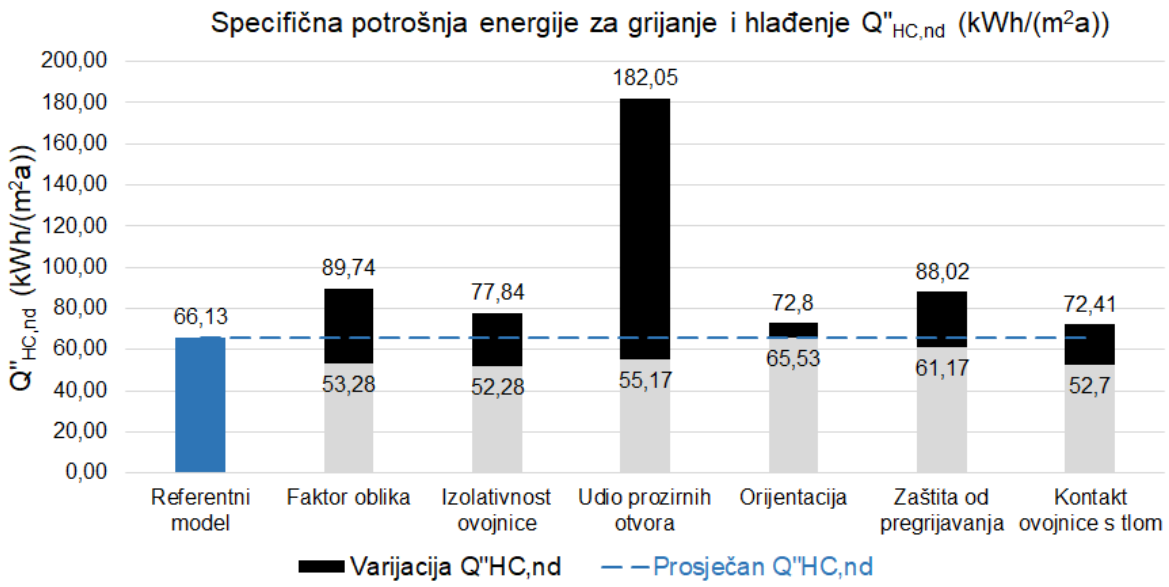
Slika 64: Pojedinačni utjecaj čimbenika na potrošnju energije (kontinentalna klima, osnovni scenarij proračuna)



Slika 65: : Pojedinačni utjecaj čimbenika na potrošnju energije (kontinentalna klima, varijantni scenarij proračuna)



Slika 66: Pojedinačni utjecaj čimbenika na potrošnju energije (primorska klima, osnovni scenarij proračuna)



Slika 67: Pojedinačni utjecaj čimbenika na potrošnju energije (primorska klima, varijantni scenarij proračuna)

Tablica 30: Čimbenici vrednovani (rangirani) prema utjecaju na ukupnu potrošnju energije

	Kontinentalna klima		**Primorska klima**	
R. br.	Osnovni scenarij	Varijantni scenarij	Osnovni scenarij	Varijantni scenarij
1.	Udio prozirnih otvora	Izolativnost ovojnice	Udio prozirnih otvora	Udio prozirnih otvora
2.	Faktor oblika	Faktor oblika	Faktor oblika	Faktor oblika
3.	Izolativnost ovojnice	Udio prozirnih otvora	Izolativnost ovojnice	Zaštita od pregrijavanja
4.	Kontakt ovojnice s tlom	Zaštita od pregrijavanja	Kontakt ovojnice s tlom	Izolativnost ovojnice
5.	Zaštita od pregrijavanja	Kontakt ovojnice s tlom	Zaštita od pregrijavanja	Kontakt ovojnice s tlom
6.	Orijentacija	Orijentacija	Orijentacija	Orijentacija

Slika 64 prikazuje usporedan utjecaj pojedinog čimbenika u ukupnoj godišnjoj potrošnji energije za grijanje i hlađenje za kontinentalnu klimu, osnovni scenarij proračuna. Utjecaj pojedinog čimbenika na mjesečnu potrošnju energije prikazan je u Prilogu 2. Najveći utjecaj

ima udio otvora u ovojnici – ukupna potrošnja varira od 74,32 kWh/(m2a) za najmanji udio otvora, do 128,38 kWh/(m2a) za najveći udio otvora. Najmanji utjecaj ima orijentacija otvora - ukupna potrošnja varira od 89,61 kWh/(m2a) za najveći otklon prema jugu, do 93,34 kWh/(m2a) za najveći otklon prema sjeveru. U slučaju varijantnog modela (Slika 65) najveći utjecaj ima izolativnost ovojnice, od 52,32 za najdeblje izolacije ovojnice do 91,42 kWh/(m2a) za najtanje. Najmanji utjecaj i u ovom slučaju ima čimbenik orijentacije, od 66,17 do 76,22 kWh/(m2a).

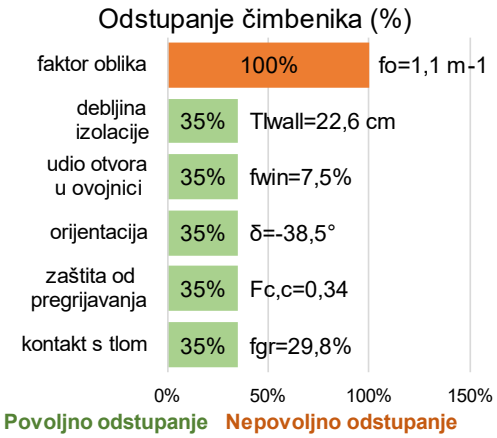
Ova razlika u rezultatima osnovnog i varijantnog scenarija proračuna može se objasniti značajnom razlikom u potrošnji energije za hlađenje između ova dva modela. Kod osnovnog scenarija veliki udio otvora rezultira i većim solarnim dobicima, a u proračunu je postavljena niža temperatura hlađenja (22 °C) i nije pretpostavljano korištenje pasivnog hlađenja. Kod varijantnog modela manja je potrošnja energije za hlađenje uslijed veće temperature hlađenja (26 °C) i korištenja pasivnog hlađenja. Iz tog razloga kod varijantnog scenarija proračuna veći je udio energije za grijanje, a izolativnost ovojnice najviše utječe upravo na njezinu potrošnju. Stoga je u varijantnom modelu najutjecajniji čimbenik debljina toplinske izolacije.

Slika 66 i Slika 67 prikazuju utjecaj svih promatranih čimbenika za primorsku klimu. Kod oba modela najutjecajniji je udio prozirnih otvora u ovojnici. Za osnovni scenarij proračuna ukupna potrošnja varira od 63,45 do 194,16 kWh/(m2a), a za varijantni od 55,17 do 182,05 kWh/(m2a). Kod oba modela najmanji je utjecaj orijentacije, za osnovni scenarij ukupna potrošnja varira od 83,79 do 84,50 kWh/(m2a), a za varijantni od 65,53 do 72,80 kWh/(m2a). Kao i u slučaju dva modela kontinentalne klime, i ovdje je primarna razlika u potrošnji energije za hlađenje. Međutim, u godišnjoj potrošnji dominantna je energija za hlađenje, na koju udio otvora ima najveći utjecaj. Također, toliko velik raspon rezultata može se obrazložiti udjelom prozirnih otvora u ovojnici od čak 45 % kao zabilježeni maksimum kod analiziranih kuća.

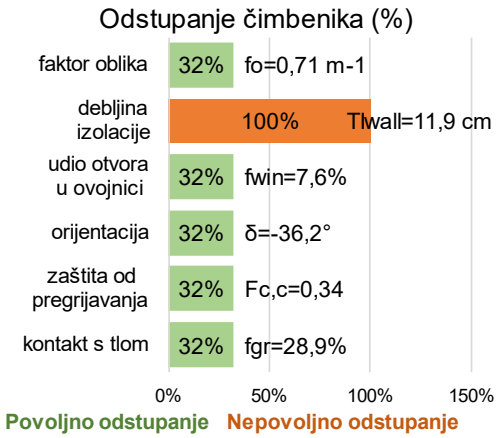
Tablica 30 prikazuje čimbenike arhitektonskog oblikovanja vrednovane od najutjecajnijih do najmanje utjecajnih za oba klimatska područja i oba načina proračuna. Kao tri najutjecajnija čimbenika ističu se: udio prozirnih otvora u ovojnici, faktor oblika i izolativnost ovojnice. Najmanje utjecajan čimbenik je orijentacija za sve varijante proračuna.

4.10 Prilagodba odstupanja jednog čimbenika u svrhu očuvanja energetske učinkovitosti

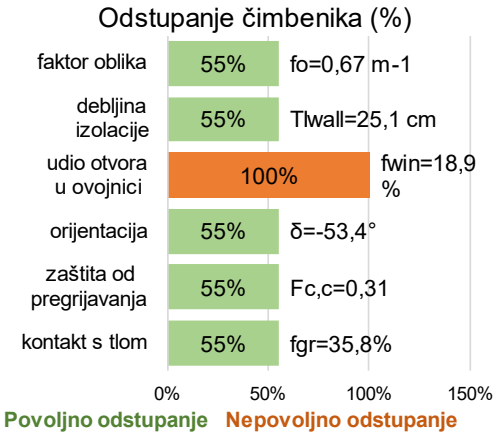
U ovom poglavlju prikazana je mogućnost korekcije energetske učinkovitosti varijacijom vrijednosti čimbenika arhitektonskog oblikovanja. Analiza je provedena na način da je za svaki od šest promatranih čimbenika odabrana najnepovoljnija granična vrijednost, uz naknadnu prilagodbu ostalih čimbenika s ciljem zadržavanja referentne potrošnje energije. proračuni su provedeni iterativnim postupkom prilagodbe do postizanja rezultata s odstupanjem do 1 % ukoliko je bilo moguće.



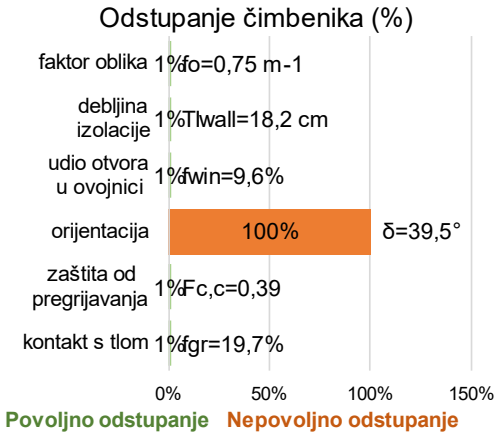
a) Faktor oblika



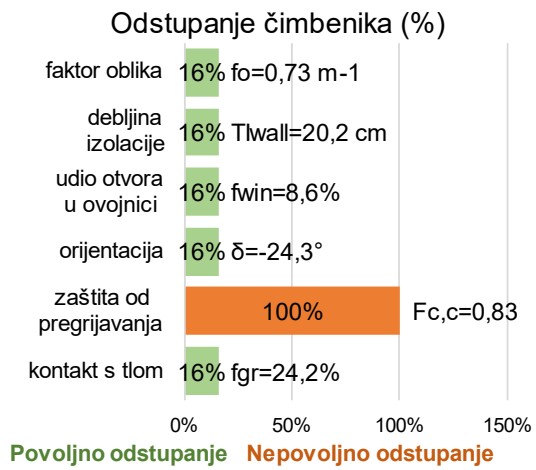
b) Debljina izolacije



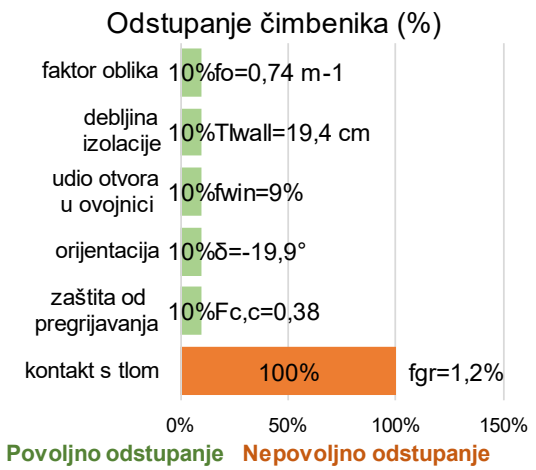
c) Udio otvora u ovojnici



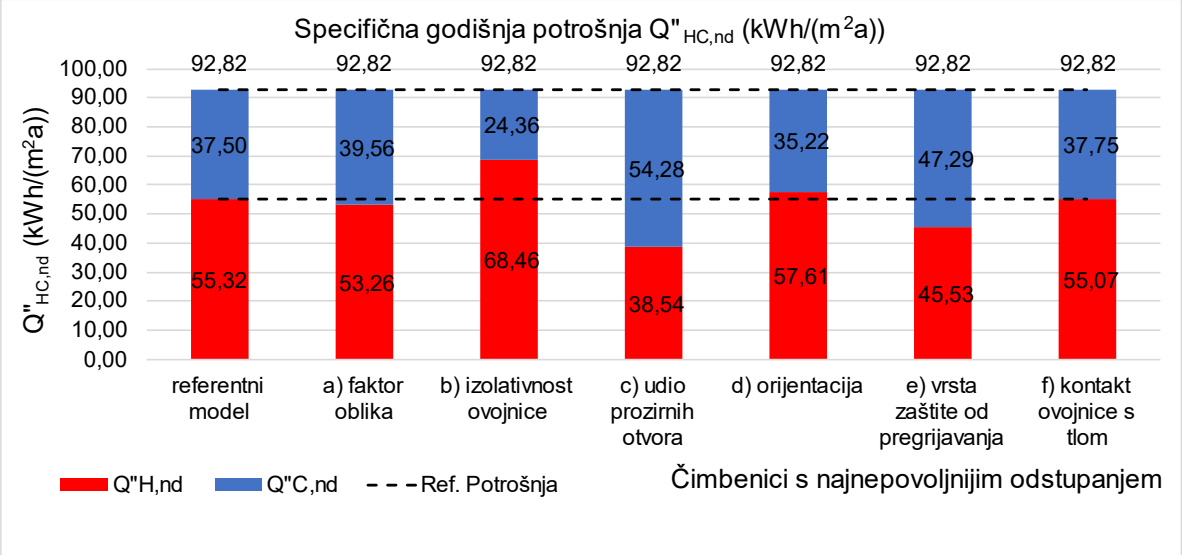
d) Orijentacija



e) Zaštita od pregrijavanja

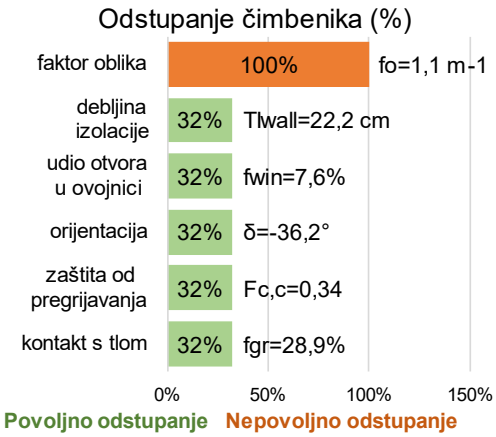


f) Kontakt s tlom

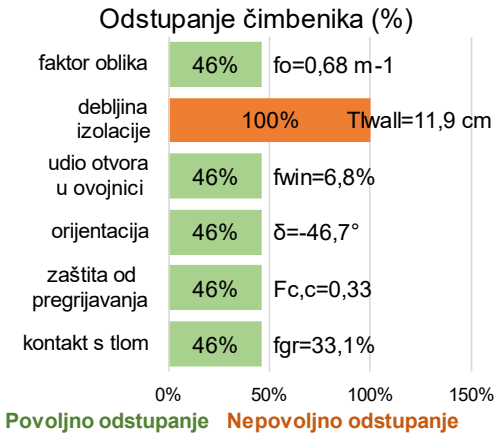


g) Korigirana potrošnja energije

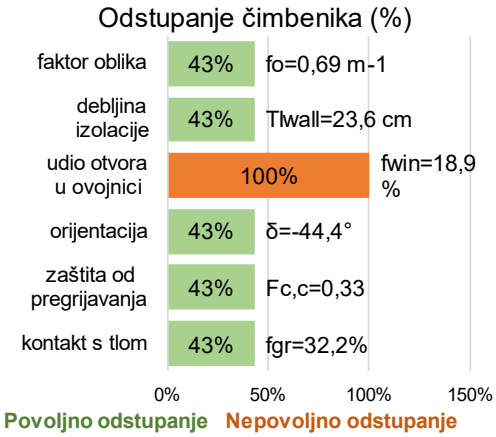
Slika 68: Korekcija potrošnje energije uslijed najnepovoljnijeg odstupanja jednog čimbenika (kontinentalna klima, osnovni scenarij proračuna)



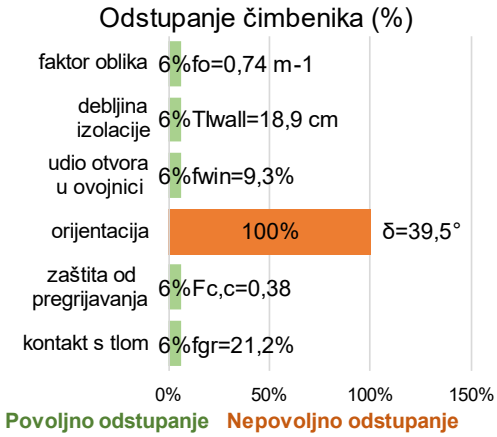
a) Faktor oblika



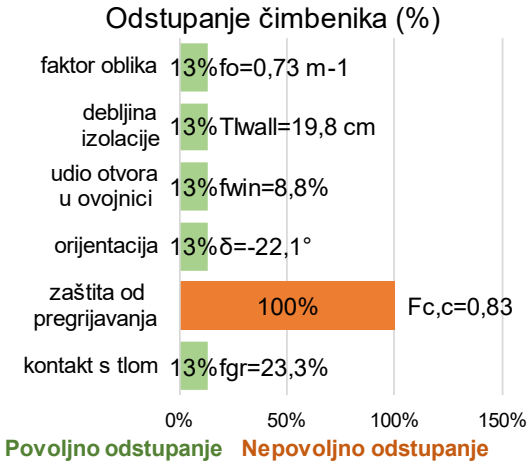
b) Debljina izolacije



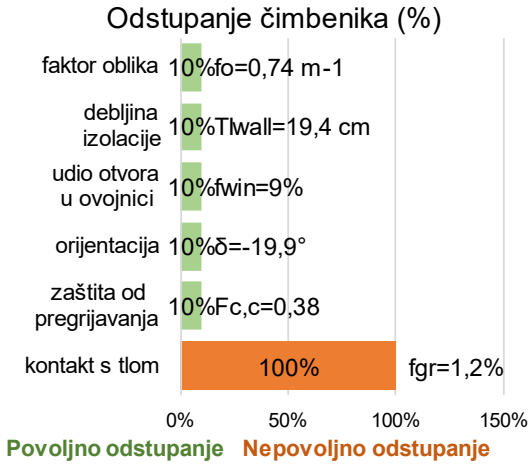
c) Udio otvora u ovojnici



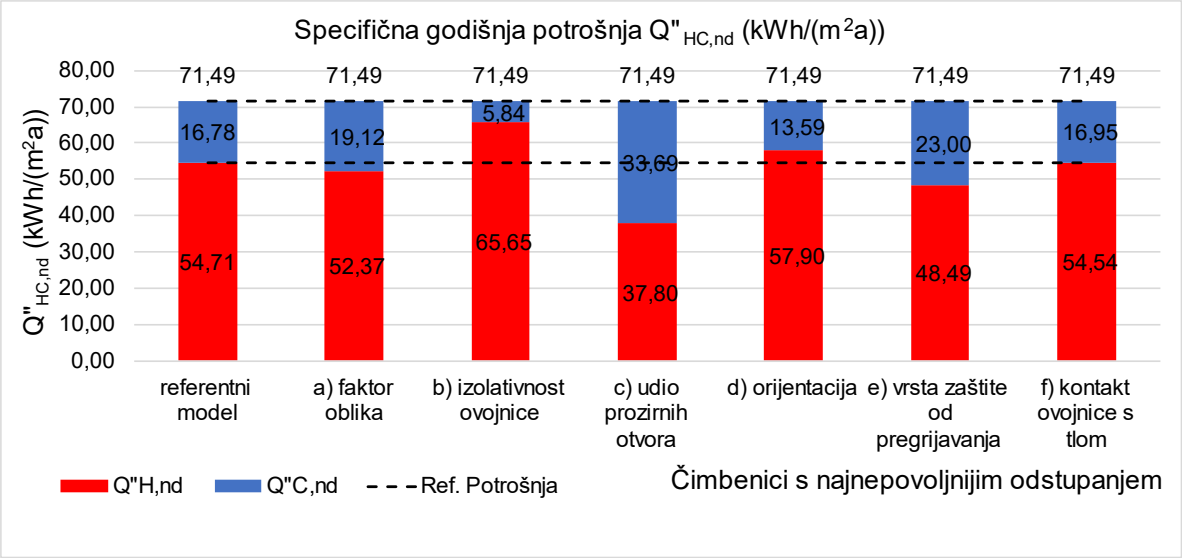
d) Orijentacija



e) Zaštita od pregrijavanja



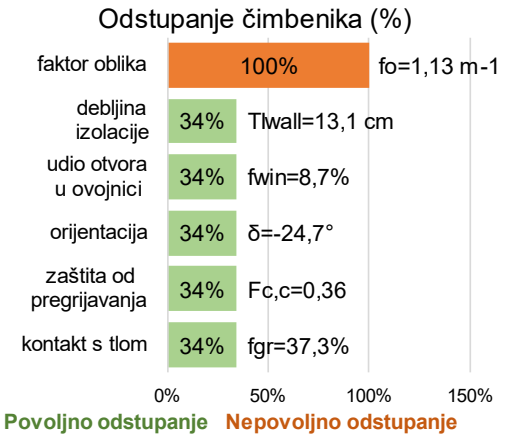
f) Kontakt s tlom



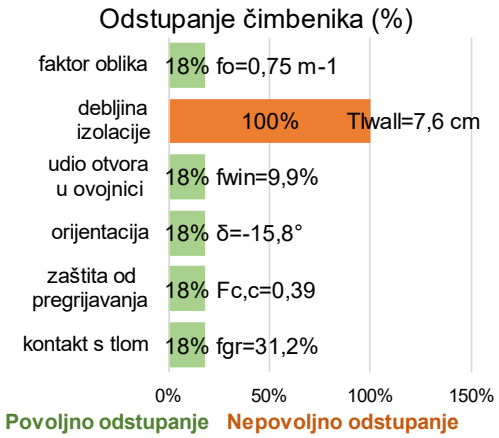
g) Korigirana potrošnja energije

Slika 69: Korekcija potrošnje energije uslijed najnepovoljnijeg odstupanja jednog čimbenika (kontinentalna klima, varijantni scenarij proračuna)

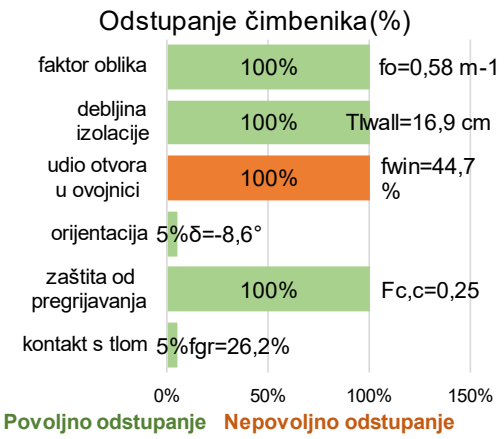
Slika 68 a) – f) i Slika 69 a) – f) prikazuju nepovoljno odstupanje pojedinog čimbenika (narančasto) i potrebno povoljno odstupanje ostalih čimbenika (zeleno) s ciljem zadržavanja referentne potrošnje. Slika 68 g) i Slika 69 g) prikazuju odnos energije za grijanje i hlađenje u korigiranom modelu. U slučaju najnepovoljnijeg odstupanja svakog od čimbenika u modelima kontinentalne klime bila je moguća korekcija potrošnje energije prilagodbom ostalih čimbenika.



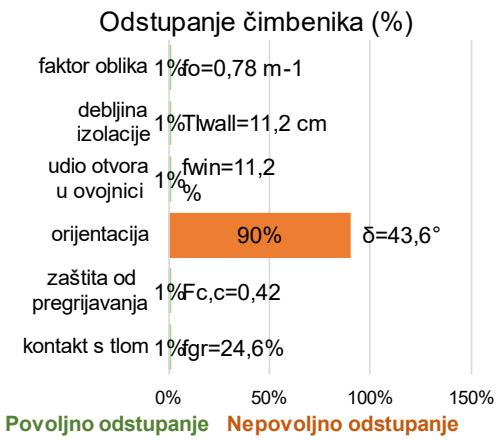
f) Faktor oblika



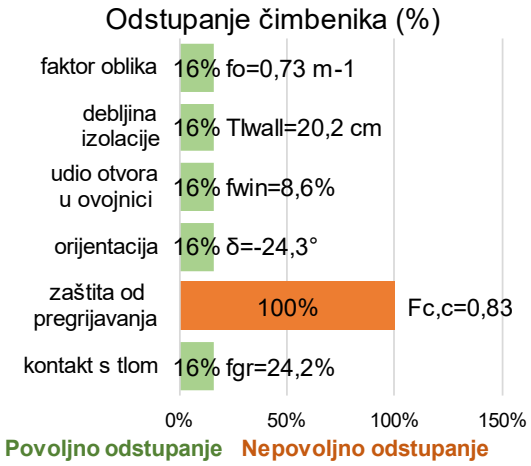
g) Debljina izolacije



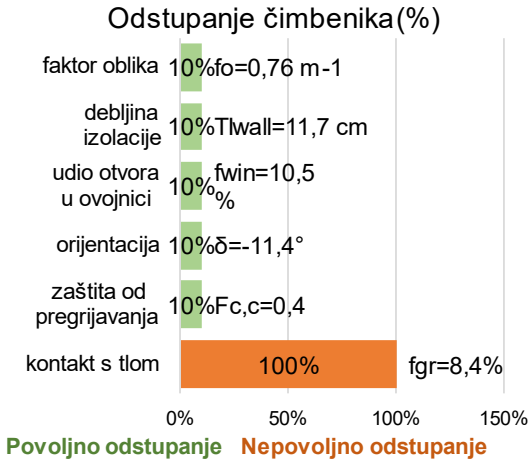
h) Udio otvora u ovojnici



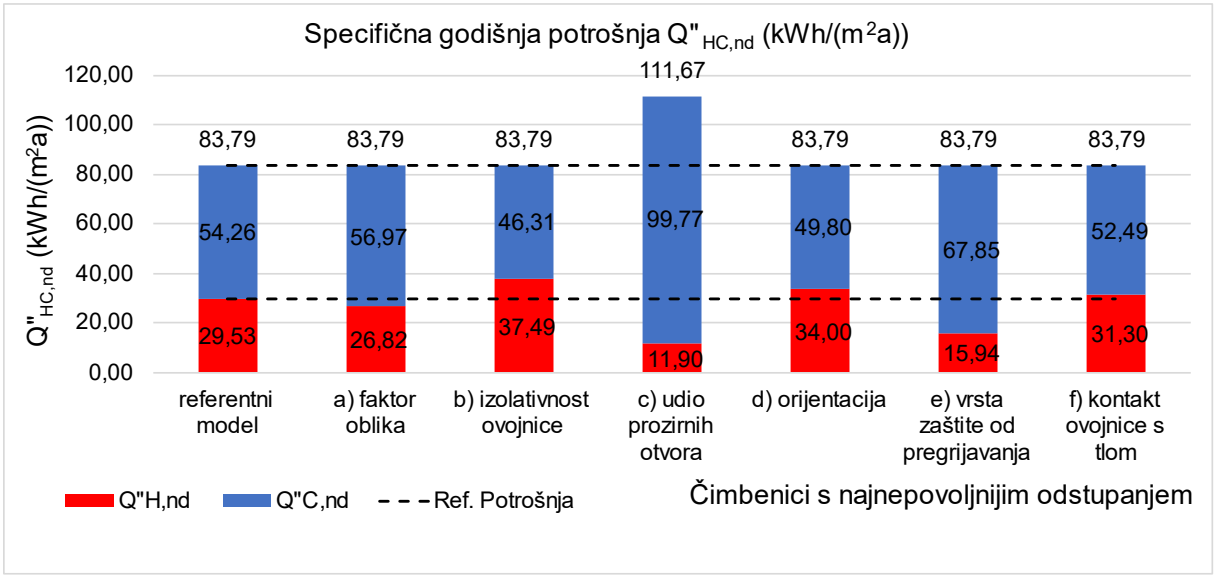
i) Orijentacija



j) Zaštita od pregrijavanja

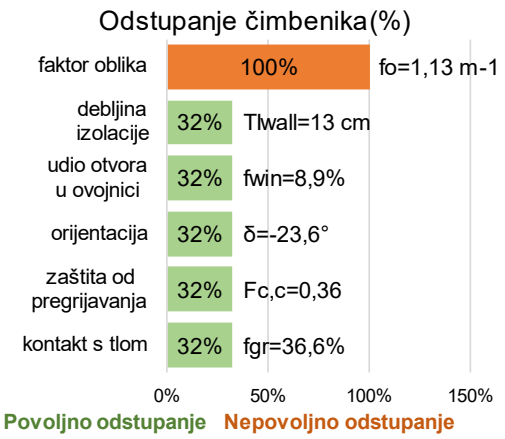


f) Kontakt s tlom

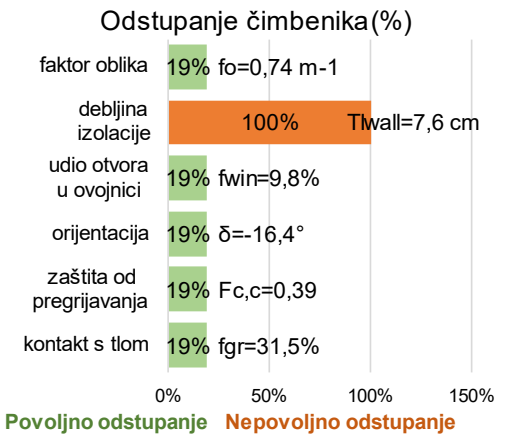


g) Korigirana potrošnja energije

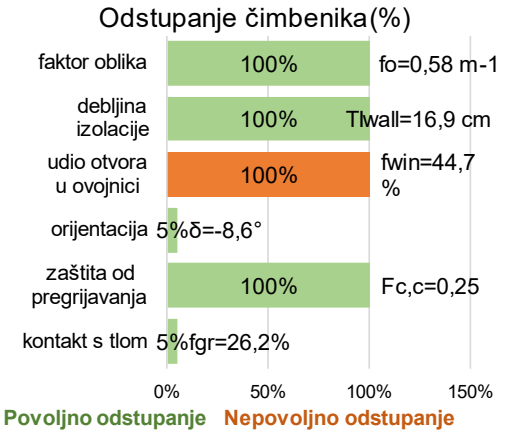
Slika 70: Korekcija potrošnje energije uslijed najnepovoljnijeg odstupanja jednog čimbenika (primorska klima, osnovni scenarij proračuna)



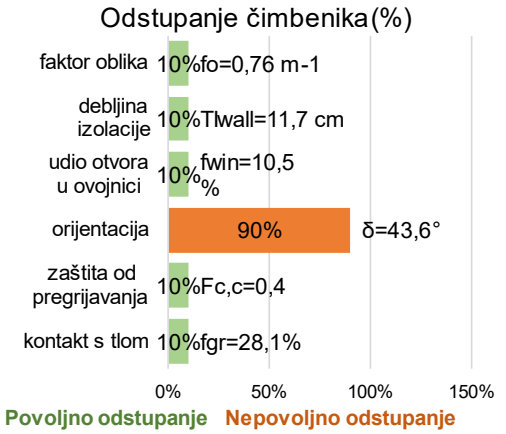
a) Faktor oblika



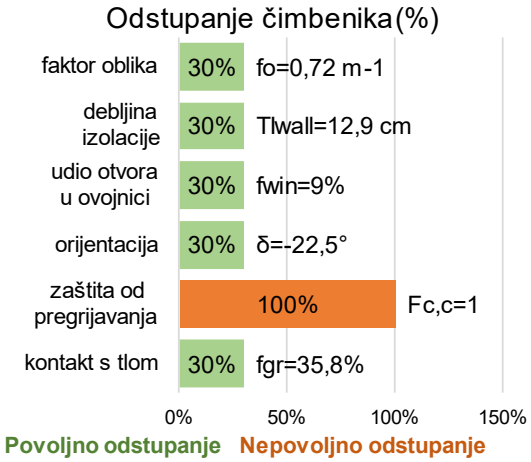
b) Debljina izolacije



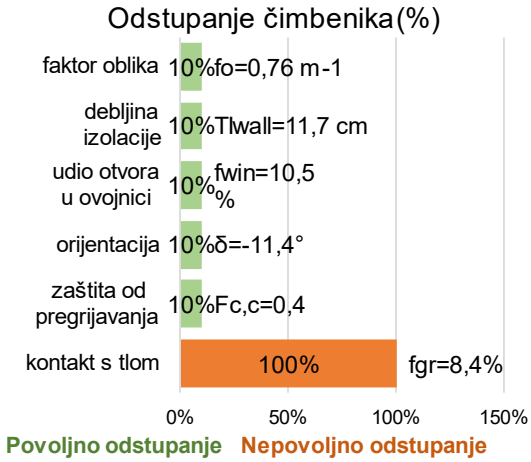
c) Udio otvora u ovojnici



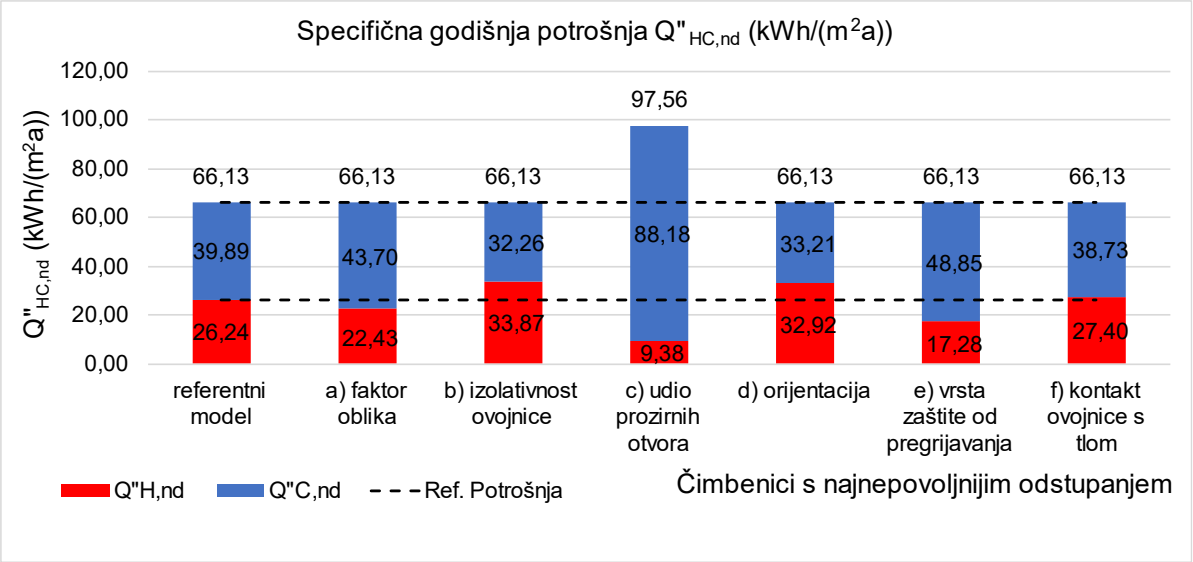
d) Orijentacija



e) Zaštita od pregrijavanja



f) Kontakt s tlom



g) Korigirana potrošnja energije

Slika 71: Korekcija potrošnje energije uslijed najnepovoljnijeg odstupanja jednog čimbenika (primorska klima, varijantni scenarij proračuna)

Slika 70 i Slika 71 prikazuju rezultate korekcije nepovoljnih odstupanja pojedinih čimbenika za primorsku klimu. Za slučaj najvećeg udjela prozora u ovojnici, godišnja potrošnja energije za hlađenje naraste u tolikoj mjeri da korekcija ostalim čimbenicima nije moguća.

Svaki od šest promatranih čimbenika arhitektonskog oblikovanja ima određen utjecaj na energetsku učinkovitost. S obzirom da se promatra najnepovoljnije odstupanje samo jednog čimbenika, za očekivati je da će korekcijom ostalih pet čimbenika biti moguće zadržati referentnu razinu energetske učinkovitosti. To se pokazalo točnim za sve čimbenike osim za udio otvora u ovojnici u primorskoj klimi. U slučaju velike ploštine prozirnih otvora ostvaruju se značajni toplinski dobici, stoga energija za hlađenje višestruko premašuje referentne vrijednosti, te nije moguće zadržati ukupnu potrošnju energije na željenoj razini. Pri tome treba uzeti u obzir da je najnepovoljniji (najveći) zabilježeni udio otvora u ovojnici 45 %, što je značajno veće u odnosu na 19 % za kontinentalnu klimu. Slika 68 do Slika 71 prikazuju korekcije godišnje potrošnje energije uslijed odstupanja jednog čimbenika.

Hipotezom 2 se pretpostavlja da je narušenu energetsku učinkovitost zbog nepovoljnog odstupanja pojedinog čimbenika, ili malog broja čimbenika koji se smatraju nositeljima arhitektonskog oblikovanja, moguće nadoknaditi poboljšanjem ostalih čimbenika koji nisu nositelji arhitektonskog oblikovanja. U slučaju kuća u kontinentalnoj klimi, hipoteza 2 je

potvrđena za odstupanje svakog od šest čimbenika za oba scenarija proračuna, dok je u primorskoj klimi potvrđena za pet od šest čimbenika, također za oba scenarija proračuna. Prema tome, u slučaju nepovoljnog odstupanja jednog čimbenika, hipoteza 2 potvrđena je za 22 od 24 slučajeva, odnosno 92 %.

Varijacijom pojedinih čimbenika primijećena je promjena u odnosu godišnje energije za grijanje i hlađenje na godišnjoj razini. U nekim slučajevima njihove vrijednosti se izjednačuju, a u drugim praktički ne postoji potreba za grijanjem ili hlađenjem zgrade.

4.10.1 Faktor oblika

Faktor oblika je jedan od čimbenika sa najvećim utjecajem na energetsku učinkovitost. Unatoč tome, korekcijom ostalih čimbenika moguće je zadržati ukupnu godišnju potrošnju na referentnoj razini. Potrebna korekcija svih ostalih čimbenika iznosi do 35 % (promatrano između referentne i najpovoljnije vrijednosti).

Nepovoljnijim faktorom oblika i korekcijom potrošnje ostalim čimbenicima, gotovo da nema razlike u odnosu energije za grijanje i hlađenje nakon korekcije. Takav rezultat je očekivan s obzirom na to da se povećanjem ovojnice povećava i ploština zidova preko kojih se gubi toplima, ali se proporcionalno povećava i ploština prozora koji uzrokuju povećanje energije za hlađenje.

4.10.2 Izolativnost ovojnice i debljina toplinske izolacije

Toplinska izolacija ovojnice također je jedan od čimbenika s najvećim utjecajem na potrošnju energije. Jednako kao kod faktora oblika, potrošnju energije u slučaju najnepovoljnije debljine izolacije moguće je korigirati i zadržati na optimalnoj razini prilagodbom ostalih čimbenika do 46 %.

Povećanjem toplinskih gubitaka kroz ovojnicu očekivana je veća potreba za grijanjem, kao i manja potreba za hlađenjem jer se omogućava rashlađivanje kuće putem cijele ovojnice noću u ljetnim mjesecima. Omjer energije za grijanje i hlađenje u godišnjoj potrošnji energije se mijenja nakon korekcije čimbenika, odnosno povećava se udio energije za grijanje. U varijantnom scenariju proračuna za kontinentalnu klimu energija za hlađenje pada na svega 8 % godišnje bilance grijanja i hlađenja, dok je u referentnom modelu udio hlađenja 24 %.

U primorskoj klimi iz istog razloga dolazi do povećanja energije za grijanje i smanjenja potrebe za hlađenjem. U slučaju varijantnog scenarija proračuna potreba za grijanjem premašuje potrebu za hlađenjem i iznosi 51 % godišnje potrošnje, dok je u referentnom modelu udio grijanja 40 %.

4.10.3 Udio prozirnih otvora u ovojnici

Utjecaj otvora u ovojnici je gotovo najutjecajniji čimbenik na energetsku učinkovitost. Otvori u ovojnici predstavljaju slabu točku u pogledu toplinske izolacije. Gubitak topline kroz otvore višestruko je veći u odnosu na zidove i ostale građevne dijelove u koje je moguće ugraditi toplinsko-izolacijske materijale većih debljina (10 cm, 15 cm ili više). Karakteristika ostakljenja je da omogućava znatno veće solarne dobitke kroz ovojnicu tijekom cijele godine u odnosu na dobitke kroz toplinski izolirane zidove. Odnos solarnih dobitaka i ukupnih toplinskih gubitaka u suvremenim kućama izoliranim prema važećim propisima je na strani dobitaka. Iz tog razloga povećanje ploštine otvora rezultira manjom potrebom za grijanjem i većom potrebom za hlađenjem u oba klimatska područja.

U kontinentalnoj klimi korekcija potrošnje je moguća prilagodbom ostalih čimbenika do 55 %. Omjer grijanja i hlađenja na godišnjoj razini gotovo se izjednačuju u varijantnom scenariju proračuna, dok u osnovnom scenariju energija za hlađenje postaje dominantna s 59 % (u referentnom modelu je 40 %). U primorskoj klimi, utjecaj otvora u ovojnici je prevelik da bi ga bilo moguće korigirati sa svih ostalih pet čimbenika, što se pripisuje vrlo velikom udjelu ostakljenja kod najnepovoljnijeg slučaja. Velikim povećanjem udjela otvora u ovojnici, nije moguće istovremeno povećati i udio ovojnice u kontaktu s tlom, odnosno taj udio se mora značajno smanjiti kako ukupan udio elemenata ovojnice ne bi premašio 1,0. Iz istog razloga prosječan otklon otvora od ekvatora mora biti što manji da ukupan udio pročelja, s otvorima u ovojnici prema različitim orijentacijama, ne naraste pretjerano. Stoga pozitivan utjecaj tla i zaštite od sunca u ovom slučaju ostaje gotovo na razini prosjeka, -5 %. U slučaju varijantnog scenarija proračuna za primorsku klimu, najizraženija je razlika. Ukupna potrošnja energije veća je za 48 % u odnosu na referentni model, energija za hlađenje veća je za 121 % a energija za grijanje manja za 64 %. Energija za grijanje u tom slučaju iznosi svega 10 % godišnje bilance grijanja i hlađenja, u odnosu na referentni model kod kojeg iznosi 40 %.

4.10.4 Orijentacija

Utjecaj orijentacije pokazao se kao najmanje utjecajan čimbenik. Prosječan udio otvora u ovojnici za kontinentalnu i primorsku klimu je relativno malen te iznosi 10 % i 11 %. Također, otvori na kućama u pravilu su orijentirani na više strana svijeta, a zabilježene najpovoljnije i najnepovoljnije orijentacije na analiziranim primjerima kuća nisu čisti jug ili sjever. Tablica 10 prikazuje udjele otvora prema stranama svijeta i prosječan otklon od ekvatora, a Tablica 12 najpovoljnije i najnepovoljnije otklone od ekvatora.

U kontinentalnom području najnepovoljniju orijentaciju otvora (gotovo čisti sjever) bilo je moguće korigirati prilagodbom ostalih čimbenika do 6 %. S obzirom na manje solarne dobitke kroz cijelu godinu, energija za grijanje neznatno se povećala, a energija za hlađenje smanjila. U slučaju primorja, najnepovoljniju orijentaciju bilo je moguće korigirati ostalim čimbenicima odstupanjem do 10 %. I za modele primorske klime dolazi do povećanja energije za grijanje i smanjenja energije za hlađenje. U slučaju varijantnog scenarija proračuna u primorskoj klimi gotovo se izjednačuju potrebna energija za grijanje i hlađenje.

4.10.5 Zaštita od pregrijavanja

Utjecaj zaštite od pregrijavanja pokazao se većim za primorsku nego kontinentalnu klimu. Pri tome treba uzeti u obzir da najnepovoljniji zabilježeni faktor naprave za zaštitu od pregrijavanja $F_{C,C}$ (-) iznosi 0,83 za kontinentalnu klimu, a za primorje 1,00. Također, u pregrijavanju ulogu ima i udio otvora u ovojnici koji je relativno malen za oba klimatska područja. Korekcija ostalih čimbenika do maksimalno 16 % za kontinentalnu klimu i 30 % za primorsku je bila dovoljna kako bi se održala referentna potrošnja energije uz najnepovoljnije faktore naprave za zaštitu od pregrijavanja.

U kontinentalnoj klimi, osnovni scenarij proračuna, energija za hlađenje je značajno veća u odnosu na varijantni scenarij. Pri najnepovoljnijoj zaštiti od pregrijavanja, uz korekciju ostalih čimbenika, ona premašuje energiju za grijanje za 4 %. Kod varijantnog scenarija u kontinentalnoj klimi samo je u manjoj mjeri promijenjen omjer u korist energije za hlađenje.

U primorskoj klimi, nakon korekcije, energija za grijanje je značajno smanjena, do 46 %, a energija za hlađenje povećana.

4.10.6 Kontakt ovojnice s tlom

Kontakt s tlom ima veći utjecaj na potrebnu energiju za grijanje nego za hlađenje. Kao pojedinačni čimbenik pokazao se utjecajnijim u kontinentalnoj klimi nego u primorskoj iz razloga što je u kontinentalnoj klimi dominantna energija za grijanje na godišnjoj razini. U oba klimatska područja korekcija potrošnje energije ostalim čimbenicima je bila moguća prilagodbom čimbenika od 10 %. Nakon korekcije ostalim čimbenicima omjer energije za grijanje i hlađenje gotovo je nepromijenjen u svim slučajevima.

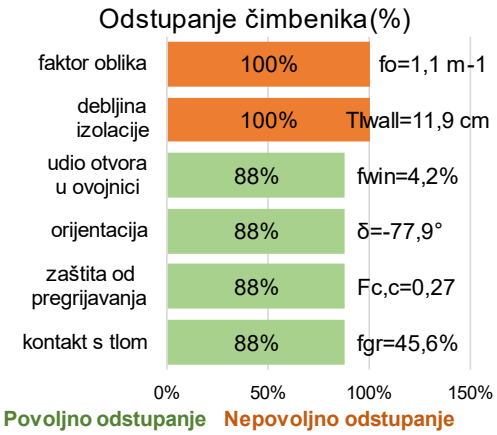
4.11 Prilagodba odstupanja dva čimbenika u svrhu očuvanja energetske učinkovitosti

4 % od promatranih kuća u kontinentalnom klimatskom područja ima dva čimbenika sa nepovoljnim odstupanjem u rasponu 90 % - 100 %, a u primorskom 1 % kuća. U oba klimatska područja ne postoje kuće sa tri čimbenika sa tolikim nepovoljnim odstupanjem. Toliko malen broj kuća s opisanim odstupanjem čimbenika je u skladu s Batesinom raspodjelom nasumičnih varijabli. U slučaju najnepovoljnijeg odstupanja dva čimbenika očekivano je da će u manjem broju slučajeva biti moguće zadržati optimalnu razinu energetske učinkovitosti prilagodbom ostalih čimbenika. Za svaki scenarij provedeno je 15 proračuna i rezultati su uspoređeni s potrošnjom energije referentnog modela.

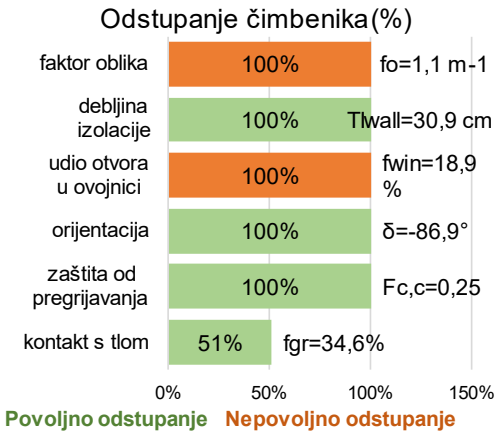
U varijanti najnepovoljnijeg odstupanja dva čimbenika, hipoteza 2 pokazala se točnom u 43 od 60 slučajeva, odnosno 72 %.

Slika 72 do Slika 75 u nastavku prikazuju korekcije godišnje potrošnje energije uslijed odstupanja dva čimbenika. Za oba klimatska područja ključni čimbenik je udio otvora u ovojnici.

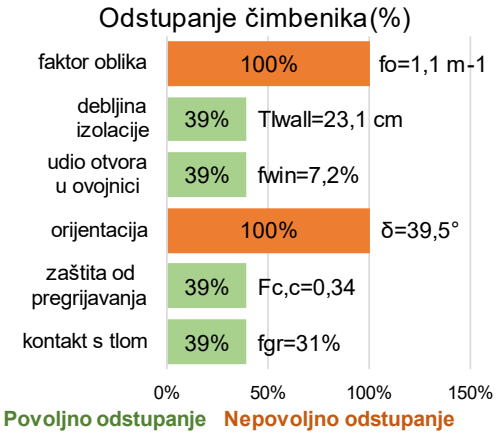
4.11.1 Kontinentalna klima



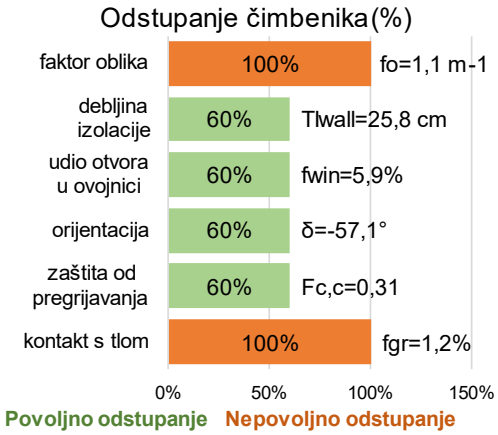
a) Faktor oblika, izolativnost ovojnice



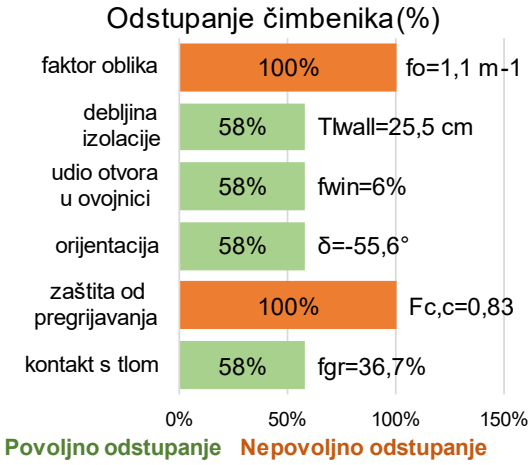
b) Faktor oblika, udio prozirnih otvora



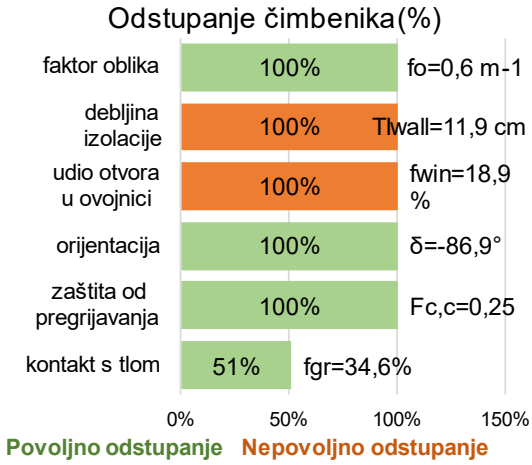
c) Faktor oblika, orijentacija



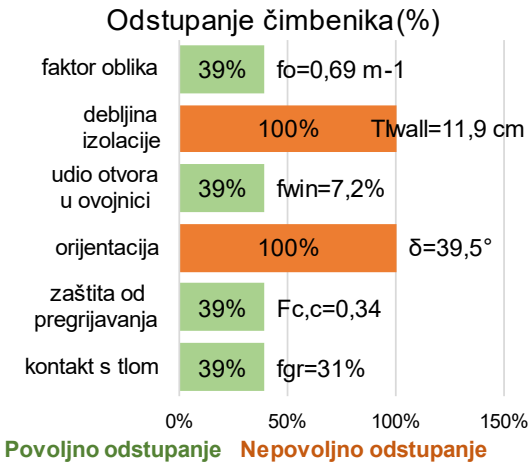
d) Faktor oblika, kontakt ovojnice s tlom



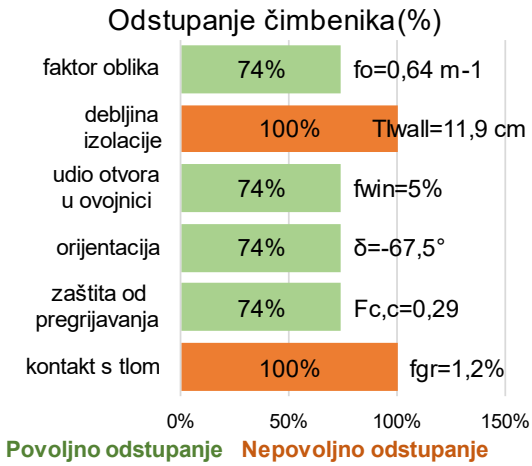
e) Faktor oblika, zaštita od pregrijavanja



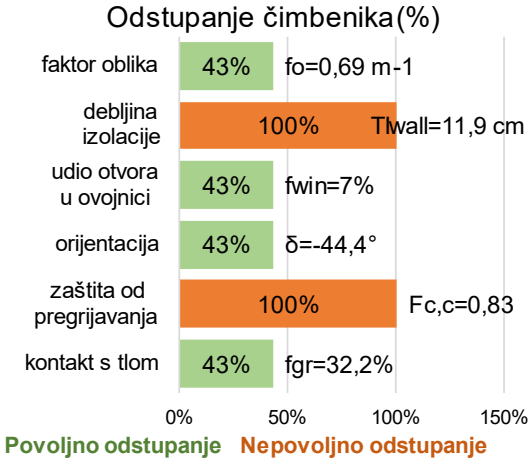
f) Izolativnost ovojnice, udio otvora



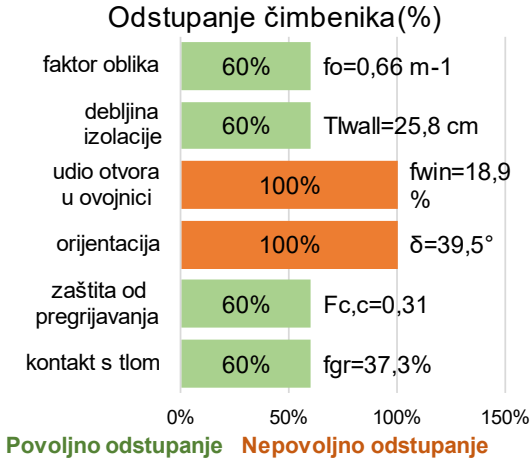
g) Izolativnost ovojnice, orijentacija



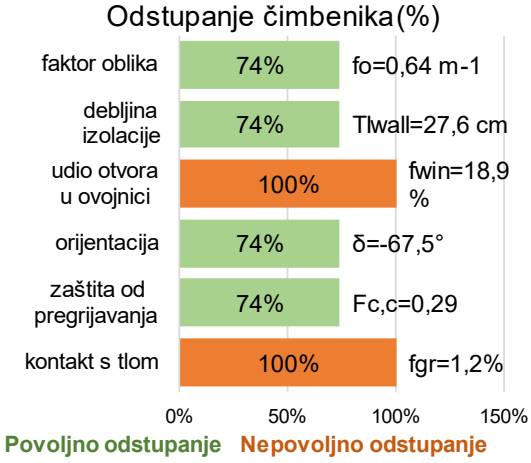
h) Izolativnost ovojnice, kontakt s tlom



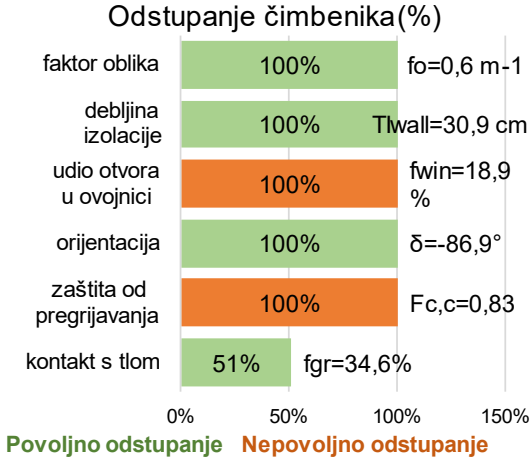
i) Izolativnost ovojnice, zaštita od pregrijavanja



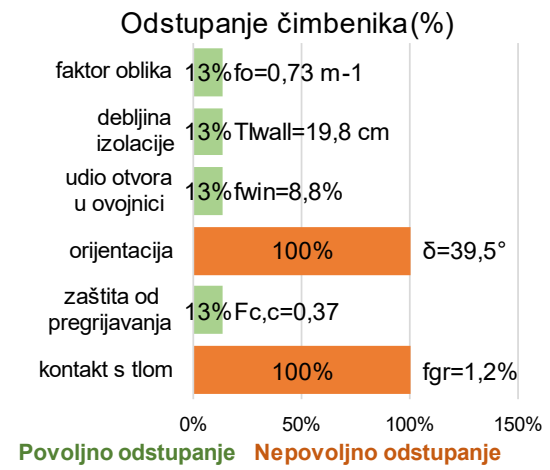
j) Udio otvora, orijentacija



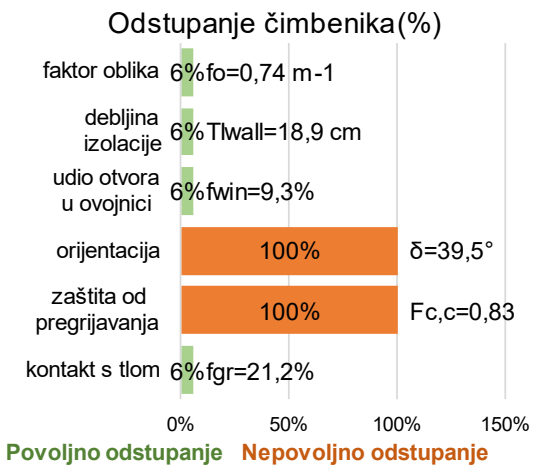
k) Udio otvora, kontakt ovojnice s tlom



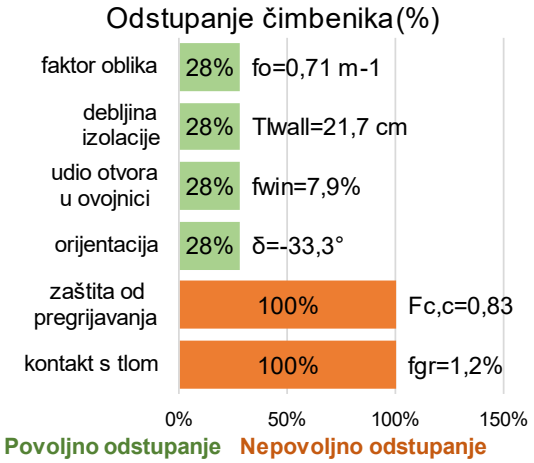
l) Udio otvora, zaštita od pregrijavanja



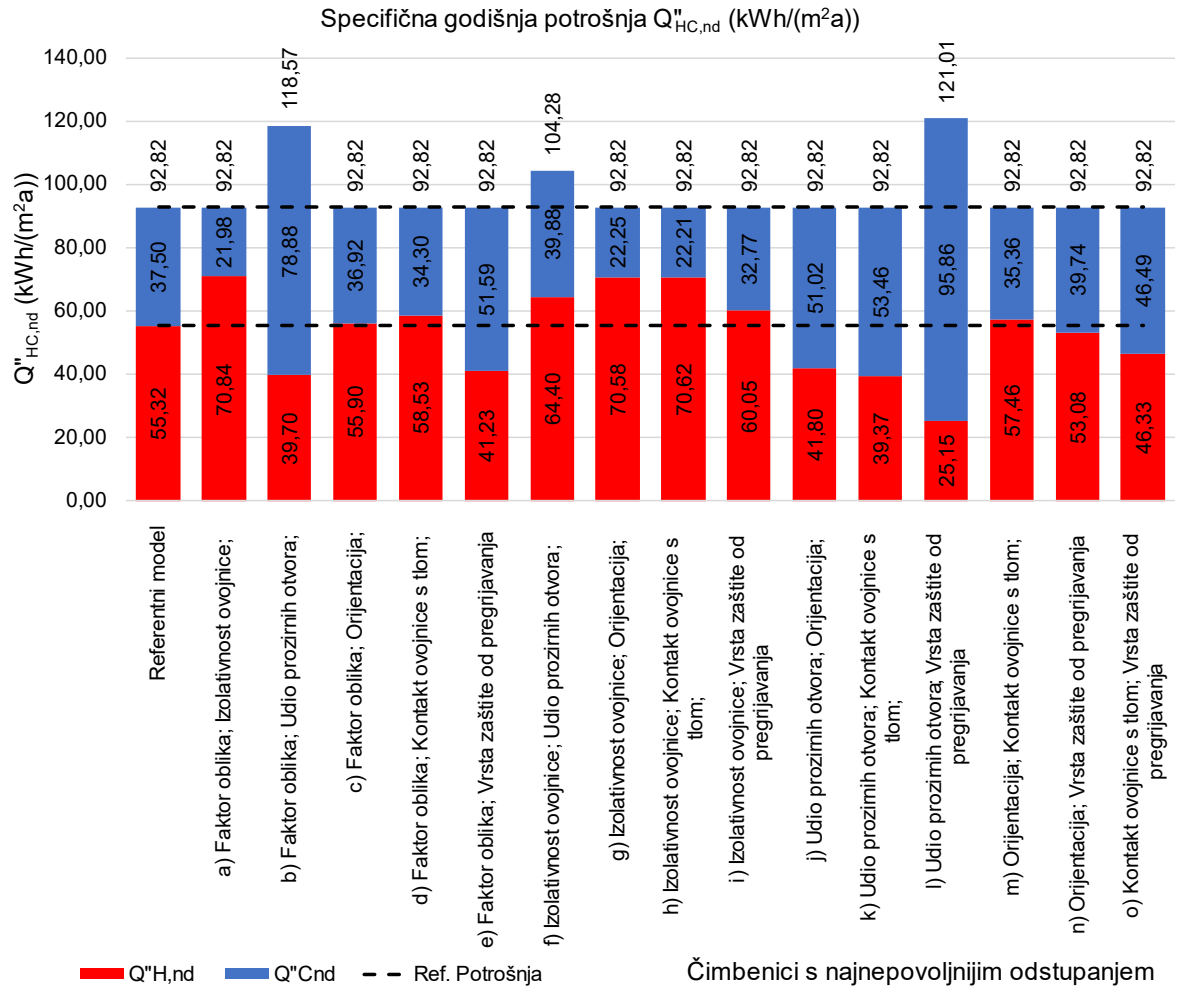
m) Orijentacija, kontakt s tlom



n) Orijentacija, zaštita od pregrijavanja



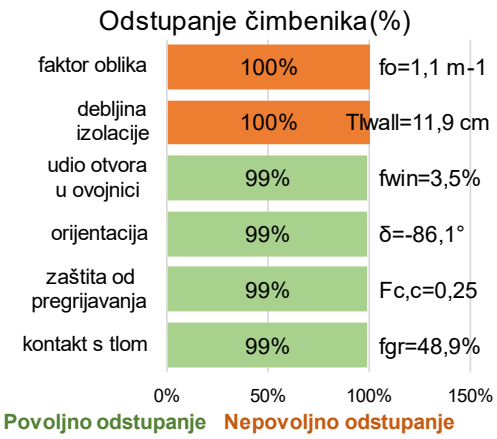
o) Zaštita od pregrijavanja, kontakt s tlom



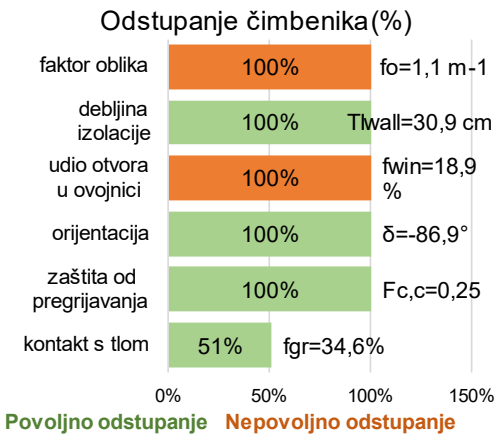
p) Korigirana potrošnja energije, varijante a) – o)

Slika 72: Korekcija potrošnje energije uslijed najnepovoljnijeg odstupanja dva čimbenika (kontinentalna klima, osnovni scenarij proračuna)

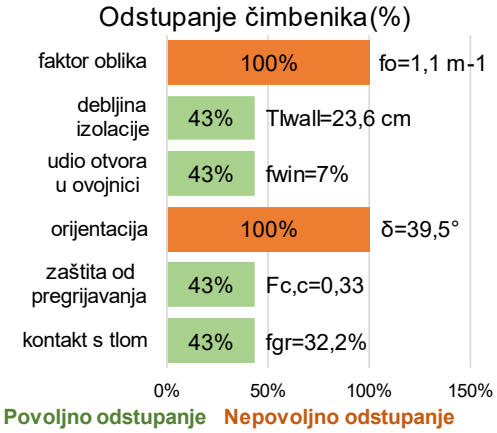
Slika 72 a) – o) prikazuje potrebno povoljno odstupanje čimbenika arhitektonskog oblikovanja (zeleno) kako bi se nadoknadio negativan utjecaj nepovoljnog odstupanja dva čimbenika (narančasto). Vrijednosti korekcija pojedinih čimbenika mogu se razlikovati uslijed geometrijskih ograničenja modela definiranog formulama u poglavlju Metodologija (primjerice, definirani udjeli konstrukcija prema tlu, otvora u ovojnici, otvora prema orijentacijama, ne mogu rezultirati ukupnim površinama većim od ovojnice ili negativne vrijednosti). Slika 72 p) prikazuje odnos energije za grijanje i hlađenje u korigiranom modelu. Za slučajeve u kojima je ukupna potrošnja energije veća od referentnog modela, utjecaj ostalih čimbenika nije dovoljan da se zadrži željena razina učinkovitosti.



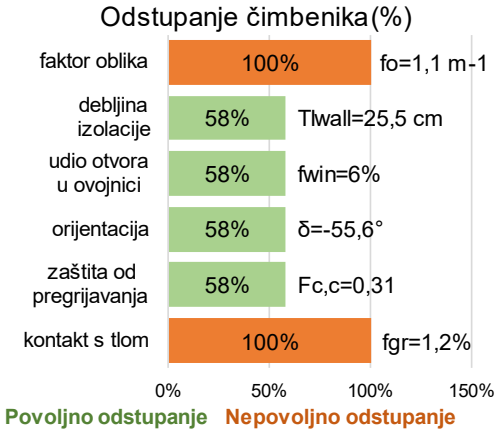
a) Faktor oblika, izolativnost ovojnice



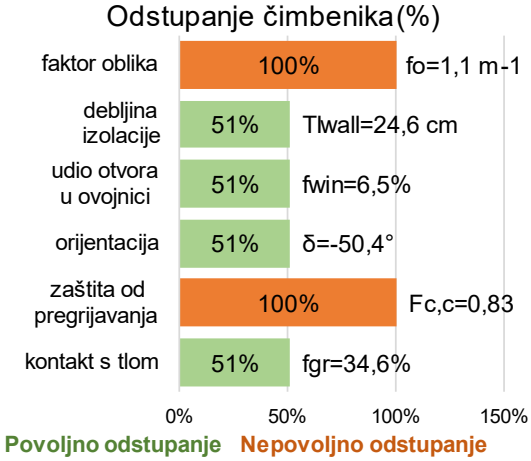
b) Faktor oblika, udio prozirnih otvora



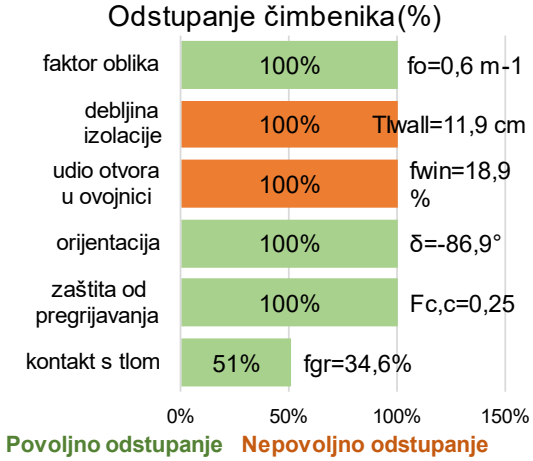
c) Faktor oblika, orijentacija



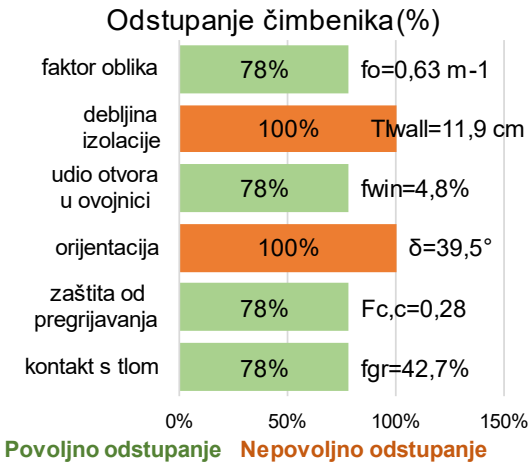
d) Faktor oblika, kontakt ovojnice s tlom



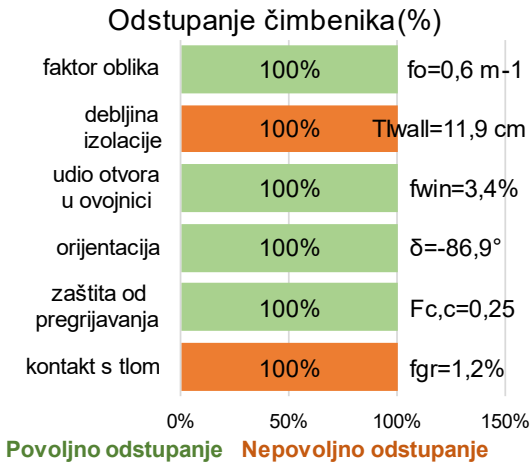
e) Faktor oblika, zaštita od pregrijavanja



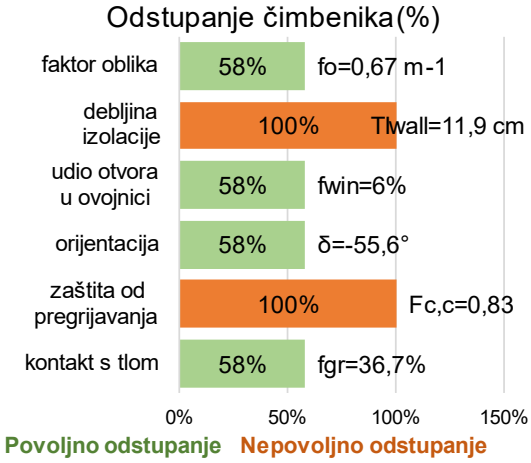
f) Izolativnost ovojnice, udio otvora



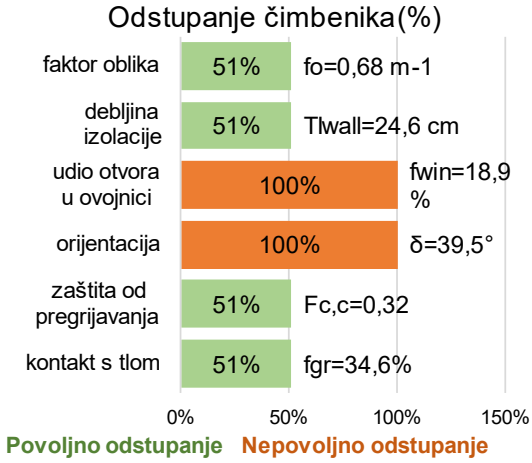
g) Izolativnost ovojnice, orijentacija



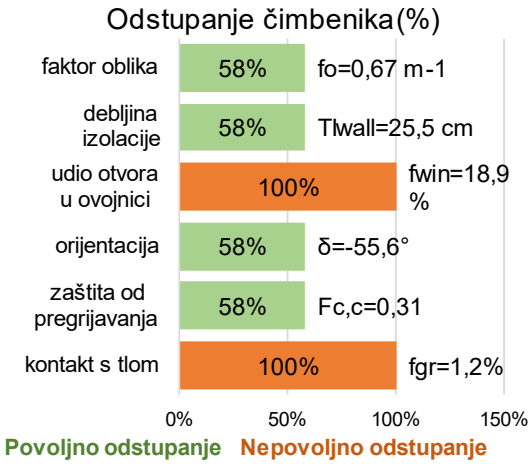
h) Izolativnost ovojnice, kontakt s tlom



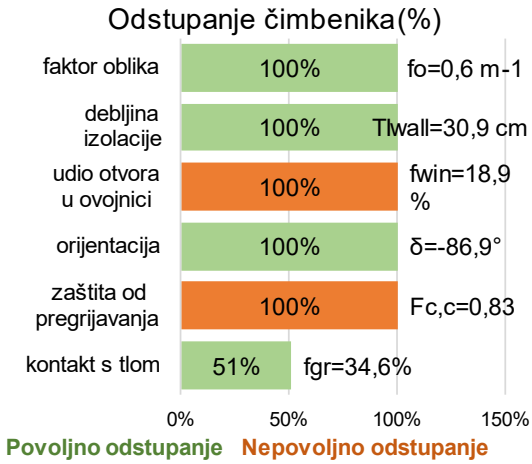
i) Izolativnost ovojnice, zaštita od pregrijavanja



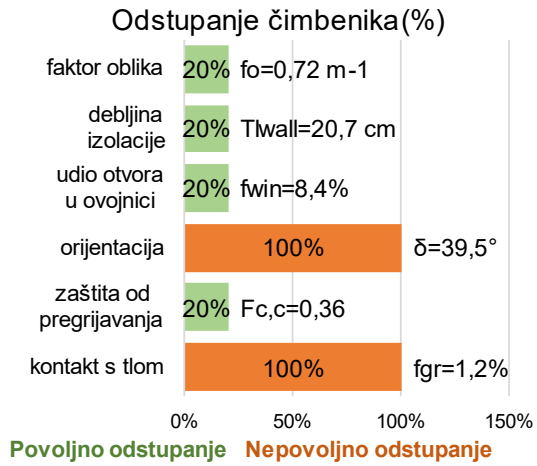
j) Udio otvora, orijentacija



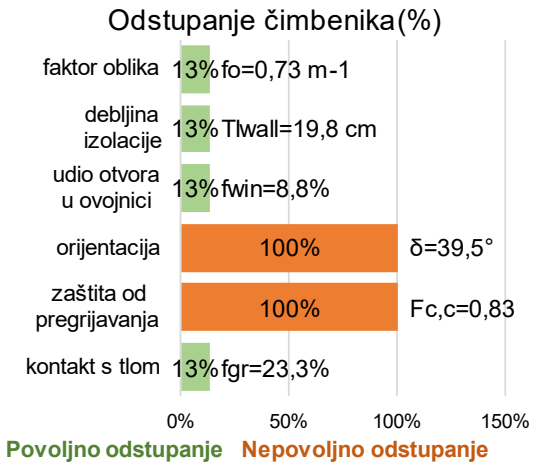
k) Udio otvora, kontakt ovojnice s tlom



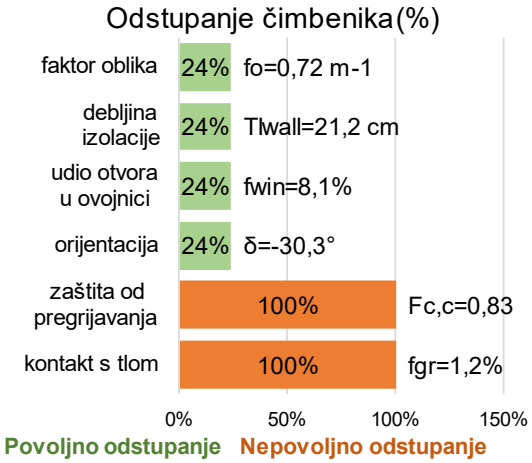
l) Udio otvora, zaštita od pregrijavanja



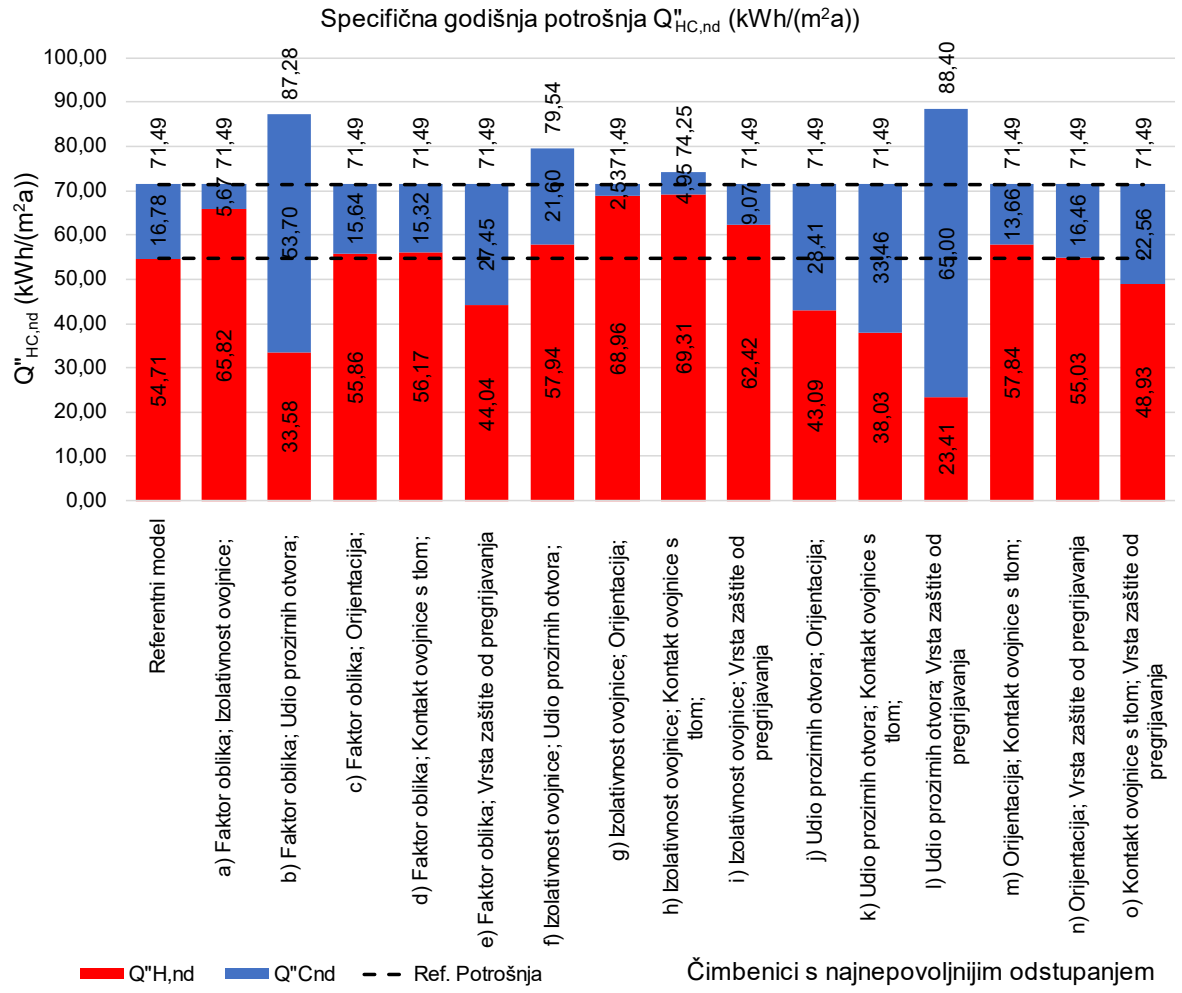
m) Orijentacija, kontakt s tlom



n) Orijentacija, zaštita od pregrijavanja



o) Zaštita od pregrijavanja, kontakt s tlom



p) Korigirana potrošnja energije, varijante a) – o)

Slika 73: Korekcija potrošnje energije uslijed najnepovoljnijeg odstupanja dva čimbenika (kontinentalna klima, varijantni scenarij proračuna)

U kontinentalnoj klimi, kombinacije nepovoljnog odstupanja dva čimbenika koje nije bilo moguće korigirati ostalim čimbenicima su:

1. Faktor oblika; Udio otvora u ovojnici;
2. Izolativnost ovojnice; Udio otvora u ovojnici;
3. Izolativnost ovojnice; Kontakt ovojnice s tlom; (samo varijantni scenarij proračuna)
4. Udio otvora u ovojnici; Vrsta zaštite od pregrijavanja;

Kod osnovnog scenarija tri su slučaja u kojima je bilo nemoguće zadržati optimalnu razinu potrošnje energije, a u varijantnom scenariju proračuna četiri slučaja. Veća odstupanja od

referentnih vrijednosti zabilježena su kod osnovnog scenarija. U nastavku su opisani samo slučajevi koji rezultiraju većom potrošnjom energije na godišnjoj razini unatoč prilagodbi ostalih čimbenika.

Kod najnepovoljnijeg odstupanja faktora oblika i udjela otvora u ovojnici, ukupna potrošnja energije veća je za 28 % kod osnovnog modela i 22 % kod varijantnog. Povećanje potrošnje energije za hlađenje je toliko da korekcija ostalih čimbenika ne uspijeva zadržati referentnu razinu potrošnje. Toliki porast energije za hlađenje može se objasniti na način da povećanjem faktora oblika dolazi do povećanja ploštine ovojnice što u kombinaciji s povećanjem udjela otvora u povećanoj ploštini ovojnice rezultira eksponencijalnim povećanjem ploštine otvora. Energija za hlađenje poveća se 110 % u osnovnom i 220 % u varijantnom scenariju.

Kombinacija najnepovoljnije izolativnosti ovojnice i najvećeg udjela otvora u ovojnici rezultira 12 % većom potrošnjom energije u osnovnom i 11 % u varijantnom scenariju proračuna. Manje debljine toplinske izolacije znače veću potrebu za grijanjem i manju potrebu za hlađenjem, dok je učinak povećanja udjela otvora u ovojnici suprotan. Prilagodbom orijentacije i faktora oblika smanjuje se potreba za grijanjem, a prilagodbom zašite od sunca energija za hlađenje. Iz tog razloga odnos godišnje energije za grijanje i hlađenje gotovo se ne mijenja.

U slučaju najnepovoljnije izolativnosti ovojnice i najmanjeg kontakta ovojnice s tlom, potrebna godišnja energija veća je za 4 % u varijantnom scenariju proračuna, dok je osnovni scenarij uspješno korigiran. Prilagodba faktora oblika i debljina toplinske izolacije oboje smanjuju potrebu za grijanjem dok prilagodba zaštite od sunca smanjuje potrebu za hlađenjem. Manja izolativnost ovojnice povećava potrebu za grijanjem, dok prilagodba ostalih čimbenika smanjuje potrebu za hlađenjem, stoga se udio hlađenja u godišnjoj bilanci smanjuje na 7 %.

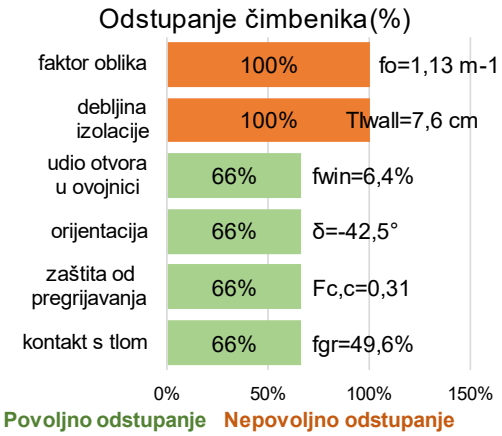
Najveći udio otvora u ovojnici i najnepovoljnija vrsta zaštite od pregrijavanja rezultiraju 30 % većom potrošnjom energije u osnovnom scenariju proračuna i 24 % u varijantnom. Oba čimbenika u svojim nepovoljnim odstupanjima povećavaju energiju za hlađenje. Prilagodba orijentacije prema jugu i povećanje debljina toplinske izolacije smanjuju energiju za grijanje, ali povećavaju energiju za hlađenje, dok manji faktor oblika dodatno smanjuje energiju za grijanje uz neznatan utjecaj na hlađenje. Ova kombinacija utjecaja daje potpuno drugačiji odnos energije za grijanje i hlađenje u odnosu na referentni model. Osnovni scenarij proračuna ima veću potrošnju energije za hlađenje u odnosu na varijantni model. Energija za grijanje u tom slučaju pada na 21 % ukupne godišnje potrošnje, a energija za hlađenje raste na 79 % što

predstavlja odnos karakterističan za primorsku klimu. U varijantnom scenariju proračuna taj omjer iznosi 74 % za hlađenje prema 26 % za grijanje.

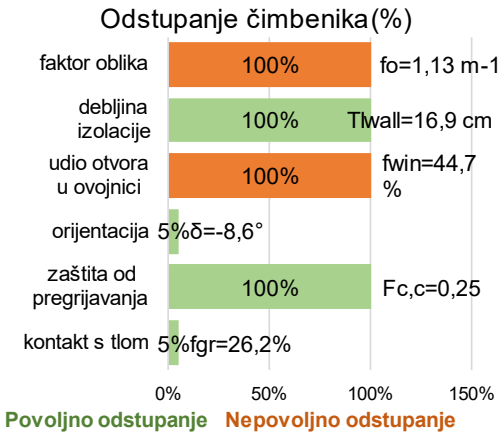
Sve ostale kombinacije dva najnepovoljnija čimbenika bilo je moguće korigirati ostalim čimbenicima na način da se zadrži referentna razina energetske učinkovitosti (Slika 72 i Slika 73), odnosno od 30 mogućih varijanti proračuna za varijante kontinentalne klime, korekcija je bila moguća za njih 23, odnosno 76 %.

Odnos godišnje energije za grijanje i hlađenje najviše je promijenjen kod najnepovoljnijeg udjela prozirnih otvora u ovojnici i neučinkovite zaštite od pregrijavanja. Udio energije za hlađenje povećao se na 79 % godišnje potrošnje što je odnos karakterističan za primorsku klimu, a godišnju potrošnju nije bilo moguće održati na referentnoj razini. Najveći udio energije za grijanje iznosi 82 % za slučaj najlošije izolativnosti ovojnice i faktora oblika.

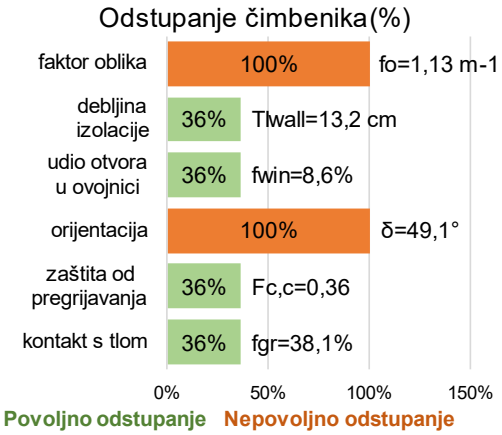
4.11.2 Primorska klima



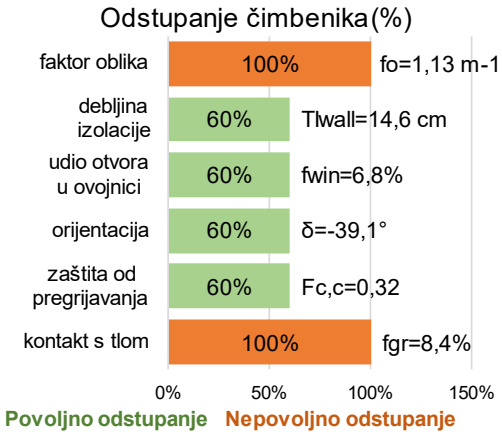
a) Faktor oblika, izolativnost ovojnice



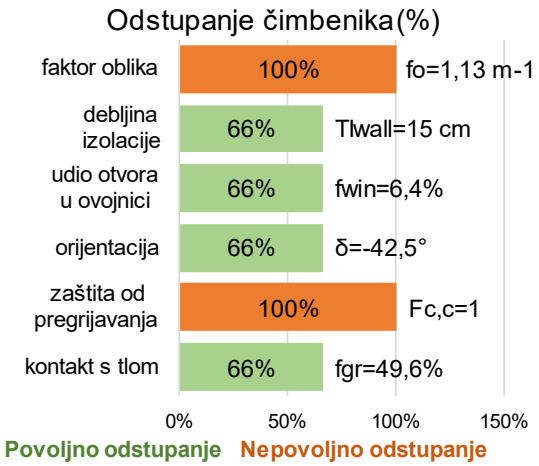
b) Faktor oblika, udio prozirnih otvora



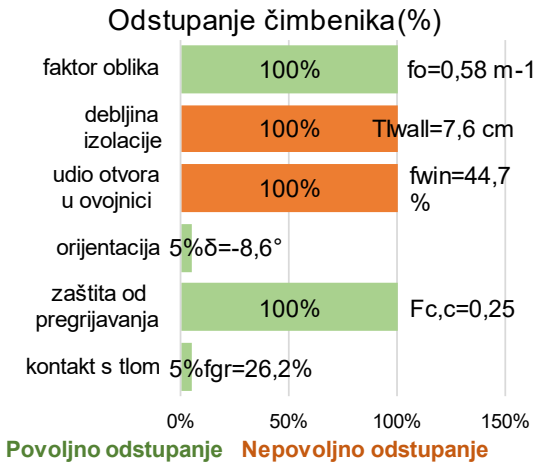
c) Faktor oblika, orijentacija



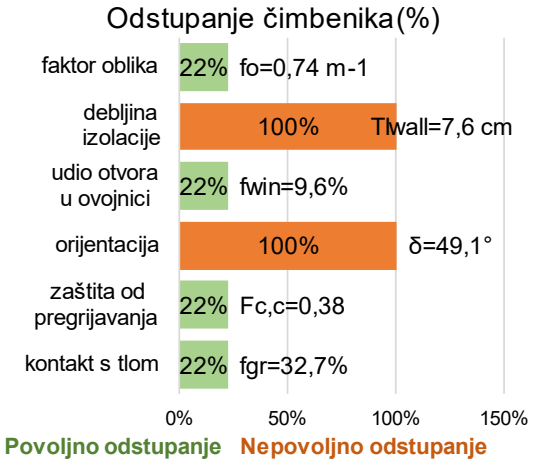
d) Faktor oblika, kontakt ovojnice s tlom



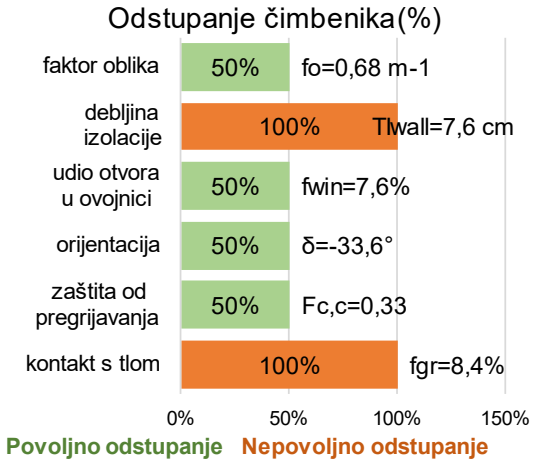
e) Faktor oblika, zaštita od pregrijavanja



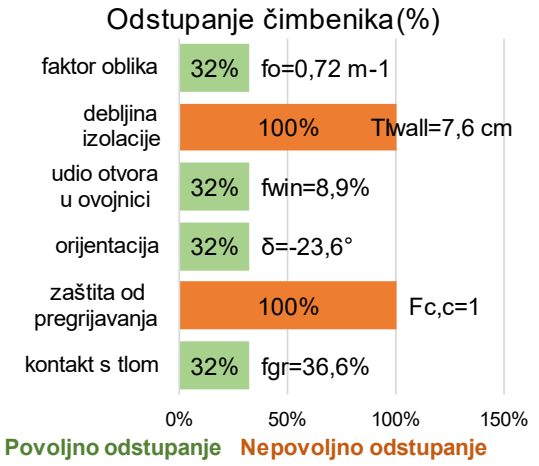
f) Izolativnost ovojnice, udio otvora



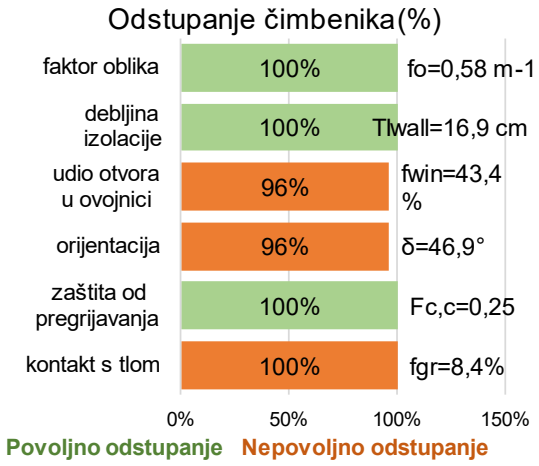
g) Izolativnost ovojnice, orijentacija



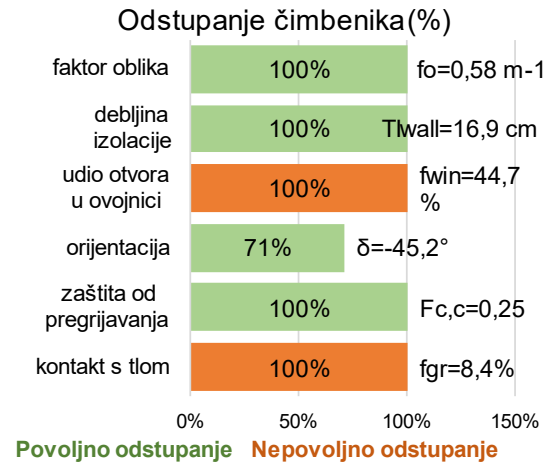
h) Izolativnost ovojnice, kontakt s tlom



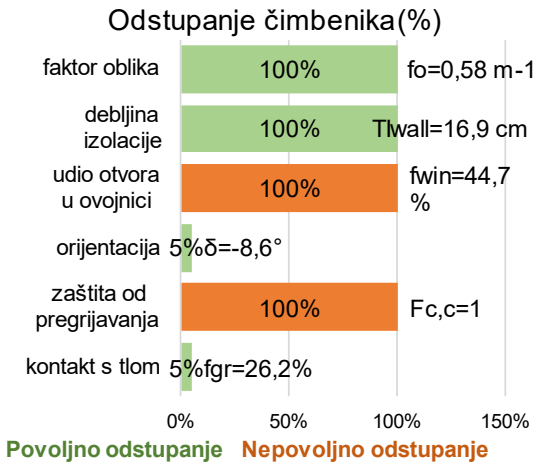
i) Izolativnost ovojnice, zaštita od pregrijavanja



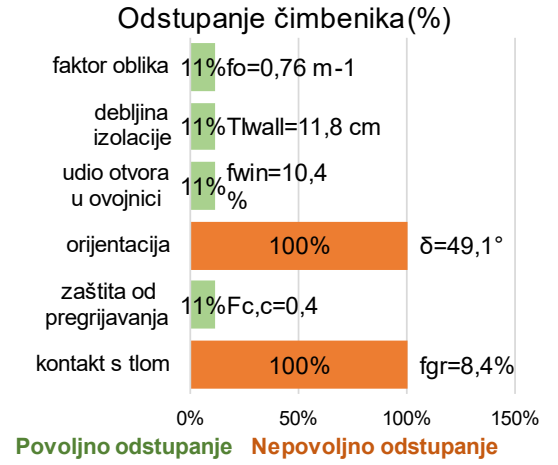
j) Udio otvora, orijentacija



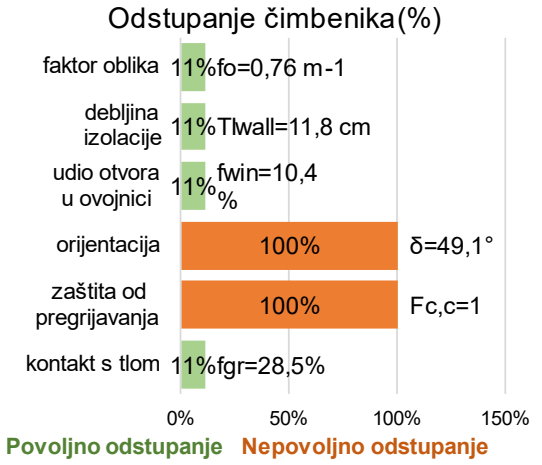
k) Udio otvora, kontakt ovojnice s tlom



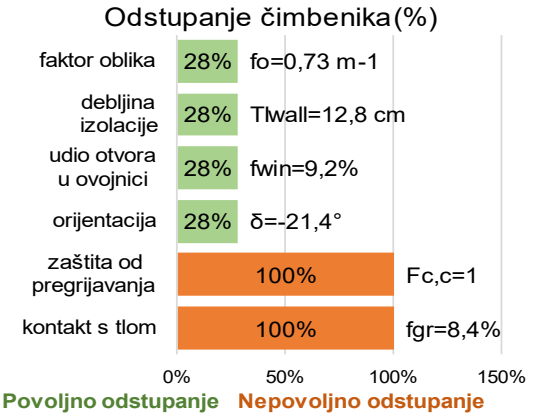
l) Udio otvora, zaštita od pregrijavanja



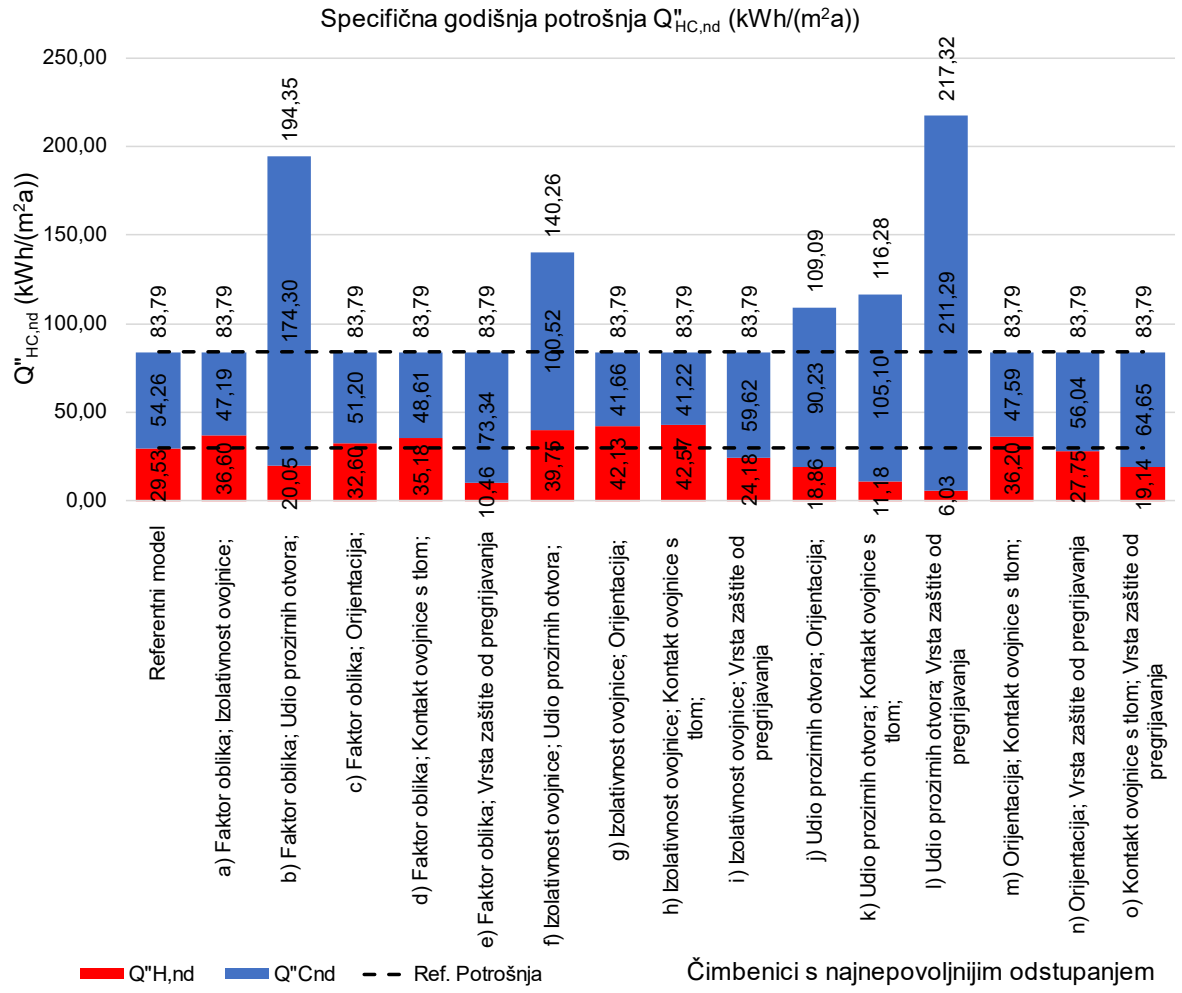
m) Orijentacija, kontakt s tlom



n) Orijentacija, zaštita od pregrijavanja



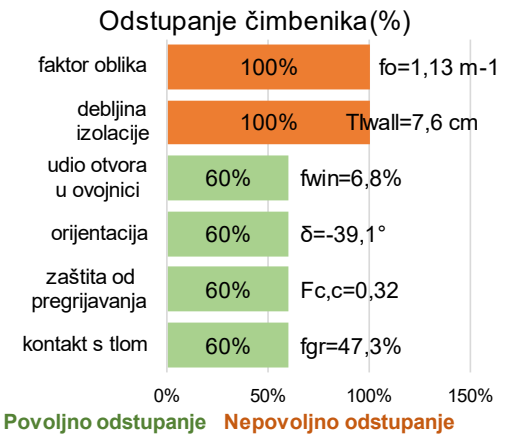
o) Zaštita od pregrijavanja, kontakt s tlom



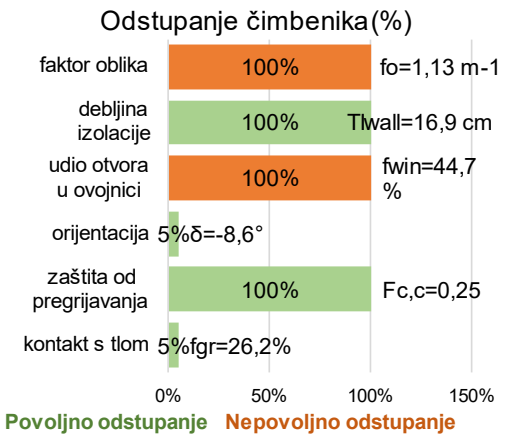
p) Korigirana potrošnja energije, varijante a) – o)

Slika 74: Korekcija potrošnje energije uslijed najnepovoljnijeg odstupanja dva čimbenika (primorska klima, osnovni scenarij proračuna)

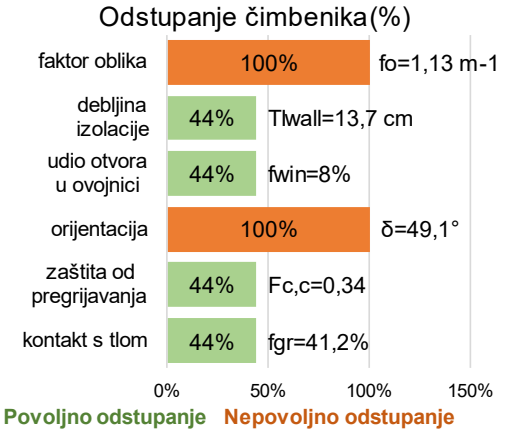
Vrijednosti korekcija pojedinih čimbenika mogu se razlikovati uslijed geometrijskih ograničenja modela definiranog formulama u poglavlju Metodologija (primjerice, definirani udjeli konstrukcija prema tlu, otvora u ovojnici, otvora prema orijentacijama, ne mogu rezultirati ukupnim ploštinama većim od ovojnice ili negativnim vrijednostima). Slika 72 p) prikazuje odnos energije za grijanje i hlađenje u korigiranom modelu. Za slučajeve u kojima je ukupna potrošnja energije veća od referentnog modela, utjecaj ostalih čimbenika nije dovoljan da se zadrži željena razina učinkovitosti.



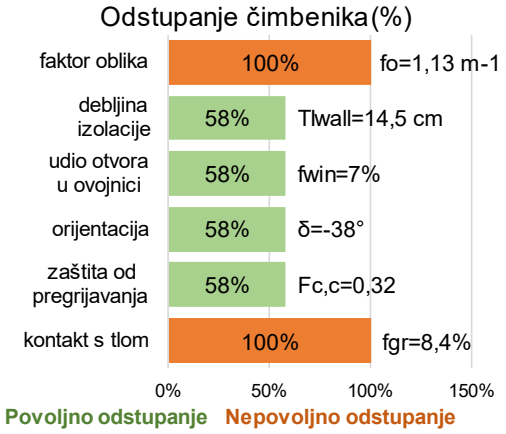
e) Faktor oblika, izolativnost ovojnice



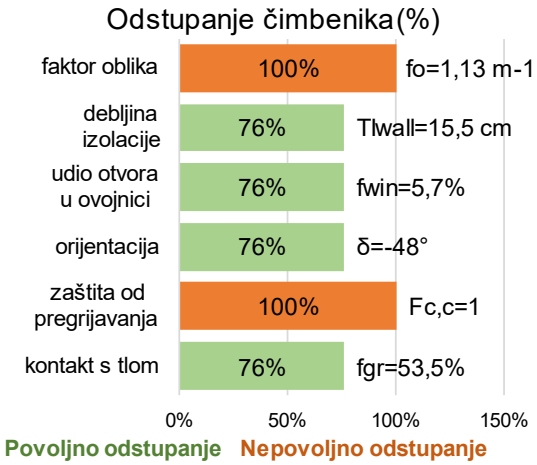
f) Faktor oblika, udio prozirnih otvora



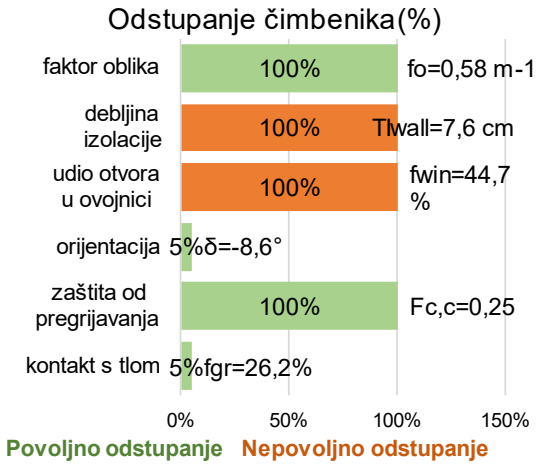
g) Faktor oblika, orijentacija



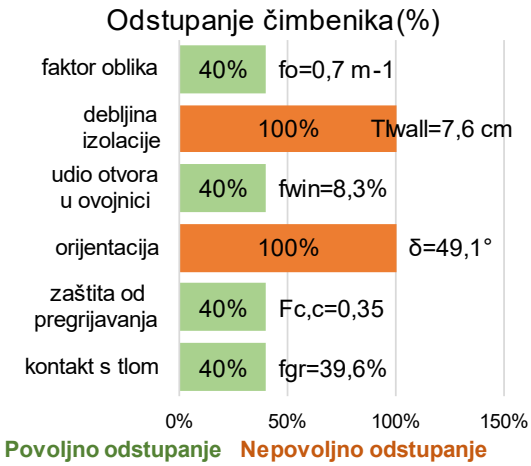
d) Faktor oblika, kontakt ovojnice s tlom



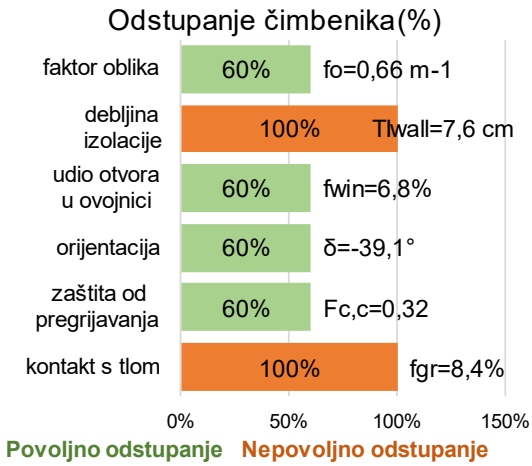
e) Faktor oblika, zaštita od pregrijavanja



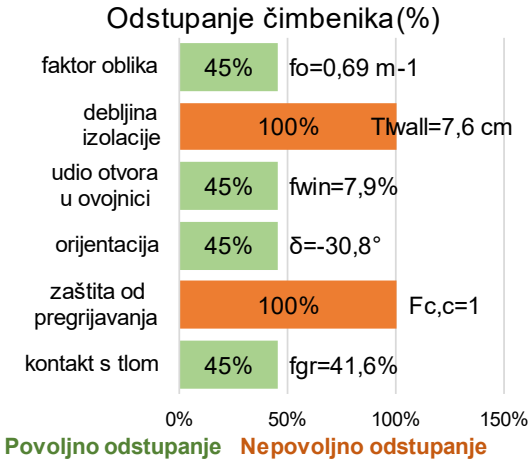
f) Izolativnost ovojnice, udio otvora



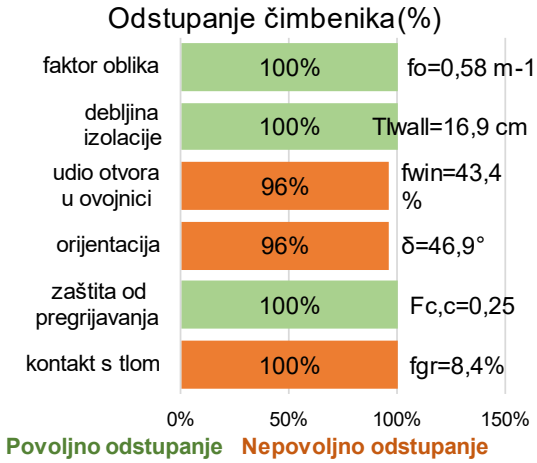
g) Izolativnost ovojnice, orijentacija



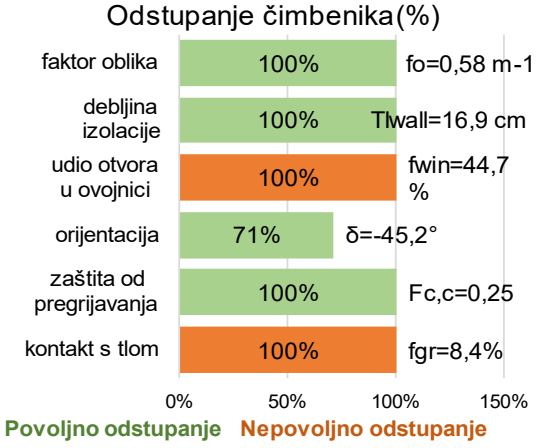
h) Izolativnost ovojnice, kontakt s tlom



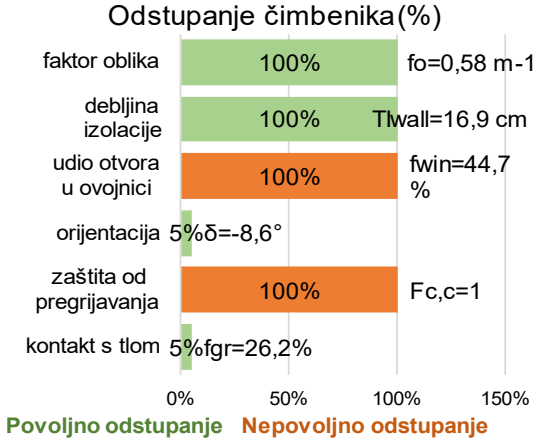
i) Izolativnost ovojnice, zaštita od pregrijavanja



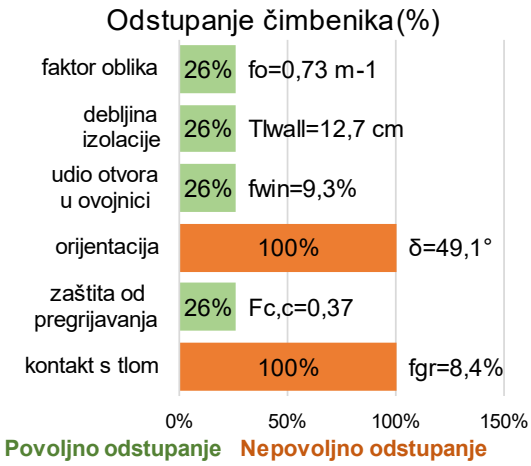
j) Udio otvora, orijentacija



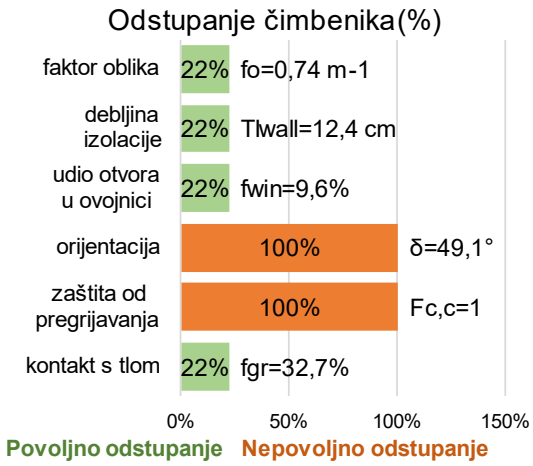
k) Udio otvora, kontakt ovojnice s tlom



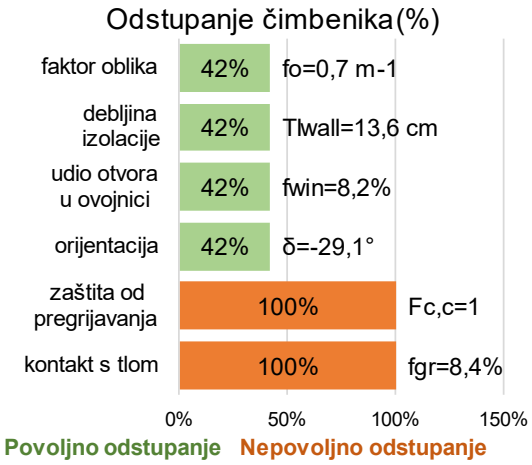
l) Udio otvora, zaštita od pregrijavanja



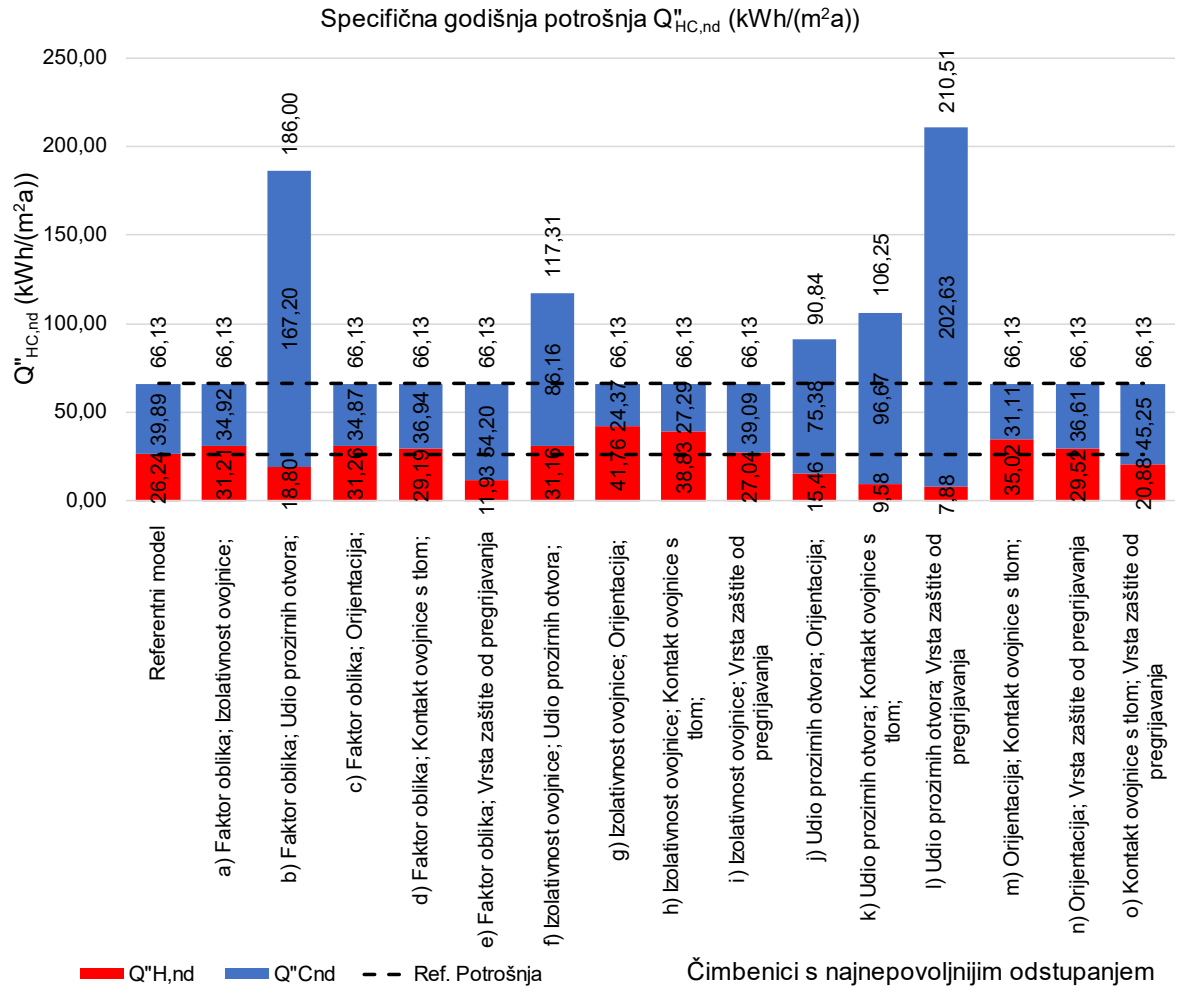
m) Orijentacija, kontakt s tlom



n) Orijentacija, zaštita od pregrijavanja



o) Zaštita od pregrijavanja, kontakt s tlom



p) Korigirana potrošnja energije, varijante a) – o)

Slika 75: Korekcija potrošnje energije uslijed najnepovoljnijeg odstupanja dva čimbenika (primorska klima, varijantni scenarij proračuna)

U primorskoj klimi, kombinacije nepovoljnog odstupanja dva čimbenika koje nije bilo moguće korigirati ostalim čimbenicima su:

1. Faktor oblika; Udio prozirnih otvora u ovojnici;
2. Izolativnost ovojnice; Udio otvora u ovojnici;
3. Udio prozirnih otvora u ovojnici; Orijentacija;
4. Udio prozirnih otvora u ovojnici; Kontakt ovojnice s tlom;
5. Udio prozirnih otvora u ovojnici; Zaštita od pregrijavanja;

Iste kombinacije čimbenika nije bilo moguće korigirati za oba načina proračuna, za osnovni i varijantni scenarij. Za slučaj primorskog klimatskog područja, udio otvora predstavlja ključni čimbenik i sve njegove kombinacije. Veća relativna odstupanja od referentnih vrijednosti zabilježena su kod korigiranih postavki proračuna. Svi prikazani slučajevi rezultiraju većom potrošnjom energije na godišnjoj razini unatoč prilagodbi ostalih čimbenika. U nastavku se analiziraju samo slučajevi u kojima nije bilo moguće zadržati referentnu potrošnju energije.

Kod najnepovoljnijeg odstupanja faktora oblika i udjela otvora u ovojnici godišnja potrebna energija osnovnog scenarija proračuna veća je za 132 %, pri čemu energija za hlađenje iznosi 90 % godišnje potrošnje. U varijantnom scenariju potrošnja je veća za 182 %, a energija za hlađenje također čini 90 % godišnje potrošnje. Za toliki porast potrebne energije za hlađenje objašnjenje je jednako kao i u slučaju kontinentalne klime. Povećanje ploštine ovojnice i povećanje udjela otvora u ovojnici rezultiraju eksponencijalnim povećanjem ploštine otvora. Prilagodba zaštite od pregrijavanja ne predstavlja veliki doprinos budući da je referentna vrijednost već zadovoljavajuća, a najbolja vrijednost je malo bolja. Također povećanje debljina toplinske izolacije smanjuje potrebu za grijanjem, ali dodatno povećava potrebu za hlađenjem.

Kombinacija najnepovoljnije izolativnosti ovojnice i najvećeg udjela otvora u ovojnici rezultira 24 % većom potrošnjom energije u osnovnom scenariju proračuna i 77 % u varijantnom scenariju pri čemu većina otpada na energiju za hlađenje. Manje debljine izolacije u ovojnici smanjuju potrebu za hlađenjem i povećavaju potrebu za grijanjem, dok povećanje otvora ima suprotan učinak. Najveći zabilježen udio otvora u primorskoj klimi iznosi 45 %, stoga solarni dobici kroz otvore na godišnjoj razini premašuju toplinske gubitke.

U slučaju najvećeg udjela otvora i najnepovoljnije orijentacije potrebna godišnja energija veća je za 30 % u osnovnom modelu i 37 % u varijantnom. Iako sjeverna orijentacija smanjuje potrebu za hlađenjem, značajan udio otvora u ovojnici čini prevagu u povećanju solarnih dobitaka i energiji za hlađenje. Prilagodba ostalih čimbenika ima malen utjecaj na energiju za hlađenje.

Kombinacija najnepovoljnijih čimbenika udjela prozirnih otvora u ovojnici i kontakta s tlom rezultiraju 38 % većom godišnjom potrošnjom u osnovnom scenariju proračuna i 60 % u varijantnom. Veći udio otvora smanjuje potrebu za grijanjem, dok manji kontakt s tlom povećava potrebu za grijanjem, ali oba čimbenika povećavaju potrebu za hlađenjem. Prilagodba

ostalih čimbenika ima manji utjecaj na potrošnju energije za hlađenje u odnosu na udio otvora što na godišnjoj razini rezultira većom potrošnjom.

U primorskoj klimi najnepovoljnija kombinacija čimbenika je velik udio otvora u ovojnici i neučinkovita zaštita od pregrijavanja. Unatoč prilagodbi ostalih čimbenika, ova kombinacija rezultira povećanjem godišnje potrošnje od 158 % u osnovnom scenariju proračuna i 218 % u varijantnom. Pri tome energija za hlađenje iznosi 97 % i 96 % godišnje bilance. U ovom slučaju ploština otvora u ovojnici poveća se za više od 4 puta, a koeficijent naprave za zaštitu od sunca lošiji je približno 2,5 puta, što rezultira s približno 10 puta većim solarnim dobicima u odnosu na referentni model. S obzirom da prilagodba ostalih čimbenika ima malen utjecaj na energiju za hlađenje, ovoliko povećanje godišnje potrošnje i energije za hlađenje je očekivano.

Preostale kombinacije dva najnepovoljnija čimbenika bilo je moguće korigirati ostalim čimbenicima tako da se zadrži referentna razina energetske učinkovitosti (Slika 75). U primorskom području, hipoteza 2 primjenjiva je na 20 od 30 slučajeva, odnosno 67 % za kombinacije nepovoljnog odstupanja dva čimbenika.

5 ZAKLJUČAK

Arhitektonsko oblikovanje jedan je od čimbenika u energetskoj učinkovitosti čiji se utjecaj istraživalo u ovom radu, i to putem analize šest čimbenika koji istovremeno predstavljaju elemente arhitektonskog oblikovanja i energetske učinkovitosti: faktor oblika, izolativnost ovojnice promatrane kroz debljinu toplinske izolacije, udio prozirnih otvora u ovojnici, orijentacija otvora, vrsta naprave za zaštitu od pregrijavanja i kontakt ovojnice s tlom. Za svaku zgradu, navedene čimbenike moguće je iskazati kao geometrijsku ili fizikalnu veličinu određene vrijednosti. Iz tog razloga bilo je moguće provesti matematičko vrednovanje pojedinog čimbenika u odnosu na energetsku učinkovitost.

Numerička analiza provedena je na proračunima iz projekata racionalne uporabe energije dobivenim ljubaznošću niza projektanata i projektantskih ureda koji se bave projektima toplinske zaštite, a koji su poslužili kao osnova za formiranje referentnog energetskog modela obiteljske kuće kontinentalne i primorske klime u Hrvatskoj. Obrađeni su proračuni za 82 obiteljske kuće iz kontinentalnog područja Hrvatske i 69 iz primorja iz razdoblja 2017. do 2025. godine čiji su numerički podaci potrebni za proračune prikazani u Prilogu 1. Obradom njihovih geometrijskih vrijednosti određeni su referentni intervali za svaki od promatranih čimbenika, a njihovi prosjeci korišteni su kao temelj za energetske referentne modele. Na taj način utvrđena je minimalna, prosječna i maksimalna numerička vrijednost za svaki od promatranih čimbenika.

Utjecaj svakog od čimbenika na potrošnju energije je poznat kao i načela energetski učinkovitog oblikovanja. Zgrade čije je oblikovanje podređeno minimiziranju potrošnje energije moraju se pridržavati tih načela. Kod zgrada čije je oblikovanje slobodnije u odnosu na načela energetske učinkovitosti, nepovoljnije su i vrijednosti promatranih čimbenika, odnosno njihove vrijednosti su nasumičnije. Rad je usredotočen na zgrade s oblikovanjem koje nije podređeno načelima energetske učinkovitosti, kako bi se provjerila mogućnost korekcije energetske učinkovitosti u slučaju navedenih odstupanja.

Nakon određivanja prosječnih vrijednosti i referentnih intervala, utvrđen je broj čimbenika koji povoljno ili nepovoljno odstupaju na svim analiziranim kućama. Prema zakonu vjerojatnosti, očekivano je da će dio njih biti povoljan, a dio nepovoljan, dok je vjerojatnost da svi čimbenici jako nepovoljno odstupaju gotovo nepostojeća. Takva raspodjela očekivanja vjerojatnosti se naziva Batesina raspodjela nasumičnih varijabli. Odstupanja čimbenika od prosjeka promatrala su se u intervalima koraka od 10 % (0,1). Rezultati analize pokazuju da 10 % kuća u

kontinentalnoj i primorskoj klimi ima barem jedan čimbenik s najnepovoljnijim odstupanjem od prosjeka u rasponu 90 % do 100 %. Udio kuća koje imaju dva takva čimbenika iznosi 4 % za kontinentalnu klimu i 1 % za primorsku. U oba klimatska područja nije zabilježena niti jedna kuća s tri čimbenika najnepovoljnijeg odstupanja. Drugim riječima, kuće s elementima oblikovanja, koji su istovremeno čimbenici energetske učinkovitost, koji vidno odstupaju od načela energetske učinkovitosti, u pravilu imaju samo jedan do dva takva čimbenika, dok su ostali čimbenici, prema zakonu vjerojatnosti, optimalni ili energetski povoljni.

Proračuna godišnje potrošnje proveden je prema Algoritmu za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade, HRN EN ISO 13790, Prilog A, Jednostavna satna metoda. Potrošnja godišnje energije za grijanje i hlađenje izračunata je s dva načina postavki i meteoroloških podataka. Prvi je osnovni scenarij koji je izračunat u potpunosti prema postavkama Algoritma i koji koristi referentne satne klimatske podatke koji predstavljaju 30-godišnji prosjek klime. Takve postavke proračuna primjenjuju se u trenutnim projektima racionalne uporabe energije i toplinske zaštite zgrade, ali koristi se jednostavnija 24-satna metoda. Budući da je korišten stvarni satni proračun koji omogućava precizno korištenje ulaznih podataka, izrađen je i drugi način, varijantni scenarij proračuna, s korigiranim ulaznim podacima. Korišteni su klimatski podaci za 10-godišnji prosjek klime, dobiveni ljubaznošću DHMZ-a, a ulazne postavke Algoritma su prilagođene u što većoj mjeri stvarnom načinu korištenja zgrada: temperatura grijanja 22 °C i hlađenja 26 °C, pasivno noćno provjetravanje ljeti i primjena dodatne zaštite od bliještanja sunca (zavjesa). Varijantni scenarij proračuna rezultira manjom potrošnjom energije, prvenstveno u hlađenju. Varijantni scenarij za kontinentalnu klimu ima 23 % manju godišnju potrošnju, a za primorje 21 % manju potrošnju.

Energije za grijanje i hlađenje vrednovane su jednako u ovom radu. Utjecaj svakog od čimbenika na energetsku učinkovitost promatra se u odnosu na ukupnu potrošnju energije za kondicioniranje prostora – zbroj energija za grijanje i hlađenje. Potrošnja energije za grijanje je dominantna u Europi u odnosu na potrošnju energije za hlađenje. Međutim, Europa se zagrijava brže od globalnog prosjeka što povećava potrebu za hlađenjem. Uspoređene su CO_2 emisije proizvodnje toplinske i rashladne energije. Učinkovitosti dizalica topline u funkciji grijanja i hlađenja su podjednake i iznose približno 4,0 za grijanje i 3,7 do 4,0 za hlađenje, što znači da će za jednaku količinu proizvedene toplinske i rashladne energije biti emitirano 34,8 do 38,1 gCO_2/kWh s obzirom na specifične emisije električne energije u Hrvatskoj u 2024. godini. U slučaju kotlova na biomasu, učinkovitost iznosi znatno niže, oko 0,85, ali budući da je riječ o

energentu s puno nižim specifičnim emisijama, za 1 kWh toplinske energije emitirano je od 40,5 do 49,8 gCO_2/kWh. Iz navedenih odnosa vidljivo je da grijanje i hlađenje rezultiraju podjednakim CO_2 emisijama.

Sljedeći dio analize obuhvatio je utjecaj pojedinog čimbenika na potrošnju energije za grijanje i hlađenje. Postojeća literatura obrađuje samo pojedine čimbenike ili malen broj njih, dok je ovim radom provedena i njihova međusobna usporedba. Za oba klimatska područja Hrvatske i za oba scenarija proračuna dobiveni su različiti rezultati koliko koji čimbenik utječe na potrošnju energije. U nastavku su prikazani čimbenici prema utjecaju na energetsku učinkovitost redoslijedom od najutjecajnijeg do onog s najmanjim utjecajem. Relativna promjena potrošnje energije (%) prikazana je negativnom vrijednošću za mogućnost smanjenja potrošnje (najpovoljnijim odstupanjem čimbenika unutar referentnog intervala) i pozitivnom vrijednosti za slučaj povećanja potrošnje (najnepovoljnijim odstupanjem čimbenika unutar referentnog intervala), te ukupnim utjecajem iskazanim kao razlikom najpovoljnijeg i najnepovoljnijeg slučaja.

Osnovni scenarij proračuna, kontinentalna klima:

1. Udio otvora, od -25 % do +38 %, ukupno 63 %
2. Faktor oblika, od -16 % do +32 %, ukupno 48 %
3. Izolativnost ovojnice, od -25 % do +19 %, ukupno 44 %
4. Kontakt s tlom, od -15 % do +8 %, ukupno 23 %
5. Zaštita od pregrijavanja, od -3 % do +13 %, ukupno 16 %
6. Orijentacija otvora, od -4 % do +1 %, ukupno 5 %

Varijantni scenarij proračuna, kontinentalna klima:

1. Izolativnost ovojnice, od -37 % do +28 %, ukupno 65 %
2. Faktor oblika, od -18 % do +34 %, ukupno 52 %
3. Udio otvora, od -10 % do +35 %, ukupno 45 %
4. Kontakt s tlom, od -19 % do +8 %, ukupno 27 %
5. Zaštita od pregrijavanja, od -3 % do +13 %, ukupno 16 %
6. Orijentacija otvora, od -8 % do +7 %, ukupno 15 %

Osnovni scenarij proračuna, primorska klima:

1. Udio otvora, od -32 % do +132 %, ukupno 164 %
2. Faktor oblika, od -23 % do +31 %, ukupno 54 %
3. Izolativnost ovojnice, od -26 % do +14 %, ukupno 40 %
4. Kontakt s tlom, od -22 % do +7 %, ukupno 29 %
5. Zaštita od pregrijavanja, od -3 % do +18 %, ukupno 21 %
6. Orijentacija otvora, od -2 % do +1 %, ukupno 3 %

Varijantni scenarij proračuna, primorska klima:

1. Udio otvora, od -20 % do +175 %, ukupno 195 %
2. Faktor oblika, od -24 % do +36 %, ukupno 60 %
3. Izolativnost ovojnice, od -26 % do +18 %, ukupno 44 %
4. Zaštita od pregrijavanja, od -8 % do +33 %, ukupno 41 %
5. Kontakt s tlom, od -25 % do +9 %, ukupno 34 %
6. Orijentacija otvora, od 0 % do +10 %, ukupno 10 %

S obzirom na referentne intervale, najutjecajniji čimbenici u kontinentalnoj klimi su se podjednako pokazali: faktor oblika, izolativnost ovojnice i udio prozirnih otvora u ovojnici. U primorskoj klimi daleko najutjecajniji čimbenik je udio otvora u ovojnici, pri čemu je potrebno uzeti u obzir da je analizom primjera najveći zabilježeni udio otvora čak 4 puta veći od prosjeka, dok toliko odstupanje nije slučaj kod ostalih čimbenika. Sljedeći najutjecajniji čimbenici za primorsku klimu su: faktor oblika, izolativnost ovojnice i zaštita od pregrijavanja.

Budući da na analiziranim kućama postoji svega jedan do dva čimbenika s najnepovoljnijim odstupanjem, u radu je istražena mogućnost korekcije narušene energetske učinkovitosti uslijed odstupanja bilo kojeg jednog ili dva čimbenika. U toj analizi ostali čimbenici korigirani su prema najpovoljnijim vrijednostima dok nije postignuta optimalna (referentna) razina godišnje potrošnje energije za grijanje i hlađenje ukoliko je to bilo moguće.

Odstupanje bilo kojeg jednog čimbenika na modelu kuće u kontinentalnoj klimi rezultiralo je ukupnom većom potrošnjom energije, ali korekcijom ostalih čimbenika unutar referentnih intervala bilo je moguće zadržati potrošnju energije na referentnoj razini. Ta mogućnost potvrđena je sve čimbenike, pa i one najutjecajnije: faktor oblika, izolativnost ovojnice i udio prozirnih otvora u ovojnici. U primorskoj klimi korekcija odstupanja jednog čimbenika ostalim

čimbenicima nije bila je moguća jedino za najnepovoljniji udio otvora u ovojnici. Najveći udio otvora veći je 4 puta od prosjeka, što rezultira do 287 % većom potrebnom energijom za hlađenje i do 175 % većom ukupnom godišnjom potrošnjom kod varijantnog scenarija proračuna.

Na isti način provjerena je mogućnost korekcije energetske učinkovitosti u slučaju odstupanja dva čimbenika. Za 6 varijabli, postoji 15 mogućih kombinacija odabira dvije varijable. U kontinentalnom području za 7 od 30 slučajeva kombinacija dvaju najnepovoljnijih čimbenika nije bila moguća korekcija energetske učinkovitosti ostalim čimbenicima, a u primorskoj klimi za 10 od 30 slučajeva. To su pretežito kombinacije najutjecajnijih čimbenika među kojima se udio otvora u ovojnici pojavljuje u gotovo svakoj kombinaciji. Kombinacija najnepovoljnijih čimbenika koji rezultiraju najvećom potrošnjom energije je jednaka za kontinentalnu i primorsku klimu. U oba slučaja je to udio otvora u ovojnici i vrsta naprave za zaštitu od pregrijavanja, odnosno kombinacija čimbenika koji najviše utječu na energiju za hlađenje. Pri ovoj kombinaciji najnepovoljnijih čimbenika, a nakon pokušaja korekcije ostalim čimbenicima, ukupna potrošnja energije veća je do 30 % u modelima kuće u kontinentalnoj klimi i do 218 % u primorskoj.

Maksimalnim odstupanjem jednog ili dva čimbenika arhitektonskog oblikovanja, i poboljšanjem ostalih, primijećena je značajna promjena odnosa energije za grijanje i hlađenje u oba klimatska područja. U kontinentalnoj klimi, energija za grijanje u prosjeku iznosi oko dvije trećine godišnje potrošnje, dok je u primorju toliki udio energije za hlađenje. Pri najvećem udjelu prozirnih otvora u ovojnici, potrebna energija za grijanje i hlađenje se izjednačuju. U slučaju minimalne izolativnosti ovojnice i sjeverne orijentacije u kontinentalnoj klimi, energija za grijanje dostiže do 97 % godišnje potrošnje dok je energija za hlađenje praktički nepostojeća. U slučaju najvećeg udjela otvora u ovojnici i neučinkovite zaštite od sunca na kontinentu, energija za grijanje pada na četvrtinu godišnje potrošnje, a primat preuzima energija za hlađenje. Kod kuća primorske klime, minimalna izolativnost ovojnice rezultira izjednačavanjem potrebe za grijanjem i hlađenjem, a pri kombinaciji sa sjevernom orijentacijom energija za grijanje može postati dominantna potrošnja s udjelom do 63 %. Premda je potrošnja energije u pojedinim kombinacijama značajno veća u odnosu na onu dozvoljenu Tehničkim propisom, provedena analiza predstavlja potencijal u smislu uloge oblikovanja u uravnoteženju omjera potrebne energije za grijanje i hlađenje.

Arhitektonsko oblikovanje potvrđeno je kao jedan od ključnih čimbenika u energetskoj učinkovitosti obiteljskih kuća. Pridržavanje ili odstupanje od načela energetski učinkovitog oblikovanja može značiti višestruku potrošnju ili uštede. Kuće koje nisu oblikovane prema načelima energetski učinkovitosti i dalje mogu zadržati optimalnu potrošnju energije prilagodbom ostalih elemenata oblikovanja. Takva mogućnost korekcije pokazala se primjenjiva za ukupno 35 od 42 slučaja u računskim modelima kontinentalne klime i 30 od 42 slučaja za primorsku klimu, odnosno ukupno 77 % slučajeva.

5.1 Izvorni znanstveni doprinos

Istraživanja u sklopu ovog rada dala su sljedeće znanstvene doprinose:

1. Dopuna poznatih kriterija energetski učinkovitog oblikovanja u smislu numeričkog vrednovanja pojedinog čimbenika oblikovanja kod obiteljskih kuća kontinentalne i primorske Hrvatske s obzirom na potrošnju energije za grijanje i hlađenje.
2. Potvrda modela istovremenog odstupanja jednog ili više čimbenika i prilagodbe ostalih, s ciljem postizanja što veće slobode arhitektonskog oblikovanja bez narušavanja energetske učinkovitosti u 77 % slučajeva.
3. Generirani su referentni energetski modeli obiteljske kuće u Hrvatskoj za razdoblje od 2017. do 2025. godine za oba klimatska područja.
4. Povećana točnost i realnost modeliranja energetskih potreba zgrade kroz varijantne scenarije proračuna i korištenje aktualnijih meteoroloških podataka.

5.2 Potencijal za daljnja istraživanja

1. Provjera maksimalnih mogućnosti utjecaja arhitektonskog oblikovanja na energetsku učinkovitost. Primjena fizički mogućih minimalnih i maksimalnih vrijednosti čimbenika oblikovanja umjesto statistički očitanih minimalnih i maksimalnih vrijednosti.
2. Vrednovanje arhitektonskog oblikovanja u energetskoj učinkovitosti kod zgrada različitih namjena. Proračun potrošnje energije s drugačijim ulaznim postavkama, primjenom prisilne ventilacije s povratom topline kao i specifične tlocrtne dispozicije i ovojnice kondicioniranog prostora rezultirati će drukčijim utjecajima pojedinih čimbenika i mogućnosti korekcija potrošnje energije.

3. Utjecaj elemenata arhitektonskog oblikovanja u odnosu na cjeloživotni ciklus zgrade kroz analizu utjelovljenog ugljika i utjecaja na operativni ugljik. Prelaskom na standard zgrada nulte emisije, fokus na potrošnji energije prelazi na emisije stakleničkih plinova ugrađenih materijala i potrošnju energije iz zgrade.
4. Optimiranje čimbenika energetske učinkovitosti u odnosu na buduće klimatske scenarije. Očekivani minimalni životni vijek zgrada je 50 godina, s tendencijom produljivanja životnog vijeka. Pojedine elemente oblikovanja biti će potrebno prilagoditi promjenama klime očekivanim u tom razdoblju.

Popis literature

[1] Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, Narodne novine, Zagreb, (2015).

[2] HRN U.J5. 600 /1987 – Tehničko pravilo i priznata tehnička pravila na koja se upućuje, HZN – Hrvatski zavod za norme, Zagreb, (1987).

[3] Tehnički propis o uštedi toplinske energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, Narodne novine, Zagreb, (2005).

[4] P. Chastas, T. Theodosiou, K. J. Kontoleon i D. Bikas, Normalising and assessing carbon emissions in the building sector: A review on the embodied CO2 emissions of residential buildings, *Building and Environment,* svez. 130, pp. 212-226, (2018). https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.019

[5] Decarbonising Heating and Cooling—A Climate Imperative, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark, (2023).

[6] K. Ratajczak, K. Michalak, K. Narojczyk i Ł. Amanowicz, Real domestic hot water consumption in residential buildings and its impact on buildings' energy performance—Case study in Poland, *Energies,* svez. 14, br. 16, p. 5010, (2021). https://doi.org/10.3390/en14165010

[7] M. T. Bekele i C. Atakara, Residential building energy conservation in mediterranean climate zone by integrating passive solar and energy efficiency design strategies, *Buildings,* svez. 13, br. 4, p. 1073, (2023). https://doi.org/10.3390/buildings13041073

[8] Criteria for Buildings: Passive House – EnerPHit – PHI Low Energy Building, Passive House Institute, Darmstadt, (2023).

[9] M. Mihai, V. Tanasiev, C. Dinca, A. Badea i R. Vidu, Passive house analysis in terms of energy performance, *Energy and Buildings,* svez. 144, pp. 74-86, (2017). https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.062

[10] J. Schnieders, T. Eian, M. Filippi, J. Florez, B. Kaufmann, S. Pallantzas i S. Yeh, Design and realisation of the Passive House concept in different climate zones, *Energy Efficiency,* svez. 13, br. 8, p. 1561-1604, (2020). https://doi.org/10.1007/s12053-020-09800-7

[11] L. V. Karaseva, Sun protection of buildings: stages and perspectives of development, *Materials Science Forum,* svez. 931, pp. 759-764, (2018). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.759

[12] Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency, Official Journal of the European Union, Brussels, (2018).

[13] J. Kurnitski, Cost optimal and nearly zero-energy buildings (nZEB): definitions, calculation principles and case studies, Berlin: Springer Science & Business Media, (2013).

[14] J. Li, W. Xu, P. Cui, B. Qiao, S. Wu i C. Zhao, Research on a systematical design method for nearly zero-energy buildings, *Sustainability,* svez. 11, br. 24, p. 7032, (2019). https://doi.org/10.3390/su11247032

[15] Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) (EU/2024/1275), European Union, Brussels, (2024).

[16] V. Venkatraj, M. K. Dixit, W. Yan i S. Lavy, Evaluating the impact of operating energy reduction measures on embodied energy, *Energy and Buildings,* svez. 226, p. 110340, (2020). https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110340

[17] I. Staffell, D. Brett, N. Brandon i A. Hawkes, A review of domestic heat pumps, *Energy & Environmental Science,* svez. 5, br. 11, pp. 9291-9306, (2012). https://doi.org/10.1039/C2EE22653G

[18] H. Willem, Y. Lin i A. Lekov, Review of Energy Efficiency and System Performance of Residential Heat Pump Water Heaters, *Energy and Buildings,* (2017). https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.023

[19] A. Priarone, F. Silenzi i M. Fossa, Modelling Heat Pumps with Variable EER and COP in EnergyPlus: A Case Study Applied to Ground Source and Heat Recovery Heat Pump Systems, *Energies (MDPI),* svez. 13, (2020). https://doi.org/10.3390/en13040794

[20] P. Carroll, M. Chesser i P. Lyons, Air Source Heat Pumps field studies: A systematic literature review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* svez. 134, (2020). https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110275

[21] Z. Wang, M. B. Luther, M. Amirkhani, C. Liu i P. Horan, State of the Art on Heat Pumps for Residential Buildings, *Buildings (MDPI),* svez. 11, (2021). https://doi.org/10.3390/buildings11080350

[22] D. D'Agostino, D. Parker, I. Epifani, D. Crawley i L. Lawrie, How will future climate impact the design and performance of nearly zero energy buildings (NZEBs)?, *Energy,* svez. 240, p. 122479, (2022). https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122479

[23] V. Loftness, B. Hakkinen, O. Adan i A. Nevalainen, Elements that contribute to healthy building design, *Environmental Health Perspectives,* svez. 115, br. 6, pp. 965-970, (2007).

[24] E. Attaianese i G. Duca, Human factors and ergonomic principles in building design for life and work activities: an applied methodology, *Theoretical Issues in Ergonomics Science,* svez. 13, br. 2, pp. 187-202, (2012).

[25] A. Coburn, O. Vartanian, Y. N. Kenett, M. Nadal, F. Hartung, G. Hayn-Leichsenring i A. Chatterjee, Psychological and neural responses to architectural interiors, *Cortex,* svez. 126, pp. 217-241, (2020). https://doi.org/10.1016/j.cortex.2020.01.004

[26] R. G. Hershberger, A study of meaning and architecture, London: Routledge, (2021), pp. 86-100.

[27] J. L. Higuera-Trujillo, C. Llinares i E. Macagno, The cognitive-emotional design and study of architectural space: A scoping review of neuroarchitecture and its precursor approaches, *Sensors,* svez. 21, br. 6, p. 2193, (2021). https://doi.org/10.3390/s21062193

[28] R. Pacheco, J. Ordóñez i G. Martínez, Energy efficient design of building: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* svez. 16, br. 6, p. 3559-3573, (2012). https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.045

[29] H. Omrany i A. K. Marsono, Optimization of building energy performance through passive design strategies, *Current Journal of Applied Science and Technology,* pp. 1-16, (2016).

[30] R. Fallahtafti i M. Mahdavinejad, Optimisation of building shape and orientation for better energy efficient architecture, *International Journal of Energy Sector Management,* svez. 9, br. 4, p. 593-618, (2015). https://doi.org/10.1108/IJESM-09-2014-0001

[31] V. Granadeiro, J. Duarte i P. Palensky, Building envelope shape design using a shape grammar-based parametric design system integrating energy simulation, (2011)Newtown, https://doi.org/10.1109/AFRCON.2011.6072140

[32] D. Bozsaky, The historical development of thermal insulation materials, *Periodica Polytechnica Architecture,* svez. 41, br. 2, pp. 49-56, (2010).

[33] A. Yildiz, G. Gurlek, M. Erkek i N. Ozbalta, Economical and environmental analyses of thermal insulation thickness in buildings, *Journal of Thermal Science and Technology,* svez. 28, br. 2, pp. 25-34, (2008).

[34] M. S. Al-Homoud, The effectiveness of thermal insulation in different types of buildings in hot climates, *Journal of Thermal Envelope and Building Science,* svez. 27, br. 3, pp. 235-247, (2004).

[35] E. Yaşa i V. Ok, Evaluation of the effects of courtyard building shapes on solar heat gains and energy efficiency according to different climatic regions, *Energy and Buildings,* svez. 73, p. 192-199, (2014). https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.042

[36] J. Morrissey, T. Moore i R. Horne, Affordable passive solar design in a temperate climate: An experiment in residential building orientation, *Renewable Energy,* svez. 36, br. 2, pp. 568-577, (2011). https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.08.013

[37] A. Capozzoli i V. Corrado, Impacts of architectural design choices on building energy performance: Applications of uncertainty and sensitivity techniques, Glasgow: IBPSA, p. 1000-1007.

[38] M. Gerçek i I. Güçü, The impacts of window to wall ratio and window orientation on building energy consumption and CO2 emissions under climate change, *International Journal of Global Warming,* svez. 18, br. 3-4, p. 269-286, (2019). https://doi.org/10.1504/IJGW.2019.101087

[39] Z. Veršić, I. Muraj i M. Binički, Nearly Zero-Energy Buildings in Croatia: Comparison of Thermal Performance in Different Climatic Regions, *Engineering Power: Bulletin of the Croatian Academy of Engineering,* svez. 13, br. 4, p. 16-23, (2018).

[40] I. Capeluto, Energy performance of the self-shading building envelope, *Energy and Buildings,* svez. 35, br. 3, p. 327-336, (2003). https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00105-6

[41] S. Chia, H. Ahmad i D. Ossen, The effect of geometric shape and building orientation on minimising solar insolation on high-rise buildings in hot humid climate, *Journal of Construction in Developing Countries,* svez. 12, br. 1, p. 27-38, (2007).

[42] M. Rana, M. Hasan i M. Sobuz, An investigation on the impact of shading devices on energy consumption of commercial buildings in the contexts of subtropical climate,

Smart and Sustainable Built Environment, svez. 11, br. 3, p. 661-691, (2022). https://doi.org/10.1108/SASBE-09-2020-0131

[43] C. Pérez-Carramiñana, Á. González-Avilés, N. Castilla i A. Galiano-Garrigós, Influence of Sun Shading Devices on Energy Efficiency, Thermal Comfort and Lighting Comfort in a Warm Semi-Arid Dry Mediterranean Climate, *Buildings,* svez. 14, br. 2, p. 556, (2024). https://doi.org/10.3390/buildings14020556

[44] J. Yao, An investigation into the impact of movable solar shades on energy, indoor thermal and visual comfort improvements, *Energy and Buildings,* svez. 71, p. 24-32, (2014). https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.09.011

[45] C. Chandrasekaran, K. Sasidhar i A. Madhumathi, Energy-efficient retrofitting with exterior shading device in hot and humid climate—Case studies from fully glazed multi-storied office buildings in Chennai, India, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering,* svez. 22, p. 2209-2223, (2022). https://doi.org/10.1080/13467581.2022.2145208

[46] K. Minichreiter, The architecture of Early and Middle Neolithic settlements of the Starčevo culture in Northern Croatia, *Documenta Praehistorica,* svez. 28, p. 199-214, (2001). https://doi.org/10.4312/dp.28.11

[47] E. Okba, Building envelope design as a passive cooling technique, (2005)u *Proceedings of the 1st International Conference Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment (PALENC 2005)*, Santorini,

[48] F. Mazarrón, J. Cid-Falceto i I. Cañas, Ground thermal inertia for energy efficient building design: A case study on food industry, *Energies,* svez. 5, br. 2, p. 227-242, (2012). https://doi.org/10.3390/en5020227

[49] C. Baglivo i P. Congedo, Optimization of high efficiency slab-on-ground floor by multi-objective analysis for zero energy buildings in Mediterranean climate, *Journal of Building Engineering,* svez. 24, p. 100733, (2019). https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100733

[50] G. J. van Oldenborgh, S. Drijfhout, A. van Ulden, R. Haarsma, A. Sterl, C. Severijns, W. Hazeleger i H. Dijkstra, Western Europe is warming much faster than expected, *Climate of the Past,* svez. 5, (2009). https://doi.org/10.5194/cp-5-1-2009

[51] R. Twardosz, A. Walanus i I. Guzik, Warming in Europe: Recent Trends in Annual and Seasonal Temperatures, *Pure and Applied Geophysics,* svez. 178, (2021). https://doi.org/10.1007/s00024-021-02860-6

[52] L. A. Espinosa, M. M. Portela, J. P. Matos i S. Gharbia, Climate Change Trends in a European Coastal Metropolitan Area: Rainfall, Temperature, and Extreme Events (1864–2021), *Atmosphere,* svez. 13, br. 12, (2022). https://doi.org/10.3390/atmos13121995

[53] G. Auld, G. C. Hegerl i I. Papastathopoulos, Changes in the distribution of observed annual maximum temperatures in Europe, *Advances in Statistical Climatology, Meteorology and Oceanography,* svez. 9, br. 1, (2023). https://doi.org/10.5194/ascmo-9-45-2023

[54] A. Audenaert, K. Briffaerts i L. Engels, Practical versus theoretical domestic energy consumption for space heating, *Energy Policy,* svez. 39, br. 9, pp. 5219-5227, (2011). https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.021

[55] J. Vávra, V. Peters, M. Lapka, T. Craig i E. Cudlínová, What shapes the temperatures of living rooms in three European regions?, *Sociální studia/Social Studies,* svez. 12, br. 3, pp. 135-158, (2015).

[56] G. Bekö, V. Földváry, S. Langer i K. Arrhenius, Indoor air quality in a multifamily apartment building before and after energy renovation, (2016)u *5th International Conference on Human-Environment System*, Nagoya,

[57] A. Mazhar, Y. Zou, C. Zeng, Y. Shen i S. Liu, An algorithm to assess the heating strategy of buildings in cold climates: a case study of Germany, *International Journal of Low-Carbon Technologies,* svez. 17, pp. 662-677, (2022). https://doi.org/10.1093/ijlct/ctac032

[58] M. Pullinger, N. Berliner, N. Goddard i D. Shipworth, Domestic heating behaviour and room temperatures: Empirical evidence from Scottish homes, *Energy and Buildings,* svez. 254, p. 111509, (2022). https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111509

[59] P. Szałański, P. Kowalski, W. Cepiński i P. Kęskiewicz, The Effect of Lowering Indoor Air Temperature on the Reduction in Energy Consumption and CO_2 Emission in Multifamily Buildings in Poland, *Sustainability,* svez. 15, br. 15, p. 12097, (2023). https://doi.org/10.3390/su151512097

[60] B. Milovanović, Rezultati mjerenja potrošnje energije i kvalitete zraka u energetski obnovljenim višestambenim zgradama, Zagreb: Hrvatska komora inženjera građevinarstva, (2023), pp. 1-26.

[61] S. Firląg, A. Baig i D. Koc, Historical Analysis of Real Energy Consumption and Indoor Conditions in Single-Family Passive Building, *Sustainability,* svez. 17, br. 2, pp. 1-35, (2025). https://doi.org/10.3390/su17010001

[62] HRN EN 12831-3:2020 Energijska svojstva zgrada — Metoda proračuna projektnog toplinskog opterećenja — 3. dio, Hrvatski zavod za norme (HZN), Zagreb, (2020).

[63] HRN EN ISO 7730:2008 Ergonomija toplinskog okoliša — Analitičko utvrđivanje i tumačenje toplinske udobnosti uporabom izračuna PMV i PPD indeksa i lokalnih toplinskih kriterija udobnosti, Hrvatski zavod za norme (HZN), Zagreb, (2008).

[64] HRN EN 15251:2008 Ulazni mikroklimatski parametri za projektiranje i ocjenjivanje energijskih značajka zgrada koji se odnose na kvalitetu zraka, toplinsku lagodnost, osvjetljenje i akustiku, Hrvatski zavod za norme (HZN), Zagreb, (2008).

[65] R. Hrvatska, Smjernice za uštedu energije u Republici Hrvatskoj, Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, Zagreb, (2022).

[66] Metodologija za identifikaciju i kartiranje urbanih toplinskih otoka, Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine, Zagreb, (2024).

[67] C.-A. Roulet, J. van der Maas i F. Flourentzos, A Planning Tool for Passive Cooling of Buildings, (1996)u *Indoor Air '96, Nagoya, Japan*, Nagoya,

[68] M. Santamouris and D. Kolokotsa, Passive Cooling Dissipation Techniques for Buildings and Other Structures: The State of the Art, (2007)in *Proceedings of the Passive and Low Energy Architecture (PLEA) Conference*, Geneva,

[69] M. M. Rahman, M. Mashud, M. S. b. Misaran, M. Sarker i S. Kumaresen, A passive cooling system of residential and commercial buildings in summer or hot season, *Applied Mechanics and Materials,* (2014). https://doi.org/10.1088/1757-899X/100/1/012031

[70] Passive Night Cooling Potential in Office Buildings in Continental and Mediterranean Climate Zone in Croatia, *Buildings,* svez. 12, br. 8, p. 1207, (2022). https://doi.org/10.3390/buildings12081207

[71] The effects of passive design on indoor thermal comfort and energy savings for residential buildings in hot climates: A systematic review, *Urban Climate,* svez. 49, p. 101466, (2023). https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101466

[72] Z. Veršić, M. Binički, S. Ostojić, G. Tropčić Zekan i D. Rendulić, Smjernice za zgrade gotovo nulte energije – 2. dio, Ministarstvo graditeljstva i prostornoga uređenja, Zagreb, (2019).

[73] Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790, Ministarstvo graditeljstva i prostornoga uređenja, Zagreb, (2017).

[74] Shade trees reduce building energy use and CO2 emissions from power plants, *Environmental Pollution,* svez. 116, p. S119-S126, (2002). https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00255-6

[75] Le Corbusier, Towards a New Architecture, F. Etchells, prev. New York: Dover Publications, inc., (1986. izvorno djelo objavljeno 1923.).

[76] G. Leuthäuser, Architecture in the twentieth century (Vol. 1), Cologne: Taschen, (2001).

[77] K. Frampton, Kritička povijest moderne arhitekture, Zagreb: Globus, (1992).

[78] K. Frampton, Studies in tectonic culture: The poetics of construction in nineteenth and twentieth century architecture, Cambridge: MIT Press, (2001).

[79] U. Schneider, M. Speidl i H. Sakamao, Toyo Ito: Blurring Architecture 1971-2005 – Rethinking the Relationship Between Architecture and the Media, Milan: Edizioni Charta Srl, (1999).

[80] K. Kuma, Anti-Object: The Dissolution and Disintegration of Architecture, svez. 2, London: AA Publishing, (2008).

[81] T. Andō, Tadao Ando: Conversations with Students, New York: Princeton Architectural Press, (2012).

[82] S. Ban, Paper in Architecture, New York: Rizzoli International Publications, (2009).

[83] A. Gassar, C. Koo, T. Kim i S. Cha, Performance optimization studies on heating, cooling and lighting energy systems of buildings during the design stage: A review, *Sustainability,* svez. 13, br. 17, p. 9815, (2021). https://doi.org/10.3390/su13179815

[84] S. Abbas, O. Saleem, M. Rizvi, S. Kazmi, M. Munir i S. Ali, Investigating the energy-efficient structures using building energy performance simulations: A case study, *Applied Sciences,* svez. 12, br. 18, p. 9386, (2022). https://doi.org/10.3390/app12189386

[85] L. Paraschiv, N. Acomi, A. Serban i S. Paraschiv, A web application for analysis of heat transfer through building walls and calculation of optimal insulation thickness, *Energy Reports,* svez. 6, p. 343-353, (2020). https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.10.015

[86] E. Bostancıoğlu, Effect of insulation thickness on energy consumption for different shaped buildings, (2021)u *Collaboration and Integration in Construction, Engineering, Management and Technology*, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-030-48465-1_50

[87] K. Ozbek, K. Gelis i O. Ozyurt, Optimization of external wall insulation thickness in buildings using response surface methodology, *International Journal of Energy and*

Environmental Engineering, svez. 13, br. 4, p. 1367-1381, (2022). https://doi.org/10.1007/s40095-022-00490-9

[88] C. Nuijsink, From ‘container’ to ‘lifestyle:’ Kazuyo Sejima, Sou Fujimoto and the destruction of the nuclear family box, *Interiors: Design/Architecture/Culture,* svez. 11, br. 2-3, p. 132-156, (2021). https://doi.org/10.1080/20419112.2021.1943190

[89] Solar Irradiance, Wikipedia, (2025). [Mrežno]. Dostupno: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_irradiance#On_Earth's_surface [Datum pristupa 8 11 2025].

[90] K. Gairaa i S. Benkaciali, Analysis of solar radiation measurements at Ghardaïa area, south Algeria, *Energy Procedia,* svez. 6, p. 122-129, (2011). https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.014

[91] A. Mostafaeipour, H. Goudarzi, A. Sedaghat, M. Jahangiri, H. Hadian, M. Rezaei i P. Karimi, Energy efficiency for cooling buildings in hot and dry regions using sol-air temperature and ground temperature effects, *Journal of Engineering, Design and Technology,* svez. 17, br. 3, p. 613-628, (2019).

[92] D. Dan, C. Tanasa, V. Stoian, S. Brata, D. Stoian, T. Gyorgy i S. Florut, Passive house design—An efficient solution for residential buildings in Romania, *Energy for Sustainable Development,* svez. 32, p. 99-109, (2016). https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.03.002

[93] Toward nearly zero energy building designs: A comparative study of various techniques, *AUT Journal of Civil Engineering,* svez. 5, br. 2, pp. 339-356, (2021). https://doi.org/10.22060/ajce.2021.19690.5862

[94] E. Li, L. Chen, T. Zhang, J. Zhu i R. Hou, A nearly zero energy building design method based on architecture form design for high solar exposure areas in China's severe cold and cold regions, *Journal of Building Engineering,* svez. 45, p. 103641, (2022). https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103641

[95] M. Cellura, F. Guarino, S. Longo i M. Mistretta, Energy life-cycle approach in Net zero energy buildings balance: Operation and embodied energy of an Italian case study, *Energy and Buildings,* svez. 72, pp. 371-381, (2014). https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.020

[96] Z. Veršić, M. Binički i M. Nosil Mešić, Zero-Emission Potential of Single-Family Houses in Croatia, *Buildings,* (2026). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/buildings16010207

[97] K. R. Shivanna, Climate change and its impact on biodiversity and human welfare, *Proceedings of the Indian National Science Academy,* svez. 88, br. 2, pp. 160-171, (2022).

[98] Road Transportation Emerges as Key Driver of Warming in New Analysis from NASA, 18 2 (2010). [Mrežno]. Dostupno: https://www.giss.nasa.gov/research/news/archive/20100218a/

[99] K. Papakostas, T. Mavromatis i N. Kyriakis, Impact of the ambient temperature rise on the energy consumption for heating and cooling in residential buildings of Greece, *Renewable Energy,* svez. 35, br. 7, pp. 1376-1379, (2010). https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.012

[100] M. Schwarz, D. Folini, S. Yang, R. P. Allan i M. Wild, Changes in atmospheric shortwave absorption as important driver of dimming and brightening, *Nature Geoscience,* svez. 13, br. 2, (2020). https://doi.org/10.1038/s41561-019-0528-y

[101] Z. Wang, Z. Ming, L. Wang i Q. Wenmin, A comprehensive research on the global all-sky surface solar radiation and its driving factors during 1980–2019, *Atmospheric Environment,* svez. 264, (2022). https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118711

[102] M. Stamatis, N. Hatzianastassiou, M. B. Korras-Carraca, C. Matsoukas, M. Wild i I. Vardavas, An Assessment of Global Dimming and Brightening during 1984–2018 Using the FORTH Radiative Transfer Model and ISCCP Satellite and MERRA-2 Reanalysis Data, *Atmosphere,* svez. 14, br. 8, (2023). https://doi.org/10.3390/atmos14081258

[103] B. Azzopardi, M. V. Balzan, S. Cherif, E. Doblas-Miranda, E. dos Santos, P. Dobrinski i E. Xoplaki, Climate and environmental change in the Mediterranean basin – current situation and risks for the future. First Mediterranean assessment report, MedECC – Mediterranean Experts on Climate and Environmental Change, Marseille, (2020).

[104] E. Dascalaki i C. Balaras, Impacts on indoor thermal comfort and heating energy use in hellenic dwellings from occupant behavioral reactions, *Applied Sciences,* svez. 11, br. 14, p. 6254, (2021). https://doi.org/10.3390/app11146254

[105] S. Papadopoulos, C. Kontokosta, A. Vlachokostas i E. Azar, Rethinking HVAC temperature setpoints in commercial buildings: The potential for zero-cost energy savings and comfort improvement in different climates, *Building and Environment,* svez. 155, pp. 350-359, (2019). https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.017

[106] D. Bienvenido-Huertas, D. Sánchez-García, A. Pérez-Fargallo i C. Rubio-Bellido, Optimization of energy saving with adaptive setpoint temperatures by calculating the prevailing mean outdoor air temperature, *Building and Environment,* svez. 170, (2020). https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106613

[107] A. Khalilnejad, R. H. French and A. R. Abramson, Evaluation of cooling setpoint setback savings in commercial buildings using electricity and exterior temperature time series data, *Energy and Buildings,* (2022). https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111999

[108] J. Kang, W. Shengjie, L. Yutong i M. Tao, Study of Building Demand Response Method Based on Indoor Temperature Setpoint Control of VRV Air Conditioning, *Energies,* svez. 16, (2023). https://doi.org/10.3390/en16145525

[109] J. Xiong, L. Chen and Y. Zhang, Building Energy Saving for Indoor Cooling and Heating: Mechanism and Comparison on Temperature Difference, *Sustainability,* (2023). https://doi.org/ https://doi.org/10.3390/su151411241

[110] S. Mousavi Navaee, A. Falavand Jozaei, A. Ghafouri i M. Mahdavi Adeli, The Impact of HVAC Setpoint Temperature on Reducing Building Energy Consumption in Different

Climatic Regions of Iran, *Journal of Computational Applied Mechanics,* svez. 56, br. 2, pp. 470-487, (2025). https://doi.org/10.1007/s42102-025-00470-8

[111] S. Serrano, D. Ürge-Vorsatz, C. Barreneche, A. Palacios i L. Cabeza, Heating and cooling energy trends and drivers in Europe, *Energy,* svez. 119, pp. 425-434, (2017). https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.068

[112] C. Younes, C. Shdid i G. Bitsuamlak, Air infiltration through building envelopes: A review, *Journal of Building Physics,* svez. 35, br. 3, pp. 267-302, (2012). https://doi.org/10.1177/1744259111435624

[113] M. Kamal, An overview of passive cooling techniques in buildings: design concepts and architectural interventions, *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture,* svez. 55, br. 1, pp. 84-97, (2012). https://doi.org/10.4316/acta-cte.2012.1.08

[114] Meteorološki podaci – primjenjuju se od 1. siječnja 2016., Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine, Zagreb, (2016).

[115] A. Fang, Y. Yang i D. Wenqiang, Optimal Design of Tilted Building Envelope Considering Air Conditioning Energy Demand, Daylight Utilization and Glare Protection—Case Study, *Buildings,* svez. 14, br. 2, (2024). https://doi.org/10.3390/buildings14020473

[116] M. Gonçalves, A. Figueiredo, R. M. S. F. Almeida i R. Vicente, Dynamic façades in buildings: A systematic review across thermal comfort, energy efficiency and daylight performance, *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* svez. 199, (2024). https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114474

[117] A. Trząski i J. Rucińska, Integration of Daylight in Building Design as a Way to Improve the Energy Efficiency of Buildings, *Energies,* svez. 18, br. 15, (2025). https://doi.org/10.3390/en18154113

[118] E. E. Agency, Greenhouse gas emission intensity of electricity generation in Europe, European Environment Agency, Copenhagen, (2025).

[119] B. Hebenstreit, R. Schnetzinger, R. Ohnmacht, E. Höftberger i W. Haslinger, Efficiency optimization of biomass boilers by a combined condensation-heat pump-system, (2011)u *ECOS*, Graz,

[120] S. R. Chandrasekaran, J. R. Laing, T. M. Holsen, S. Raja i P. K. Hopke, Emission Characterization and Efficiency Measurements of High-Efficiency Wood Boilers, *Energy & Fuels,* svez. 25, br. 11, (2011). https://doi.org/10.1021/ef2012563

[121] A. Nocoń, A. Jachimowski, W. Koniuch, G. Pełka, W. Luboń, P. Kubarek, M. Jach-Nocoń i D. Dawiec, Analysis of the Energy and Emission Performance of an Automatic Biomass Boiler in the Context of Efficient Heat Management, *Energies (MDPI),* svez. 17, (2024). https://doi.org/10.3390/en17235885

[122] Faktori primarne energije i emisija CO2, Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine, Zagreb, (2017).

[123] P. Drábek, M. Zálešák i M. Opluštil, The impact of the heat accumulation on energy efficiency of building, (2015)u *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, Vienna,

[124] E. Cuce i H. Şen, The effect of the barrier design on the heat conduction in double glass windows, (2023)u *15th International Conference On Engineering and Natural Sciences*, Muş,

[125] Determining the optimum orientation of a greenhouse on the basis of the total solar radiation availability, *Thermal Science,* svez. 15, br. 1, pp. 215-221, (2011). https://doi.org/10.2298/TSCI100220057D

[126] Wikipedia, Azimuth, (2025). [Mrežno]. Dostupno: https://en.wikipedia.org/wiki/Azimuth [Datum pristupa 8 11 2025].

[127] Encyclopædia Britannica, Declination, Encyclopædia Britannica, (2025). [Mrežno]. Dostupno: https://www.britannica.com/science/declination [Datum pristupa 8 11 2025].

[128] The "greenhouse" effect and climate change, *Reviews of Geophysics,* svez. 27, br. 1, pp. 115-139, (1989).

[129] S. A. Kalogirou i G. A. Florides, Measurements of ground temperature at various depths, (2004)u *International Conference on Sustainable Energy Technologies*, Nottingham,

[130] H. Nyberg, Thermal bridges at foundations: Evaluation of heat calculation methods, Chalmers University of Technology, Department of Civil and Geodetic Engineering, Division of Building Technology, Building Physics, Göteborg, (2011).

[131] J. L. Lean, Cycles and trends in solar irradiance and climate, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change,* svez. 1, br. 1, pp. 111-122, (2010).

[132] G. Pfister, R. L. McKenzie, J. B. Liley, A. Thomas, B. W. Forgan i C. N. Long, Cloud coverage based on all-sky imaging and its impact on surface solar irradiance, *Journal of Applied Meteorology,* svez. 42, br. 10, pp. 1421-1434, (2003).

[133] Algoritam za proračun potrebne energije za primjenu ventilacijskih i klimatizacijskih sustava kod grijanja i hlađenja prostora zgrade, Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine, Zagreb, (2017).

[134] Algoritam za proračun dizalice topline zrak-zrak, Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine, Zagreb, (2020).

[135] Algoritam za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama, Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine, Zagreb, (2017).

Prilog 1: Baza numeričkih podataka iz projekata racionalne uporabe energije

1. Projekti obiteljskih kuća kontinentalnog područja Hrvatske

Tablica 31: Numerička analiza projekata obiteljskih kuća (kontinentalna Hrvatska)[12]

Podaci očitani iz projekata

Redni broj kuće		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Godina		2017	2017	2017	2017	2019	2019	2019	2019	2019	2020
Mjesto		Zagreb [10000]	Zagreb [10000]	Zagreb [10000]	Zagreb [10000]	Zagreb [10000]	Zaprešić [10290]	Zagreb [10000]	Biškupec Zelinski	Zagreb [10000]	Zagreb [10110]
V_e	(m^3)	2.030,74	1.306,80	869,38	213,88	1.540,20	668,60	1.752,50	553,66	779,08	1.543,91
V	(m^3)	1.321,30	797,10	459,09	145,64	876,80	395,48	1.033,80	376,03	486,68	1.055,91
A_k	(m^2)	416,60	281,60	184,19	55,20	299,63	147,44	333,83	125,65	191,05	377,37
A_f	(m^2)	576,80	376,80	274,81	69,80	405,00	201,63	458,81	150,81	235,47	474,09
h	(m)	3,30	3,50	3,06	3,00	3,60	3,10	3,40	3,10	2,80	3,10
f_0	(m^{-1})	0,74	0,65	0,68	1,19	0,71	0,67	0,84	0,94	0,85	0,59
A	(m^2)	1.502,95	850,73	587,01	255,30	1.087,54	450,44	1.470,35	522,76	662,45	917,08
$A_{fl,gr}$	(m^2)	279,21	58,70	44,93	58,63	93,87	46,96	176,29	130,54	60,00	18,11
$A_{wall,gr}$	(m^2)	289,63	44,01	35,08	0,00	141,65	47,77	52,08	0,00	50,12	22,68
P	(m)	117,30	55,10	29,25	34,90	88,90	30,23	127,00	56,00	36,70	7,26
$A_{int,e}$	(m^2)	30,60	32,50	0,00	0,00	59,80	16,39	118,00	0,00	0,00	0,00
$A_{int,u}$	(m^2)	0,00	43,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	96,41	151,24
$A_{wall,u}$	(m^2)	22,10	11,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,36	0,00
A_{roof}	(m^2)	343,76	155,40	161,23	69,37	218,70	79,50	337,10	151,04	173,04	172,17
$A_{w,N}$	(m^2)	13,03	25,12	1,66	0,00	0,00	7,63	0,00	0,00	7,28	31,68
$A_{w,NE}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	0,00	27,69	1,38	60,16	0,00	0,00	0,00
$A_{w,E}$	(m^2)	99,91	21,29	3,84	0,00	0,00	5,29	7,13	6,48	4,11	19,87
$A_{w,SE}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	5,14	6,88	0,00	34,94	0,00	0,00	0,00
$A_{w,S}$	(m^2)	24,08	33,33	2,34	0,00	0,00	4,77	0,00	17,00	15,65	62,30
$A_{w,SW}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	15,10	13,06	0,00	92,18	0,00	0,00	0,00
$A_{w,W}$	(m^2)	28,24	38,76	12,25	0,00	0,00	8,56	0,00	18,50	11,66	40,30
$A_{w,NW}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	1,10	5,28	0,00	39,30	0,00	0,00	0,00
U_{wall}	(W/(m^2K))	0,15	0,23	0,21	0,12	0,21	0,22	0,23	0,24	0,22	0,20
Rezultati proračunskog modela											
f'_0	(m^{-1}) 5*	0,96	0,73	0,66	0,73	0,84	0,60	1,04	0,80	0,80	0,70
$d_{ti,wall}$	(cm) 7*	22,7	15,0	16,3	28,6	16,1	15,3	14,5	14,0	15,3	17,2
d_{wall}	(cm) 8*	47,7	40,0	41,3	53,6	41,1	40,3	39,5	39,0	40,3	42,2
f_{win}	(-) 9*	0,11	0,14	0,03	0,08	0,05	0,06	0,16	0,08	0,06	0,17
δ	(°) 10, 11*	126,78	155,12	202,80	198,68	110,12	134,20	145,96	205,77	163,70	154,94
F_C	(-) 12*	0,25	0,61	0,30	0,25	0,32	0,46	0,31	0,25	0,30	0,25
P'	(m) 13*	152,37	61,79	28,64	21,41	105,31	27,11	157,06	47,17	34,64	8,61
$f_{win,N}$	(-) 22*	0,08	0,21	0,08	0,03	0,31	0,30	0,21	0,00	0,19	0,21
$f_{win,E}$	(-) 23*	0,60	0,18	0,19	0,12	0,33	0,22	0,23	0,15	0,11	0,13
$f_{win,S}$	(-) 24*	0,15	0,28	0,12	0,47	0,19	0,17	0,27	0,40	0,40	0,40
$f_{win,W}$	(-) 25*	0,17	0,33	0,61	0,38	0,17	0,31	0,28	0,44	0,30	0,26
$f_{fl,gr}$	(-) **	0,23	0,18	0,27	0,27	0,20	0,18	0,23	0,29	0,26	0,19
$f_{wall,gr}$	(-) **	0,19	0,05	0,06	0,00	0,13	0,11	0,04	0,00	0,08	0,02
$f_{int,e}$	(-) **	0,02	0,04	0,00	0,00	0,05	0,04	0,08	0,00	0,00	0,00
$f_{int,u}$	(-) **	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,16
$f_{wall,u}$	(-) **	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00

* broj formule korištene za izračun

** rezultat statističke analize

[12] Podaci o arhitektima nalaze se u arhivu autora rada.

Podaci očitani iz projekata

Redni broj kuće		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Godina		2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2022	2022
Mjesto		Kerestinec	Samobor [10430]	Klanjec [49290]	Zagreb [10000]	Zagreb [10000]	10437 Rakitje	Samobor [10430]	Zagreb [10000]	Samobor [10430]	Brezovica [10257]
V_e	(m^3)	1.116,64	775,81	663,94	1.033,04	948,28	735,47	775,81	819,70	1.050,80	839,56
V	(m^3)	800,28	500,00	279,31	630,91	622,83	491,30	500,00	546,50	616,30	545,44
A_k	(m^2)	296,40	166,64	147,52	218,33	232,86	180,11	166,64	215,00	240,89	192,06
A_f	(m^2)	348,70	211,36	189,50	282,07	294,63	230,75	211,36	262,00	307,30	246,43
h	(m)	3,00	3,40	3,20	3,44	3,10	3,15	3,40	2,70	3,20	3,15
f_0	(m^{-1})	0,74	0,81	0,69	0,79	0,77	0,82	0,82	0,70	0,69	0,89
A	(m^2)	830,45	629,57	456,46	813,31	728,56	604,63	634,54	577,56	724,53	745,70
$A_{fl,gr}$	(m^2)	108,37	79,33	51,29	94,49	82,04	96,66	79,33	35,91	68,43	96,67
$A_{wall,gr}$	(m^2)	0,00	0,00	42,28	0,00	81,57	0,00	0,00	0,00	23,10	0,00
P	(m)	59,30	39,48	32,52	49,10	62,16	115,61	39,48	17,20	41,40	55,85
$A_{int,e}$	(m^2)	27,80	28,62	6,54	75,71	33,85	3,22	28,62	0,00	0,00	47,58
$A_{int,u}$	(m^2)	59,10	2,68	0,00	0,00	0,00	19,92	2,68	46,30	69,50	10,60
$A_{wall,u}$	(m^2)	0,00	0,00	10,84	8,72	0,00	19,65	0,00	67,91	21,17	18,41
A_{roof}	(m^2)	217,80	121,78	81,74	186,89	130,03	144,92	121,78	100,39	169,18	178,48
$A_{w,N}$	(m^2)	1,80	22,83	0,00	0,00	16,72	0,00	22,83	7,45	0,00	0,00
$A_{w,NE}$	(m^2)	0,00	0,00	2,25	20,01	0,00	0,00	0,00	0,00	14,84	7,21
$A_{w,E}$	(m^2)	18,90	5,87	0,00	0,00	1,85	17,32	5,87	24,20	0,00	0,00
$A_{w,SE}$	(m^2)	0,00	0,00	9,14	10,28	0,00	0,00	0,00	0,00	4,72	38,69
$A_{w,S}$	(m^2)	14,16	32,54	0,00	0,00	25,67	14,85	32,54	13,82	0,00	0,00
$A_{w,SW}$	(m^2)	0,00	0,00	51,06	30,48	0,00	0,00	0,00	0,00	40,73	23,95
$A_{w,W}$	(m^2)	18,50	15,60	0,00	0,00	11,05	7,25	15,60	34,08	0,00	0,00
$A_{w,NW}$	(m^2)	0,00	0,00	10,22	7,09	0,00	0,00	0,00	0,00	4,77	21,21
U_{wall}	($W/(m^2K)$)	0,22	0,19	0,15	0,23	0,24	0,13	0,15	0,23	0,22	0,19
Rezultati proračunskog modela											
f'_0	(m^{-1}) 5*	0,79	0,76	0,62	0,82	0,77	0,76	0,77	0,68	0,72	0,86
$d_{ti,wall}$	(cm) 7*	15,4	17,5	22,6	14,9	14,0	26,3	22,6	14,6	15,3	17,8
d_{wall}	(cm) 8*	40,4	42,5	47,6	39,9	39,0	51,3	47,6	39,6	40,3	42,8
f_{win}	(-) 9*	0,06	0,12	0,16	0,08	0,08	0,07	0,12	0,14	0,09	0,12
δ	(°) 10, 11*	173,25	137,92	195,45	148,89	140,54	157,01	137,92	174,33	170,82	151,55
F_C	(-) 12*	0,29	0,30	0,72	0,33	0,49	0,30	0,30	0,30	0,30	0,34
P'	(m) 13*	63,11	37,21	29,10	50,91	62,64	107,04	37,21	16,51	43,17	54,04
$f_{win,N}$	(-) 22*	0,03	0,30	0,09	0,20	0,30	0,00	0,30	0,09	0,15	0,16
$f_{win,E}$	(-) 23*	0,35	0,08	0,08	0,22	0,03	0,44	0,08	0,30	0,15	0,25
$f_{win,S}$	(-) 24*	0,27	0,42	0,41	0,30	0,46	0,38	0,42	0,17	0,35	0,34
$f_{win,W}$	(-) 25*	0,35	0,20	0,42	0,28	0,20	0,18	0,20	0,43	0,35	0,25
$f_{fl,gr}$	(-) **	0,26	0,19	0,18	0,23	0,18	0,24	0,19	0,17	0,23	0,24
$f_{wall,gr}$	(-) **	0,00	0,00	0,09	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00
$f_{int,e}$	(-) **	0,03	0,05	0,01	0,09	0,05	0,01	0,05	0,00	0,00	0,06
$f_{int,u}$	(-) **	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,08	0,10	0,01
$f_{wall,u}$	(-) **	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,03	0,00	0,12	0,03	0,02

* broj formule korištene za izračun

** rezultat statističke analize

Podaci očitani iz projekata

Redni broj kuće		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Godina		2022	2022	2022	2022	2022	2022	2022	2022	2022	2022
Mjesto		Mrkopalj [51315]	Donja Reka	Zagreb [10000]	Zagreb [10000]	Zagreb [10000]	Donja Pušća [10294]	Zagreb [10000]	Zagreb [10000]	Strmec Samoborski [10434]	Zagreb [10000]
V_e	(m^3)	431,60	1.396,84	691,21	858,98	687,30	1.019,74	596,07	525,81	597,61	481,16
V	(m^3)	296,61	806,26	440,36	596,52	457,06	676,47	409,63	362,18	429,70	265,85
A_k	(m^2)	98,87	290,83	163,89	154,55	161,20	225,67	157,55	118,50	179,04	93,28
A_f	(m^2)	126,95	352,78	211,46	190,00	212,62	272,32	195,29	149,37	223,90	146,00
h	(m)	3,00	1,50	3,15	3,00	2,80	3,42	3,00	3,30	2,70	3,00
f_0	(m^{-1})	1,06	0,61	0,76	0,80	0,86	0,71	0,81	0,83	0,92	0,77
A	(m^2)	457,32	854,73	528,50	686,49	587,64	721,67	484,31	434,74	552,08	372,51
$A_{fl,gr}$	(m^2)	102,96	199,46	72,23	110,30	108,11	145,95	85,78	49,00	122,00	48,40
$A_{wall,gr}$	(m^2)	0,00	105,63	0,00	0,00	0,00	104,53	0,00	0,00	0,00	0,00
P	(m)	55,10	63,06	38,80	50,70	63,44	65,62	42,20	35,70	51,56	27,46
$A_{int,e}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	5,90	0,00	10,95	3,15	0,00	0,00	18,45
$A_{int,u}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	27,20	0,00	0,00	0,00	32,21	0,00	0,00
$A_{wall,u}$	(m^2)	0,00	36,67	0,00	33,08	0,00	0,00	0,00	16,13	0,00	24,27
A_{roof}	(m^2)	126,94	238,04	89,03	145,11	137,90	192,69	105,19	95,24	145,56	80,46
$A_{w,N}$	(m^2)	0,00	0,00	6,88	8,90	9,69	0,00	8,22	5,37	6,79	0,00
$A_{w,NE}$	(m^2)	13,08	12,59	0,00	0,00	0,00	4,32	0,00	0,72	0,00	7,50
$A_{w,E}$	(m^2)	0,00	0,00	8,53	27,78	14,80	0,00	14,30	0,00	12,30	0,00
$A_{w,SE}$	(m^2)	0,00	19,13	0,00	0,00	0,00	33,76	0,00	6,79	0,00	8,39
$A_{w,S}$	(m^2)	0,00	0,00	5,50	26,27	17,15	0,00	10,76	20,31	2,73	0,00
$A_{w,SW}$	(m^2)	22,24	11,34	0,00	0,00	0,00	15,05	0,00	10,20	0,00	16,57
$A_{w,W}$	(m^2)	0,00	0,00	29,17	0,00	6,65	0,00	5,94	2,05	12,64	0,00
$A_{w,NW}$	(m^2)	14,40	59,81	0,00	0,00	0,00	3,65	0,00	0,00	0,00	3,84
U_{wall}	($W/(m^2K)$)	0,11	0,21	0,20	0,15	0,23	0,20	0,23	0,19	0,26	0,14
Rezultati proračunskog modela											
f'_0	(m^{-1}) 5*	0,82	0,70	0,69	0,78	0,77	0,73	0,70	0,68	0,80	0,62
$d_{ti,wall}$	(cm) 7*	30,9	16,1	17,3	22,7	14,8	16,6	14,9	18,2	13,1	24,4
d_{wall}	(cm) 8*	55,9	41,1	42,3	47,7	39,8	41,6	39,9	43,2	38,1	49,4
f_{win}	(-) 9*	0,11	0,12	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,10	0,06	0,10
δ	(°) 10, 11*	151,58	133,91	192,39	114,83	128,69	152,01	123,09	164,03	145,42	157,49
F_C	(-) 12*	0,30	0,30	0,30	0,30	0,37	0,75	0,30	0,30	0,30	0,30
P'	(m) 13*	42,71	72,31	35,19	49,44	57,43	67,75	36,43	29,56	44,55	22,07
$f_{win,N}$	(-) 22*	0,28	0,35	0,14	0,14	0,20	0,07	0,21	0,13	0,20	0,16
$f_{win,E}$	(-) 23*	0,13	0,15	0,17	0,44	0,31	0,34	0,36	0,08	0,36	0,22
$f_{win,S}$	(-) 24*	0,22	0,15	0,11	0,42	0,36	0,43	0,27	0,63	0,08	0,34
$f_{win,W}$	(-) 25*	0,37	0,35	0,58	0,00	0,14	0,16	0,15	0,16	0,37	0,28
$f_{fl,gr}$	(-) **	0,28	0,28	0,17	0,21	0,23	0,27	0,22	0,22	0,26	0,22
$f_{wall,gr}$	(-) **	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00
$f_{int,e}$	(-) **	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,05
$f_{int,u}$	(-) **	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00
$f_{wall,u}$	(-) **	0,00	0,04	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,07

* broj formule korištene za izračun

** rezultat statističke analize

Podaci očitani iz projekata

Redni broj kuće		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Godina		2022	2022	2022	2023	2023	2023	2023	2023	2023	2023
Mjesto		Saborsko [47306]	Brdovec	Lokve [51316]	Zagreb-Dubrava [10040]	Sveti Martin pod Okićem	Zagreb [10000]	Donja Bistra [10298]	Zagreb [10000]	Velika Gorica [10410]	Turanj (Karlovac)
V_e	(m^3)	498,25	593,59	769,79	361,51	463,49	1.166,92	395,95	1.706,86	622,67	308,08
V	(m^3)	356,14	356,38	550,40	219,63	322,60	799,48	291,66	1.157,15	420,76	249,72
A_k	(m^2)	133,52	134,64	165,40	82,11	126,00	296,15	97,20	390,13	135,83	106,96
A_f	(m^2)	164,00	178,60	195,10	113,86	164,76	391,96	121,03	477,90	166,06	127,04
h	(m)	3,00	3,20	3,00	3,05	3,00	3,04	3,10	3,45	3,44	2,43
f_0	(m^{-1})	0,82	0,86	0,82	0,85	0,78	0,67	1,19	0,64	0,69	0,98
A	(m^2)	407,82	510,49	634,46	305,91	360,27	777,29	471,86	1.088,98	427,53	300,90
$A_{fl,gr}$	(m^2)	53,46	99,04	110,76	44,80	66,87	76,16	141,33	12,67	73,26	54,30
$A_{wall,gr}$	(m^2)	0,00	0,00	56,50	0,00	0,00	63,56	0,00	0,00	0,00	0,00
P	(m)	32,68	43,40	56,50	30,56	36,70	47,92	49,76	15,53	37,12	34,62
$A_{int,e}$	(m^2)	31,61	11,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$A_{int,u}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,54	0,00	71,77	0,00	0,00
$A_{wall,u}$	(m^2)	0,00	0,00	19,53	0,00	0,00	38,83	0,00	131,64	0,00	0,00
A_{roof}	(m^2)	135,74	115,76	262,97	56,93	86,81	174,39	151,91	185,91	98,80	89,87
$A_{w,N}$	(m^2)	13,15	0,96	34,62	0,00	0,00	7,68	0,00	0,00	3,38	2,64
$A_{w,NE}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	0,00	6,05	0,00	0,00	30,27	0,00	0,00
$A_{w,E}$	(m^2)	26,14	6,59	0,00	0,00	0,00	11,23	0,00	0,00	0,00	6,71
$A_{w,SE}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	5,58	8,41	0,00	10,36	56,67	12,84	0,00
$A_{w,S}$	(m^2)	16,75	15,98	26,04	0,00	0,00	16,56	0,00	0,00	0,00	6,88
$A_{w,SW}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	1,36	4,32	0,00	13,34	8,43	2,20	0,00
$A_{w,W}$	(m^2)	1,54	0,48	23,54	0,00	0,00	34,81	0,00	0,00	0,00	6,71
$A_{w,NW}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	4,32	3,95	0,00	2,88	41,64	6,00	0,00
U_{wall}	(W/(m^2K))	0,19	0,20	0,16	0,24	0,22	0,22	0,19	0,23	0,15	0,23
Rezultati proračunskog modela											
f'_0	(m^{-1}) 5*	0,67	0,74	0,77	0,62	0,62	0,72	0,90	0,78	0,60	0,68
$d_{ti,wall}$	(cm) 7*	18,2	17,3	21,3	14,1	15,3	15,6	18,0	14,6	22,7	14,6
d_{wall}	(cm) 8*	43,2	42,3	46,3	39,1	40,3	40,6	43,0	39,6	47,7	39,6
f_{win}	(-) 9*	0,14	0,05	0,13	0,04	0,06	0,09	0,06	0,13	0,06	0,08
δ	(°) 10, 11*	100,44	149,90	131,15	145,87	128,15	190,53	180,17	120,65	124,42	159,29
F_C	(-) 12*	0,36	0,37	0,38	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
P'	(m) 13*	26,58	37,41	53,12	22,33	29,13	51,75	37,48	19,04	32,51	23,98
$f_{win,N}$	(-) 22*	0,23	0,04	0,41	0,19	0,22	0,11	0,05	0,26	0,26	0,12
$f_{win,E}$	(-) 23*	0,45	0,27	0,00	0,25	0,32	0,16	0,19	0,32	0,26	0,29
$f_{win,S}$	(-) 24*	0,29	0,67	0,31	0,31	0,28	0,24	0,45	0,24	0,31	0,30
$f_{win,W}$	(-) 25*	0,03	0,02	0,28	0,25	0,18	0,50	0,31	0,18	0,17	0,29
$f_{fl,gr}$	(-) **	0,33	0,23	0,41	0,19	0,24	0,22	0,32	0,17	0,23	0,30
$f_{wall,gr}$	(-) **	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
$f_{int,e}$	(-) **	0,08	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$f_{int,u}$	(-) **	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,07	0,00	0,00
$f_{wall,u}$	(-) **	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,05	0,00	0,12	0,00	0,00

* broj formule korištene za izračun

** rezultat statističke analize

Podaci očitani iz projekata

Redni broj kuće		41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Godina		2023	2023	2023	2023	2023	2023	2023	2023	2023	2023
Mjesto		Drežnik Podokićki	Bosiljevo [47251]	Samobor [10430]	Zagreb [10000]	Zagreb [10000]	Hrašće	Zagreb [10000]	Zagreb [10000]	Zagreb [10000]	Delnice [51300]
V_e	(m^3)	563,13	748,39	927,78	1.654,89	768,74	567,85	1.436,39	1.264,54	2.075,47	695,64
V	(m^3)	389,27	501,12	645,98	906,30	524,70	517,22	805,65	705,16	788,31	480,50
A_k	(m^2)	131,60	169,45	239,36	348,80	168,02	199,93	242,58	231,20	263,18	164,24
A_f	(m^2)	178,76	209,03	296,88	456,80	182,64	285,25	369,51	274,90	315,80	206,42
h	(m)	2,60	3,30	2,62	3,60	3,50	2,90	3,70	4,00	4,00	3,37
f_0	(m^{-1})	0,71	0,70	0,77	0,91	0,89	1,17	0,67	0,74	0,51	0,70
A	(m^2)	401,79	520,80	718,01	1.505,78	687,86	661,89	957,21	930,57	1.049,98	487,02
$A_{fl,gr}$	(m^2)	74,86	92,10	139,44	177,54	149,46	113,43	108,29	243,00	278,60	89,16
$A_{wall,gr}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	27,84	8,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P	(m)	34,70	36,48	56,08	122,90	105,70	44,50	49,30	81,70	93,00	44,52
$A_{int,e}$	(m^2)	0,00	9,30	7,44	80,00	22,68	22,19	78,25	0,00	0,00	0,00
$A_{int,u}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	36,59	25,90	0,00	0,00	0,00
$A_{wall,u}$	(m^2)	0,00	12,58	20,46	0,00	44,75	16,55	0,00	0,00	23,86	0,00
A_{roof}	(m^2)	89,36	142,74	164,95	304,07	188,34	197,11	238,50	274,90	315,80	119,14
$A_{w,N}$	(m^2)	4,42	3,38	0,00	6,24	0,00	13,02	28,49	30,22	13,88	3,32
$A_{w,NE}$	(m^2)	0,00	0,00	17,93	18,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$A_{w,E}$	(m^2)	10,08	6,99	0,00	16,90	21,06	10,32	15,92	4,58	9,78	9,02
$A_{w,SE}$	(m^2)	0,00	0,00	7,00	28,67	25,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$A_{w,S}$	(m^2)	10,14	24,55	0,00	21,84	0,00	20,37	70,26	59,78	64,66	3,81
$A_{w,SW}$	(m^2)	0,00	0,00	25,14	33,54	8,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$A_{w,W}$	(m^2)	6,44	19,91	0,00	25,87	0,00	0,41	8,64	19,52	25,11	4,95
$A_{w,NW}$	(m^2)	0,00	0,00	8,08	19,50	5,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
U_{wall}	($W/(m^2K)$)	0,23	0,15	0,23	0,24	0,16	0,23	0,16	0,17	0,17	0,15
Rezultati proračunskog modela											
f'_0	(m^{-1}) 5*	0,60	0,65	0,77	1,10	0,84	0,99	0,77	0,82	0,66	0,64
$d_{ti,wall}$	(cm) 7*	14,8	22,7	14,7	14,0	21,3	14,9	21,0	20,0	20,0	22,7
d_{wall}	(cm) 8*	39,8	47,7	39,7	39,0	46,3	39,9	46,0	45,0	45,0	47,7
f_{win}	(-) 9*	0,08	0,11	0,08	0,11	0,09	0,07	0,13	0,12	0,11	0,04
δ	(°) 10, 11*	143,86	190,11	146,16	159,47	132,41	106,67	133,11	144,12	170,14	134,32
F_C	(-) 12*	0,30	0,30	0,34	0,82	0,30	0,30	0,78	0,75	0,75	0,39
P'	(m) 13*	29,39	33,97	56,10	149,11	99,32	37,80	57,06	90,62	121,68	40,46
$f_{win,N}$	(-) 22*	0,14	0,06	0,22	0,15	0,05	0,30	0,23	0,26	0,12	0,16
$f_{win,E}$	(-) 23*	0,32	0,13	0,21	0,24	0,55	0,23	0,13	0,04	0,09	0,43
$f_{win,S}$	(-) 24*	0,33	0,45	0,28	0,31	0,28	0,46	0,57	0,52	0,57	0,18
$f_{win,W}$	(-) 25*	0,21	0,36	0,29	0,31	0,12	0,01	0,07	0,17	0,22	0,23
$f_{fl,gr}$	(-) **	0,22	0,27	0,23	0,20	0,27	0,30	0,25	0,30	0,30	0,24
$f_{wall,gr}$	(-) **	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$f_{int,e}$	(-) **	0,00	0,02	0,01	0,05	0,03	0,03	0,08	0,00	0,00	0,00
$f_{int,u}$	(-) **	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,03	0,00	0,00	0,00
$f_{wall,u}$	(-) **	0,00	0,02	0,03	0,00	0,07	0,03	0,00	0,00	0,02	0,00

* broj formule korištene za izračun

** rezultat statističke analize

Podaci očitani iz projekata

Redni broj kuće		51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Godina		2023	2023	2023	2023	2023	2023	2023	2024	2024	2024
Mjesto		Zagreb [10000]	Zagreb [10000]	Zagreb [10000]	Lokve [51316]	Svetvinčenat [52342]	Zagreb [10000]	Rakovica [47245]	Zagreb [10000]	Zagreb [10000]	Zagreb [10000]
V_e	(m^3)	1.448,25	1.112,82	1.755,80	850,65	395,03	2.478,40	833,26	855,10	384,48	1.162,78
V	(m^3)	851,43	743,28	1.175,80	422,18	308,12	1.472,32	572,03	577,90	244,77	693,04
A_k	(m^2)	272,48	261,72	315,46	161,77	108,47	520,04	205,26	220,08	102,90	260,85
A_f	(m^2)	372,90	326,58	386,60	208,61	145,07	667,50	246,57	272,62	131,90	325,98
h	(m)	3,70	3,20	4,00	2,85	2,90	3,60	3,00	3,05	2,50	3,40
f_0	(m^{-1})	0,66	0,66	0,74	0,68	1,25	0,66	0,70	0,64	1,00	0,63
A	(m^2)	962,36	738,47	1.303,68	580,74	492,92	1.639,96	583,62	550,86	384,13	730,92
$A_{fl,gr}$	(m^2)	115,02	60,01	340,09	107,74	82,30	256,05	103,60	61,38	61,14	88,72
$A_{wall,gr}$	(m^2)	0,00	57,62	0,00	0,00	0,00	174,87	0,00	79,47	52,41	46,01
P	(m)	49,70	42,79	116,30	44,60	49,46	101,40	56,18	38,05	45,34	39,41
$A_{int,e}$	(m^2)	104,10	0,00	0,00	0,00	0,00	103,00	3,40	9,10	3,44	7,54
$A_{int,u}$	(m^2)	0,00	75,05	0,00	0,00	0,00	0,00	18,98	0,00	0,00	22,63
$A_{wall,u}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	0,00	18,59	0,00	18,30	0,00	0,00	24,41
A_{roof}	(m^2)	238,50	131,22	387,20	155,28	101,18	415,50	149,38	84,00	74,53	135,53
$A_{w,N}$	(m^2)	27,68	0,00	31,11	2,91	0,00	37,54	7,50	36,65	0,00	0,00
$A_{w,NE}$	(m^2)	0,00	24,61	0,00	0,00	6,23	0,00	0,00	0,00	2,80	20,65
$A_{w,E}$	(m^2)	16,71	0,00	24,73	13,85	0,00	27,34	8,63	34,95	0,00	0,00
$A_{w,SE}$	(m^2)	0,00	29,80	0,00	0,00	43,25	0,00	0,00	0,00	11,16	22,65
$A_{w,S}$	(m^2)	73,37	0,00	59,78	10,15	0,00	77,88	39,75	10,31	0,00	0,00
$A_{w,SW}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	0,00	6,23	0,00	0,00	0,00	18,06	35,66
$A_{w,W}$	(m^2)	3,04	0,00	39,67	18,14	0,00	2,96	8,69	18,85	0,00	0,00
$A_{w,NW}$	(m^2)	0,00	5,08	0,00	0,00	10,68	0,00	0,00	0,00	4,01	20,12
U_{wall}	(W/(m^2K))	0,17	0,23	0,17	0,17	0,24	0,17	0,21	0,28	0,22	0,23
Rezultati proračunskog modela											
f'_0	(m^{-1}) 5*	0,77	0,71	0,92	0,66	0,94	0,92	0,68	0,63	0,75	0,68
$d_{ti,wall}$	(cm) 7*	20,0	14,6	20,0	20,6	13,7	20,0	15,9	11,9	15,2	14,6
d_{wall}	(cm) 8*	45,0	39,6	45,0	45,6	38,7	45,0	40,9	36,9	40,2	39,6
f_{win}	(-) 9*	0,13	0,08	0,12	0,08	0,13	0,09	0,11	0,18	0,09	0,14
δ	(°) 10, 11*	128,57	97,77	152,60	176,94	135,00	118,57	159,18	100,15	173,12	148,63
F_C	(-) 12*	0,79	0,32	0,75	0,30	0,48	0,75	0,57	0,30	0,44	0,30
P'	(m) 13*	57,68	45,48	143,92	43,35	37,23	140,76	54,23	37,05	33,82	42,51
$f_{win,N}$	(-) 22*	0,23	0,25	0,20	0,06	0,13	0,26	0,12	0,36	0,09	0,21
$f_{win,E}$	(-) 23*	0,14	0,46	0,16	0,31	0,37	0,19	0,13	0,35	0,19	0,22
$f_{win,S}$	(-) 24*	0,61	0,25	0,38	0,23	0,37	0,53	0,62	0,10	0,41	0,29
$f_{win,W}$	(-) 25*	0,03	0,04	0,26	0,40	0,13	0,02	0,13	0,19	0,31	0,28
$f_{fl,gr}$	(-) **	0,25	0,18	0,30	0,27	0,21	0,25	0,26	0,15	0,19	0,19
$f_{wall,gr}$	(-) **	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	0,14	0,14	0,06
$f_{int,e}$	(-) **	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,01	0,02	0,01	0,01
$f_{int,u}$	(-) **	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,03
$f_{wall,u}$	(-) **	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,03	0,00	0,00	0,03

* broj formule korištene za izračun

** rezultat statističke analize

Podaci očitani iz projekata

Redni broj kuće		61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
Godina		2024	2024	2024	2024	2024	2024	2024	2024	2024	2024
Mjesto		Zagreb [10000]	Sveti Ivan Zelina [10380]	Zagreb [10110]	Zagreb [10000]	Zagreb [10000]	Zagreb [10000]	Zagreb [10000]	Zagreb [10000]	Velika Gorica [10410]	10 294 Pušća
V_e	(m^3)	1.488,30	743,58	542,97	1.883,23	1.881,13	1.256,45	1.235,85	603,70	460,23	686,02
V	(m^3)	900,40	505,24	361,55	1.204,51	1.107,93	644,50	925,91	389,00	315,95	368,74
A_k	(m^2)	338,02	171,15	145,26	397,17	391,45	244,09	300,40	132,90	116,40	136,57
A_f	(m^2)	414,10	220,91	178,52	500,58	489,34	317,19	342,80	177,00	142,09	174,56
h	(m)	3,20	3,00	3,00	3,50	3,50	3,50	3,30	3,20	3,10	3,20
f_0	(m^{-1})	0,64	0,79	0,99	0,62	0,57	0,60	0,67	0,85	0,79	0,85
A	(m^2)	955,64	589,73	535,48	1.169,30	1.078,08	754,12	822,09	515,20	362,25	582,57
$A_{fl,gr}$	(m^2)	122,03	111,00	57,47	90,15	163,24	98,76	168,22	57,52	64,38	145,02
$A_{wall,gr}$	(m^2)	54,72	0,00	39,78	0,00	0,00	0,00	81,96	64,02	0,00	84,30
P	(m)	62,95	47,40	48,11	50,90	25,17	51,54	75,50	51,40	36,48	66,54
$A_{int,e}$	(m^2)	11,30	7,76	0,00	86,58	41,59	5,57	19,52	0,00	0,00	0,00
$A_{int,u}$	(m^2)	2,75	0,00	46,80	30,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$A_{wall,u}$	(m^2)	88,30	0,00	19,55	24,02	0,00	0,00	7,79	0,00	0,00	10,14
A_{roof}	(m^2)	224,40	147,05	114,75	216,76	226,88	193,20	215,76	73,70	80,74	174,56
$A_{w,N}$	(m^2)	0,00	0,00	5,80	0,00	1,08	0,00	0,00	3,33	0,00	0,00
$A_{w,NE}$	(m^2)	48,77	4,00	0,00	11,27	17,83	6,24	30,53	0,00	1,22	6,14
$A_{w,E}$	(m^2)	0,00	0,00	19,98	0,00	0,00	0,00	0,00	14,05	0,00	0,00
$A_{w,SE}$	(m^2)	32,32	8,58	0,00	73,36	8,16	7,44	21,86	0,00	6,93	26,46
$A_{w,S}$	(m^2)	0,00	0,00	59,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,47	0,00	0,00
$A_{w,SW}$	(m^2)	47,85	10,09	0,00	67,85	20,25	9,12	0,00	0,00	3,24	0,00
$A_{w,W}$	(m^2)	0,00	0,00	2,91	0,00	0,00	0,00	0,00	9,37	0,00	0,00
$A_{w,NW}$	(m^2)	25,46	14,16	0,00	68,09	139,66	32,16	17,84	0,00	16,19	18,10
U_{wall}	($W/(m^2K)$)	0,23	0,19	0,14	0,22	0,22	0,15	0,21	0,25	0,20	0,18
Rezultati proračunskog modela											
f'_0	(m^{-1}) 5*	0,75	0,74	0,83	0,79	0,73	0,66	0,73	0,74	0,62	0,77
$d_{ti,wall}$	(cm) 7*	14,6	17,9	24,4	15,5	15,2	22,7	16,1	13,5	16,9	18,8
d_{wall}	(cm) 8*	39,6	42,9	49,4	40,5	40,2	47,7	41,1	38,5	41,9	43,8
f_{win}	(-) 9*	0,16	0,06	0,16	0,19	0,17	0,07	0,09	0,08	0,08	0,09
δ	(°) 10, 11*	134,47	149,88	150,57	158,09	135,39	139,72	95,88	154,01	141,59	124,10
F_C	(-) 12*	0,36	0,33	0,26	0,68	0,30	0,25	0,38	0,66	0,30	0,30
P'	(m) 13*	73,72	44,05	40,26	64,48	31,87	57,05	83,11	44,56	28,89	60,20
$f_{win,N}$	(-) 22*	0,24	0,25	0,07	0,18	0,43	0,35	0,34	0,08	0,32	0,24
$f_{win,E}$	(-) 23*	0,26	0,17	0,23	0,19	0,07	0,12	0,37	0,36	0,15	0,32
$f_{win,S}$	(-) 24*	0,26	0,25	0,67	0,32	0,08	0,15	0,16	0,32	0,18	0,26
$f_{win,W}$	(-) 25*	0,24	0,33	0,03	0,31	0,43	0,38	0,13	0,24	0,35	0,18
$f_{fl,gr}$	(-) **	0,23	0,25	0,21	0,19	0,21	0,26	0,26	0,14	0,22	0,30
$f_{wall,gr}$	(-) **	0,06	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,10	0,12	0,00	0,14
$f_{int,e}$	(-) **	0,01	0,01	0,00	0,07	0,04	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00
$f_{int,u}$	(-) **	0,00	0,00	0,09	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$f_{wall,u}$	(-) **	0,09	0,00	0,04	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02

* broj formule korištene za izračun

** rezultat statističke analize

Podaci očitani iz projekata

Redni broj kuće		71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
Godina		2024	2024	2024	2024	2024	2024	2025	2025	2025	2025
Mjesto		Zagreb [10110]	Bednja [42253]	Ozalj [47280]	Zagreb [10000]	Brckovljani, Dugo Selo	Samobor [10430]	Fužine [51322]	Samobor [10430]	Sveta Nedjelja [10431]	Plešivička Reka
V_e	(m^3)	522,30	1.214,55	628,33	1.292,95	689,50	759,00	673,96	835,45	472,06	274,30
V	(m^3)	363,30	794,86	437,16	816,98	482,96	497,50	437,99	588,00	312,83	167,96
A_k	(m^2)	134,40	269,28	172,10	283,57	130,16	188,72	181,56	196,00	109,40	64,60
A_f	(m^2)	170,40	332,02	199,21	358,91	163,50	232,54	235,17	238,70	147,98	85,72
h	(m)	3,00	3,40	3,00	3,60	3,00	3,00	2,70	3,00	2,97	3,20
f_0	(m^{-1})	0,97	0,59	0,98	0,69	0,86	0,73	0,82	0,91	0,84	1,17
A	(m^2)	504,80	719,74	616,27	896,14	594,76	550,65	555,41	761,68	398,61	321,62
$A_{fl,gr}$	(m^2)	43,29	138,88	83,88	151,96	138,20	138,90	100,37	208,70	63,10	68,58
$A_{wall,gr}$	(m^2)	38,50	55,44	37,76	104,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P	(m)	36,24	59,08	33,71	57,65	60,18	48,30	57,25	76,60	35,10	45,18
$A_{int,e}$	(m^2)	0,00	6,60	31,36	32,18	0,00	0,00	0,00	0,00	1,26	0,00
$A_{int,u}$	(m^2)	54,30	6,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$A_{wall,u}$	(m^2)	20,90	9,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A_{roof}	(m^2)	105,90	185,26	190,25	204,28	182,56	149,90	253,59	234,90	85,65	85,72
$A_{w,N}$	(m^2)	16,10	34,05	0,00	45,42	12,96	6,63	9,60	0,00	0,00	0,00
$A_{w,NE}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,01	6,83	8,64
$A_{w,E}$	(m^2)	2,70	4,38	1,65	1,85	12,42	7,14	7,15	0,00	0,00	0,00
$A_{w,SE}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,28	7,23	1,04
$A_{w,S}$	(m^2)	50,82	8,95	45,78	19,05	8,64	4,82	30,08	0,00	0,00	0,00
$A_{w,SW}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,48	8,16	2,60
$A_{w,W}$	(m^2)	20,09	9,79	0,00	15,72	10,63	9,83	0,00	0,00	0,00	0,00
$A_{w,NW}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,96	0,00	2,34
U_{wall}	(W/(m^2K))	0,14	0,21	0,25	0,22	0,21	0,19	0,15	0,20	0,12	0,12
Rezultati proračunskog modela											
f'_0	(m^{-1}) 5*	0,80	0,65	0,86	0,77	0,78	0,68	0,74	0,88	0,67	0,78
$d_{ti,wall}$	(cm) 7*	24,4	15,9	13,7	15,5	16,1	17,5	22,7	17,3	29,6	29,6
d_{wall}	(cm) 8*	49,4	40,9	38,7	40,5	41,1	42,5	47,7	42,3	54,6	54,6
f_{win}	(-) 9*	0,18	0,08	0,08	0,09	0,08	0,05	0,08	0,04	0,06	0,05
δ	(°) 10, 11*	165,14	81,31	176,87	95,56	124,15	146,53	129,36	112,24	140,39	97,82
F_C	(-) 12*	0,26	0,83	0,41	0,30	0,33	0,33	0,39	0,30	0,30	0,30
P'	(m) 13*	29,94	64,66	29,62	64,42	54,54	45,19	51,49	74,00	28,03	30,11
$f_{win,N}$	(-) 22*	0,18	0,60	0,00	0,55	0,29	0,23	0,20	0,30	0,15	0,38
$f_{win,E}$	(-) 23*	0,03	0,08	0,03	0,02	0,28	0,25	0,15	0,33	0,32	0,33
$f_{win,S}$	(-) 24*	0,57	0,16	0,97	0,23	0,19	0,17	0,64	0,20	0,35	0,12
$f_{win,W}$	(-) 25*	0,22	0,17	0,00	0,19	0,24	0,35	0,00	0,17	0,18	0,17
$f_{fl,gr}$	(-) **	0,21	0,26	0,31	0,23	0,31	0,27	0,46	0,31	0,21	0,27
$f_{wall,gr}$	(-) **	0,08	0,08	0,06	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$f_{int,e}$	(-) **	0,00	0,01	0,05	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$f_{int,u}$	(-) **	0,11	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$f_{wall,u}$	(-) **	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

* broj formule korištene za izračun

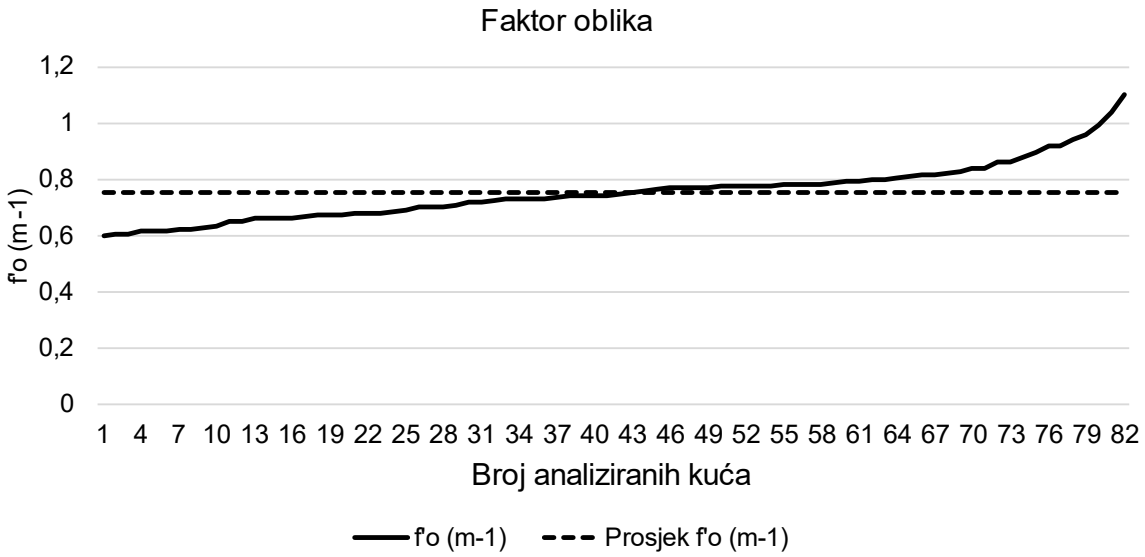
** rezultat statističke analize

Podaci očitani iz projekata

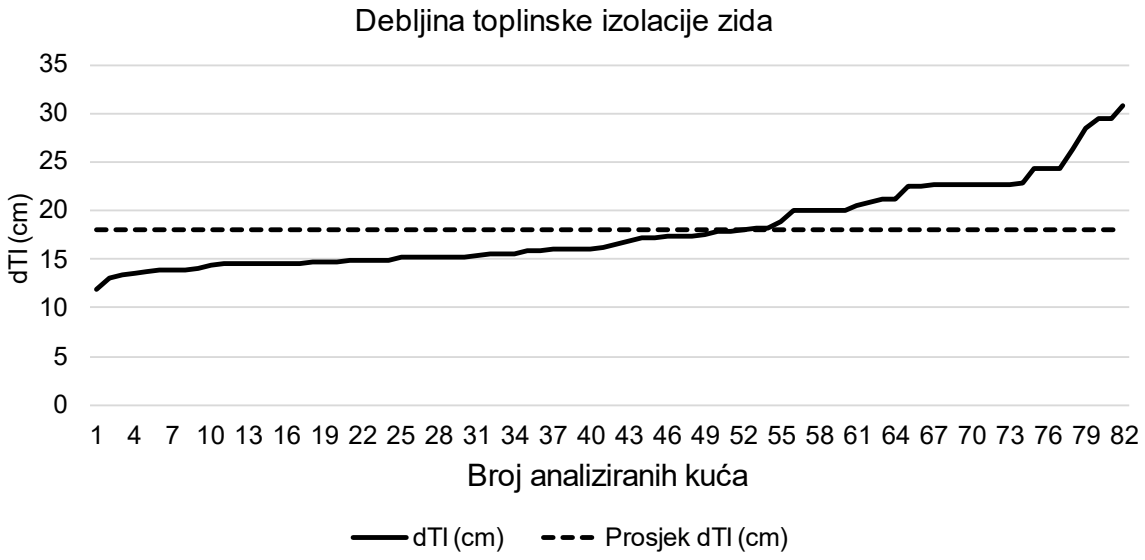
Redni broj kuće			81	82
Godina			2025	2025
Mjesto			Drežnik Grad [47246]	Zagreb [10000]
V_e	(m^3)		391,15	1.270,76
V	(m^3)		236,40	834,43
A_k	(m^2)		91,63	267,18
A_f	(m^2)		113,05	343,47
h	(m)		3,00	3,30
f_0	(m^{-1})		0,99	0,73
A	(m^2)		385,63	929,69
$A_{fl,gr}$	(m^2)		95,21	152,57
$A_{wall,gr}$	(m^2)		0,00	120,90
P	(m)		43,00	81,54
$A_{int,e}$	(m^2)		0,00	0,00
$A_{int,u}$	(m^2)		0,00	65,58
$A_{wall,u}$	(m^2)		0,00	13,69
A_{roof}	(m^2)		113,05	260,06
$A_{w,N}$	(m^2)		3,51	0,00
$A_{w,NE}$	(m^2)		0,00	0,00
$A_{w,E}$	(m^2)		1,29	27,13
$A_{w,SE}$	(m^2)		0,00	0,00
$A_{w,S}$	(m^2)		10,98	13,51
$A_{w,SW}$	(m^2)		0,00	0,00
$A_{w,W}$	(m^2)		6,20	41,76
$A_{w,NW}$	(m^2)		0,00	0,00
U_{wall}	($W/(m^2K)$)		0,23	0,15
Rezultati proračunskog modela				
f'_0	(m^{-1})	5*	0,74	0,81
$d_{ti,wall}$	(cm)	7*	14,6	22,8
d_{wall}	(cm)	8*	39,6	47,8
f_{win}	(-)	9*	0,06	0,09
δ	(°)	10, 11*	171,36	195,98
F_C	(-)	12*	0,30	0,36
P'	(m)	13*	32,26	90,59
$f_{win,N}$	(-)	22*	0,16	0,00
$f_{win,E}$	(-)	23*	0,06	0,33
$f_{win,S}$	(-)	24*	0,50	0,16
$f_{win,W}$	(-)	25*	0,28	0,51
$f_{fl,gr}$	(-)	**	0,29	0,28
$f_{wall,gr}$	(-)	**	0,00	0,13
$f_{int,e}$	(-)	**	0,00	0,00
$f_{int,u}$	(-)	**	0,00	0,07
$f_{wall,u}$	(-)	**	0,00	0,01

* broj formule korištene za izračun

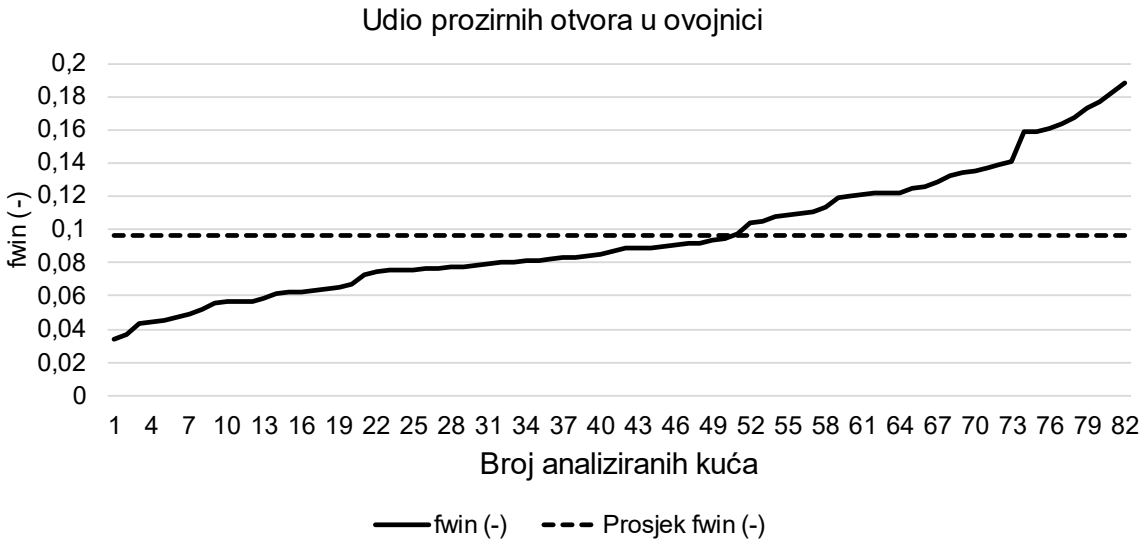
** rezultat statističke analize



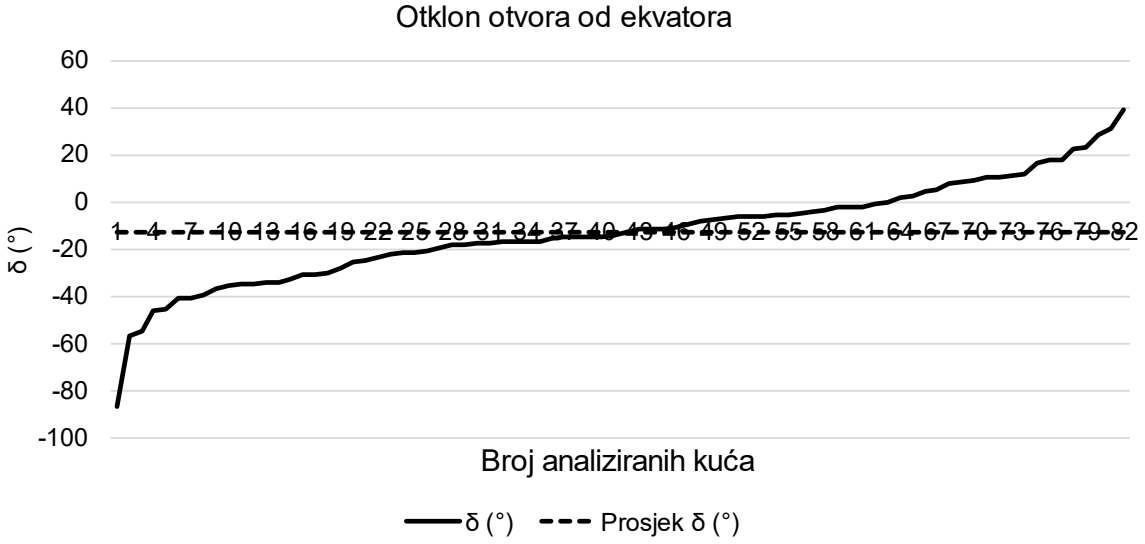
Slika 76: Faktor oblika analiziranih kuća (kontinentalna klima)



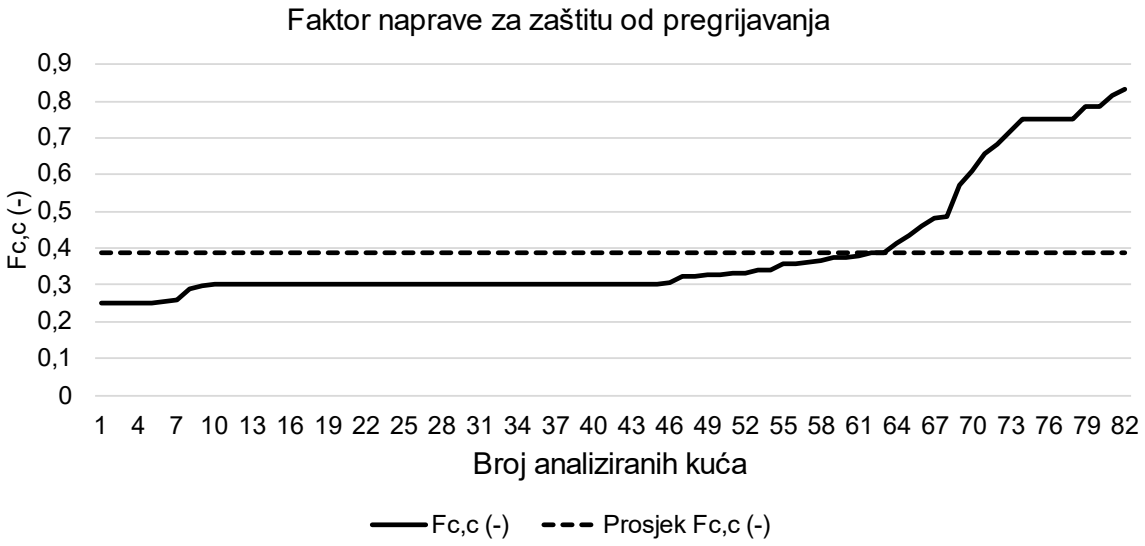
Slika 77: Debljina toplinske izolacije zida analiziranih kuća (kontinentalna klima)



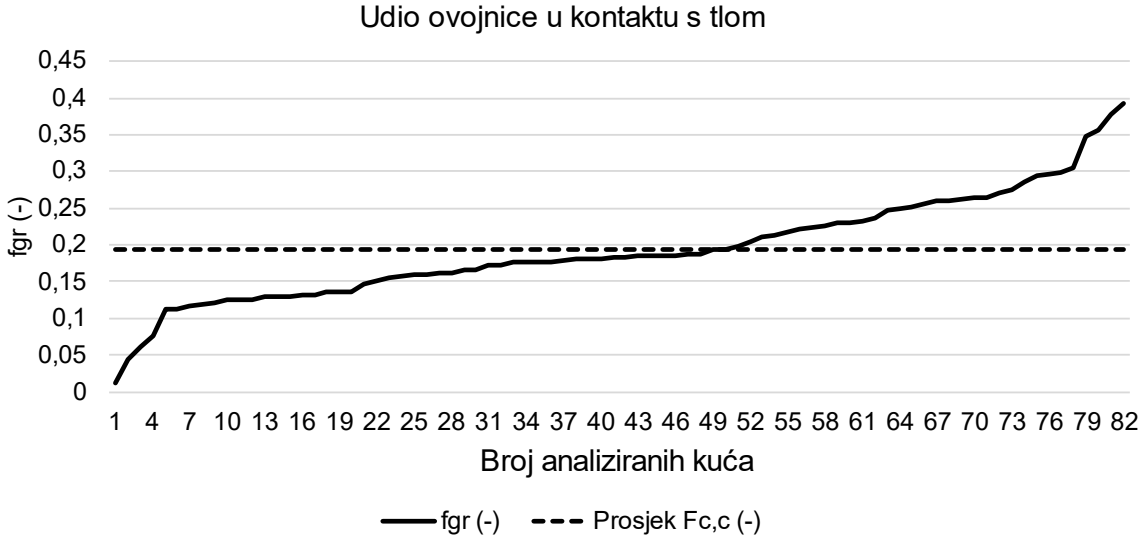
Slika 78: Udio prozirnih otvora u ovojnici analiziranih kuća (kontinentalna klima)



Slika 79: Otklon otvora od ekvatora analiziranih kuća (kontinentalna klima)



Slika 80: Faktor naprave za zaštitu od pregrijavanja analiziranih kuća (kontinentalna klima)



Slika 81: Udio ovojnice u kontaktu s tlom analiziranih kuća (kontinentalna klima)

2. Projekti obiteljskih kuća primorskog područja Hrvatske

Tablica 32: Numerička analiza projekata obiteljskih kuća (primorska Hrvatska)[13]

Podaci očitani iz projekata

Redni broj kuće		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Godina		2017	2017	2017	2018	2018	2018	2018	2018	2018	2018
Mjesto		Kali [23272]	Pakoštane [23211]	Kali [23272]	Vodice [22211]	Peroj	Zaton [22215]	Novalja [53291]	Jasenice [23243]	Rijeka [51000]	Pula [52100]
V_e	(m^3)	714,90	828,99	577,25	1.193,73	845,28	699,03	683,57	640,87	929,70	1.341,45
V	(m^3)	442,90	478,56	345,04	771,70	556,87	444,85	453,45	400,72	531,88	836,90
A_k	(m^2)	163,00	177,37	135,60	285,65	169,40	173,77	166,27	145,75	207,70	329,16
A_f	(m^2)	206,90	222,26	176,00	342,10	202,70	201,50	211,24	183,10	264,30	411,60
h	(m)	3,20	3,65	3,20	3,40	2,85	3,50	3,20	3,50	3,50	3,20
f_0	(m^{-1})	0,92	0,90	0,84	0,79	0,96	0,85	0,80	0,77	0,69	0,71
A	(m^2)	655,92	742,19	487,20	948,54	809,19	595,50	546,99	494,82	640,75	953,77
$A_{fl,gr}$	(m^2)	64,47	88,17	31,49	189,00	130,34	100,59	109,86	88,55	140,30	156,84
$A_{wall,gr}$	(m^2)	64,75	0,00	59,99	36,80	0,00	0,00	35,72	0,00	80,50	86,72
P	(m)	38,62	64,76	33,10	89,00	70,80	49,10	52,81	50,40	46,00	85,10
$A_{int,e}$	(m^2)	76,60	65,12	20,98	18,60	49,70	34,90	0,00	3,15	0,00	36,60
$A_{int,u}$	(m^2)	0,00	0,00	24,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$A_{wall,u}$	(m^2)	0,00	11,63	0,00	54,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A_{roof}	(m^2)	156,58	182,90	86,20	234,70	251,75	150,70	126,71	109,84	152,70	222,86
$A_{w,N}$	(m^2)	0,00	0,00	25,09	13,51	0,00	0,00	6,83	0,00	0,00	0,00
$A_{w,NE}$	(m^2)	51,10	3,81	0,00	13,51	0,00	8,08	0,00	9,75	43,46	14,72
$A_{w,E}$	(m^2)	0,00	0,00	19,30	9,42	12,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$A_{w,SE}$	(m^2)	8,80	27,06	0,00	8,16	0,00	4,68	0,00	15,72	26,13	13,29
$A_{w,S}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	70,44	50,52	0,00	14,61	0,00	0,00	0,00
$A_{w,SW}$	(m^2)	0,00	43,44	0,00	0,00	0,00	27,86	0,00	24,96	3,90	61,81
$A_{w,W}$	(m^2)	0,00	0,00	6,98	17,58	23,40	0,00	22,16	0,00	0,00	0,00
$A_{w,NW}$	(m^2)	9,42	4,08	0,00	0,00	0,00	13,46	0,00	2,04	20,86	22,90
U_{wall}	($W/(m^2K)$)	0,29	0,24	0,30	0,43	0,39	0,35	0,32	0,24	0,29	0,30
Rezultati proračunskog modela											
f'_0	(m^{-1}) 5*	0,82	0,84	0,70	0,85	0,91	0,76	0,71	0,67	0,67	0,79
$d_{ti,wall}$	(cm) 7*	11,5	14,1	11,2	7,6	8,4	9,4	10,3	14,0	11,4	10,9
d_{wall}	(cm) 8*	36,5	39,1	36,2	32,6	33,4	34,4	35,3	39,0	36,4	35,9
f_{win}	(-) 9*	0,11	0,11	0,11	0,14	0,11	0,09	0,08	0,11	0,15	0,12
δ	(°) 10, 11*	68,65	180,50	70,51	150,67	191,47	167,92	197,55	161,09	97,26	172,60
F_C	(-) 12*	0,48	0,34	0,30	0,55	0,62	0,30	0,78	0,39	0,34	0,35
P'	(m) 13*	34,62	61,00	27,63	94,66	67,12	43,69	46,64	43,57	45,02	94,10
$f_{win,N}$	(-) 22*	0,44	0,05	0,49	0,15	0,00	0,20	0,16	0,11	0,34	0,17
$f_{win,E}$	(-) 23*	0,43	0,20	0,38	0,15	0,14	0,12	0,00	0,24	0,37	0,12
$f_{win,S}$	(-) 24*	0,06	0,45	0,00	0,56	0,59	0,30	0,34	0,39	0,16	0,33
$f_{win,W}$	(-) 25*	0,07	0,30	0,14	0,13	0,27	0,38	0,51	0,26	0,13	0,38
$f_{fl,gr}$	(-) **	0,24	0,25	0,18	0,25	0,31	0,25	0,23	0,22	0,24	0,23
$f_{wall,gr}$	(-) **	0,10	0,00	0,12	0,04	0,00	0,00	0,07	0,00	0,13	0,09
$f_{int,e}$	(-) **	0,12	0,09	0,04	0,02	0,06	0,06	0,00	0,01	0,00	0,04
$f_{int,u}$	(-) **	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$f_{wall,u}$	(-) **	0,00	0,02	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

* broj formule korištene za izračun

** rezultat statističke analize

[13] Podaci o arhitektima nalaze se u arhivi autora rada.

Podaci očitani iz projekata

Redni broj kuće		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Godina		2018	2018	2019	2019	2019	2019	2019	2019	2019	2020
Mjesto		Petrčane [23231]	Primošten [22202]	Žaborić	Crikvenica [51260]	Dubrovnik [20000]	Zadar [23000]	Blace [20357]	Jelsa [21465]	Blace [20357]	Ugljan [23275]
V_e	(m^3)	328,47	833,10	518,26	931,60	1.502,30	875,12	1.350,44	2.257,80	1.350,44	1.087,40
V	(m^3)	199,27	628,00	325,38	583,03	1.092,78	616,57	866,94	1.413,90	866,94	732,50
A_k	(m^2)	75,20	210,20	112,20	227,83	413,76	225,42	309,62	460,65	309,62	287,15
A_f	(m^2)	94,88	234,30	141,60	288,50	485,97	277,55	376,58	557,00	376,58	331,10
h	(m)	3,48	3,70	3,30	3,10	3,30	3,02	3,30	3,40	3,30	3,30
f_0	(m^{-1})	0,90	0,82	1,40	0,76	0,66	0,73	0,57	0,61	0,52	0,65
A	(m^2)	294,83	685,06	726,54	709,69	985,81	637,09	767,18	1.386,97	702,90	708,55
$A_{fl,gr}$	(m^2)	30,66	91,68	113,81	113,98	157,81	120,66	116,47	231,40	116,47	100,98
$A_{wall,gr}$	(m^2)	3,78	0,00	0,00	75,64	173,59	7,50	40,08	163,56	40,08	0,00
P	(m)	18,40	40,70	75,10	58,06	60,93	66,70	45,20	87,50	45,20	45,80
$A_{int,e}$	(m^2)	0,00	51,30	0,00	19,73	6,36	0,00	6,68	49,10	6,68	0,00
$A_{int,u}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$A_{wall,u}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	27,14	0,00	0,00	0,00	29,11	0,00	0,00
A_{roof}	(m^2)	57,56	183,40	141,60	142,58	203,28	141,28	140,54	289,30	140,54	110,60
$A_{w,N}$	(m^2)	6,48	8,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,28	0,00	70,16
$A_{w,NE}$	(m^2)	0,00	0,00	4,14	1,92	16,10	17,62	0,00	0,00	0,00	0,00
$A_{w,E}$	(m^2)	0,00	3,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	117,90	0,00	90,11
$A_{w,SE}$	(m^2)	0,00	0,00	19,76	10,62	41,05	9,88	15,96	0,00	15,96	0,00
$A_{w,S}$	(m^2)	23,74	21,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,28	0,00	64,01
$A_{w,SW}$	(m^2)	0,00	0,00	13,78	56,23	107,92	6,86	27,72	0,00	27,72	0,00
$A_{w,W}$	(m^2)	0,00	13,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	66,05	0,00	92,75
$A_{w,NW}$	(m^2)	0,00	0,00	8,32	2,56	7,57	24,52	82,44	0,00	82,44	0,00
U_{wall}	(W/(m^2K))	0,37	0,39	0,35	0,33	0,32	0,37	0,24	0,22	0,24	0,21
Rezultati proračunskog modela											
f'_0	(m^{-1}) 5*	0,62	0,78	1,13	0,75	0,75	0,70	0,63	0,81	0,58	0,67
$d_{ti,wall}$	(cm) 7*	9,0	8,4	9,3	10,0	10,5	8,9	13,9	15,0	13,9	16,1
d_{wall}	(cm) 8*	34,0	33,4	34,3	35,0	35,5	33,9	38,9	40,0	38,9	41,1
f_{win}	(-) 9*	0,10	0,07	0,06	0,10	0,18	0,09	0,16	0,14	0,18	0,45
δ	(°) 10, 11*	141,40	168,32	153,86	203,53	182,87	118,55	154,78	151,12	154,78	140,91
F_C	(-) 12*	0,30	0,65	0,30	0,62	0,48	0,30	0,30	0,39	0,30	0,51
P'	(m) 13*	12,73	38,40	60,48	56,86	69,97	63,97	50,09	115,10	50,09	47,22
$f_{win,N}$	(-) 22*	0,21	0,17	0,14	0,03	0,07	0,36	0,33	0,03	0,33	0,22
$f_{win,E}$	(-) 23*	0,00	0,07	0,26	0,09	0,17	0,23	0,06	0,61	0,06	0,28
$f_{win,S}$	(-) 24*	0,79	0,47	0,36	0,47	0,43	0,14	0,17	0,03	0,17	0,20
$f_{win,W}$	(-) 25*	0,00	0,29	0,24	0,41	0,33	0,27	0,44	0,34	0,44	0,29
$f_{fl,gr}$	(-) **	0,20	0,27	0,19	0,20	0,21	0,22	0,18	0,21	0,20	0,16
$f_{wall,gr}$	(-) **	0,01	0,00	0,00	0,11	0,18	0,01	0,05	0,12	0,06	0,00
$f_{int,e}$	(-) **	0,00	0,07	0,00	0,03	0,01	0,00	0,01	0,04	0,01	0,00
$f_{int,u}$	(-) **	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$f_{wall,u}$	(-) **	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00

* broj formule korištene za izračun

** rezultat statističke analize

Podaci očitani iz projekata

Redni broj kuće		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Godina		2020	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021
Mjesto		Žgombici	Jelsa [21465]	Sali [23281]	Sutivan [21403]	Orebić [20250]	Selina	Vinjerac [23247]	Vrboska [21463]	Šmrika [51263]	Lumbarda [20263]
V_e	(m^3)	862,89	830,50	716,61	1.009,00	1.197,35	1.054,18	802,16	1.136,82	828,80	539,55
V	(m^3)	543,65	574,01	468,67	628,69	836,84	636,50	565,62	713,52	534,60	320,87
A_k	(m^2)	184,51	212,74	163,87	240,40	235,97	244,48	176,70	265,70	187,10	110,64
A_f	(m^2)	251,65	262,25	223,94	306,20	349,14	355,50	215,14	333,42	231,10	149,13
h	(m)	3,10	3,00	3,00	3,50	3,40	2,70	3,30	3,50	3,40	3,00
f_0	(m^{-1})	0,90	0,85	0,96	0,66	0,73	0,71	0,79	0,82	0,85	0,86
A	(m^2)	779,62	704,01	686,73	669,37	872,39	750,16	637,00	928,21	708,38	464,34
$A_{fl,gr}$	(m^2)	46,69	150,37	136,99	86,01	73,05	114,62	103,85	199,11	131,17	68,10
$A_{wall,gr}$	(m^2)	21,28	80,55	140,16	100,11	26,24	0,00	0,00	0,00	66,64	0,00
P	(m)	85,20	74,60	76,94	41,03	37,98	64,63	58,76	86,33	67,60	47,54
$A_{int,e}$	(m^2)	17,70	0,00	0,00	0,00	8,98	0,00	12,10	0,00	18,20	8,32
$A_{int,u}$	(m^2)	36,60	0,00	0,00	0,00	101,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$A_{wall,u}$	(m^2)	19,18	16,18	0,00	0,00	27,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A_{roof}	(m^2)	151,46	167,86	113,96	114,81	194,88	158,78	142,23	232,99	169,20	91,73
$A_{w,N}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	58,12	13,68	7,16	17,88	9,17	0,00	29,99
$A_{w,NE}$	(m^2)	28,05	0,00	1,66	0,00	0,00	2,40	0,00	44,38	5,40	0,00
$A_{w,E}$	(m^2)	0,00	7,56	0,00	18,63	4,37	12,63	9,35	9,17	0,00	4,38
$A_{w,SE}$	(m^2)	4,18	0,00	3,68	0,00	0,00	2,40	0,00	22,81	3,26	0,00
$A_{w,S}$	(m^2)	0,00	29,54	0,00	5,19	73,47	13,58	10,47	0,00	0,00	27,15
$A_{w,SW}$	(m^2)	38,80	0,00	6,98	0,00	0,00	0,00	0,00	18,56	39,89	0,00
$A_{w,W}$	(m^2)	0,00	6,26	0,00	15,12	16,62	6,31	6,08	0,00	0,00	0,00
$A_{w,NW}$	(m^2)	27,06	0,00	54,39	0,00	0,00	14,44	0,00	47,94	8,71	0,00
U_{wall}	($W/(m^2K)$)	0,33	0,31	0,20	0,27	0,35	0,34	0,27	0,30	0,32	0,27
Rezultati proračunskog modela											
f'_0	(m^{-1}) 5*	0,86	0,80	0,86	0,67	0,78	0,73	0,74	0,85	0,80	0,70
$d_{ti,wall}$	(cm) 7*	10,1	10,7	16,9	12,4	9,4	9,7	12,3	11,1	10,4	12,3
d_{wall}	(cm) 8*	35,1	35,7	41,9	37,4	34,4	34,7	37,3	36,1	35,4	37,3
f_{win}	(-) 9*	0,13	0,06	0,10	0,14	0,12	0,08	0,07	0,16	0,08	0,13
δ	(°) 10, 11*	144,87	177,30	142,18	68,95	167,42	130,11	99,76	108,86	189,22	85,85
F_C	(-) 12*	0,50	1,00	0,26	0,51	0,50	0,63	0,30	0,36	0,66	0,30
P'	(m) 13*	81,33	70,31	69,03	41,26	40,44	65,95	54,74	90,34	63,67	38,81
$f_{win,N}$	(-) 22*	0,28	0,00	0,42	0,60	0,13	0,26	0,41	0,36	0,12	0,49
$f_{win,E}$	(-) 23*	0,16	0,17	0,04	0,19	0,04	0,26	0,21	0,28	0,08	0,07
$f_{win,S}$	(-) 24*	0,22	0,68	0,08	0,05	0,68	0,25	0,24	0,14	0,38	0,44
$f_{win,W}$	(-) 25*	0,34	0,14	0,46	0,16	0,15	0,23	0,14	0,22	0,42	0,00
$f_{fl,gr}$	(-) **	0,19	0,24	0,17	0,17	0,22	0,21	0,22	0,25	0,24	0,20
$f_{wall,gr}$	(-) **	0,03	0,11	0,20	0,15	0,03	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00
$f_{int,e}$	(-) **	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,03	0,02
$f_{int,u}$	(-) **	0,05	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$f_{wall,u}$	(-) **	0,02	0,02	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

* broj formule korištene za izračun

** rezultat statističke analize

Podaci očitani iz projekata

Redni broj kuće		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Godina		2021	2021	2021	2022	2022	2022	2022	2022	2022	2022
Mjesto		Krk [51500]	Vinjerac [23247]	Selina	Koločep [20221]	Moščenica [44253]	Preko [23273]	Povljana [23249]	Povljana [23249]	Kožino	Tribunj [22212]
V_e	(m^3)	952,22	873,39	1.118,30	806,24	248,10	728,30	876,32	964,55	1.246,25	492,09
V	(m^3)	781,72	574,55	660,30	478,90	148,64	416,46	590,93	583,43	813,50	292,51
A_k	(m^2)	269,56	184,17	254,00	192,55	57,17	152,50	189,12	207,21	292,79	105,60
A_f	(m^2)	295,22	234,62	375,60	242,36	72,97	189,30	241,48	254,18	381,32	134,82
h	(m)	3,20	3,20	2,70	3,00	3,00	3,20	3,50	3,50	3,00	3,65
f_0	(m^{-1})	0,73	0,80	0,75	0,77	1,33	0,92	1,09	0,66	0,83	1,00
A	(m^2)	693,98	701,16	843,31	618,87	330,02	670,62	957,03	639,98	1.030,90	492,88
$A_{fl,gr}$	(m^2)	145,22	108,59	124,22	112,00	57,17	65,00	192,65	165,53	91,42	111,33
$A_{wall,gr}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	86,53	0,00	25,06	10,84	80,29	65,83	0,00
P	(m)	54,95	68,67	75,70	54,80	51,30	52,70	135,60	75,97	67,31	57,87
$A_{int,e}$	(m^2)	27,55	0,00	0,00	0,00	0,00	70,35	0,00	3,11	48,10	0,00
$A_{int,u}$	(m^2)	0,00	0,00	20,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$A_{wall,u}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,18
A_{roof}	(m^2)	173,05	144,09	178,94	141,28	72,97	162,78	241,47	194,95	162,60	134,82
$A_{w,N}$	(m^2)	0,00	9,26	7,16	0,00	21,59	26,32	0,00	13,99	0,00	0,00
$A_{w,NE}$	(m^2)	107,64	13,09	2,40	66,31	0,00	0,00	65,22	24,67	26,00	6,33
$A_{w,E}$	(m^2)	0,00	4,77	12,63	0,00	4,00	6,60	0,00	0,00	0,00	0,00
$A_{w,SE}$	(m^2)	34,32	0,00	2,40	0,00	0,00	0,00	1,68	5,36	56,41	7,99
$A_{w,S}$	(m^2)	39,33	4,95	13,58	0,00	21,59	11,62	0,00	0,00	0,00	0,00
$A_{w,SW}$	(m^2)	65,31	4,14	0,00	19,96	0,00	0,00	7,22	0,00	54,43	0,00
$A_{w,W}$	(m^2)	0,00	0,00	6,31	0,00	15,82	3,06	0,00	0,00	0,00	0,00
$A_{w,NW}$	(m^2)	16,66	6,40	14,44	0,00	0,00	0,00	1,68	10,55	30,67	4,89
U_{wall}	($W/(m^2K)$)	0,23	0,27	0,34	0,32	0,20	0,34	0,24	0,35	0,39	0,32
Rezultati proračunskog modela											
f'_0	(m^{-1}) 5*	0,72	0,77	0,78	0,72	0,84	0,83	1,05	0,66	0,89	0,79
$d_{ti,wall}$	(cm) 7*	14,6	12,4	9,7	10,3	16,9	9,7	14,0	9,4	8,4	10,5
d_{wall}	(cm) 8*	39,6	37,4	34,7	35,3	41,9	34,7	39,0	34,4	33,4	35,5
f_{win}	(-) 9*	0,38	0,06	0,07	0,14	0,19	0,07	0,08	0,09	0,16	0,04
δ	(°) 10, 11*	127,25	86,95	130,11	86,65	135,20	73,77	66,13	59,70	150,27	105,34
F_C	(-) 12*	0,60	0,41	0,63	0,31	0,25	0,30	0,42	0,31	0,64	0,35
P'	(m) 13*	54,20	65,82	78,78	51,14	32,32	47,54	130,11	75,26	72,63	45,81
$f_{win,N}$	(-) 22*	0,24	0,45	0,26	0,38	0,34	0,55	0,44	0,58	0,17	0,29
$f_{win,E}$	(-) 23*	0,27	0,27	0,26	0,38	0,06	0,14	0,44	0,28	0,25	0,37
$f_{win,S}$	(-) 24*	0,34	0,16	0,25	0,12	0,34	0,24	0,06	0,05	0,33	0,21
$f_{win,W}$	(-) 25*	0,16	0,12	0,23	0,12	0,25	0,06	0,06	0,10	0,25	0,13
$f_{fl,gr}$	(-) **	0,25	0,21	0,21	0,23	0,22	0,24	0,25	0,30	0,16	0,27
$f_{wall,gr}$	(-) **	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,04	0,01	0,13	0,06	0,00
$f_{int,e}$	(-) **	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,05	0,00
$f_{int,u}$	(-) **	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$f_{wall,u}$	(-) **	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03

* broj formule korištene za izračun

** rezultat statističke analize

Podaci očitani iz projekata

Redni broj kuće		41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Godina		2022	2022	2022	2022	2023	2023	2023	2023	2023	2023
Mjesto		Starigrad Paklenica [23244]	Zadar [23000]	Rovinj (Rovigno) [52210]	Zadar [23000]	Ladići	Zaton [22215]	Motovun [52424]	Primošten [22202]	Primošten [22202]	Ždrelac [23263]
V_e	(m^3)	448,55	1.045,68	1.979,74	1.041,50	987,20	884,45	1.525,08	980,82	998,20	607,10
V	(m^3)	292,24	658,33	1.304,70	700,05	746,50	599,69	729,48	656,91	669,53	371,60
A_k	(m^2)	114,97	247,56	439,40	259,90	216,10	234,37	267,34	238,67	243,05	120,44
A_f	(m^2)	151,11	323,00	502,50	320,60	252,20	297,38	353,58	281,62	286,45	157,30
h	(m)	2,95	3,30	4,20	3,00	3,10	2,90	2,75	3,35	3,35	3,00
f_0	(m^{-1})	0,95	0,76	0,72	0,75	0,71	0,78	0,74	0,82	0,81	0,84
A	(m^2)	424,46	792,63	1.425,21	783,52	697,95	689,96	1.133,44	803,78	810,64	511,48
$A_{fl,gr}$	(m^2)	87,74	150,21	286,30	132,04	145,39	100,08	336,38	123,37	126,00	78,18
$A_{wall,gr}$	(m^2)	0,00	97,32	163,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P	(m)	45,91	56,58	143,30	70,20	62,70	46,65	133,78	45,61	45,33	38,50
$A_{int,e}$	(m^2)	0,00	23,26	20,90	14,40	2,69	0,00	18,69	73,17	73,17	26,10
$A_{int,u}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$A_{wall,u}$	(m^2)	0,00	30,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A_{roof}	(m^2)	88,28	201,79	357,60	167,50	184,37	119,33	249,31	208,25	213,06	116,50
$A_{w,N}$	(m^2)	2,34	0,00	71,14	28,21	8,56	1,44	0,00	14,36	16,86	0,00
$A_{w,NE}$	(m^2)	4,77	0,00	0,00	0,00	0,00	7,37	58,16	0,00	0,00	15,06
$A_{w,E}$	(m^2)	0,00	7,84	32,42	1,44	6,68	3,53	0,00	6,00	6,25	0,00
$A_{w,SE}$	(m^2)	6,22	0,00	0,00	0,00	0,00	10,92	11,55	0,00	0,00	3,90
$A_{w,S}$	(m^2)	0,00	38,88	88,20	12,45	30,72	5,46	0,00	36,66	34,89	0,00
$A_{w,SW}$	(m^2)	10,59	0,00	0,00	0,00	0,00	11,66	27,20	0,00	0,00	31,60
$A_{w,W}$	(m^2)	0,00	45,32	34,76	19,98	8,11	14,54	0,00	32,57	32,57	0,00
$A_{w,NW}$	(m^2)	7,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,65	0,00	0,00	5,22
U_{wall}	($W/(m^2K)$)	0,32	0,24	0,26	0,33	0,24	0,35	0,24	0,33	0,33	0,24
Rezultati proračunskog modela											
f'_0	(m^{-1}) 5*	0,73	0,77	0,91	0,76	0,71	0,75	0,86	0,82	0,81	0,72
$d_{ti,wall}$	(cm) 7*	10,3	14,1	13,1	10,0	13,7	9,4	14,1	9,9	9,9	14,0
d_{wall}	(cm) 8*	35,3	39,1	38,1	35,0	38,7	34,4	39,1	34,9	34,9	39,0
f_{win}	(-) 9*	0,07	0,12	0,16	0,08	0,08	0,08	0,09	0,11	0,11	0,11
δ	(°) 10, 11*	141,66	216,65	124,40	125,08	153,90	175,81	109,09	177,84	172,65	161,69
F_C	(-) 12*	0,30	0,25	0,73	0,61	0,30	0,36	0,30	0,30	0,30	0,30
P'	(m) 13*	35,24	57,58	180,41	71,35	62,60	44,90	154,40	45,44	45,42	32,69
$f_{win,N}$	(-) 22*	0,27	0,00	0,31	0,45	0,16	0,09	0,32	0,16	0,19	0,18
$f_{win,E}$	(-) 23*	0,18	0,09	0,14	0,02	0,12	0,23	0,32	0,07	0,07	0,17
$f_{win,S}$	(-) 24*	0,27	0,42	0,39	0,20	0,57	0,30	0,18	0,41	0,39	0,32
$f_{win,W}$	(-) 25*	0,29	0,49	0,15	0,32	0,15	0,37	0,18	0,36	0,36	0,33
$f_{fl,gr}$	(-) **	0,21	0,25	0,25	0,21	0,26	0,17	0,22	0,26	0,26	0,23
$f_{wall,gr}$	(-) **	0,00	0,12	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$f_{int,e}$	(-) **	0,00	0,03	0,01	0,02	0,00	0,00	0,02	0,09	0,09	0,05
$f_{int,u}$	(-) **	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$f_{wall,u}$	(-) **	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

* broj formule korištene za izračun

** rezultat statističke analize

Podaci očitani iz projekata

Redni broj kuće		51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Godina		2023	2023	2023	2023	2023	2023	2023	2023	2023	2024
Mjesto		Zaton [22215]	Sali [23281]	Ladići	Primošten [22202]	Povlja [21413]	Zaton [22215]	21217 Kaštel Štafilić	Zaton [22215]	Vrboska [21463]	Blato [20271]
V_e	(m^3)	1.044,11	1.252,46	983,11	1.034,86	613,78	1.253,80	966,65	1.477,81	590,83	1.655,22
V	(m^3)	733,97	800,62	740,70	689,83	419,61	886,81	689,90	1.029,81	410,04	1.097,67
A_k	(m^2)	285,48	284,52	214,41	251,21	153,13	344,42	273,22	400,28	161,23	368,73
A_f	(m^2)	350,37	396,92	251,15	297,32	187,70	418,50	336,46	494,83	203,35	457,98
h	(m)	2,90	2,65	3,10	3,35	3,15	2,90	2,85	2,90	2,81	3,25
f_0	(m^{-1})	0,75	0,98	0,71	0,82	0,73	0,76	0,68	0,71	0,87	0,79
A	(m^2)	779,43	1.230,92	694,47	844,24	448,67	953,39	655,29	1.048,80	511,48	1.303,82
$A_{fl,gr}$	(m^2)	126,19	198,70	144,47	122,00	82,22	179,37	64,43	194,57	33,90	164,40
$A_{wall,gr}$	(m^2)	0,00	165,76	0,00	0,00	107,86	0,00	0,00	0,00	0,00	203,28
P	(m)	55,03	125,84	62,38	55,21	39,96	70,56	35,53	76,21	35,16	60,46
$A_{int,e}$	(m^2)	0,00	0,00	2,69	74,82	0,00	0,00	8,26	0,00	0,00	130,78
$A_{int,u}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	49,09	0,00	53,51	0,00
$A_{wall,u}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	17,58	0,00	0,00	19,13	0,00	0,00	81,15
A_{roof}	(m^2)	150,29	206,83	183,12	212,90	93,85	204,41	145,44	220,61	98,42	290,33
$A_{w,N}$	(m^2)	0,00	0,00	8,56	15,40	0,00	0,00	2,55	25,41	0,00	0,00
$A_{w,NE}$	(m^2)	27,07	0,00	0,00	0,00	0,00	22,00	0,00	12,36	23,04	8,55
$A_{w,E}$	(m^2)	0,00	51,24	6,68	18,60	15,84	0,00	7,55	12,18	7,96	0,00
$A_{w,SE}$	(m^2)	16,38	0,00	0,00	0,00	0,00	17,22	0,00	0,00	17,08	6,48
$A_{w,S}$	(m^2)	0,00	0,00	30,72	32,82	0,00	0,00	34,04	33,18	0,00	0,00
$A_{w,SW}$	(m^2)	17,06	0,00	0,00	0,00	0,00	33,65	0,00	9,55	30,05	54,75
$A_{w,W}$	(m^2)	0,00	0,00	8,11	30,94	0,00	0,00	23,21	1,44	0,00	0,00
$A_{w,NW}$	(m^2)	1,44	0,00	0,00	0,00	0,00	5,64	0,00	0,00	15,38	2,60
U_{wall}	(W/(m^2K))	0,35	0,32	0,24	0,33	0,35	0,35	0,30	0,35	0,32	0,33
Rezultati proračunskog modela											
f'_0	(m^{-1}) 5*	0,76	1,06	0,70	0,83	0,62	0,82	0,67	0,81	0,73	0,93
$d_{ti,wall}$	(cm) 7*	9,4	10,2	13,7	9,9	9,4	9,4	11,1	9,4	10,3	10,1
d_{wall}	(cm) 8*	34,4	35,2	38,7	34,9	34,4	34,4	36,1	34,4	35,3	35,1
f_{win}	(-) 9*	0,08	0,04	0,08	0,12	0,04	0,08	0,10	0,09	0,18	0,06
δ	(°) 10, 11*	120,46	90,00	153,90	163,01	90,00	148,35	194,11	107,97	137,92	192,45
F_C	(-) 12*	0,36	0,30	0,30	0,30	0,30	0,37	0,36	0,37	0,75	0,30
P'	(m) 13*	55,98	136,01	62,19	55,99	34,05	76,29	35,22	87,04	29,58	71,71
$f_{win,N}$	(-) 22*	0,23	0,00	0,16	0,16	0,00	0,18	0,04	0,34	0,21	0,08
$f_{win,E}$	(-) 23*	0,35	1,00	0,12	0,19	1,00	0,25	0,11	0,20	0,30	0,10
$f_{win,S}$	(-) 24*	0,27	0,00	0,57	0,34	0,00	0,32	0,51	0,40	0,25	0,42
$f_{win,W}$	(-) 25*	0,15	0,00	0,15	0,32	0,00	0,25	0,34	0,07	0,24	0,40
$f_{fl,gr}$	(-) **	0,19	0,17	0,26	0,25	0,21	0,21	0,22	0,21	0,19	0,22
$f_{wall,gr}$	(-) **	0,00	0,13	0,00	0,00	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16
$f_{int,e}$	(-) **	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,10
$f_{int,u}$	(-) **	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,10	0,00
$f_{wall,u}$	(-) **	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,06

* broj formule korištene za izračun

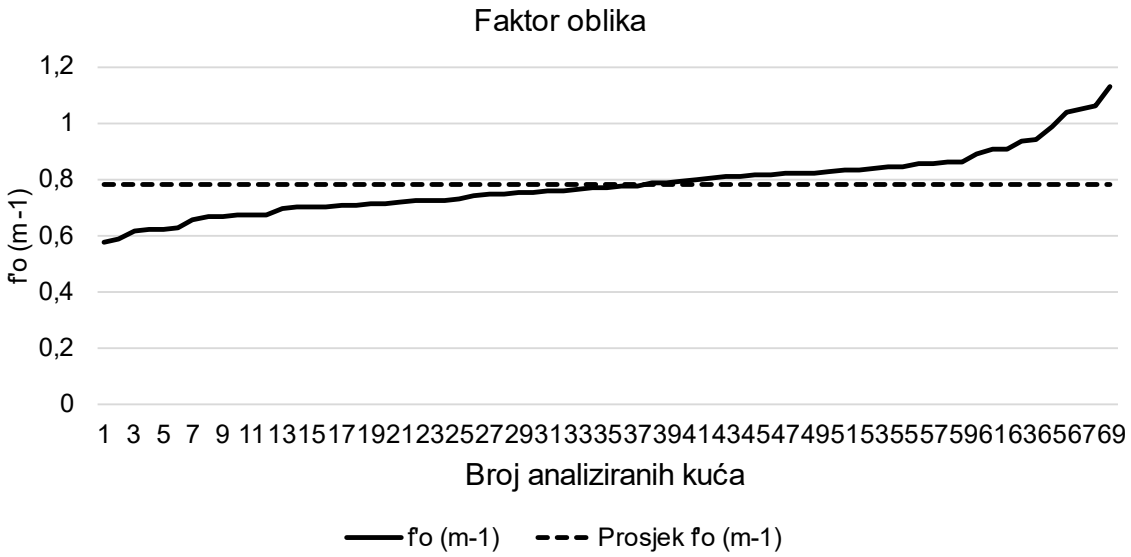
** rezultat statističke analize

Podaci očitani iz projekata

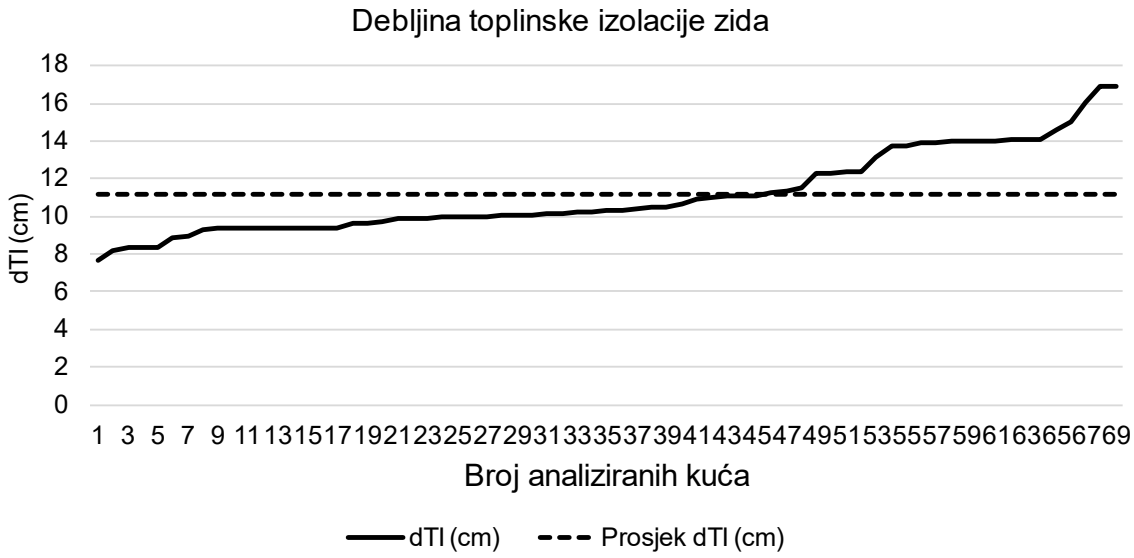
Redni broj kuće		61	62	63	64	65	66	67	68	69
Godina		2024	2024	2024	2024	2024	2024	2024	2024	2025
Mjesto		Murvica	Pula [52100]	Brtonigla (Vertenegl io) [52474]	Dubrovnik [20000]	Porat, o, Krk	Murter [22243]	Ždrelac [23263]	Kućište [20267]	Drašnice [21328]
V_e	(m^3)	693,90	1.690,42	1.438,97	1.071,60	1.254,60	819,00	520,19	1.560,84	1.257,18
V	(m^3)	509,75	1.006,35	825,11	691,90	781,20	578,20	330,26	980,40	791,36
A_k	(m^2)	171,50	349,50	312,79	271,21	279,07	188,07	130,77	352,70	288,27
A_f	(m^2)	227,30	481,51	399,40	346,74	465,23	237,48	161,30	454,11	360,44
h	(m)	3,00	3,00	3,10	2,90	3,00	3,20	3,20	3,40	3,20
f_0	(m^{-1})	0,66	0,79	0,87	0,80	0,67	1,11	0,76	0,64	0,77
A	(m^2)	457,90	1.334,25	1.252,48	855,67	841,96	908,27	397,17	1.006,58	965,26
$A_{fl,gr}$	(m^2)	86,80	293,10	168,04	48,70	166,82	137,40	69,85	80,20	111,38
$A_{wall,gr}$	(m^2)	19,84	0,00	0,00	56,28	0,00	46,82	0,00	27,20	159,40
P	(m)	38,10	97,40	96,02	36,40	64,60	72,30	35,95	63,10	49,25
$A_{int,e}$	(m^2)	0,00	45,67	105,22	66,60	0,00	43,68	0,00	7,10	16,48
$A_{int,u}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	94,06	0,00
$A_{wall,u}$	(m^2)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	28,56	0,00	51,92	10,29
A_{roof}	(m^2)	88,88	339,10	311,82	126,40	200,00	195,87	80,65	195,10	143,00
$A_{w,N}$	(m^2)	34,55	6,23	0,00	59,31	0,00	0,00	0,00	6,24	18,05
$A_{w,NE}$	(m^2)	0,00	16,58	14,61	0,00	69,62	6,88	0,75	0,00	0,00
$A_{w,E}$	(m^2)	12,45	1,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	39,56	12,72
$A_{w,SE}$	(m^2)	0,00	0,00	37,61	2,10	15,08	16,33	2,24	0,00	0,00
$A_{w,S}$	(m^2)	42,11	17,02	0,00	123,36	0,00	0,00	0,00	30,82	38,27
$A_{w,SW}$	(m^2)	0,00	29,53	23,92	0,00	20,28	16,00	0,75	0,00	0,00
$A_{w,W}$	(m^2)	12,45	33,75	0,00	2,10	0,00	0,00	0,00	28,73	41,77
$A_{w,NW}$	(m^2)	0,00	6,23	55,40	0,00	17,73	4,78	25,72	0,00	0,00
U_{wall}	($W/(m^2K)$)	0,33	0,24	0,30	0,30	0,35	0,33	0,33	0,40	0,33
Rezultati proračunskog modela										
f'_0	(m^{-1}) 5*	0,59	0,94	0,99	0,82	0,73	1,04	0,62	0,75	0,83
$d_{ti,wall}$	(cm) 7*	10,0	14,0	11,1	11,0	9,4	10,2	9,9	8,2	10,0
d_{wall}	(cm) 8*	35,0	39,0	36,1	36,0	34,4	35,2	34,9	33,2	35,0
f_{win}	(-) 9*	0,22	0,08	0,11	0,22	0,15	0,05	0,07	0,10	0,11
δ	(°) 10, 11*	118,77	185,22	141,37	123,38	98,81	153,66	135,00	160,09	174,27
F_C	(-) 12*	0,30	0,75	0,53	0,30	0,30	0,30	0,36	0,30	0,45
P'	(m) 13*	33,82	116,34	108,69	37,35	69,86	67,82	28,99	73,39	53,30
$f_{win,N}$	(-) 22*	0,34	0,16	0,27	0,32	0,36	0,13	0,45	0,06	0,16
$f_{win,E}$	(-) 23*	0,12	0,09	0,20	0,01	0,35	0,26	0,05	0,38	0,11
$f_{win,S}$	(-) 24*	0,41	0,29	0,23	0,67	0,14	0,37	0,05	0,29	0,35
$f_{win,W}$	(-) 25*	0,12	0,47	0,30	0,01	0,15	0,24	0,45	0,27	0,38
$f_{fl,gr}$	(-) **	0,19	0,25	0,25	0,15	0,24	0,22	0,20	0,19	0,15
$f_{wall,gr}$	(-) **	0,04	0,00	0,00	0,07	0,00	0,05	0,00	0,03	0,17
$f_{int,e}$	(-) **	0,00	0,03	0,08	0,08	0,00	0,05	0,00	0,01	0,02
$f_{int,u}$	(-) **	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00
$f_{wall,u}$	(-) **	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,05	0,01

* broj formule korištene za izračun

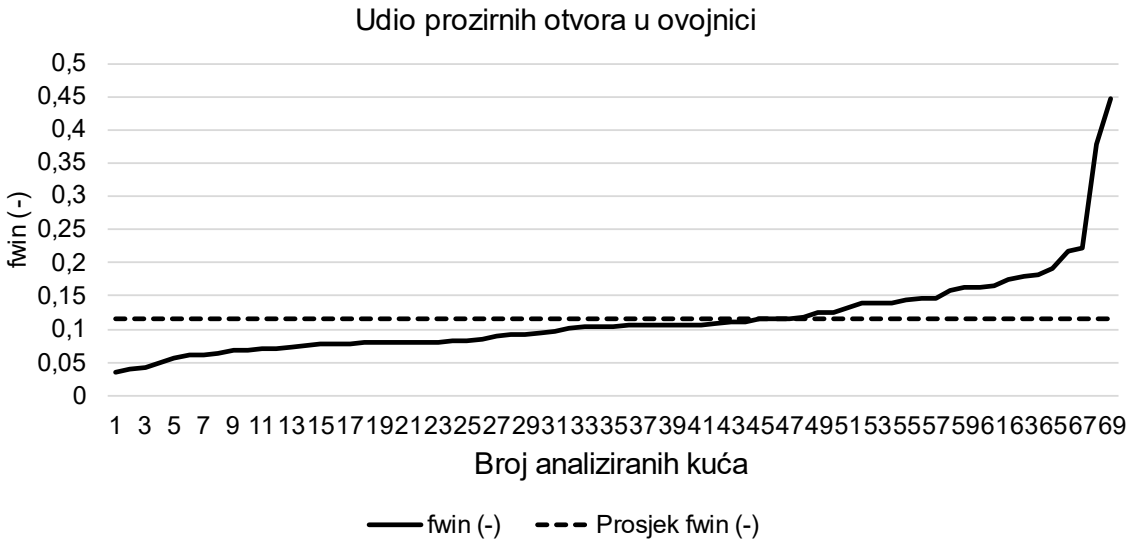
** rezultat statističke analize



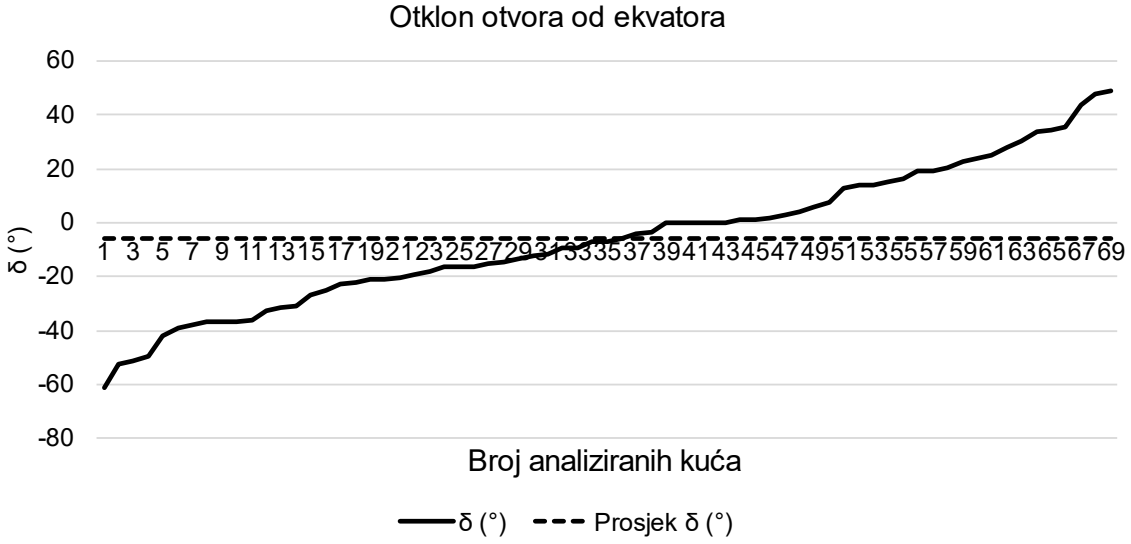
Slika 82: Faktor oblika analiziranih kuća (primorska klima)



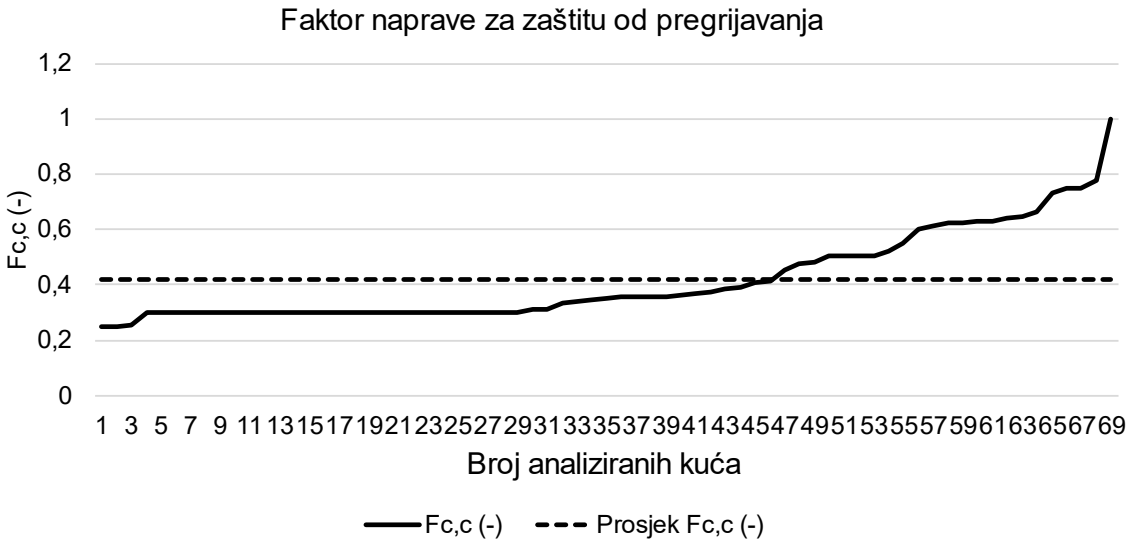
Slika 83: Debljina toplinske izolacije zida analiziranih kuća (primorska klima)



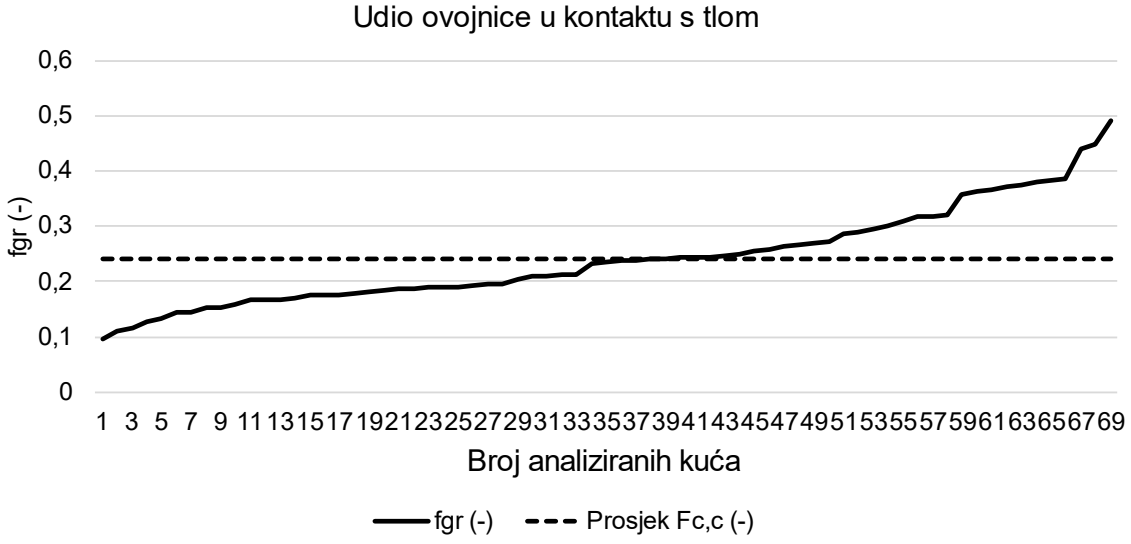
Slika 84: Udio prozirnih otvora u ovojnici analiziranih kuća (primorska klima)



Slika 85: Otklon otvora od ekvatora analiziranih kuća (primorska klima)



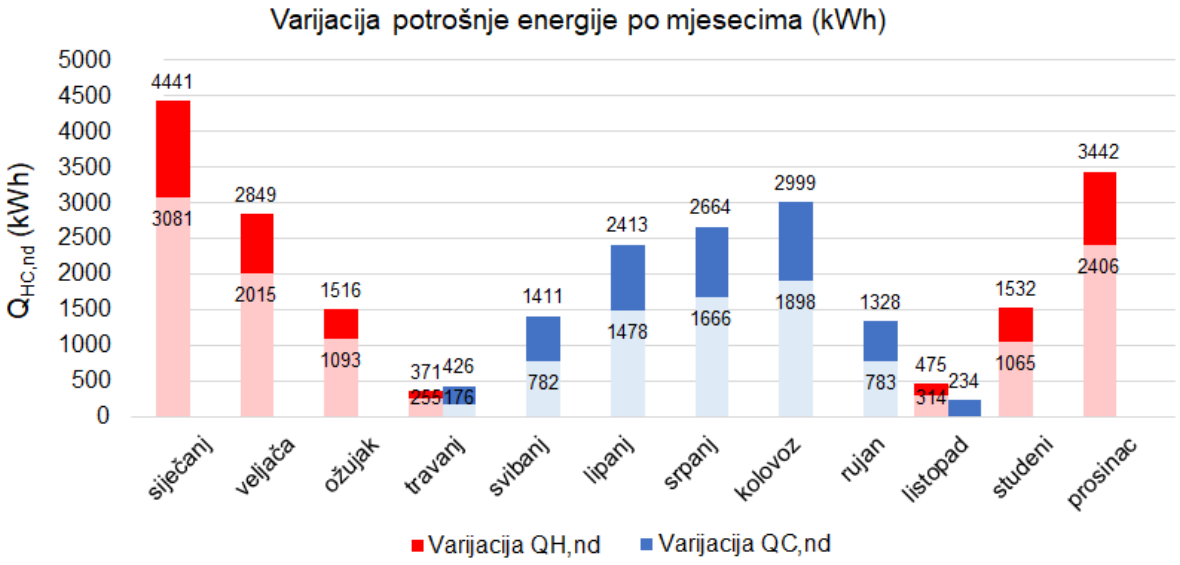
Slika 86: Faktor naprave za zaštitu od pregrijavanja analiziranih kuća (primorska klima)



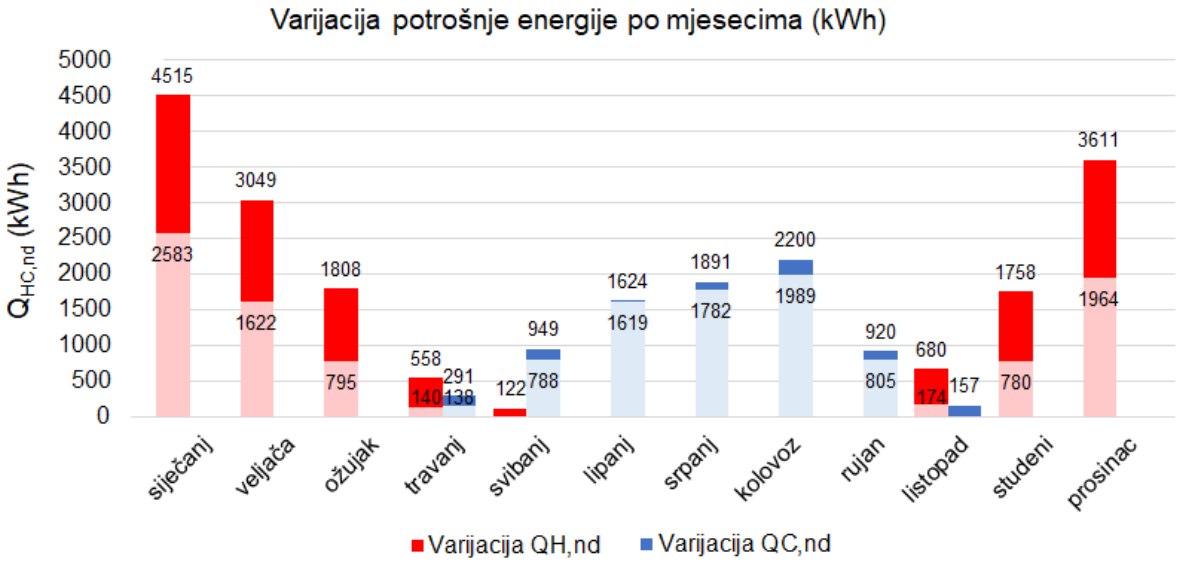
Slika 87: Udio ovojnice u kontaktu s tlom analiziranih kuća (primorska klima)

Prilog 2: Vrednovanje čimbenika arhitektonskog oblikovanja – utjecaj na mjesečnu potrošnju

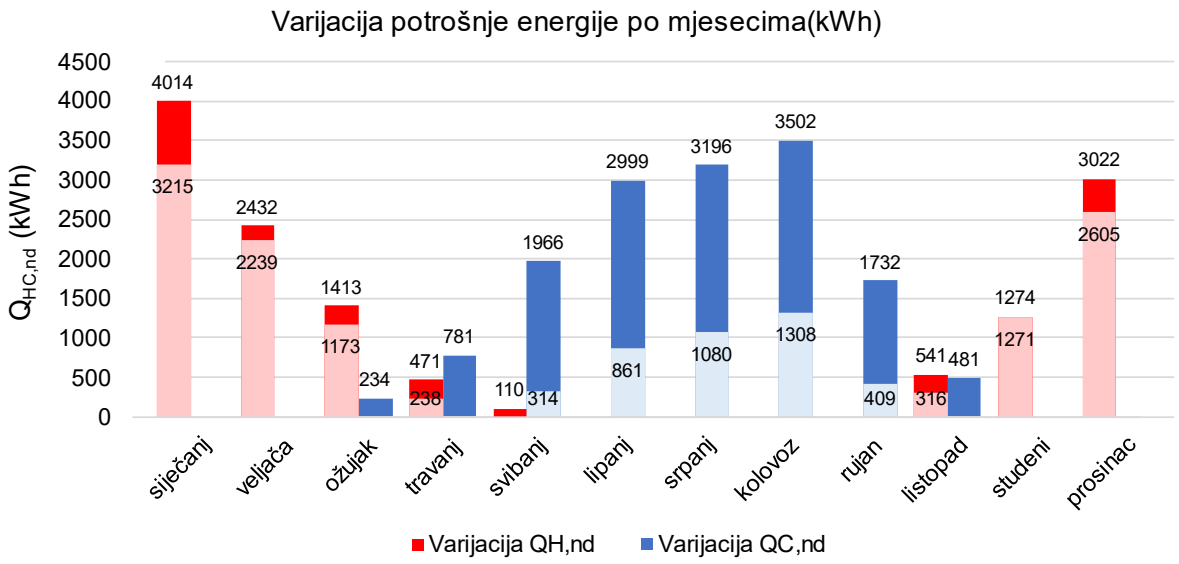
1. Kontinentalna klima, osnovni scenarij proračuna



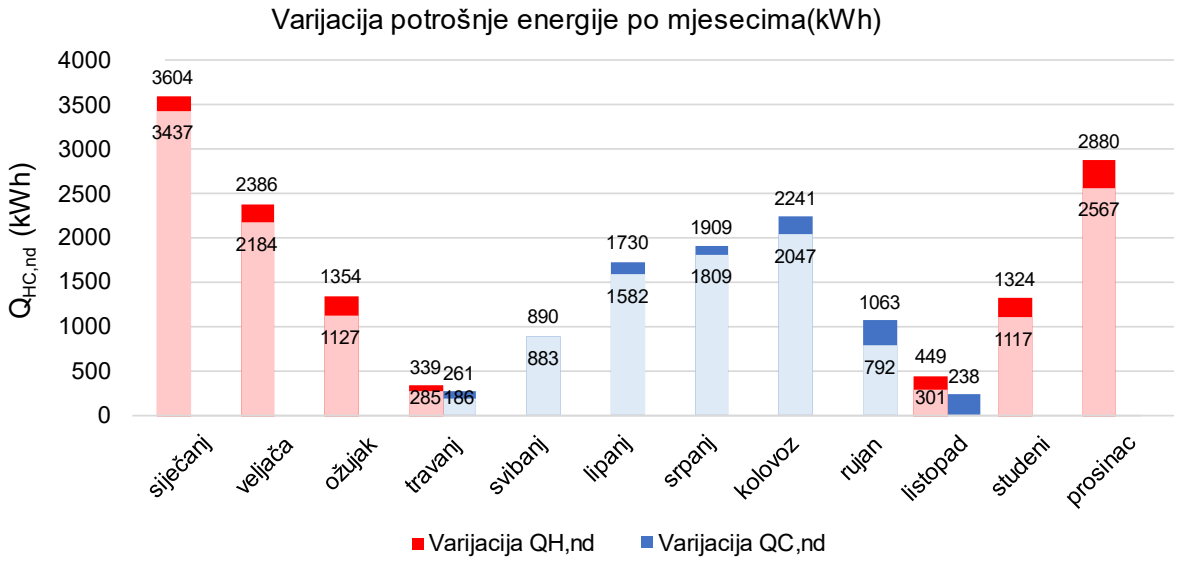
Slika 88: Utjecaj faktora oblika na mjesečnu potrošnju energije (kontinentalna klima, osnovni scenarij proračuna)



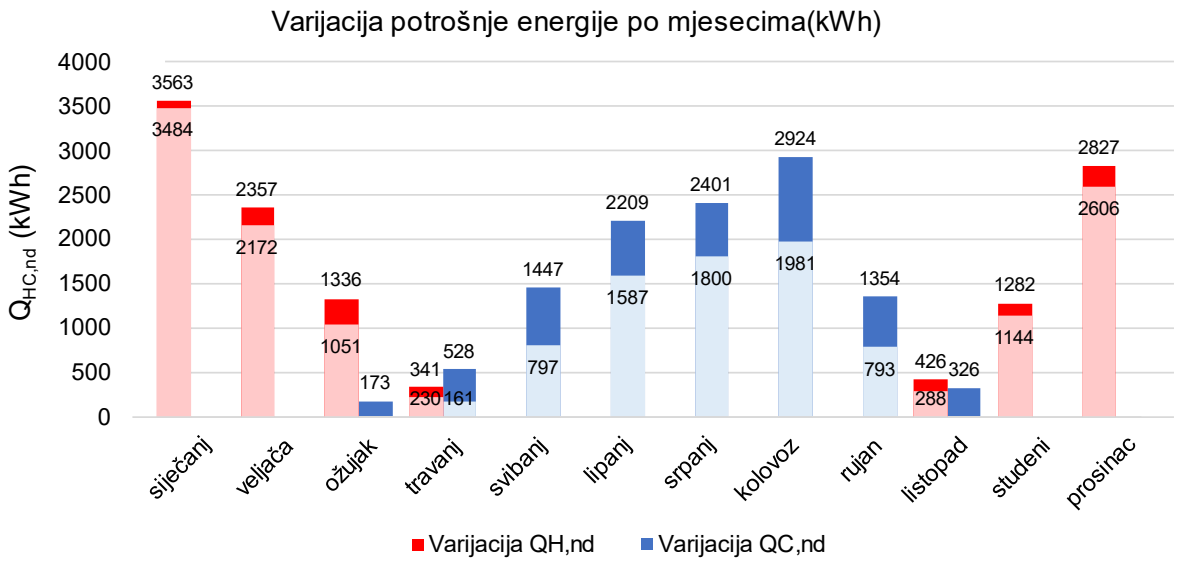
Slika 89: Utjecaj izolativnosti ovojnice na mjesečnu potrošnju energije (kontinentalna klima, osnovni scenarij proračuna)



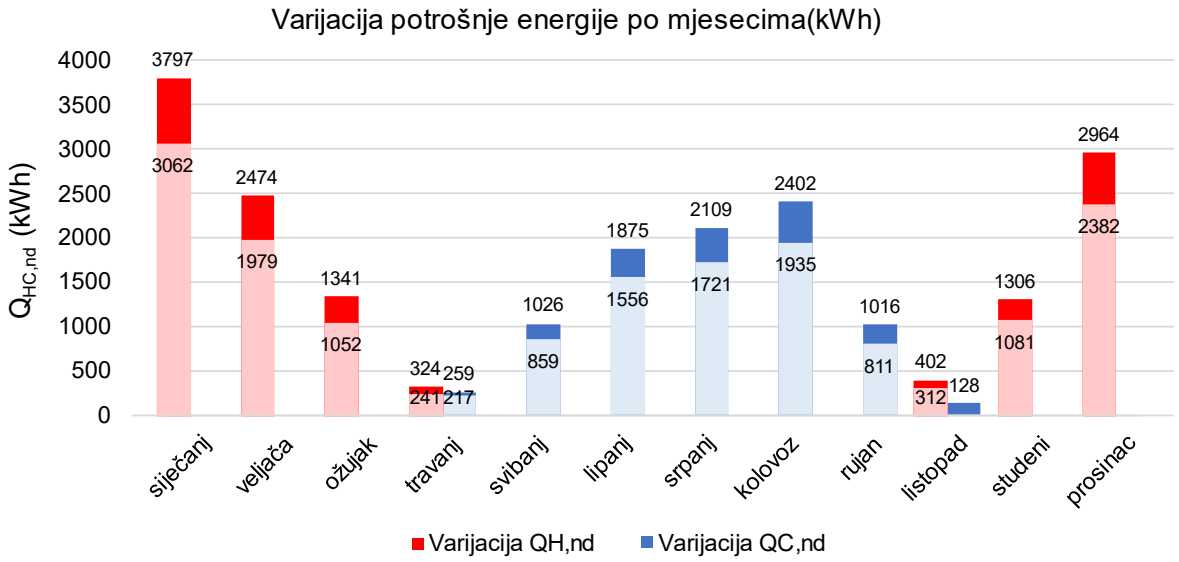
Slika 90: Utjecaj udjela prozirnih otvora na mjesečnu potrošnju energije (kontinentalna klima, osnovni scenarij proračuna)



Slika 91: Utjecaj orijentacije na mjesečnu potrošnju energije (kontinentalna klima, osnovni scenarij proračuna)

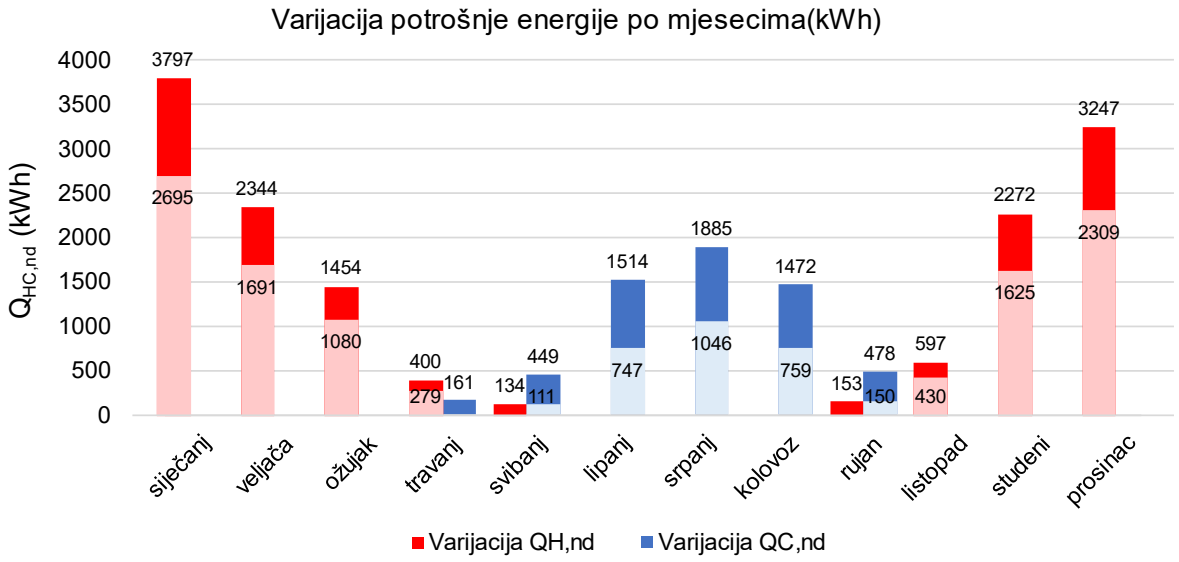


Slika 92: Utjecaj zaštite od pregrijavanja na mjesečnu potrošnju energije (kontinentalna klima, osnovni scenarij proračuna)

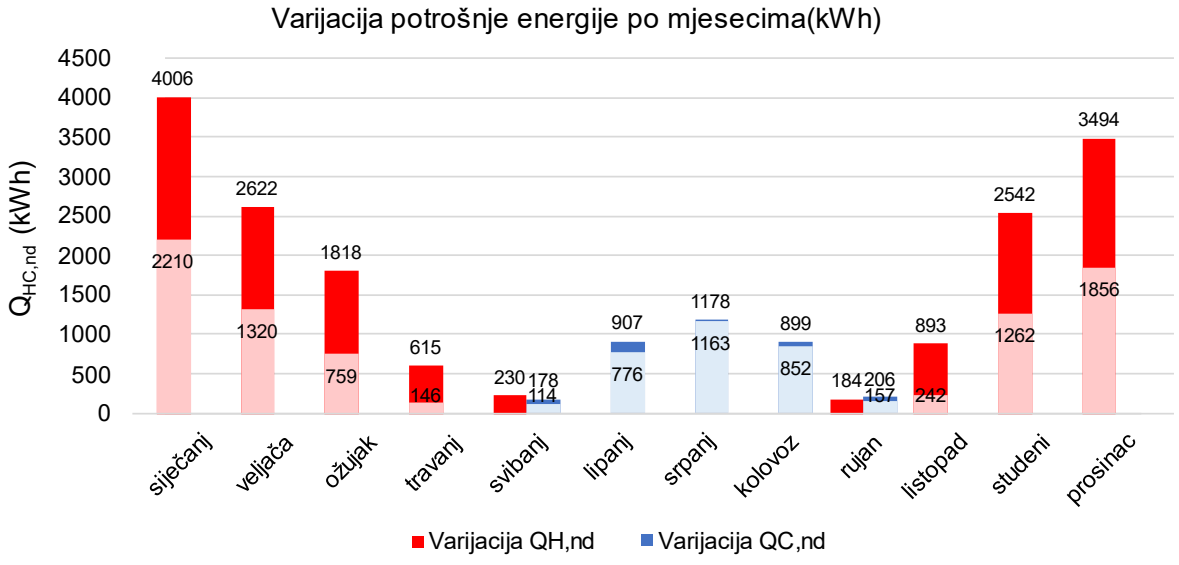


Slika 93: Utjecaj kontakta ovojnice s tlom na mjesečnu potrošnju energije (kontinentalna klima, osnovni scenarij proračuna)

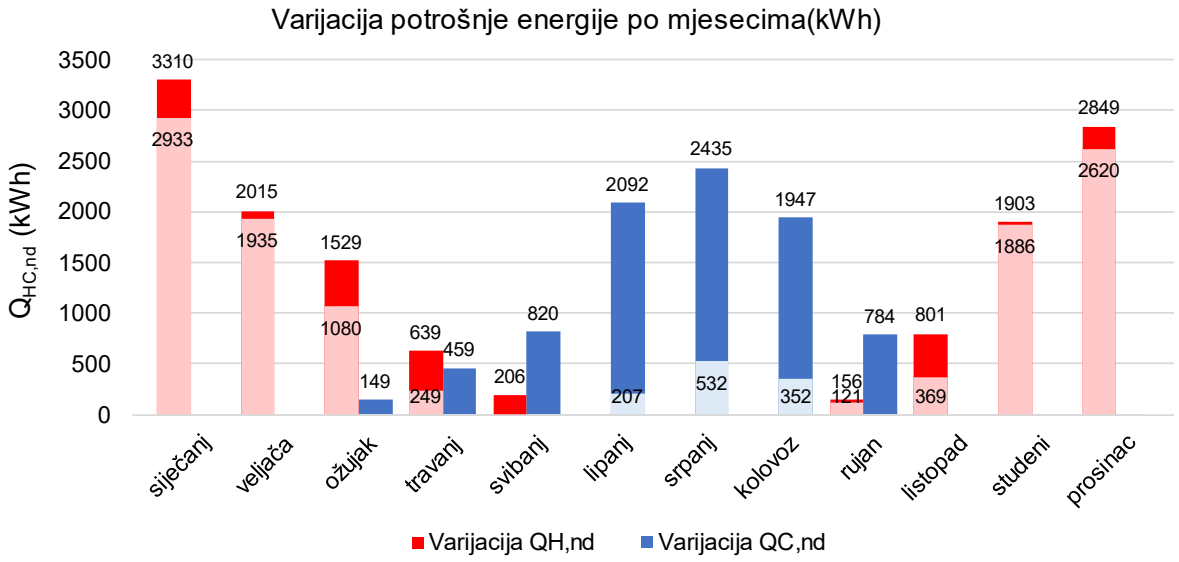
2. Kontinentalna klima, varijantni scenarij proračuna



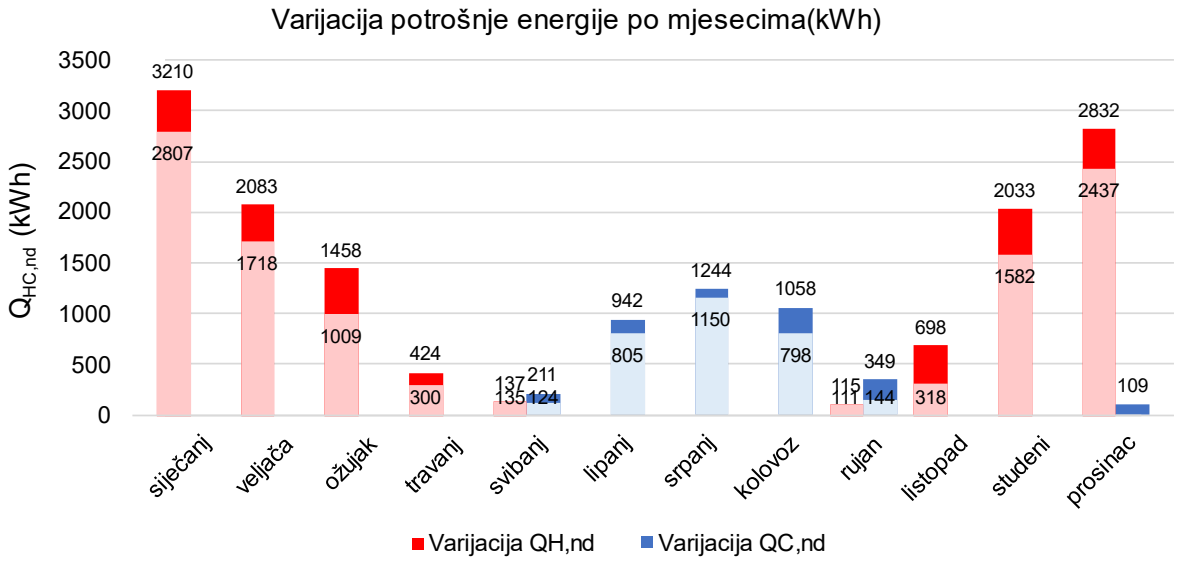
Slika 94: Utjecaj kontakta ovojnice s tlom na mjesečnu potrošnju energije (kontinentalna klima, varijantni scenarij proračuna)



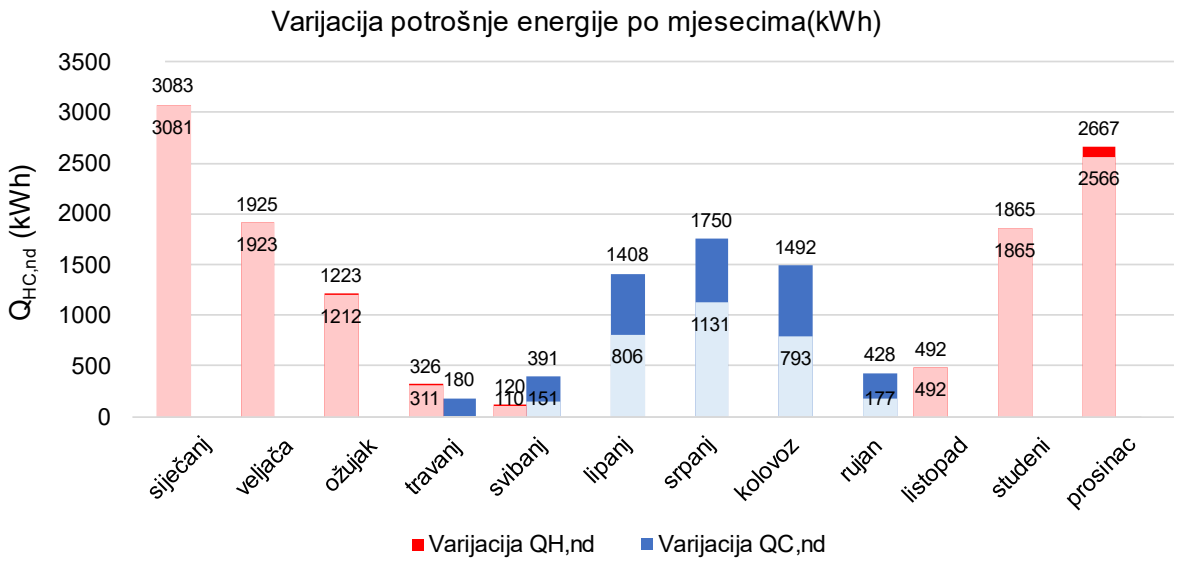
Slika 95: Utjecaj izolativnosti ovojnice na mjesečnu potrošnju energije (kontinentalna klima, varijantni scenarij proračuna)



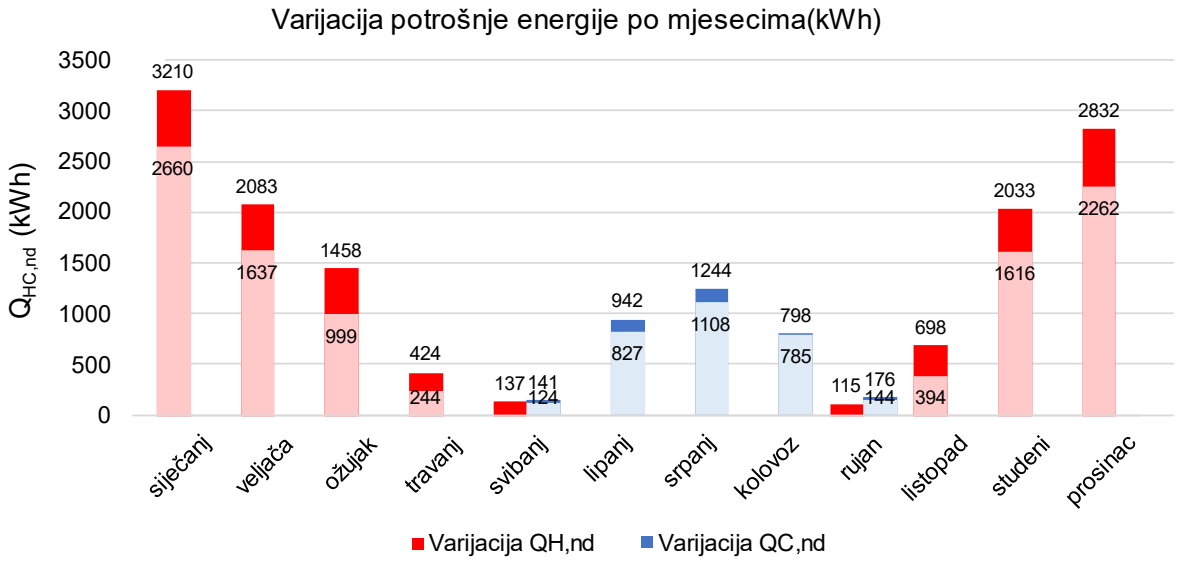
Slika 96: Utjecaj udjela prozirnih otvora na mjesečnu potrošnju energije (kontinentalna klima, varijantni scenarij proračuna)



Slika 97: Utjecaj orijentacije na mjesečnu potrošnju energije (kontinentalna klima, varijantni scenarij proračuna)

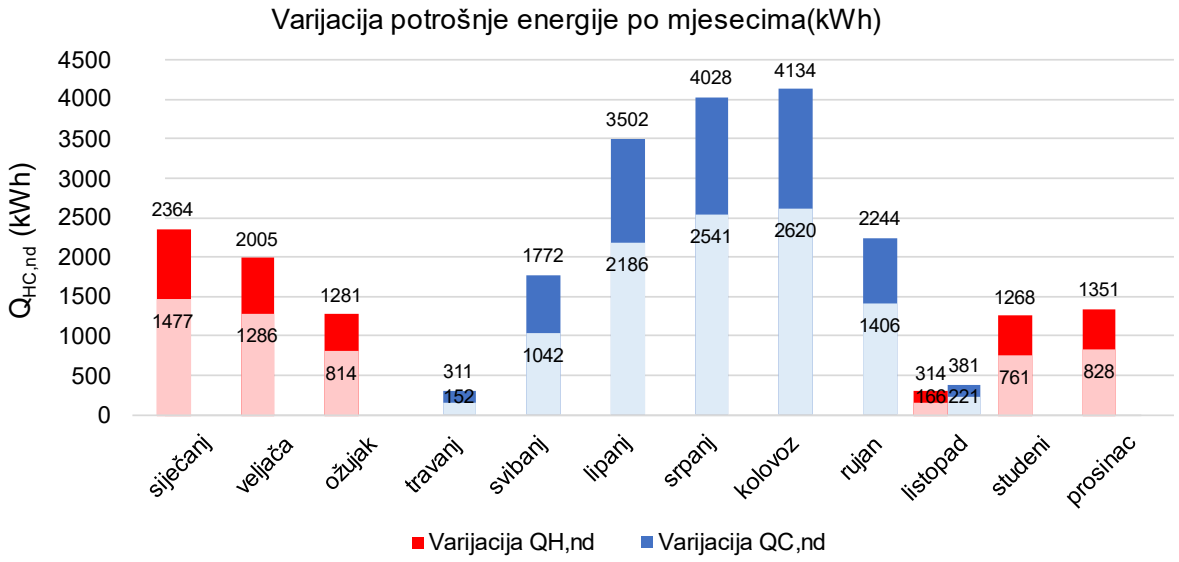


Slika 98: Utjecaj zaštite od pregrijavanja na mjesečnu potrošnju energije (kontinentalna klima, varijantni scenarij proračuna)

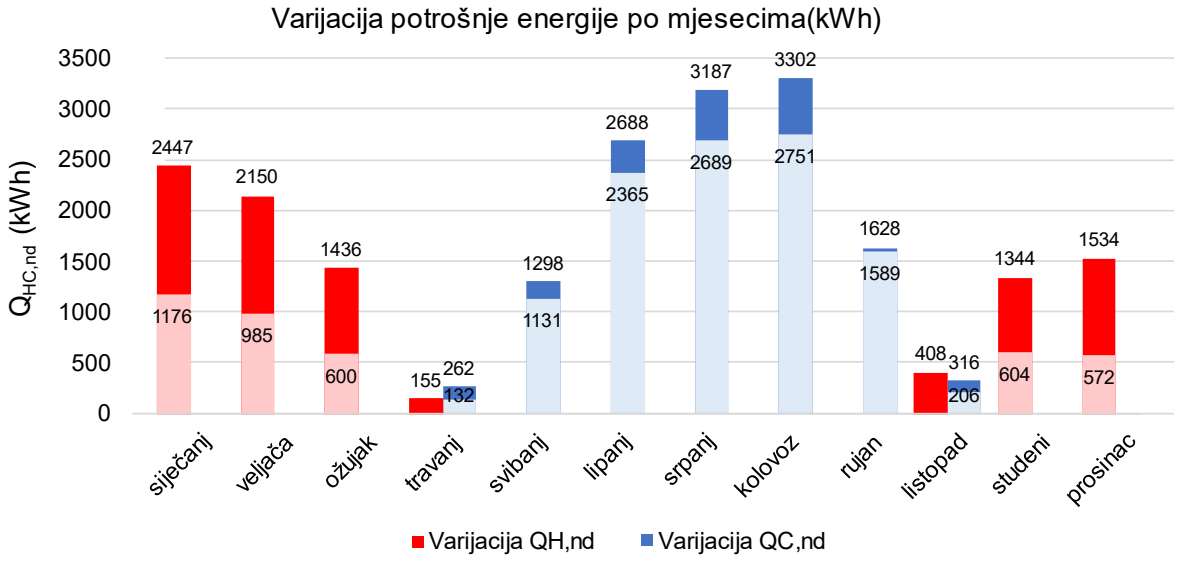


Slika 99: Utjecaj kontakta ovojnice s tlom na mjesečnu potrošnju energije (kontinentalna klima, varijantni scenarij proračuna)

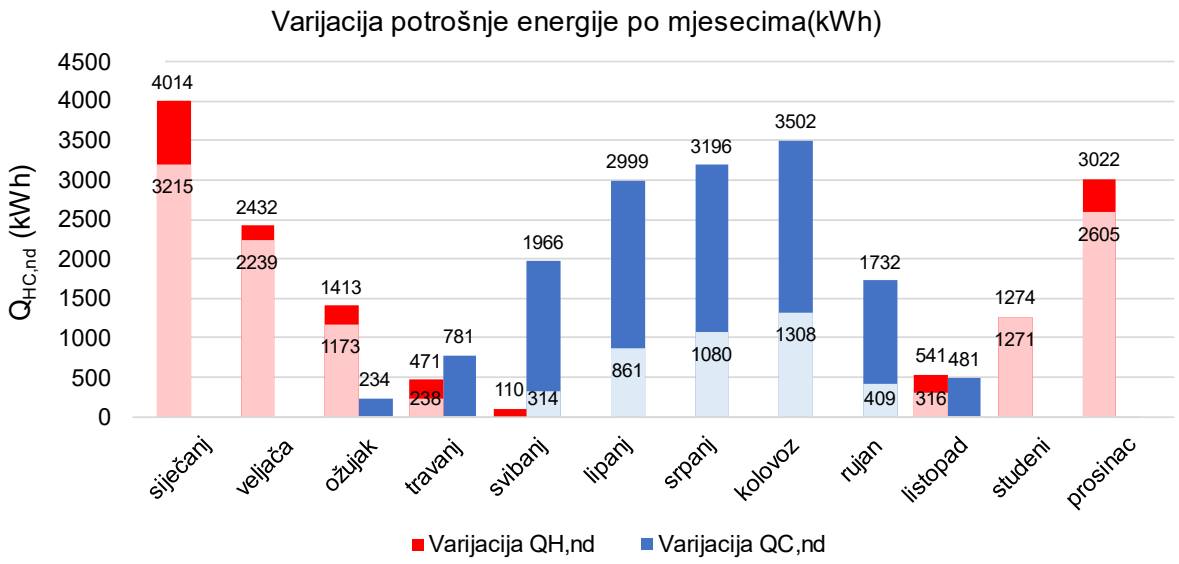
3. Primorska klima, osnovni scenarij proračuna



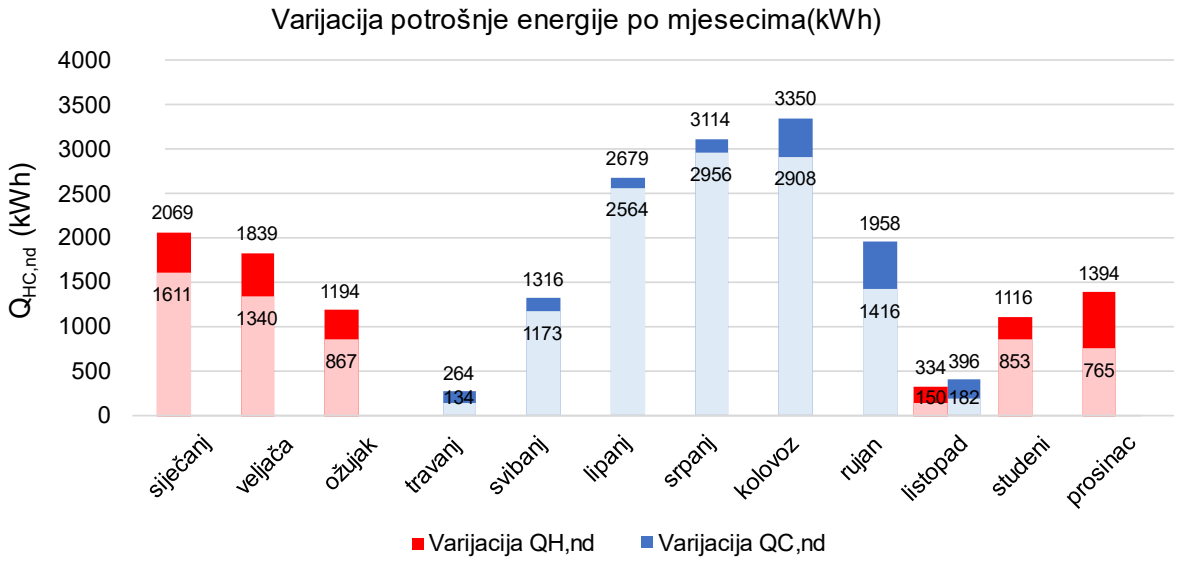
Slika 100: Utjecaj faktora oblika na mjesečnu potrošnju energije (primorska klima, varijantni scenarij proračuna)



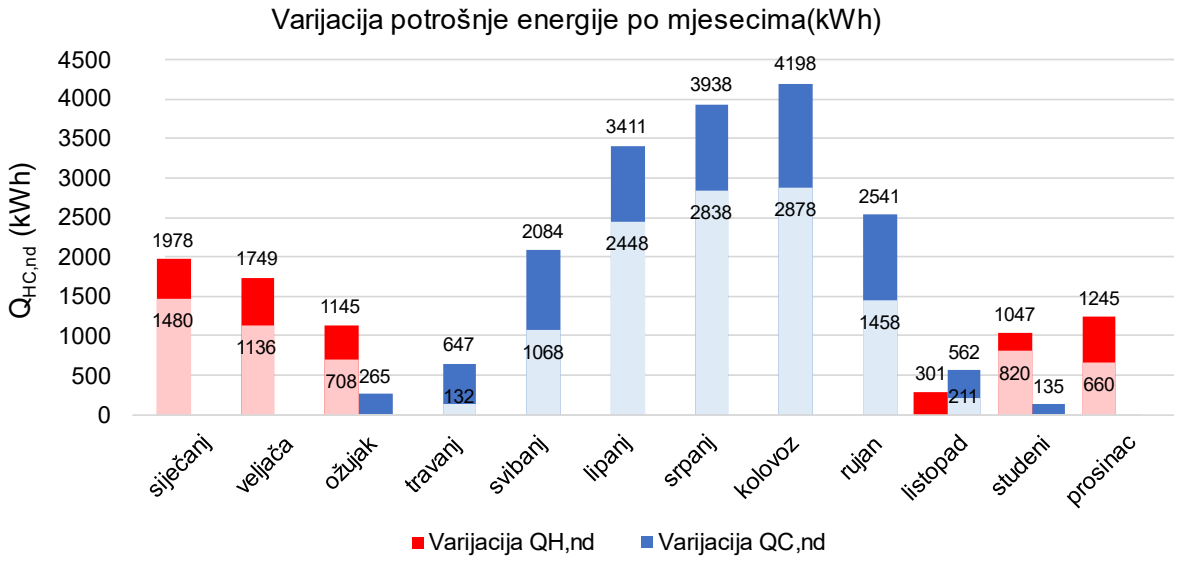
Slika 101: Utjecaj izolativnosti ovojnice na mjesečnu potrošnju energije (primorska klima, osnovni scenarij proračuna)



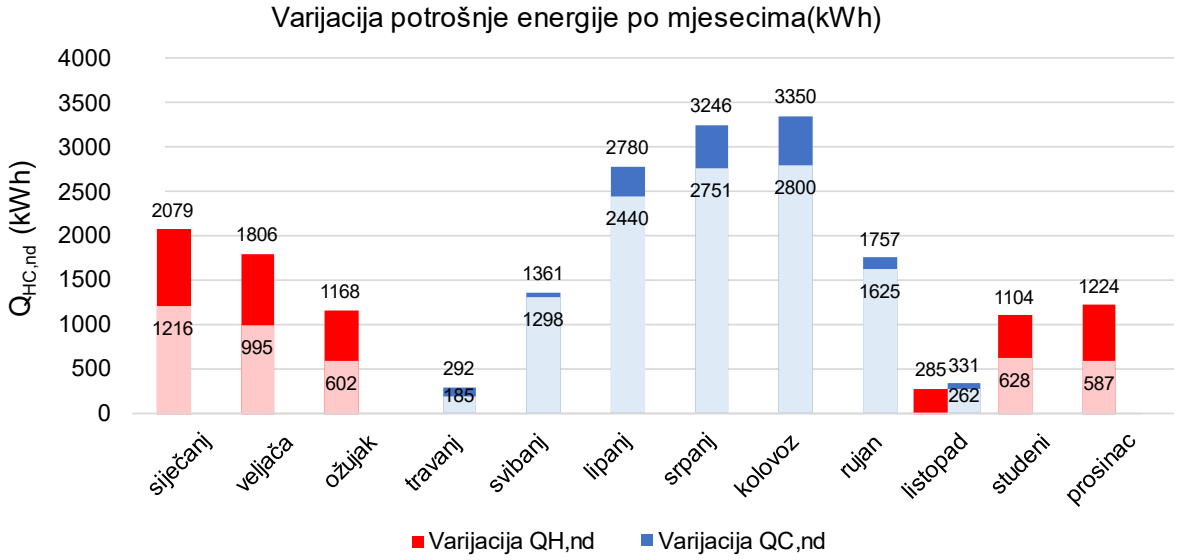
Slika 102: Utjecaj udjela prozirnih otvora na mjesečnu potrošnju energije (primorska klima, osnovni scenarij proračuna)



Slika 103: Utjecaj orijentacije na mjesečnu potrošnju energije (primorska klima, osnovni scenarij proračuna)

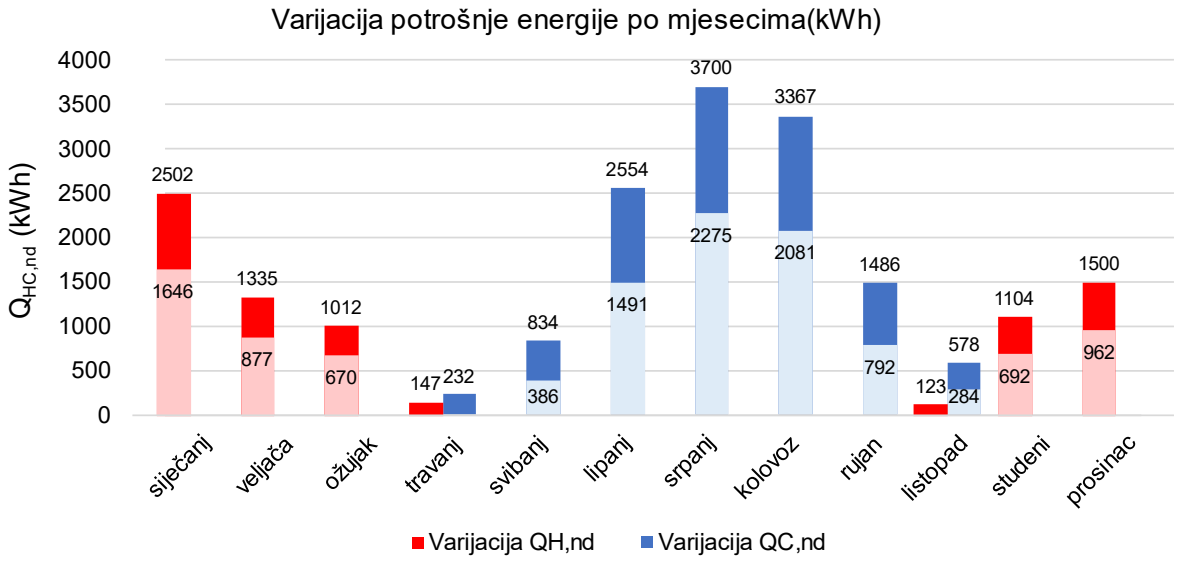


Slika 104: Utjecaj zaštite od pregrijavanja na mjesečnu potrošnju energije (primorska klima, osnovni scenarij proračuna)

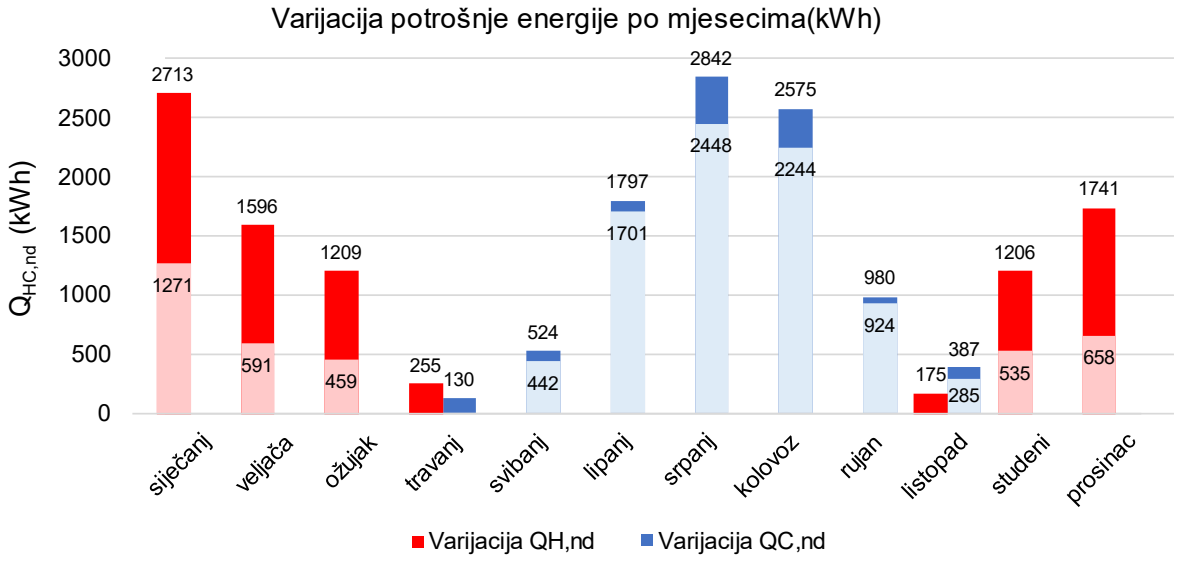


Slika 105: Utjecaj kontakta ovojnice s tlom na mjesečnu potrošnju energije (primorska klima, osnovni scenarij proračuna)

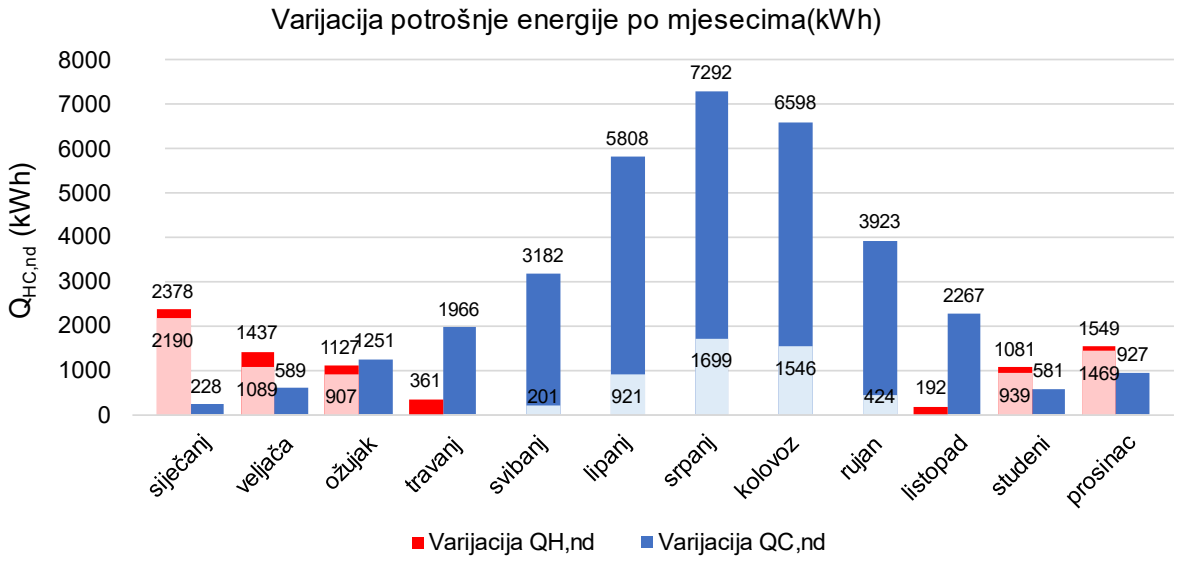
4. Primorska klima, varijantni scenarij proračuna



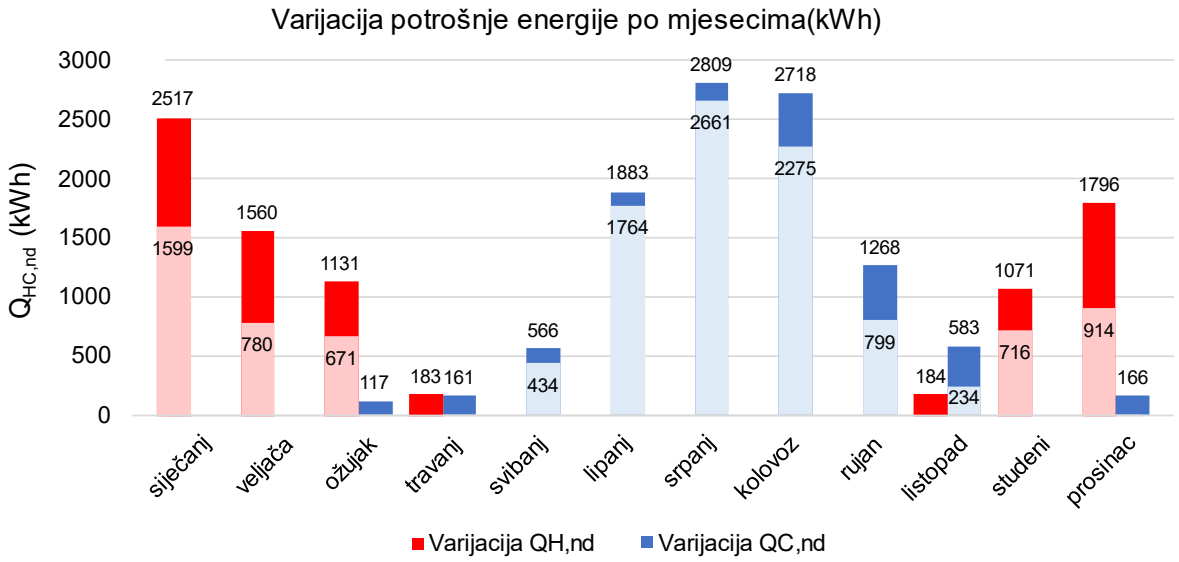
Slika 106: Utjecaj faktora oblika na mjesečnu potrošnju energije (primorska klima, varijantni scenarij proračuna)



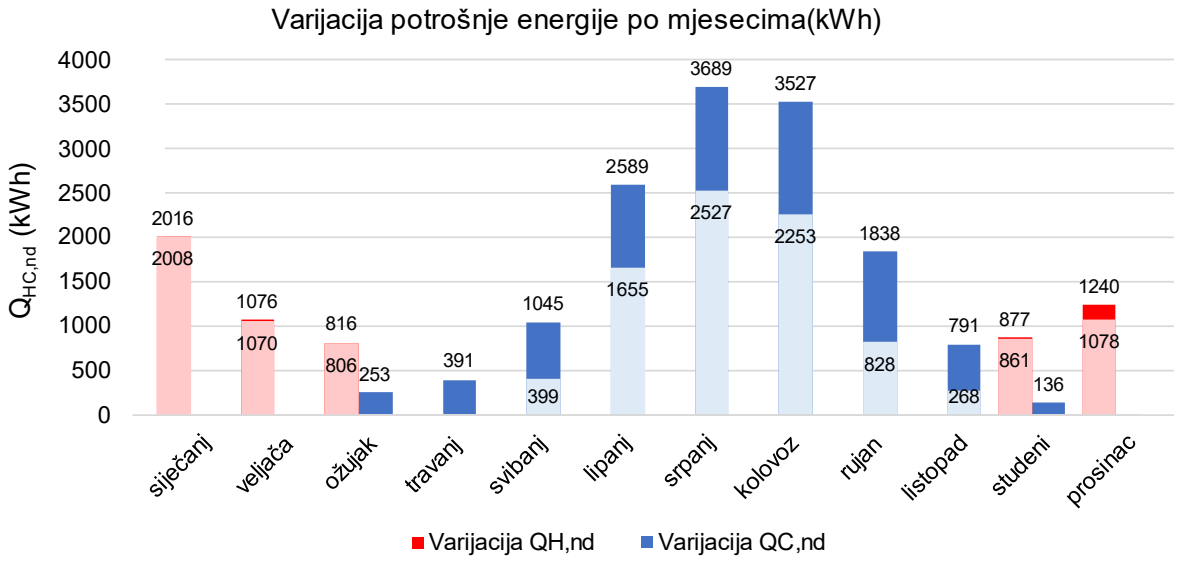
Slika 107: Utjecaj izolativnosti ovojnice na mjesečnu potrošnju energije (primorska klima, varijantni scenarij proračuna)



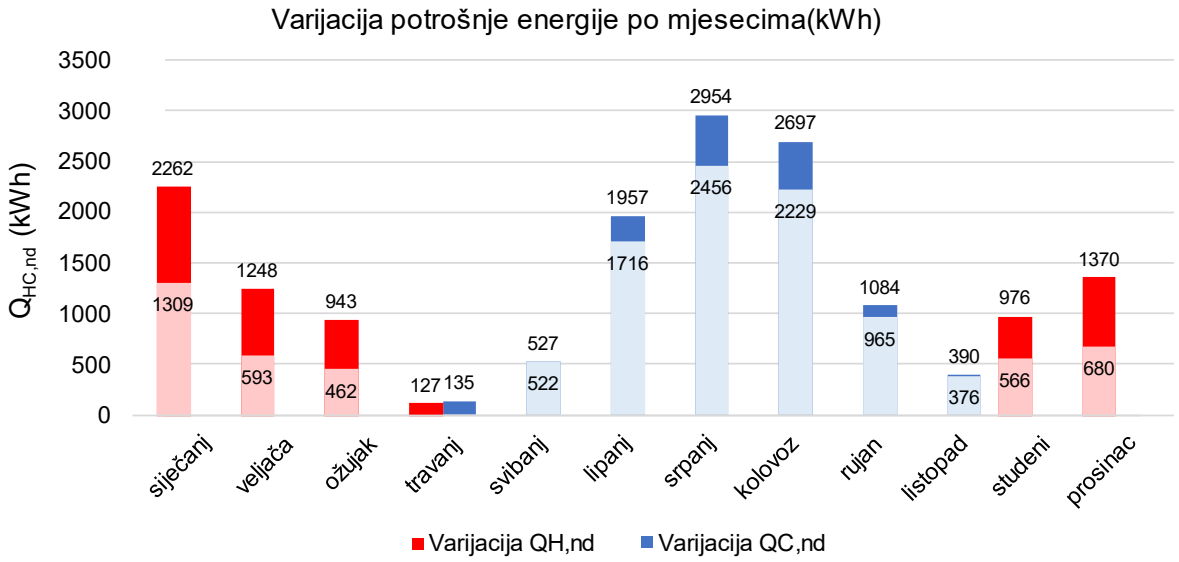
Slika 108: Utjecaj udjela prozirnih otvora na mjesečnu potrošnju energije (primorska klima, varijantni scenarij proračuna)



Slika 109: Utjecaj orijentacije na mjesečnu potrošnju energije (primorska klima, varijantni scenarij proračuna)



Slika 110: Utjecaj zaštite od pregrijavanja na mjesečnu potrošnju energije (primorska klima, varijantni scenarij proračuna)



Slika 111: Utjecaj kontakta ovojnice s tlom na mjesečnu potrošnju energije (primorska klima, varijantni scenarij proračuna)

Životopis

Marin Binički rođen je 1980. godine u Zagrebu. 2006. godine diplomirao je na Arhitektonskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Radno iskustvo stječe kao projektant u birou K.A.T. d.o.o. za arhitektonsko i građevinsko projektiranje. Od 2013. je zaposlen na Arhitektonskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu kao predavač na Katedri za arhitektonske konstrukcije i zgradarstvo. Poslijediplomski studij Arhitektura i urbanizam upisuje 2018. godine na Arhitektonskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Uspješno sudjeluje na javnim arhitektonsko-urbanističkim natječajima od kojih se izdvajaju 1. nagrade za rješenja:

2005. dječjeg vrtića Vrbani u Zagrebu (Siniša Blaženka, Marko Salopek, Marin Binički),

2005. osnovne škole Čulinec u Zagrebu (Siniša Blaženka, Marko Salopek, Marin Binički),

2009. gradskog zatvorenog bazena u Kutini (Marin Binički) i

2014. zdravstveno-turistički centar u Biogradu (Anna Kocsis, Marin Binički).

Djeluje kao suradnik u znanstvenim projektima od kojih se izdvajaju:

„Provjera inovativnog procesa kompleksnog dinamičkog modeliranja i cjelovitog optimiranja u konceptima energetskih rješenja zgrada“ (voditelj prof.dr.sc. Zoran Veršić),

„Razvoj dvostruke fasade s hermetički zatvorenom šupljinom (H-CCF), KK01.2.1.02.0218“, Povećanje razvoja novih proizvoda i usluga koji proizlaze iz aktivnosti istraživanja i razvoja – faza II, Referentna oznaka: KK.01.2.1.01, znanstveni voditelj projekta prof. dr.sc. Zoran Veršić,

„INCEPT / Introducing Sustainability and Energy Efficiency Principles in Architectural Education: Towards Designing Climate Neutral and Inclusive Buildings“, 2022.-2025., Erasmus+, New Bulgarian University, Sofia.

Fokus njegova stručnog i znanstvenog rada je na projektima racionalne uporabe energije, energetskim konceptima zgrada, izračunima i modeliranju potrošnje energije i CO_2 emisija iz zgrada, programiranju i izradi edukacijskih i komercijalnih softvera.

Aktivno sudjeluje na stručnim i znanstvenim skupovima, objavljuje i prezentira radove s temama energetske učinkovitosti i održivosti.

Popis objavljenih radova

1. Veršić, Zoran; **Binički, Marin**; Nosil Mešić, Mateja; Zero-Emission Potential of Single-Family Houses in Croatia // Buildings, 16 (2026), 1; 1-21. doi: 10.3390/buildings16010207 (prilog u časopisu, izvorni znanstveni rad, međunarodna recenzija)
2. Georgiev, Georgi; Gaydarova, Eleonora; Georgiev, Zdravko; Petrov, Peter; Roth-Čerina, Mia; Ostojić, Stanka; Mrđa, Ana; Veršić, Zoran; **Binički, Marin**; Cvitković, Ivona et al.; Online Training Course on Sustainable Architecture / Stan, Angelica (ur.), 2025. doi: 10.5281/zenodo.17633474 (obrazovni materijal, visoko obrazovanje)
3. Roth-Čerina, Mia; Ostojić, Stanka; Veršić, Zoran; Mrđa, Ana; **Binički, Marin**; Cvitković, Ivona; Stan, Angelica; Hărmănescu, Mihaela; Armenciu, Daniel Nicolae; Manea, Sorin Vasile et al.; Climate Neutral Building Design Atelier for Architecture Students / Roth-Čerina, Mia; Ostojić, Stanka (ur.), 2025. doi: 10.5281/zenodo.17623775 (obrazovni materijal, visoko obrazovanje)
4. Georgiev, Georgi; Gaydarova, Eleonora; Georgiev, Zdravko; Petrov, Peter; Stan, Angelica; Hărmănescu, Mihaela; Armenciu, Daniel Nicolae; Manea, Sorin Vasile; Roth-Čerina, Mia; Veršić, Zoran et al.; Compendium on the Green Transition to Affordable and Clean Energy in Buildings, Sustainable Cities and Climate Resilience for Architecture Students / Gaydarova, Eleonora (ur.), 2025. doi: 10.5281/zenodo.17611594 (obrazovni materijal, visoko obrazovanje)
5. Veršić, Zoran; **Binički, Marin**; Nosil Mešić, Mateja; Energetska tranzicija u zgradarstvu // Godišnjak Akademije tehničkih znanosti Hrvatske 2024 / Mornar, Vedran (ur.). Zagreb: Akademija tehničkih znanosti Hrvatske, 2025. str. 9-20 (prilog u knjizi, izvorni znanstveni rad)
6. Andrić, Davor; Nosil Mešić, Mateja; **Binički, Marin**; Soft Temporary Air-Filled Add-Ons for Non-transparent Facade Parts – A Hypothetical Model in Zagreb, Croatia // International Scientific Conference on Contemporary Glass Facades - Zagreb 2024: Conference Proceedings / Veršić, Zoran; Galić, Josip (ur.). Zagreb: Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet, 2024. str. 54-63 (prilog sa skupa u zborniku, izvorni znanstveni rad, međunarodna recenzija)
7. Veršić, Zoran; **Binički, Marin**; Nosil Mešić, Mateja; CO2 otisak u cjeloživotnom vijeku zgrada // 9. Sabor hrvatskih graditelja (Hrvatska graditeljska izvrsnost) - Zbornik radova

/ Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: Hrvatski savez građevinskih inženjera, Berislavićeva 6, Zagreb, 2024. str. 625-637 (prilog sa skupa u zborniku, pregledni znanstveni rad)

8. Veršić, Zoran; **Binički, Marin**; ZGRADE S NULTOM EMISIJOM STAKLENIČKIH PLINOVA (ZEB) // Zbornik sažetaka predavanja, 17. Dani hrvatske komore inženjera građevinarstva / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: Hrvatska komora inženjera građevinarstva, 2023. str. 44-44 (prilog sa skupa u zborniku, sažetak izlaganja sa skupa)
9. Veršić, Zoran; Braun, Alan; **Binički, Marin**; Jonjić, Luka; Nosil Mešić, Mateja; Ostojić, Stanka; Tropčić Zekan, Goranka; Smjernice za energetsku obnovu zgrada sa statusom kulturnog dobra // Smjernice za energetsku obnovu zgrada sa statusom kulturnog dobra / Veršić, Zoran; Braun, Alan (ur.). Zagreb: Ministarstvo kulture i medija, Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine, 2023. 1-169 (stručna ekspertiza)
10. Veršić, Zoran; Nosil Mešić, Mateja; **Binički, Marin**; Cvitković, Ivona; Petrac, Dora; A simulation of the physical characteristics of passively maintained closed cavity facades // International journal of advances in mechanical and civil engineering, 10 (2023), 4; 58-61 (prilog u časopisu, izvorni znanstveni rad, međunarodna recenzija)
11. Stepinac, Lucija; Galić, Josip; **Binički, Marin**; Fast estimation of bending stiffness in sandwich structured composites with 3D printed TPMS core // Mechanics of advanced materials and structures, 0/2013 (2023), 0; 1-10. doi: 10.1080/15376494.2023.2267551 (prilog u časopisu, izvorni znanstveni rad, međunarodna recenzija)
12. Veršić, Zoran; Galić, Josip; **Binički, Marin**; Nosil Mešić, Mateja; Passively Maintained Closed Cavity Façade—Experimental Validation of the Mathematical Thermal Model // Publications (Basel), 13 / 2023 (2023), 8; 2031, 22. doi: 10.3390/buildings13082031 (prilog u časopisu, izvorni znanstveni rad, međunarodna recenzija)
13. Jošić, Mladen; Veršić, Zoran; Biluš, Mateo; **Binički, Marin**; Mandić, Dunja; Užarević, Darko; Tropić Zekan, Goranka; Smjernice za projektiranje zamjenskih obiteljskih kuća oštećenih potresom na području Grada Zagreba i Krapinsko-zagorske županije. Zagreb, 2022. 76 (stručna ekspertiza)
14. Veršić, Zoran; **Binički, Marin**; Energetska obnova povijesne jezgre Grada Zagreba / Energy Efficiency improvement of Zagreb Historic Centre // Zbornik sažetaka predavanja 16. Dani Hrvatske komore inženjera građevinarstva. Zagreb: Hrvatska komora inženjera građevinarstva, 2022. str. 49-49 (prilog sa skupa u zborniku, prošireni sažetak izlaganja sa skupa, domaća recenzija)

15. Veršić, Zoran; Galić, Josip; **Binički, Marin**; Stepinac, Lucija; Factors in a Sustainability Assessment of New Types of Closed Cavity Facades // World academy of science, engineering and technology, 16, 1, 2022. str. 3-3 (prilog sa skupa u časopisu, prošireni sažetak izlaganja sa skupa, međunarodna recenzija)
16. Veršić, Zoran; **Binički, Marin**; Nosil Mešić, Mateja; Passive Night Cooling Potential in Office Buildings in Continental and Mediterranean Climate Zone in Croatia // Buildings, 12 (2022), 8; 1207, 24. doi: 10.3390/buildings12081207 (prilog u časopisu, izvorni znanstveni rad, međunarodna recenzija)
17. Veršić, Zoran; **Binički, Marin**; CO2 emisije u životnom vijeku građevine – praktična primjena u Hrvatskoj. 2021 (prilog sa skupa u zborniku, sažetak izlaganja sa skupa)
18. **Binički, Marin**; Veršić, Zoran; Muraj, Iva; Nearly Zero Energy Building CO2 Emissions // KEEPING UP WITH TECHNOLOGIES TO ACT RESPONSIVELY IN URBAN ENVIRONMENT, 7th International Academic Conference on Places and Technologies, Proceedings. Beograd: Arhitektonski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2020. str. 248-254. doi: 10.18485/arh_pt.2020.7.ch29 (prilog sa skupa u zborniku, izvorni znanstveni rad, međunarodna recenzija)
19. Veršić, Zoran; **Binički, Marin**; Ostojić, Stanka; Tropčić Zekan, Goranka; Rendulić, Dario Ilija; Smjernice za zgrade gotovo nulte energije - 2. dio // Smjernice za zgrade gotovo nulte energije / Veršić, Zoran (ur.). Zagreb: Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja, Arhitektonski fakultet, Hrvatski savjet za zelenu gradnju, 2019. 1-102 (stručna ekspertiza)
20. Veršić, Zoran; **Binički, Marin**; Ostojić, Stanka; Tropčić Zekan, Goranka; Rendulić, Dario Ilija; Smjernice za zgrade gotovo nulte energije - 1. dio // Smjernice za zgrade gotovo nulte energije / Veršić, Zoran (ur.). Zagreb: Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja, Arhitektonski fakultet, Hrvatski savjet za zelenu gradnju, 2019. 1-23 (stručna ekspertiza)
21. Muraj, Iva; Veršić, Zoran; **Binički, Marin**; Sustainability, Environmental Performance and Energy Efficiency in Higher Education: Faculty of Architecture, University of Zagreb // SBE19-Thessaloniki international conference 'Sustainability in the built environment for climate change mitigation', Book of Abstracts. Solun: Laboratory of Building Construction & Building Physics, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, 2019. str. 103-103 (prilog sa skupa u zborniku, sažetak izlaganja sa skupa, međunarodna recenzija)

22. Veršić, Zoran; Muraj, Iva; **Binički, Marin**; Nearly Zero-Energy Buildings in Croatia: Comparison of Thermal Performance in Different Climatic Regions // 42nd IAHS World Congress on Housing, The housing for the dignity of mankind. Napulj: Tavolario stampa, 2018. str. 1-13 (prilog sa skupa u zborniku, izvorni znanstveni rad, međunarodna recenzija)
23. Veršić, Zoran; Muraj, Iva; **Binički, Marin**; Graditeljsko naslijeđe zagrebačkoga donjogradskog bloka – energetska obnova // Prostorne i razvojne mogućnosti kulturnog naslijeđa / Cultural Heritage - Possibilities for Spatial and Economic Development. Zagreb: Arhitektonski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2015. str. 358-363 (prilog sa skupa u zborniku, izvorni znanstveni rad, međunarodna recenzija)
24. Veršić, Zoran; Muraj, Iva; **Binički, Marin**; Model ugrađene najamne zgrade zagrebačkog donjogradskog bloka. Analiza u svrhu poboljšanja energetske učinkovitosti. // Prostor : znanstveni časopis za arhitekturu i urbanizam, 23(2015) (2015), 2 (50); 236-249 (prilog u časopisu, izvorni znanstveni rad, međunarodna recenzija)