

Primljen / Received: 24.1.2025.

Ispravljen / Corrected: 7.8.2025.

Prihvaćen / Accepted: 16.8.2025.

Dostupno online / Available online: 10.10.2025.

Algoritamski model energetske obnove: parametarsko optimiranje osunčanja unutarnjeg prostora

Autori:

**Slobodan Peulić**, dipl.ing.arch.

Sveučilište u Banjoj Luci, Bosna i Hercegovina
Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet
slobodan.peulic@aggf.unibl.org

Autor za korespondenciju

**Izv.prof.dr.sc. Milovan Kotur**, dipl.ing.stroj.

Sveučilište u Banjoj Luci, Bosna i Hercegovina
Strojarski fakultet
milovan.kotur@mf.unibl.org

Prethodno priopćenje

Slobodan Peulić, Milovan Kotur

Algoritamski model energetske obnove: parametarsko optimiranje osunčanja unutarnjeg prostora

Porast ljetnih temperatura, uključujući povećanje od 2 °C u posljednjih 50 godina u Banjoj Luci te ekstremne vrijednosti koje u srpnju dosežu 40,7 °C, znatno je povećao potrebu za hlađenjem u javnim zgradama. To je osobito važno za obrazovne ustanove koje čine 31,59 % ukupnih javnih zgrada u Bosni i Hercegovini. Solarno zračenje utječe na unutarnju udobnost izazivajući odsjaj, refleksiju i pregrijavanje. Studija slučaja jedne obrazovne ustanove u Banjoj Luci upotrebljava otvorene klimatske podatke, nebesku matricu i podatke o vjetru. Toplinska udobnost procjenjuje se pomoću Univerzalnog pokazatelja toplinske udobnosti (UTCI) tijekom najveće zauzetosti prostora (8.00 – 16.00) u ljetnome razdoblju. Algoritamskim je modelom definiran vertikalni vanjski element zasjenjenja u skladu s intenzitetom solarnog zračenja. Simulacije u Rhinocerosu alatima Grasshopper, Ladybug i Honeybee analizirale su solarno zračenje unutar ureda s primjenom zasjenjenja i bez njega. Rezultati su pokazali da parametarski optimirano zasjenjenje smanjuje najvišu unutarnju temperaturu za 1,88 °C, ujednačeno raspršuje solarno zračenje te poboljšava toplinsku udobnost integracijom pasivnih rješenja za hlađenje.

Ključne riječi:

energetska obnova zgrada, pregrijavanje, sjenila za prozore, uredski prostori, rhinoceros, grasshopper

Research Paper

Slobodan Peulić, Milovan Kotur

Algorithmic energy retrofit model: Parametric optimization of indoor solar insolation

Over the past 50 years, summer temperatures in Banja Luka have risen by about 2 °C, with peak values reaching 40.7 °C in July. This trend has led to a significant increase in cooling demand in public buildings, particularly in educational facilities, which represent 31.59 % of all public buildings in Bosnia and Herzegovina. Solar irradiation affects the interior comfort through glare, reflection, and overheating. A case study was conducted on an educational facility in Banja Luka using open-source climate data, sky matrices, and wind condition data. Thermal comfort was assessed via the universal thermal climate index (UTCI) during peak occupancy hours (08:00–16:00) in summer using open-source data. Using an algorithmic model, vertical exterior shading elements were defined according to the intensity of solar irradiation. Simulations in Rhinoceros with Grasshopper, Ladybug, and Honeybee analysed indoor solar irradiation with and without shading in an office space. The results indicated that parametrically optimised shading reduced the highest interior temperature, dispersed solar irradiation more evenly, and enhanced thermal comfort by integrating passive cooling solutions.

Key words:

building energy retrofit, overheating, window sunshades, office space, rhinoceros, grasshopper

1. Uvod

Poseban izazov u zemljama u razvoju poput Bosne i Hercegovine jest vrlo energetska neučinkovitost zgrada. To ne samo da otežava napore u borbi protiv klimatskih promjena, već pogoršava uvjete unutarnje udobnosti za korisnike prostora. Građevinski sektor globalno je odgovoran za približno 38 % emisija stakleničkih plinova [1], pri čemu su posljedice najizraženije u zemljama koje se suočavaju s porastom energetske siromašnosti. Zbog rasta populacije i urbanizacije, potrošnja energije u zgradama pokazuje trend porasta, što je popraćeno naglim porastom istraživanja usmjerenih na potrošnju energije u zgradama, emisije CO₂, energetska učinkovitost, kontrolu emisija i energetska politiku [2]. Energetska siromašnost najčešće se definira kao nemogućnost osiguravanja dovoljne količine energije za odgovarajuće grijanje prostora [3-5]. Međutim, većina istraživanja fokusirana je ponajprije na zimske uvjete, zanemarujući sve izraženiji problem energetske siromašnosti ljeti [6]. Nedavna istraživanja upozoravaju na to da je pregrijavanje tijekom ljeta raširen problem diljem Europe, čak i u zemljama s umjerenom klimom [7], a posebno je izražen u južnim regijama. Pojedine studije, posebno one provedene u Španjolskoj, predlažu uključivanje potreba za hlađenjem u definiciju energetskog siromaštva [8]. Ipak, dominantan fokus ostaje na grijanju, dok relevantni zakoni, propisi i strategije još uvijek ne prepoznaju cjelovitost tog problema.

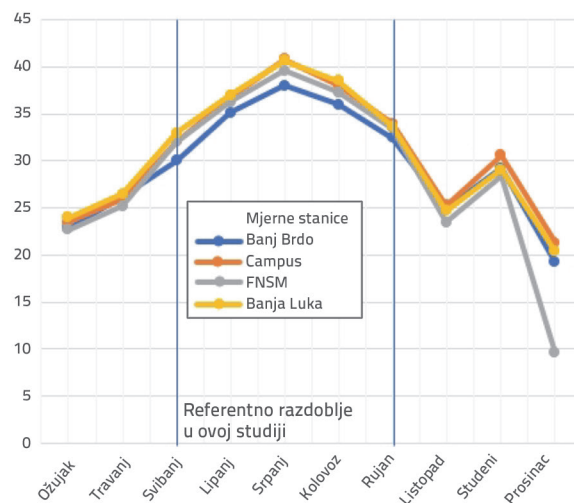
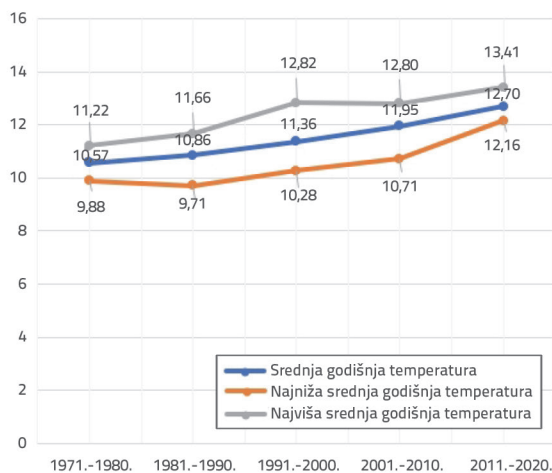
Ljeta u područjima s kontinentalnom klimom postaju sve toplija, uz povećanu pojavu toplinskih valova i obilnih oborina kao posljedicu globalnog porasta temperature [9], što uzrokuje rast potrebe za hlađenjem prostora ($Q_{c,nd}$). Od 1990. potrošnja energije potrebne za klimatizaciju utrostručila se, stvarajući izazove za elektroenergetske mreže, povećavajući emisije stakleničkih plinova i pridonoseći pojavi urbanih toplinskih otoka [10]. Neka istraživanja sugeriraju da se na energiju korištenu u HVAC sustavima odnosi otprilike polovica ukupne potrošnje energije [11]. Nedostatak sustava za hlađenje izlaže velik dio stanovništva riziku od toplinskog stresa, narušavajući udobnost, produktivnost i zdravlje korisnika, dok

ekstremni klimatski događaji mogu imati ozbiljne posljedice po društvo i ekosustave [12]. Toplija ljeta povećavaju rizik od energetske siromašnosti jer više vanjske temperature zahtijevaju veću količinu energije za postizanje unutarnje ugodnosti [13].

Prema podacima Međunarodne agencije za energiju (IEA), ukupna površina zgrada povećana je za 60 % u posljednja dva desetljeća, a očekuje se dodatno povećanje od 20 % do kraja desetljeća, što znači gotovo 45 milijardi kvadratnih metara novog prostora. Više od polovine tog porasta događa se u toplim klimatskim zonama koje imaju potrebu za hlađenjem, ali nemaju propise o energetske učinkovitosti za cijeli građevinski sektor. Očekuje se da će potreba za klimatizacijom porasti za dodatnih 8 % do 2030. [14].

U Europskoj uniji zgrade su u 2021. trošile 42 % ukupne energije, uz 36 % izravnih i neizravnih emisija stakleničkih plinova povezanih s tom potrošnjom [15-17]. Unatoč velikoj potrošnji energije, znatan dio zgrada ostaje neobnovljen zbog financijskih ograničenja, nedostatka znanja o stvarnim prednostima obnove ili nerazvijenih mehanizama podrške. Europska unija postavila je kao cilj smanjenje emisija stakleničkih plinova za najmanje 55 % do 2030. (u odnosu na sadašnjih 40 %) i postizanje klimatske neutralnosti do 2050. [18]. Strategija EU-a za grijanje i hlađenje, usvojena 2016., ističe važnost rashlade prostora kao ključnog faktora toplinske udobnosti u toplijim klimatskim zonama [19]. Strategija uvodi metodologiju za procjenu dnevne srednje, minimalne i maksimalne temperature u odnosu na prag od 22 °C, iznad kojeg se pretpostavlja potreba za hlađenjem. Ističe se povezanost prekomjerne topline u zatvorenom prostoru s kvalitetom zgrade te se promiču mjere obnove koje mogu unaprijediti unutarnju kvalitetu boravka [20].

Globalne strategije za smanjenje potrebe za hlađenjem oslanjaju se na tri glavna pristupa u cilju postizanja nulte neto emisije do 2050.: prvo, gradnja i obnova pomoću obnovljivih materijala s prioritetom na pasivnim rješenjima hlađenja; drugo, promjena ponašanja korisnika – edukacija o optimalnim metodama za smanjenje temperature, na primjer, podešavanje termostata između 24 °C i 25 °C; treće, povećanje učinkovitosti sustava za hlađenje u novim i postojećim objektima [14].



Slika 1. Povećanje srednje godišnje temperature (lijevo) i apsolutna maksimalna temperatura zraka u Banjoj Luci (desno), prema podacima iz [21, 22]

Tablica 1. Klimatski podaci za grad Banju Luku [26]

Parametar	Opis	Jed,	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Sred, vrijednost
TEMPERATURA ZRAKA [°C]															
T srednja	Srednja (prosječna) temperatura zraka	°C	1,6	2,8	7,6	12,4	17	20,9	22,9	22,3	16,7	12,1	7,5	2,6	12,2
T standardna devijacija	Standardna devijacija temperature zraka	°C	2,4	2,9	1,7	1,1	1,1	1,4	1,1	1,6	1,5	1,5	2,3	1,7	0,6
T minimalna	Najniža zabilježena temperatura zraka	°C	-23,5	-21,5	-18,2	-5,9	0,5	4,4	7,2	6,1	2,4	-5,5	-8,2	-18,2	-23,5
p1	Temperatura 1 percentil (vrlo hladni dani)	°C	-1,7	-2,7	4,5	10,2	15	18,6	21,5	19,4	14,8	9,5	3,1	-1,5	10,8
p5	Temperatura 5 percentila	°C	-1,6	-2,1	5,5	10,7	15,6	19,2	21,7	19,5	14,9	9,8	3,3	0	11,2
p10	Temperatura 10 percentila	°C	-1,1	-1,8	6,0	11,0	15,9	19,5	21,7	20,1	15,1	9,9	3,9	1	11,5
p90	Temperatura 90 percentila (vrlo topli dani)	°C	5,3	6,5	9,5	13,8	18,6	22,9	24,6	24,2	18,8	13,8	10,4	4,5	12,8
p95	Temperatura 95 percentila	°C	5,8	6,7	10,0	14,1	18,9	23,3	25,2	24,4	19,2	14	10,9	4,6	12,9
p99	Temperatura 99 percentila (iznimno vrući dani)	°C	6,1	7,0	11,0	14,2	18,9	23,9	25,2	24,4	20	14,2	11	4,6	13
T maksimalna	Najviša zabilježena temperatura zraka	°C	22,3	25,2	28,3	31,8	35,2	37,9	41,6	41,2	40,2	30,9	27,1	23,2	41,6
VLAŽNOST ZRAKA															
P srednja	Prosječna mjesečna količina oborina	mm	5,8	5,9	7,0	9,4	13,2	16,4	17,8	17,4	14,1	11,4	8,5	6,5	11,1
P07h	Količina oborina u 07:00	mm	5,4	5,5	6,7	9,3	12,9	16,1	17,5	17	13,4	10,6	7,8	6	10,7
P14h	Količina oborina u 14:00	mm	6,2	6,1	7,0	9,3	13,1	16	17,1	17,1	13,9	11,9	9,0	6,7	10,7
H srednja	Prosječna relativna vlažnost zraka	%	84	79	69	68	70	69	61	68	75	80	82	85	75
H07h	Relativna vlažnost zraka u 07:00	%	89	89	85	84	82	80	79	83	89	92	90	90	86
H14h	Relativna vlažnost zraka u 14:00	%	80	75	66	64	64	62	60	61	70	75	77	80	68
BRZINA VJETRA [m/s]															
W srednja	Prosječna brzina vjetra	m/s	1,4	1,5	2,2	1,9	1,8	1,6	1,6	1,6	1,4	1,4	1,5	1,4	1,6

S obzirom na to da 58,32 % ukupne opskrbe energijom u Bosni i Hercegovini dolazi iz termoelektrana na ugljen, postoji dodatna potreba za smanjenjem potrošnje energije, osobito u građevinskome sektoru. BiH je kroz Nacionalno utvrđene doprinose postavila bezuvjetne ciljeve smanjenja emisija stakleničkih plinova za 12,8 % do 2030. i za 50 % do 2050. u odnosu na 2014. [20]. U tome dokumentu suše su istaknute kao jedan od najvećih rizika koji uzrokuju gospodarske, ekološke i društvene štete. Temperatura u regiji Banje Luke porasla je za 2 °C u razdoblju od 50 godina (slika 1.) [21, 22]. Također, vidljivo je da maksimalne temperature dosežu

vrhunac u srpnju, s vrijednostima do 40,7 °C u urbanome području. Obrazovne ustanove s udjelom od 31,59 % čine najveći udio javnih zgrada prema površini, a slijede uredske i administrativne zgrade s 27,49 %, dok vrtići čine samo 1,35 % ukupnog fonda [23, 24], pri čemu je većina tih objekata izgrađena u posljednjih 20 godina [24]. Daljnja analiza pokazuje tendenciju smanjenja udjela prozirnih dijelova omotača u korist neprozirnih dijelova, što pojednostavljuje i pojeftinjuje smanjenje ukupne U-vrijednosti omotača. Međutim, u javnim zgradama, osobito onima u kojima korisnici borave veći dio dana kao što su vrtići, osnovne i srednje škole te

administrativne zgrade, važan je i svjetlosni komfor. Zato pristup koji podrazumijeva smanjenje U-vrijednosti smanjenjem odnosa između prozirnih i neprozirnih dijelova nije optimalan. Potrebno je pažljivo promišljati i usklađivati te donositi rješenja s poboljšanim karakteristikama stakla i okvira, ugradnjom sjenila i/ili posebnih premaza na staklima te boljom dispozicijom i rasporedom prostorija.

Strategija za prilagodbu klimatskim promjenama i niskouglični razvoj Bosne i Hercegovine za razdoblje 2020. – 2030. donosi pregled potrošnje energije u javnim zgradama u odnosu na razdoblje njihove izgradnje i funkcionalnu tipologiju. Prema toj studiji, administrativne zgrade čine 36,3 % svih javnih objekata, dok obrazovne ustanove zauzimaju 32 %, čime zajedno čine najveći udio u ukupnome fondu. Najveća potreba za grijanjem zabilježena je u vrtićima, a slijede sportski objekti i druge kategorije [25]. Međutim, isto istraživanje ne obrađuje potrebe za hlađenjem u javnim zgradama. Kada je riječ o kućanstvima, potrebe za hlađenjem uzimaju se u obzir samo neizravno, kroz ukupnu godišnju potrošnju električne energije. Iako je jedna od najopsežnijih nacionalnih strategija, dokument ilustrira kako potreba za energijom za hlađenje još uvijek nije prepoznata kao jednako važna kao i potreba za grijanjem, čime se ističe ključna praznina u energetske planiranju.

Iz tablice 1. vidljivo je da se najviše temperature bilježe u srpnju, kada prosječna temperatura iznosi 22,9 °C, dok maksimalne vrijednosti dosežu 41,6 °C [26], što upućuje na neizbježnu potrebu za hlađenjem tijekom cijeloga operativnog vremenskog okvira.

Za razliku od stambenih objekata koji su kontinuirano u upotrebi, javne zgrade karakterizira izmjenična upotreba, s razdobljima visoke zauzetosti te razdobljima kada nisu u funkciji kao što su vikendi, praznici te školski ljetni i zimski raspusti. Povećana potrošnja energije za hlađenje prostora posebno utječe na vršna opterećenja elektroenergetskog sustava, osobito u vrijeme visokih temperatura, što povećava rizik od nestanka struje [10].

Trenutačno stanje građevinskog fonda u BiH rezultira neadekvatnim sustavima hlađenja ili njihovim potpunim izostankom, što kompromitira kvalitetu unutarnje udobnosti. U većini slučajeva prisutne su tri vrste rješenja za hlađenje: lokalno postavljeni klimatizacijski uređaji, prozori zasjenjeni unutarnjim roletama ili zavjesama te pokretni ventilatori. Osim toga korisnici često izbjegavaju korištenje ureda okrenutih prema jugu i zapadu u razdobljima najviših temperatura. Takav pristup ilustrira nedosljedno rješavanje problema pregrijavanja u uredskim prostorima.

Smanjenje potrebe za aktivnim hlađenjem pomoću pasivnih strategija projektiranja jedna je od ključnih mjera u rješavanju rastuće potrebe za energijom za hlađenje ($Q_{c,nd}$) u javnim zgradama.

Glavni parametar koji se razmatra u ovome istraživanju jest smanjenje izravnoga solarnog osunčanja te optimiranje distribucije prirodne svjetlosti unutar uredskih prostora. Pozornim upravljanjem tim čimbenicima moguće je smanjiti unutarnje temperature tijekom ljetnih mjeseci, čime se poboljšava toplinska udobnost i smanjuje ukupna potreba za energijom za hlađenje.

Takav pristup zahtijeva integrirano projektno rješenje koje ne samo da ograničava pregrijavanje uzrokovano solarnim dobicima, već i osigurava adekvatnu dostupnost dnevne svjetlosti, doprinoseći zdravijemu i energetski učinkovitijemu unutarnjem prostoru. Optimiranje tih uvjeta mora biti specifično za kontekst, uzimajući u obzir orijentaciju, karakteristike pročelja, omjer ostakljenja i obrasce korištenja prostora.

Sljedeće poglavlje istražuje simulacijske procjene i algoritamske pristupe u svrhu evaluacije i poboljšanja toplinskih performansi odabranih uredskih prostora u zgradama javnog sektora.

2. Analiza sunčeva zračenja i UTCI indeksa te razvoj algoritma za optimiranje unutarnjih uvjeta u uredima

Javne ustanove često zahtijevaju kontrolirane sustave grijanja, ventilacije, klimatizacije i hlađenja kako bi se osigurali optimalni radni uvjeti. Postoji više načina za smanjenje energetske potrošnje u zgradama, uključujući poboljšanje svojstava omotača zgrade, energetski učinkovitu HVAC opremu, sustave rasvjete visoke učinkovitosti, racionalnu potrošnju vode, tehnologije obnovljivih izvora energije, inteligentne sustave upravljanja i slično [27].

Kada se radi o poboljšanjima omotača, razlikuju se dva pristupa: redovita i dubinska energetska obnova [28, 29]. Oba pristupa imaju isti cilj: smanjiti energetske potrebe za grijanjem i hlađenjem, produljiti životni vijek zgrade i poboljšati unutarnju klimu. Prema važećim pravilnicima, propisano je da maksimalni koeficijent prolaska topline iznosi 0,30 W/m²K za zidove, 0,20 W/m²K za krov i 1,60 W/m²K za prozore. Poboljšanja prozirnih dijelova omotača obuhvaćaju odgovarajući omjer staklenih i čvrstih površina, održavanje prozirnih dijelova na južno orijentiranim fasadama, poboljšanje nepropusnosti zraka i toplinske izolacije upotrebom višeslojnog ostakljenja, različitih premaza i sl.

U literaturi je sve veći interes za povećanjem energetske učinkovitosti zgrada kontrolom pregrijavanja, osobito u kontekstu klimatskih promjena i rastuće potrebe za hlađenjem. Međutim, većina postojećih istraživanja fokusira se na analizu neprozirnih dijelova omotača, dok je pitanje pregrijavanja uzrokovano sunčevim zračenjem kroz prozore znatno manje istraženo. Metode koje se bave prozorskim površinama ograničene su i često ne osiguravaju sveobuhvatnu procjenu dinamičkog ponašanja u stvarnim uvjetima. Također, nedostaju holističke i interdisciplinarnе metodologije koje kombiniraju arhitektonski dizajn, tipologije ostakljenja i pasivne sustave solarne zaštite.

Nedavne komparativne studije između tradicionalnih i bioklimatskih zgrada [30–34] pokazuju pozitivan utjecaj integriranih pasivnih strategija u održavanju termalne ugone u interijeru [35], s rezultatima smanjenja pregrijavanja za više od 50 % u gotovo svim regijama [36]. Na primjer, vanjska zasjenjenja u *Passiv Haus* zgradi u Sloveniji održavala su unutarnju temperaturu između 20 °C i 25 °C tijekom kolovoza [37]. Slična

istraživanja koja su primjenjivala strategiju zasjenjenja južno orijentiranih površina pokazala su da održavanje 70 % zasjene tijekom toplih razdoblja znatno smanjuje potrebu za hlađenjem [38]. Također, automatski sustavi zasjenjenja nadmašuju ručne sustave i umanjuju probleme s pregrijavanjem [39, 40]. Važnost vanjskih sustava zasjenjenja kod izoliranih poslovnih zgrada pokazala je obećavajuće rezultate u smanjenju potrebe za hlađenjem, no s povećanjem potrebe za grijanjem i rasvjetom, što dokazuje da su takvi sustavi učinkovitiji u toplim klimama [41, 42].

Cilj ovoga rada jest predstaviti mogućnost optimiranja unutarnjih uvjeta primjenom jednostavnih i lako primjenjivih rješenja na prozore koja se bave unutarnjom insolacijom. Za takav pristup neophodno je primjenjivati softverski alat za simulaciju kako bi se analiziralo trenutačno stanje i identificirali problemi na temelju univerzalnog pokazatelja toplinske udobnosti (eng. *universal thermal climate index* - UTCI), definirao skup rješenja te simulirali i analizirali rezultati. U tome smislu koristi se softver za simulaciju energetske učinkovitosti zgrada, pri čemu optimizacijski proces uključuje definiciju kompleksnih algoritama za identifikaciju varijabli i ograničenja, postavljanje ciljeva te provođenje simulacija radi pronalaska optimalnih rješenja [43].

Generirani algoritam testira se na konkretnome primjeru sveučilišne zgrade, koristeći ulazne podatke iz otvorenih izvora klimatskih parametara za određenu lokaciju, u cilju smanjenja unutarnjih temperatura tijekom ljetnog razdoblja kada su vanjske temperature najviše. Cijeli proces teži automatizaciji, bez potrebe za ručnim odlukama dizajna, uz jednostavnu mogućnost prilagodbe.

2.1. Primjena Indeksa toplinske klime (TCI) u energetske projektiranju

Toplinski stres utječe na ljudsko ponašanje, zdravlje i učinkovitost. Različiti klimatski parametri, uključujući temperaturu, relativnu vlažnost zraka, brzinu vjetra i sunčevo zračenje, imaju ključnu ulogu u oblikovanju fizičke i psihološke percepcije unutarnjeg okoliša. Toplinska ugodnost obično se procjenjuje na temelju subjektivnog osjećaja ispitanika (najmanje 1300 sudionika). Prema normi BAS EN ISO 7730, unutar metode FANGER [44] definirani su indeksi za opisivanje unutarnje ugodnosti, i to PMV (*Predicted Mean Vote*), što označava srednju vrijednost subjektivne ocjene toplinske ugodnosti, te PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*), koji izražava postotak osoba nezadovoljnih klimatskim uvjetima u prostoru [45]. Europska norma EN 15251 predlaže projektne raspone temperature zraka koji su u skladu s prihvatljivim razinama toplinske ugodnosti. Zato je precizno izračunavanje PMV-a, PPD-a i pripadajuće operative temperature vrlo važno za kvalitetu unutarnjeg okoliša (IEQ) i uštedu energije [46–48]. Prema normi ISO 7730 [45], prostor se smatra termički ugodnim ako se 80 % korisnika osjeća neutralno ili ugodno [48].

Temperatura i vlažnost, na primjer, ključni su elementi koji utječu na način na koji se toplota percipira i tolerira. Visoke temperature u kombinaciji s povećanom vlagom mogu uzrokovati nelagodu i

opteretiti sposobnost tijela da se ohladi, što može dovesti do stanja poput toplinskog iscrpljenja ili toplinskog udara. Sunčevo zračenje dodatno utječe na toplinsku dinamiku unutarnjih prostora, utječući na temperaturu i razinu osvijetljenosti, što posredno oblikuje i korisničko iskustvo boravka u prostoru.

Ti klimatski utjecaji različito se percipiraju ovisno o osobnim čimbenicima poput odjeće, razine aktivnosti i individualne tolerancije na toplotu. Kako bi se ta subjektivna toplinska opažanja sustavno razumjela i kvantificirala, istraživači su razvili više indeksa. Ti indeksi prevode složene klimatske interakcije u mjerljive vrijednosti, omogućujući objektivnu procjenu toplinske ugodnosti i toplinskog stresa. Neki od najčešće korištenih indeksa uključuju *Wet Bulb Globe Temperature* (WBGT), *Heat Index* (HI) i *Universal Thermal Climate Index* (UTCI), koji integrira više meteoroloških parametara za procjenu toplinskih uvjeta. Ovaj rad oslanja se na računalni program koji koristi vanjsku temperaturu kao ulazni parametar pa su na temelju toga izračunani i WBGT i UTCI. Ti indeksi dragocjeni su u projektiranju i održavanju unutarnjih prostora koji podržavaju zdravlje, udobnost i učinkovitost. Njihovom primjenom moguće je oblikovati strategije klimatizacije kojima se ublažavaju negativni učinci toplinskog stresa, čime se poboljšava iskustvo unutarnjeg prostora i podržavaju optimalna ljudska izvedba i dobrobit.

UTCI je uveden 1994. Uključuje suhu temperaturu zraka [49], relativnu vlažnost, sunčevo zračenje i brzinu vjetra te se priznaje kao referentna ekološka temperatura koja uzrokuje neugodu [50]. Njegovu je primjenu podržalo Međunarodno društvo za biometeorologiju, a dodatno je ojačana kroz COST akciju 730 [49, 51].

Standardna efektivna temperatura (SET) ističe se kao logičan i sveobuhvatan indikator toplinske ugodnosti, temeljen na dva fiziološka čimbenika: temperaturi kože i vlažnosti kože [52].

UTCI se smatra najcjelovitijim indeksom za definiranje toplinske ugodnosti. Definiran je kao temperatura zraka referentnog okoliša koja uzrokuje jednak indeks fiziološkog opterećenja u usporedbi s odgovorom referentne osobe na stvarne uvjete. UTCI se smatra jednim od najsveobuhvatnijih indeksa za izračun toplinskog stresa u vanjskim prostorima [53]. Parametri koji se uzimaju u obzir pri izračunu UTCI-a uključuju suhu temperaturu, srednju temperaturu zračenja, tlak vodene pare (ili relativnu vlažnost) i brzinu vjetra (na visini od 10 m) [46].

2.2. Integracija evolucijskih algoritama u parametrijsko energetske modeliranje korištenjem otvorenih klimatskih podataka

Nedavni razvoj parametrijskog/algoritamskog računalnog programa potiče projektne tokove temeljene na algoritamskim procesima, skupovima naredbi i ulaznim podacima u odnosu na konvencionalne metode izravne manipulacije unutar CAD ili BIM modela. Posljednjih godina računalno potpomognuto projektiranje (CAD) prihvaćeno je u svim dijelovima svijeta zbog povećanja razine učinkovitosti u smislu projektnih mogućnosti, uštede vremena i troškova te mogućnosti

predviđanja realnih situacija još u fazi projektiranja [54]. Te napredne simulacije oslanjaju se na vremenske podatke kako bi se simulirali unutarnji i vanjski uvjeti, energetske performanse zgrade te biološke reakcije ljudi na te uvjete. Zato algoritamski računalni program može doprinijeti trima vrstama simulacija. Prva skupina simulacija usmjerena je na definiranje vremenskih uvjeta kao što su putanja Sunca, solarna iradijacija, učestalost vjetrova, brzina vjetrova i vlažnost zraka. Druga skupina predviđa učinke i scenarije ponašanja izgrađenog okoliša na temelju prethodno definiranih modela. Treća skupina bavi se složenim reakcijama ljudskog metabolizma na navedene uvjete.

Parametrijska modelarska okružja kao što su *Rhinoceros* i *Grasshopper* u kombinaciji sa simulacijskim alatima *Ladybug* i *Honeybee* pružaju snažnu osnovu za analizu energetske performansi. Projektanti mogu definirati varijable poput veličine prozora, dubine sjenila ili orijentacije pročelja unutar *Grasshoppera*. *Ladybuga* i *Honeybee* i tada simuliraju izloženost suncu, pristup dnevnom svjetlu i energetska opterećenja. Ti rezultati služe kao kriteriji za evoluciju optimalnih konfiguracija. Takav pristup posebno je učinkovit za smanjenje potrebe za hlađenjem u područjima visokoga solarnog dobitka, omogućujući ravnotežu između toplinske ugodnosti i dnevnog osvijetljenja.

Radni proces u ovome istraživanju uključuje primjenu suvremenih softverskih rješenja temeljenih na algoritamske razmišljanju, s automatiziranim procesom kreativnog definiranja arhitektonskih struktura. Računalni programi *Rhinoceros* i *Grasshopper* označavaju promjenu u paradigmi projektiranja koju su ranije definirali CAD i BIM alati, zahvaljujući svojem temelju u matematičkim i programskim logikama. *Rhinoceros* je tipičan 3D računalni program za modeliranje jednostavne i složene geometrije, ali s dodatkom dodatka *Grasshopper* postaje alat sposoban za izvođenje naprednih energetske simulacije. Te simulacije mogu postati sastavni dio arhitektonskog projektiranja, koje se sve više temelji na podacima.

Temeljna ideja parametrijskog projektiranja jest primjena matematičkih algoritama za optimiranje određenih projektnih ciljeva u sklopu zadanih ograničenja [43]. Danas dodatni softverski moduli za *Grasshopper* omogućuju simulaciju okolišnih i energetske performansi zgrada, ali njihove mogućnosti još uvijek nisu široko primijenjene, što otvara prostor za daljnja istraživanja i širu integraciju u svakodnevnu praksu. Također, nedostatak jasnih i sveobuhvatnih uputa za korištenje tih modula dodatno otežava njihovu implementaciju.

Za procjenu okolišnih performansi različitih tipova zgrada trebalo je provesti analizu sunčeva zračenja i izračun vanjske udobnosti. Te su procjene izvedene pomoću alata *Ladybug* i *Honeybee*, koji su integrirani u *Rhinoceros 3D* i *Grasshopper*. Alati *Ladybug* specijalizirani su za okolišni dizajn, točnije simulaciju izloženosti suncu i analizu sjene, dok *Honeybee* omogućuje simulacije energetske potrošnje i mikroklima.

Integracijom tih analiza i upotrebom povratnih informacija u stvarnome vremenu moguće je optimirati različite scenarije i tako poboljšati ukupnu kvalitetu dizajna [55, 56].

Ladybugov modul za izračun vanjske udobnosti zahtijeva geometriju zgrade i vremenske datoteke. *EnergyPlus* koristi datoteku *EnergyPlus Weather* (EPW) za bilo koju lokaciju, dostupnu kao otvoreni izvor podataka [57]. Ta analiza može obuhvatiti cijelu godinu ili određeni vremenski period. Rezultati uključuju UTCI indeks, razinu stresa pojedinca te postotak vremena tijekom kojeg prostor ostaje ugodan. UTCI, izražen u Celzijevim stupnjevima, uključuje utjecaj vremenskih uvjeta na ljude, uključujući sunčevo zračenje, vlažnost i brzinu vjetrova [56].

Pouzdanost alata *Ladybug* temelji se na znanstveno potvrđenim softverskim paketima kao što su *Radiance*, *EnergyPlus/OpenStudio*, *Therm/Window* i *OpenFOAM* [58]. U AEC sektoru (arhitektura, inženjerstvo i graditeljstvo) taj se alat može koristiti za izradu sveobuhvatne analize klime i studija toplinske udobnosti na mikro (objekti) i makro (naselja) razini, s mogućnošću skaliranja od radnih prostora do analiza urbanih toplinskih otoka i međusobne dispozicije zgrada.

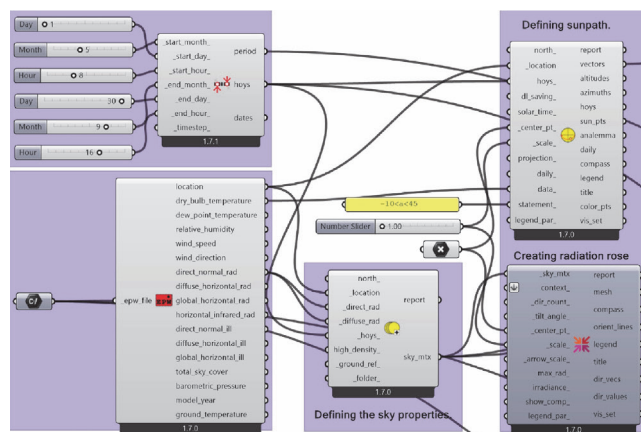
Drugi alat iz iste softverske arhitekture jest *Honeybee*, koji se temelji na simulacijskim mogućnostima *Ladybuga* i koristi se u kasnijim fazama projektiranja. Konkretno, omogućuje generiranje, izvođenje i vizualizaciju rezultata simulacija osvijetljenosti i zračenja pomoću *Radianced* te energetske modele putem *EnergyPlus/OpenStudio* [59]. Njegova primjena uključuje izradu studija osvijetljenja, godišnjih analiza dnevne svjetlosti (što je primijenjeno i u ovome istraživanju), analize odsjaja, analize toplinske udobnosti i slično.

Modeli i indeksi toplinske udobnosti važni su za analizu odnosa između ljudskog tijela i okoliša [60]. U praksi postoji nekoliko metoda za procjenu toplinske udobnosti: *Standard Effective Temperature*, *Perceived Temperature*, *Physiologically Equivalent Temperature* i *Universal Thermal Climate Index* [62]. I PET i UTCI pokazali su visoku razinu pouzdanosti u istraživanjima, a njihov indeks izražen je u Celzijevim stupnjevima, što ih čini lako razumljivima i stručnjacima izvan industrije te široj javnosti [62]. UTCI predstavlja ekvivalentnu temperaturu (°C) i mjeri fiziološki odgovor čovjeka na toplinske uvjete okoliša [60].

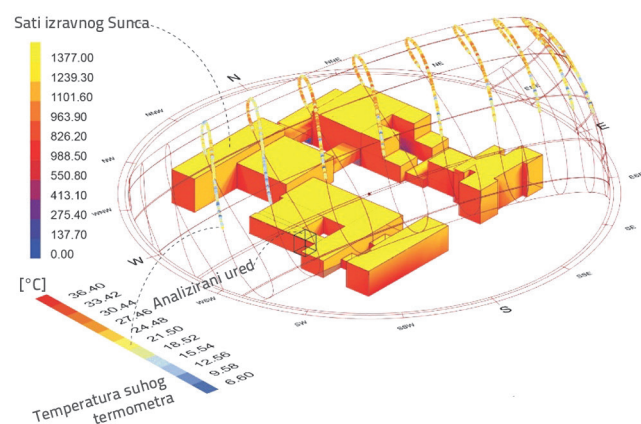
U brojnim istraživanjima UTCI se pokazao kao najpouzdaniji u najširem rasponu klimatskih uvjeta [62]. UTCI pretpostavlja prilagodbu u pogledu odjeće i aktivnosti, što ga čini prikladnim za proučavanje opće populacije [62], jer za razliku od PET-a ne zahtijeva podatke o vrsti odjeće i metabolizmu korisnika. Izračuni u ovome radu temelje se na otvorenim klimatskim podacima iz baze ASHRAE, na temelju kojih je prvo izračunan UTCI za studiju slučaja sveučilišnoga kompleksa u Banjoj Luci. Na temelju tih podataka izvedena je simulacija okolišnih i energetske performansi zgrade primjenom alata *Ladybug* u *Grasshopperu*. Prema definiciji, UTCI zahtijeva unos podataka o temperaturi zraka, relativnoj vlažnosti, brzini vjetrova i tokovima zračenja [62]. Svi ti parametri sadržani su u EPW datoteci korištenoj u ovome istraživanju.

2.3. Definiranje algoritma za studiju slučaja obrazovne ustanove u Banjoj Luci

Algoritam je izrađen na temelju klimatskih podataka za grad Banju Luku za razdoblje od 2007. do 2021. u obliku datoteke EPW pod licencom organizacije ASHRAE. Definirana je putanja Sunca radi potrebe simulacije insolacije tijekom navedenoga vremenskog razdoblja (slika 3.). Godišnji sati (HOYS) postavljeni su za razdoblje godine s najvišim temperaturama (tablica 1.), točnije od 1. svibnja do 30. rujna (slika 2.).



Slika 2. Ulazni parametri korišteni za simulaciju



Slika 3. Dijagram putanje Sunca definiran alatom Ladybug u Grasshopperu (grad Banja Luka, 1. svibnja – 30. rujna, 8:00 do 16:00 sati)

Nadalje, proračuni su rađeni samo za specifično razdoblje najveće zauzetosti zgrade, u intervalu od 8:00 do 16:00 sati. Simulacije su također uzele u obzir i druge čimbenike poput oblačnosti (*sky matrix*) i vjetra. Sličan pristup postoji i u ranijim istraživanjima, gdje su simulacije bile ograničene na radno vrijeme od 8.00 do 15.00 sati, a kolovoz isključen zbog zatvaranja objekta [65], no u ovome slučaju razmatrano je cijelo razdoblje zbog povremene zauzetosti analiziranog ureda i tijekom odmora.

Dijagram putanje Sunca koristi temperaturu suhog termometra (*Dry Bulb Temperature*), poznatu i kao temperatura zraka, što je

najčešće korištena meteorološka varijabla. Taj se naziv koristi jer se mjerenje provodi termometrom koji nije pod utjecajem vlage iz zraka. Temperatura suhog termometra mjeri se standardnim termometrom slobodno izloženim zraku, ali zaštićenim od izravnog zračenja i vlage. Obično se izražava u Celzijevim (°C) ili Fahrenheitovim stupnjevima (°F) [49].

Algoritamski model izrađen je radi daljnje analize utjecaja sunčeva zračenja i detekcije najviše insiliranih dijelova zgrade. Definirani dijagram putanje Sunca za navedeno razdoblje pokazao je da su južni zidovi sve manje izloženi suncu zbog novoizgrađenih stambenih zgrada, no zapadno orijentirane fasade nemaju zaštitu od izravnog zračenja i predstavljaju prioritet za intervencije. Osim orijentacije važni faktori za određivanje prioriteta zahvata su vrijeme i razina zauzetosti, vrsta rada i volumen prostora.

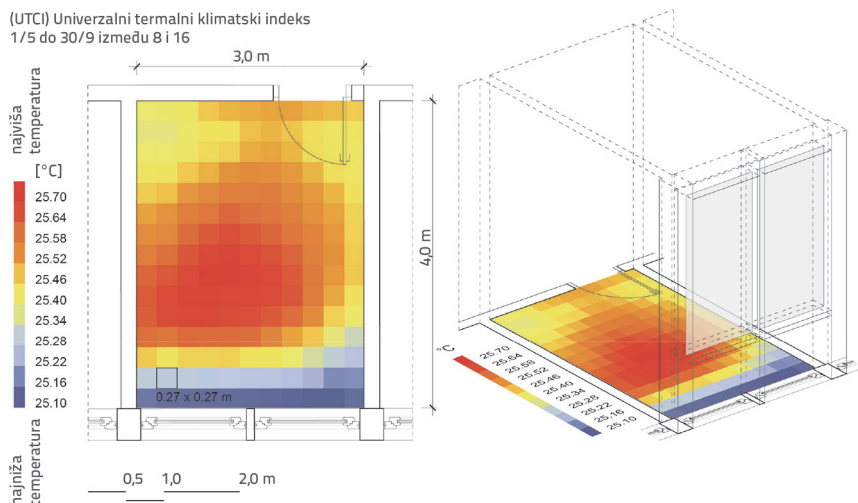
2.4. UTCI analiza uredskog prostora u kontekstu temperatura optimalnih za koncentraciju

U ovome istraživanju analiziran je tipičan uredski prostor unutar zgrade Tehnološkoga fakulteta. Sveučilišni kompleks izgrađen je između 1970. i 1980., a trenutno se nalazi u stanju koje zahtijeva sveobuhvatne mjere obnove. Tijekom vremena nekad reprezentativni obrazovni kompleks postao je zapušten, s brojnim manjkavostima uzrokovanim dizajnerskim propustima i dotrajalošću. U tome primjeru prisutni su gotovo svi znakovi lošeg upravljanja objektom poput propadanja fasade, toplinskih mostova na loše projektiranim detaljima, prokišnjavanja ravnoga krova, lošeg stanja instalacija, infiltracije zraka na spojevima stolarije i zidova te općeg pada funkcionalnosti obrazovne ustanove. Za rješavanje svih navedenih problema potreban je sveobuhvatan projekt adaptacije, rekonstrukcije i funkcionalnog preuređenja.



Slika 4. Prozor uredskog prostora primijenjen u studiji slučaja

U eksperimentalne svrhe korišten je tipičan uredski prostor površine 12 m², orijentiran prema zapadu (slika 4.). Ured nema nikakve prirodne ili umjetne barijere od sunca, što znači da je potpuno izložen izravnome sunčevu zračenju. Prethodne analize pokazale su da zapadna fasada prima između 963,90 i



Slika 5. UTCI analiza uredskog prostora orijentiranog prema zapadu bez sjenila na prozoru

1101,60 sati izravne insolacije tijekom analiziranog razdoblja. Kao rezultat te produžene izloženosti Univerzalni toplinski klimatski indeks unutar ureda kreće se između 25,10 °C i 25,70 °C (slika 5).

Na temelju tih vrijednosti može se zaključiti da one formalno spadaju u raspon propisan standardom ASHRAE 55, koji definira zonu toplotne ugodnosti između 22,8 °C i 26,1 °C [64]. Međutim, važno je napomenuti da su u izračun uključeni i mjeseci svibanj i rujan, koji imaju blaže klimatske uvjete u odnosu na vrhunac ljeta (tablica 1., slika 1.).

U usporedbi s drugim istraživanjima pragovi toplinske ugodnosti u Australiji definirani su unutar raspona od 20 °C do 24 °C, konkretno 21,5 °C ± 1,5 °C zimi i 22,5 °C ± 1,5 °C ljeti [65]. Nadalje, istraživanja su pokazala da temperature iznad 25,7 °C mogu negativno utjecati na kognitivne sposobnosti i smanjiti razinu koncentracije korisnika [66]. Jedno drugo istraživanje, koje je uspoređivalo kognitivne sposobnosti pri dvije različite temperature, pokazalo je da su pri 22 °C kognitivne funkcije bile stabilnije pa čak i stimulirane, dok je pri 24 °C zabilježen blagi pad koncentracije [67].

Uzimajući u obzir prikazane vrijednosti i činjenicu da su svibanj i rujan mjeseci s blažim klimatskim uvjetima, može se zaključiti da, iako zabilježene temperature formalno spadaju unutar ASHRAE definiranog raspona ugodnosti (22,8 °C do 26,1 °C), nalazi drugih istraživanja upozoravaju na to da temperature iznad 25,7 °C mogu narušiti kognitivne sposobnosti. To ističe potrebu za preciznijim pristupom u definiranju optimalnih unutarnjih uvjeta, osobito u kontekstu klimatskih promjena i sve češćih toplinskih valova.

Znatan problem identificiran u ovoj analizi jest stvaranje koncentrirane zone topline u središtu ureda. Ta neravnomjerna distribucija topline ne utječe samo na udobnost korisnika, već potencijalno smanjuje učinkovitost sustava hlađenja. Zato buduće intervencije moraju riješiti taj problem uvođenjem mjera koje će omogućiti ravnomjerniju raspodjelu temperature u prostoru. Potencijalne strategije za postizanje ujednačene raspodjele temperature uključuju:

- postavljanje reflektirajućih folija ili sjenila na prozore kako bi se smanjio toplinski dobitak
- primjenu ventilatora ili sustava za cirkulaciju zraka radi ravnomjernijeg raspršivanja toplog zraka
- ugradnju pasivnih elemenata hlađenja, na primjer, sjenila za prozore kako bi se smanjila izravna insolacija unutrašnjeg prostora.

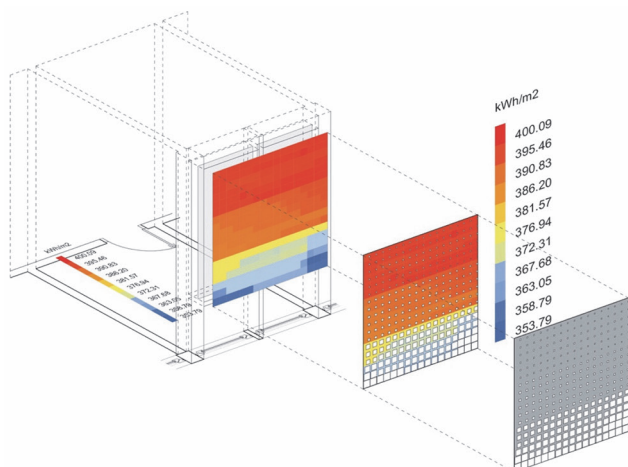
Rješavanjem tih izazova u distribuciji topline cilj je stvoriti ugodnije i energetski učinkovitije radno okruženje, smanjiti pojavu "vrućih točaka" i osigurati stabilnu i ugodnu temperaturu u cijelome prostoru.

3. Rezultati – procjena utjecaja rješenja na unutarnju solarnu insolaciju

Toplinski dobici u unutarnjemu prostoru nastaju zbog sunčeva zračenja, prijenosa topline kroz omotač zgrade, infiltraciju vanjskog zraka, metaboličke topline korisnika, toplinskih emisija rasvjete, strojeva i procesa (kuhanje, glačanje i sl.). Solarna toplina koja prolazi kroz prozirne dijelove omotača zgrade pokazala se kao glavni uzrok prekomjernog opterećenja sustava hlađenja, osobito kada su ti dijelovi orijentirani prema jugu i zapadu. Prema Hardyju i Mitchellu, za zgrade teške konstrukcije poput one u ovome istraživanju maksimalan udio ostakljenja u odnosu na neprozirni dio zida trebao bi iznositi 70 % u slučaju primjene klimatizacijskih sustava ili 45 % u slučaju primjene mehaničke ventilacije [68]. Međutim, analizirana zgrada ne raspolaže ni jednim oblikom kontrole kvalitete unutarnjeg zraka, zbog čega problem pregrijavanja postaje neizbježan. Smanjenje površine prozora zahtijevalo bi konstrukcijske zahvate i pritom bi se narušila vizualna udobnost u uredi. Moguće su različite alternativne mjere kao što su vanjski i unutarnji zasjeni elementi, žaluzine unutar dvostrukog ostakljenja te različite vrste staklenih premaza.

Kako bi se ublažio problem pregrijavanja uredskog prostora, za daljnju je analizu odabrano rješenje u obliku vanjskog sjenila. Takvi elementi mogu biti fiksni ili podesivi, a moraju biti projektirani tako da spriječe izravno sunčevo zračenje u odgovarajućim dijelovima dana i godine [69]. U tome smislu njihovo optimiranje mora omogućiti korisne solarne dobiteke tijekom zimskog razdoblja te spriječiti prodor izravnoga sunčeva svjetla tijekom petomjesečnog razdoblja najintenzivnijeg zračenja.

Analiza sunčeva zračenja provedena je pomoću alata *Honeybee* unutar *Grasshoppera*, koji je prikazao točnu insolaciju sjenila u promatranome razdoblju. Rezultati su pokazali da su donji dijelovi sjenila manje izloženi suncu, a gornji je dio u najvećoj mjeri osunčan (slika 6.).



Slika 6. Analiza zračenja sjenila s parametarskom definicijom perforacija

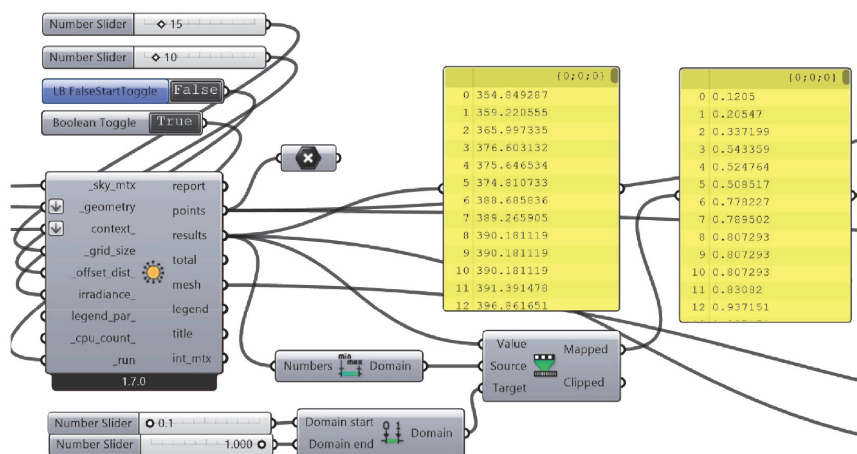
Na temelju provedene analize vertikalno sjenilo projektirano je tako da propušta više svjetla kroz manje osunčane dijelove, dok sprječava prodor izravnoga sunčeva svjetla kroz gornje dijelove panela. Parametarska definicija sjenila prikazana je na slici 7., gdje se vidi da su rezultati insolacije na ravnoj površini (kWh/m^2) pretvoreni u vrijednosti od 0 do 1, pri čemu 0 označava minimalnu površinu sjenila (najširi otvor za prolaz svjetla), a 1 maksimalnu površinu sjenila (najmanji otvor za svjetlo). U tome slučaju visina parapeta iznosi 1,00 m, a ukupna visina panela 3,00 m. Najveći udio perforacije nalazi se u zoni vidnog polja osobe u sjedećemu (radnome) položaju, čime su omogućeni vizualna udobnost i kontakt s vanjskim prostorom.

Nakon što je izrađen algoritam i definiran raspored perforacija sjenila, provedena je sveobuhvatna parametarska analiza radi procjene toplinskih svojstava sustava. Cilj te analize bio je prikazati način na koji se toplina raspršuje po površini te procijeniti utjecaj na efekt urbanoga toplinskog otoka u okolnome prostoru. Faza izrade algoritma uključuje složene računalne procedure kojima se osigurava optimalan dizajn perforacija sjenila. Te perforacije igraju ključnu ulogu u kontroli količine sunčeve svjetlosti koja prodire u prostor, a time i u regulaciji toplinskih tokova. Pozornim podešavanjem veličine, oblika i rasporeda perforacija algoritam omogućuje da se maksimalna količina

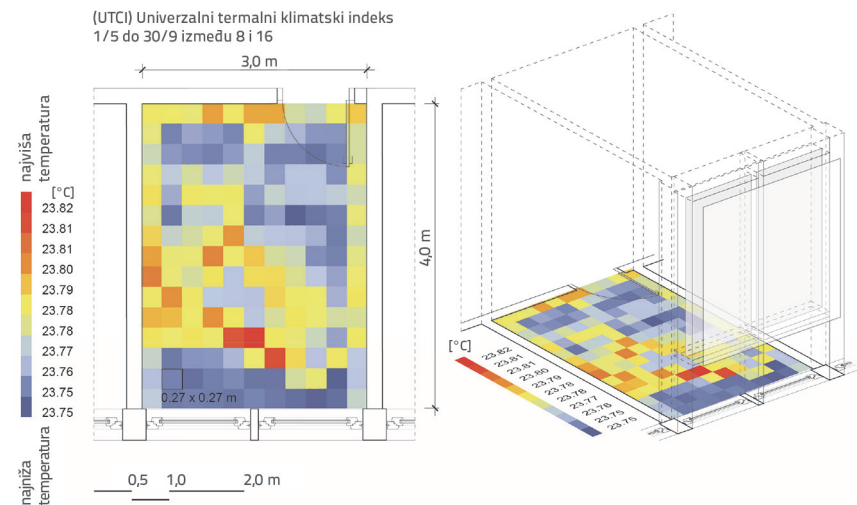
topline ili apsorbira ili reflektira radi smanjenja prekomjernog nakupljanja topline.

Nakon što je novi dizajn sjenila implementiran, provedena je parametarska analiza u kojoj su se sustavno mijenjali ulazni parametri kako bi se uočio njihov učinak na raspodjelu topline i utvrdila najučinkovitija konfiguracija. Za simulaciju toplinskog ponašanja korišteni su napredni alati koji omogućuju vizualizaciju i kvantifikaciju kretanja topline kroz površinu sjenila.

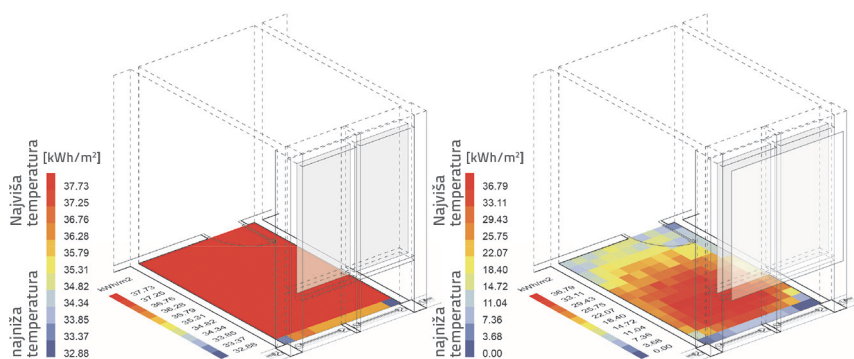
Tim metodološkim pristupom poboljšana je unutarnja toplinska udobnost smanjenjem solarnih dobitaka tijekom ljetnih mjeseci (slika 8.). Postignuto snižavanje maksimalne temperature u prostoriji za $1,88\text{ }^{\circ}\text{C}$ važan je rezultat i potvrđuje praktične prednosti primjene računalnih alata za projektiranje i optimiranje zgrada. UTCI analiza pokazala je da je nakon ugradnje sjenila raspodjela temperature u uredu postala ravnomjernija, čime je uklonjena prethodno identificirana zona koncentrirane topline u središtu prostora.



Slika 7. Dio algoritma s vidljivom pretvorbom sunčeva zračenja (lijevi žuti panel) u faktor skaliranja otvora sjenila (desni žuti panel)



Slika 8. UTCI analiza tipičnoga uredskog prostora nakon ugradnje vanjskog sjenila



Slika 9. Incidentno sunčevo zračenje u uredskome prostoru prije (lijevo) i nakon (desno) ugradnje sjenila

Veza između smanjene temperature prostorije, povećane toplinske udobnosti i smanjenih potreba za energijom za hlađenje vrlo je važna. Stvaranjem ugodnijega unutarnjeg ambijenta učinkovitim upravljanjem unutarnjom solarnom insolacijom moguće je smanjiti razinu oslanjanja na mehaničke sustave hlađenja, što dovodi do energetske uštede i pozitivnih utjecaja na okoliš.

Za potrebe detaljnije analize provedena je i simulacija incidentnoga sunčeva zračenja na pod uredskog prostora (slika 9.). Rezultati su pokazali znatno smanjenje insolacije u odnosu na stanje bez sjenila. Insolacija je smanjena na nulu u kutovima prostorije, a uz zidove zabilježena su velika smanjenja.

Taj proces pokazao je da rezultati parametarske analize ne samo da potvrđuju učinkovitost dizajna sjenila u kontroli unutarnje solarne insolacije, već pružaju uvide dragocjene za daljnje optimiranje. Dobiveni nalazi doprinose razvoju učinkovitijih pasivnih arhitektonskih rješenja koja mogu znatno unaprijediti toplinsku udobnost u urbanim sredinama te smanjiti negativne posljedice pregrijavanja.

4. Zaključak

Ovo istraživanje predstavlja pristup arhitektonskome projektiranju koji se temelji na matematičkim i parametrijskim principima. Predloženo je rješenje algoritamsko i koristi otvorene klimatske podatke, uključujući sunčevo zračenje, nebesku matricu i vjetar, nudeći fleksibilnu i skalabilnu metodu prilagodljivu različitim scenarijima. Studija slučaja fokusirana je na obrazovnu ustanovu u Banjoj Luci, gdje su simulacije provedene pomoću softvera *Rhinoceros* s dodacima *Grasshopper*, *Ladybug* i *Honeybee*. Analiza je bila ograničena na razdoblje najveće zauzetosti (8.00 – 16.00), a toplinska ugodnost procjenjivana je pomoću Univerzalnoga toplinskog klimatskog indeksa (UTCI), koji se kretao između 25,10 °C i 25,70 °C.

Predloženo vertikalno sjenilo, parametrijski definirano prema intenzitetu sunčeva zračenja koje pada na njegovu površinu, pokazalo se kao ključni početni korak u upravljanju toplinskom neugodnošću. Komparativna analiza sunčeva zračenja unutar prostora, sa sustavom zasjenjivanja i bez njega, potvrdila je njegovu učinkovitost. Projekt je postigao smanjenje maksimalne unutarnje temperature za 1,88 °C, čime je pokazano da pasivna, algoritamski vođena rješenja mogu poboljšati toplinsku ugodnost uz smanjenje oslanjanja na mehaničko hlađenje.

Buduća istraživanja mogu se usmjeriti na optimiranje udaljenosti panela od fasade, njegova kuta i segmentacije te na integraciju motoriziranih ili dinamičkih sustava. Ciljevi su tih nadogradnji produbljivanje optimiranja i potencijalno uklanjanje potrebe za tradicionalnim klimatizacijskim sustavima.

Ova studija ne ističe samo neposredne prednosti predloženog rješenja za zasjenjivanje, već skreće pozornost i na širu primjenu. Proširenjem algoritma mogu se postići znatna poboljšanja u učinkovitosti HVAC sustava, kontroli vlage, upravljanju protokom zraka i raspodjeli umjetne rasvjete. Ta poboljšanja podržavaju integriraniji i održiviji pristup upravljanju okolišnim uvjetima u arhitektonskim prostorima.

Zaključno, istraživanje nudi sveobuhvatan okvir za rješavanje problema toplinske ugodnosti u toplim klimatskim područjima, integrirajući napredni algoritamski dizajn s praktičnim pasivnim arhitektonskim rješenjima. Daljnji razvoj i primjena tih metoda mogu redefinirati tradicionalnu arhitektonsku praksu, potičući stvaranje prostora koji su energetske učinkovitiji i koji podržavaju zdravlje, učinkovitost i udobnost korisnika. Iako prikazani rezultati simulacija potvrđuju učinkovitost pasivnih strategija zasjenjivanja u smanjenju pregrijavanja uredskih prostora, potrebna su dodatna istraživanja kako bi se procijenila robusnost predloženog rješenja u različitim uvjetima. U ovom su istraživanju korišteni fiksni parametri za prikaz performansi prije i nakon primjene uređaja za zasjenjivanje. Međutim, buduća istraživanja mogu se fokusirati na procjenu kako varijacije ulaznih parametara poput dubine i kuta zasjenjivanja, omjera prozora i zida, svojstava ostakljenja, unutarnjih toplinskih dobitaka i brzine ventilacije utječu na toplinsku ugodnost i razinu pregrijavanja. Takve će analize pomoći u prepoznavanju najutjecajnijih projektantskih parametara te povećati pouzdanost i prilagodljivost predloženih pasivnih mjera u različitim tipologijama uredskih prostora i klimatskim uvjetima?

LITERATURA

- [1] Eurostat: Energy efficiency in buildings, <https://ephtinktank.eu/2016/07/08/energy-efficiency-in-buildings/>, [1.3.2024.]
- [2] Churchill, S.A., Smyth, R., Farrell, L.: Fuel poverty and subjective wellbeing, *Energy Economics*, 86 (2020).
- [3] Zohra Filali F., Zohra Chafi F.: Potrošnja energije i emisije CO₂ u zgradama: bibliometrijski pregled trendova, izazova i budućih smjernica, *Građevinar*, 77 (2025) 4, pp. 367–380, doi: <https://doi.org/10.14256/jce.4264.2025>
- [4] Biermann, P.: How fuel poverty affects subjective well-being: Panel evidence from Germany, 2016.
- [5] Kahouli, S.: An economic approach to the study of the relationship between housing hazards and health: the case of residential fuel poverty in France, *Energy Economics*, 85 (2020).
- [6] Igawa, M., Piao, X., Manag, S.: The impact of cooling energy needs on subjective well-being: Evidence from Japan, *Ecological Economics*, 198 (2022).
- [7] Morgan, C., Foster, J.A., Poston, A., Sharpe, T.R.: Overheating in Scotland: contributing factors in occupied homes, *Building Research & Information*, 45 (2017).
- [8] Sánchez-Guevara Sánchez, C., Mavrogianni, A., Neila González, J.: On the minimal thermal habitability conditions in low income dwellings in Spain for a new definition of fuel poverty, *Building and Environment*, 114 (2017), pp. 344–356
- [9] Trkulja T., Radujković, M., Nikolić-Topalović, M.: Sustav vertikalnog ozelenjavanja - model za poboljšanje energetske učinkovitosti zgrada, *Građevinar*, 74 (2022) 7, pp. 561–571, <https://doi.org/10.14256/JCE.3370.2021>
- [10] International Energy Agency: Tracking space cooling, <https://www.iea.org/energy-system/buildings/space-cooling/>, [1.3.2024.]
- [11] Kalfaoglu Hatipoglu H., Cetin R., Hatipoglu A.: Održivo stanovanje: Analiza energetske učinkovitosti u Turskoj u usporedbi s austrijskim građevinskim standardima, *Građevinar*, 74 (2022) 8, pp. 647–659, <https://doi.org/10.14256/JCE.3332.2021>
- [12] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SREX_Full_Report-1.pdf, [1.3.2024.]
- [13] Thomson, H., Simcock, N., Bouzarovski, S., Petrova, S.: Energy poverty and indoor cooling: An overlooked issue in Europe, *Energy and Buildings*, 196 (2019), pp. 21–29
- [14] International Energy Agency: Key energy statistics - Bosnia and Herzegovina, <https://www.iea.org/countries/bosnia-and-herzegovina/>, [1.3.2024.]
- [15] European Parliament: EU Directive 2023/1791 of the European parliament and of the council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending regulation (EU) 2023/955, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ%20%3AJOL_2023_231_R_0001&qid=1695186598766, [1.3.2024.]
- [16] European Parliament: EU Directive 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast), https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401275&pk_keyword=Energy&pk_content=Directive, [1.3.2024.]
- [17] Sesana, M.M., Salvalai, G., Della Valle, N., Melica, G., Bertoldi, P.: Towards harmonising energy performance certificate indicators in Europe, *Journal of Building Engineering*, 95 (2024), p. 110323
- [18] European parliament: Reducing carbon emissions: EU targets and policies, European Green Deal, <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20180305STO99003/reducing-carbon-emissions-eu-targets-and-policies/>, [1.3.2024.]
- [19] European Commission: An EU Strategy on Heating and Cooling, Brussels, 2016.
- [20] Nationally determined contributions for Bosnia and Herzegovina (NDC) for the period 2020 – 2030, https://climate-laws.org/document/bosnia-and-herzegovina-first-ndc-updated-submission_71c1, [7.4.2024.]
- [21] Okilj, U., Čvoro, M., Čvoro, S., Uljarević, Z.: The green dimension of a compact city: Temperature changes in the urban area of Banja Luka, *Buildings*, 13 (2023).
- [22] The Hydrometeorological Institute of the Republic of Srpska, <https://www.rhmzrs.com/>, [31.5.2023.]
- [23] Nišandžić, M.: Typology of Public Buildings in Bosnia and Herzegovina, UNDP in Bosnia and Herzegovina, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2018.
- [24] Hadžikadić, E.: Typology of public buildings in Bosnia and Herzegovina, Proceedings of The 4th Energy summit in Bosnia and Herzegovina, https://www.energy-community.org/dam/jcr:1bac2ed9-9f87-4fd6-ab69-c6a75ff40a5e/EECG_UNDP_BH_062018.pdf, [21.3.2024.]
- [25] The Strategy for adaptation to climate change and low-emission development of Bosnia and Herzegovina for the period 2020 – 2030, UNDP, https://unfccc.int/sites/default/files/resource/ENG_CC_%20adaptation_%20and_%20Low_%20emission_%20development_%20Strategy_%20BiH_%202020-2030.pdf, [15.4.2024.]
- [26] Ministry of Spatial Planning, Civil Engineering and Ecology: Rulebook on energy survey and energy certificate publication, Official Gazzete of The Republic of Srpska 40/13, Banja Luka, 2015.
- [27] Yi, C., Bing, X.: Encyclopedia of sustainable technologies, 2017.
- [28] Gajić, D., Peulić, S., Mavrić, T., Sandak, A., Tavrzes, Č., Malešević, M., Slijepčević, M.: Energy retrofitting opportunities using renewable materials - Comparative analysis of the current frameworks in Bosnia-Herzegovina and Slovenia, *Sustainability*, 13 (2021).
- [29] Peulić, S., Gajić, D., Mitrović, Z.: Reliability of experimental methods to determine heat transmission coefficient of the existing building façade wall, *Thermal Science*, 29 (2025), pp. 2185–2197
- [30] Camara, T., Kamsu-Foguem, B., Diourte, B., Issa Maïga, A., Habbadi, A.: Management and assessment of performance risks for bioclimatic buildings, *Journal of Cleaner Production*, 147 (2017).
- [31] Katsaprakakis, D., Georgila, K., Zidianakis, G., Michopoulos, A., Psarras, N., Christakis, D., Condaxakis, C., Kanouras, S.: Energy upgrading of buildings. A holistic approach for the Natural History Museum of Crete, Greece, *Renewable Energy*, 114 (2017), pp. 1306–1332
- [32] Pajek, L., Košir, M.: Implications of present and upcoming changes in bioclimatic potential for energy performance of residential buildings, *Building and Environment*, 127 (2018), pp. 157–172
- [33] Soutullo, S., Sanchez, M.N., Enriquez, R., Olmedo, R., Jimenez, M.J., Heras, M.R.: Comparative thermal study between conventional and bioclimatic office buildings, *Building and Environment*, 105 (2016), pp. 95–103

- [34] Soutullo, S., Sanchez, M.N., Enriquez, R., Olmedo, R., Jimenez, M.J.: Bioclimatic vs. conventional building: experimental quantification of the thermal improvements, *Energy Procedia*, 122 (2017), pp. 823-828
- [35] Puertolas Felices, R., Losada Gonzalez, J.C., Soutullo Castro, S., Aguilera Benito, P., Vinas Arrebola, C.: A bioclimatic building in Madrid: Analysis of the thermal response and long-term comfort indices review, *Developments in the Built Environment*, 3 (2020)
- [36] Harkouss, F., Fardoun, F., Biwole, P.H.: Passive design optimisation of low energy buildings in different climate, *Energy*, 165 (2018), pp. 591-613
- [37] Mlakar, J., Štrancar, J.: Overheating in residential passive house: Solution strategies revealed and confirmed through data analysis and simulations, *Energy and Buildings*, 43 (2011), pp. 1443-1451
- [38] Wang, Y., Kuckelkorn, J., Zhao, F., Spliethoff, H., Lang, W.: A state of art of review on interactions between energy performance and indoor environment quality in Passive House buildings, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 72 (2017), pp. 1303-1319
- [39] Ip, K., Lam, M., Miller, A.: Shading performance of a vertical deciduous climbing plant canopy, *Build. Environ.*, 45 (2010), pp. 81-88
- [40] Hammad, F., Abu-Hijleh, B.: The energy savings potential of using dynamic external louvers in an office building, *Energy Build.*, 42 (2010), pp. 1888-1895
- [41] Bellia, L., De Falco, F., Minichiello, F.: Effects of solar shading devices on energy requirements of standalone office buildings for Italian climates, *Appl. Therm. Eng.*, 54 (2013), pp. 190-201
- [42] Figueroa-Lopez, A., Arias, A., Oregi, X., Rodriguez, I.: Evaluation of passive strategies, natural ventilation and shading systems, to reduce overheating risk in a passive house tower in the north of Spain during the warm season, *Journal of Building Engineering*, vol. 43 (2021)
- [43] Chi, D., Gonzalez, E., Valdivia, R., Gutierrez, E.: Parametric design and comfort optimization of dynamic shading structures, *Sustainability*, 13 (2021).
- [44] Fanger, P.O.: Thermal comfort - Analysis and applications in environmental engineering, Danish Technical Press Copenhagen, 1970.
- [45] International Standardization Organization: ISO 7730:2005: Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2005.
- [46] Zare, S., Hasheminejad, N., Shirvan, H.E., Hemmatjo, R., Sarebanzadeh, K., Ahmadi, S.: Comparing Universal Thermal Climate Index (UTCI) with selected thermal indices/environmental parameters during 12 months of the year, *Weather and Climate Extremes*, 19 (2018), pp. 49-57
- [47] European Commission: EN 15251: Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics, Brussels, 2007.
- [48] Gajić, D., Stupar, D., Antunović, B., Janković, A.: Determination of the energy performance indicator of kindergartens through design, measured and recommended parameters, *Energy and Buildings*, 204 (2019).
- [49] National Weather Service: Temperatures including dry bulb/ wet bulb/ dew point/ potential/ equivalent potential, https://weather.gov/source/zhu/ZHU_Training_Page/definitions/dry_wet_bulb_definition/dry_wet_bulb.html, [17.4.2024.]
- [50] Baaghideh, M., Mayvaneh, F., Shojaei, T.: Evaluation of human thermal comfort using UTCI index: Case study Khorasan Razavi, *Natural Environment Change*, 2 (2016), pp. 165-175
- [51] Cost Action 730: Towards a Universal Thermal Climate Index (UTCI) for assessing the thermal environment of the human being, <https://www.cost.eu/actions/730/>, [1.3.2024.]
- [52] Blazejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H., Tinz, B.: Comparison of UTCI to selected thermal indices, *International Journal of Biometeorology*, 56 (2012), pp. 515-535
- [53] Blazejczyk, K.: New climatological-and-physiological model of the human heat balance outdoor (MENEX) and its applications in bioclimatological studies in different scales, (1994) 1, pp. 27-58
- [54] Bedra, K.B., Zheng, J., Li, J., Sun, Z., Zheng, B.: Automating microclimate evaluation and optimization, *Sustainability*, 15 (2023).
- [55] Roudsari, M., Pak, M., Smith, A.: Ladybug: A parametric environmental plugin for Grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design, BS2013, 2013.
- [56] Fink, T., Koenig, R.: Integrated parametric urban design in Grasshopper / Rhinoceros 3D demonstrated on a Master Plan in Vienna, Data - city information modelling and gis, 3 (2023), pp. 313-322
- [57] Weather Data, Energy Plus: <https://energyplus.net/weather>, [17.2.2024.]
- [58] Ladybug Tools LLC: What is Ladybug Tools?, <https://www.ladybug.tools/#intro>, [17.2.2024.]
- [59] Honeybee, Ladybug Tools LLC, <https://www.ladybug.tools/honeybee.html>, [17.2.2024.]
- [60] Ji, W., Yingxin, Z., Heng, D., Cao, B., Zhiwei, L., Yang, G., Shuli, L., Jianyin, X., Changhui, Y.: Interpretation of standard effective temperature (SET) and explorations on its modification and development, *Building and Environment*, 210 (2022).
- [61] Gagge, A., Fobelets, A., Berglund, L.: A standard predictive index of human response to the thermal environment, *ASHRAE Transactions*, 1986.
- [62] Elrefai, R., Nikolopoulou, M.: A simplified outdoor shading assessment method (OSAM) to identify outdoor shading requirements over the year within an urban context, *Sustainable Cities and Society*, 97 (2023).
- [63] Thermal Comfort Indices - Universal Thermal Climate Index, 1979-2020, Climate-ADAPT, <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/indicators/thermal-comfort-indices-universal-thermal-climate-index-1979-2019>, [14.5.2024.]
- [64] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: ANSI/ASHRAE Standard 55 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, 2023.
- [65] Roussac, A.C., Bright, S.: Improving environmental performance through innovative commercial leasing: An Australian case study. *International Journal of Law in the Built Environment*, 4 (2012), pp. 6-22
- [66] Hancock, P.A., Ross, J.M., Szalma, J.L.: A meta-analysis of performance response under thermal stressors, *Humans Factors*, 49 (2007), pp. 851-877
- [67] Zhang, F., de Dear, R.: University students' cognitive performance under temperature cycles induced by direct load control events, *Indoor Air*, 27 (2016), pp. 78-93
- [68] Hardy, A., Mitchell, H.: Building a climate: The Wallsend project, Electricity Council, 1969.
- [69] Legg, R.: Air Conditioning System Design, Chapter 5 - Room Heat Gains, Air Diffusion, and Air Flow Rates, Elsevier Ltd., 2017.