

Primljen / Received: 2.9.2019.

Ispravljen / Corrected: 19.12.2019.

Prihvaćen / Accepted: 5.1.2020.

Dostupno online / Available online: 10.8.2020.

Indirektna zelena fasada kao mjera za sprečavanje pregrijavanja

Autori:



Mr.sc. **Valentina Lesjak**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Ljubljani, Slovenija
Fakultet građevinarstva i geodezije
Katedra za zgradarstvo i građevinske konstrukcije
valentina.lesjak94@gmail.com



Mr.sc. **Luka Pajek**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Ljubljani, Slovenija
Fakultet građevinarstva i geodezije
Katedra za zgradarstvo i građevinske konstrukcije
luka.pajek@fgg.uni-lj.si

Autor za korespondenciju



Doc.dr.sc. **Mitja Košir**, dipl.ing.arh.
Sveučilište u Ljubljani, Slovenija
Fakultet građevinarstva i geodezije
Katedra za zgradarstvo i građevinske konstrukcije
mitja.kosir@fgg.uni-lj.si

Prethodno priopćenje

Valentina Lesjak, Luka Pajek, Mitja Košir

Indirektna zelena fasada kao mjera za sprečavanje pregrijavanja

U radu je prikazana simulacija i eksperimentalno istraživanje utjecaja indirektno zelene fasade (IZF) na toplinsko ponašanje zgrade. Istraživanje je provedeno na lokaciji Punat na otoku Krku u Hrvatskoj tijekom ljeta 2018. godine. Primjenom IZF-a utjecaj sunčevog zračenja smanjen je do 505 W/m², a temperature na vanjskoj površini fasade smanjene su do 13,5 K. Eksperimentalni su rezultati korišteni za simuliranje toplinske ugodnosti u unutrašnjosti zgrade primjenom jednostavnog modela. Kada je IZF postavljen preko čitavog zida izloženog suncu, prosječno smanjenje operative temperature iznosilo je do 6 K za novu zgradu, tj. do 5 K za tradicionalnu kamenu kuću.

Ključne riječi:

vertikalni vrtni sustavi, indirektna zelena fasada, Sunčevo zračenje, površinska temperatura fasade, operativna temperatura

Research paper

Valentina Lesjak, Luka Pajek, Mitja Košir

Indirect green façade as an overheating prevention measure

Simulation and experimental investigation of the indirect green façade (IGF) impact on thermal behaviour of buildings is presented in the paper. The study was conducted in Punat, Krk, Croatia, in the summer of 2018. The IGF reduced the incident solar radiation by up to 505 W/m² and façade temperatures by up to 13.5 K. Experimental results were used to simulate the indoor thermal comfort of a simple building model. When IGF was positioned across the entire sun-exposed wall, an average decrease of operative temperature was up to 6 K for a new house and up to 5 K for a traditional stone house.

Key words:

vertical greenery systems, indirect green façade, solar radiation, façade surface temperature, operative temperature

Vorherige Mitteilung

Valentina Lesjak, Luka Pajek, Mitja Košir

Fassadenbegrünung als Maßnahme gegen Überhitzung

In der Abhandlung werden eine Simulation und eine experimentelle Untersuchung des Einflusses einer Fassadenbegrünung auf das Wärmeverhalten des Gebäudes dargestellt. Die Untersuchung wurde in Kroatien am Standort Punat auf der Insel Krk während des Sommers 2018 durchgeführt. Durch Anwendung einer Fassadenbegrünung wurde der Einfluss der Sonneneinstrahlung um bis zu 505 W/m² gesenkt, und die Temperatur an der Außenfläche der Fassade wurde um bis zu 13.5 K gesenkt. Die experimentellen Ergebnisse wurden verwendet, um den thermischen Komfort im Inneren des Gebäudes durch Anwendung eines einfachen Modells zu simulieren. Als die Fassadenbegrünung über die gesamte Wand angebracht wurde, die der Sonne ausgesetzt ist, betrug die Senkung der Betriebstemperatur bis zu 6 K für das neue Gebäude, d. h. bis 5 K für ein traditionelles Steinhaus.

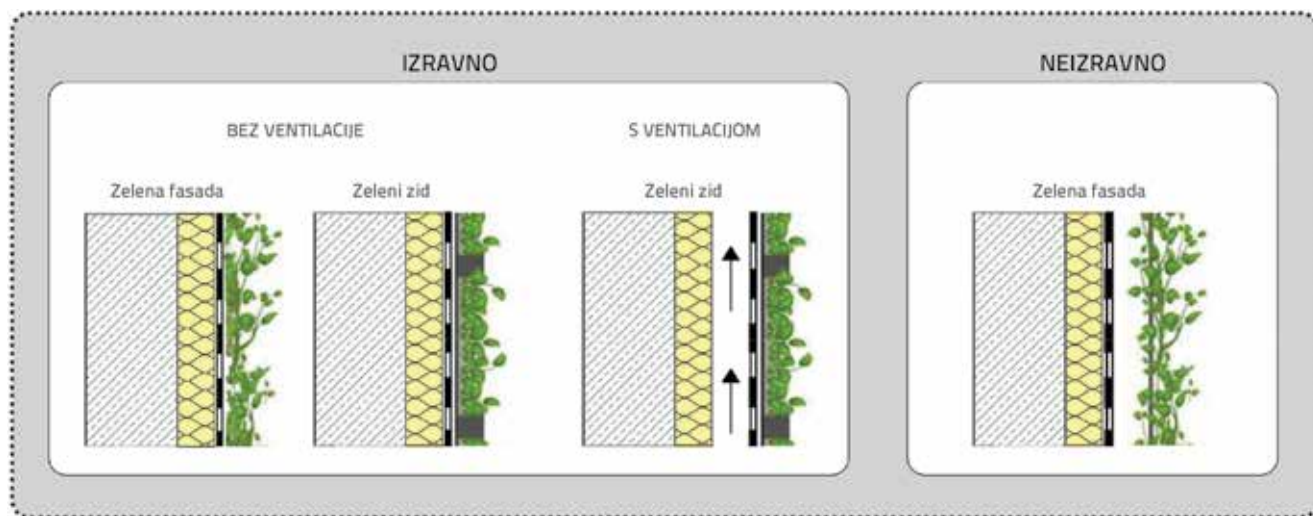
Schlüsselwörter:

vertikale Gartensysteme, Fassadenbegrünung, Sonneneinstrahlung, Oberflächentemperatur der Fassade, Betriebstemperatur

1. Uvod

U današnjem svijetu zbog sve prisutnije globalizacije i tendencije međusobnog povezivanja, više od polovine svjetskog stanovništva (55 %) živi u urbaniziranim područjima [1]. U Europi udio populacije koja živi u gradovima još je i veći te sada iznosi čak 74 %. Uz tehnološki i ekonomski razvoj, visoka razina urbanizacije jedan je od osnovnih razloga za radikalno povećanje potrošnje energije na globalnoj razini, posebno u posljednja četiri desetljeća [1]. Međunarodna energetska agencija [2] navodi da je ukupna globalna potrošnja energije u prosjeku porasla za više od dva puta u razdoblju od 1971. do 2017. godine. Veliki udio ukupne globalne potrošnje energije otpada na zgrade radi održavanja unutarnje toplinske ugodnosti i osvjetljenja [3], pa se stoga može reći da su energetska učinkovitost i niski utjecaji na okoliš dva najveća izazova s kojima se danas suočava građevinska industrija. Zbog toga se stalno ulažu veliki napor u razvoj novih materijala i građevinskih tehnologija s naglaskom na kakvoću boravka u unutarnjim prostorima, a ona uvjetuje i izbor tipa vanjske ovojnice zgrade [4]. Nprekidna težnja prema razvoju energetske učinkovitijih, ekološki prihvatljivijih i toplinski ugodnijih zgrada potaknula je inženjere i arhitekta da u ovojnice zgrada uključe i zelene površine [5] jer pozitivno utječu na ponašanje zgrade, pogotovo u sezoni hlađenja. Horizontalni vrtni sustavi istražuju se još od šezdesetih godina prošlog stoljeća kada su novi materijali i tehnologije omogućili učinkovito projektiranje zelenih krovova [6], a danas su ti sustavi razvijeni gotovo do savršenstva. Stoga se pozornost projekatana sada sve više usmjerava prema integraciji vertikalnih zelenih površina u zgrade. Iako se biljke spontano penju po vertikalnim površinama još od vremena građenja prvih ljudskih nastambi, trend namjernog sađenja biljaka po tim površinama primjenjuje se tek od prije nekoliko desetljeća. Vertikalni vrtni sustavi (VVS) mogu na brojne načine povoljno utjecati na vanjsku ovojnicu zgrade, kao npr. zasjenjivanjem, hlađenjem uslijed isparavanja, dodatnim izoliranjem prostora te

smanjivanjem brzine strujanja vjetra po vanjskoj površini [7]. Od navedenih povoljnih utjecaja, do sada su se najčešće empirijski istraživali utjecaji VVS sustava [8]. Osim spomenutih utjecaja, VVS sustavi također štite fasadne površine od ultraljubičastog zračenja, kiše, ekstremnih promjena temperature i vlage, a mogu i smanjiti štetnu buku te povećati vrijednost nekretnine [5, 9]. U urbanim sredinama, primjena VVS sustava može dovesti do smanjenja zagađenja zraka i manjeg akumuliranja prašine i teških metala, do poboljšanja zdravlja i općeg stanja stanara zgrade [10] te do porasta bioraznolikosti u urbanim sredinama [11]. VVS sustave možemo podijeliti u četiri osnovne skupine prema načinu projektiranja zidova i položaju vegetacije (slika 1.). Iako ima mnogo različitih VVS sustava, indirektna zelena fasada (IZF) ubraja se među najjednostavnija rješenja, i to naročito zbog jednostavne izvedbe (u mnogim je slučajevima postavljena na zasebnu konstrukciju) i nezahtjevnog održavanja. O utjecaju VVS-a na zgrade do sada je proveden velik broj istraživanja. Tako su Wong i suradnici [12] istražili osam različitih VVS sustava te su ustanovili da je interakcija između površine, geometrije i boje lista s jedne strane, te mikroklimatskih uvjeta kao što je Sunčevo zračenje, s druge, poprilično složena te da može dovesti do različitih učinaka hlađenja tijekom dana i noći. Na primjer, u njihovoj analizi sposobnost IZF-a smanjenju površinske temperature fasade u odnosu na slučaj bez korištenja IZF-a iznosila je 4,4 K. Do sličnih zaključaka došli su i Perez sa suradnicima [13] analizirajući utjecaj IZF-a u kojem je korištena biljka *Wisteria sinensis* (listopadna penjačica). Ustanovili su da je temperatura na vanjskoj površini fasade smanjena od 5,5 K pa sve do 15,2 K u kolovozu, tj. rujnu kada je korišten IZF. Slični su rezultati dobiveni i u mnogim drugim istraživanjima za različite biljke i za različite klimatske uvjete [14-25]. Općenito se može reći da je smanjenje površinske temperature nakon primjene IZF-a u najvećoj mjeri ovisilo o vrsti biljke (tj. o površini listova) i o klimatskim uvjetima (npr. o količini vlage, temperaturi zraka i intenzitetu Sunčevog zračenja). U nekim je studijama dodatno istražen utjecaj IZF-a na uvjete u unutrašnjosti zgrade te na potrošnju energije. Istraživanjem



Slika 1. Podjela vertikalnih vrtnih sustava

provedenim u suhoj mediteranskoj kontinentalnoj klimi, Perez i suradnici [13] pokazali su da se temperatura zraka smanjuje za 1,5 K tijekom ljeta kada je biljka u punom rastu. Analizirajući eksperimentalnu pregradu u mediteranskoj klimi, Coma i suradnici [16] utvrdili su da je u rujnu temperatura smanjena za 1 K zahvaljujući primjeni IZF-a. Međutim, po danu je u mjesecu srpnju smanjenje temperature iznosilo samo 1 % (za 50-postotnu pokrivenost zida, i za održavanu temperaturu unutarnjeg zraka od 24 °C). Sasvim suprotne rezultate dobili su Perez i suradnici [21] u vrućoj i suhoj klimi gdje je ustanovljena ušteda energije od 34 % tijekom sezone hlađenja za indeks površine lista (IPL) od 3,5 do 4,0.

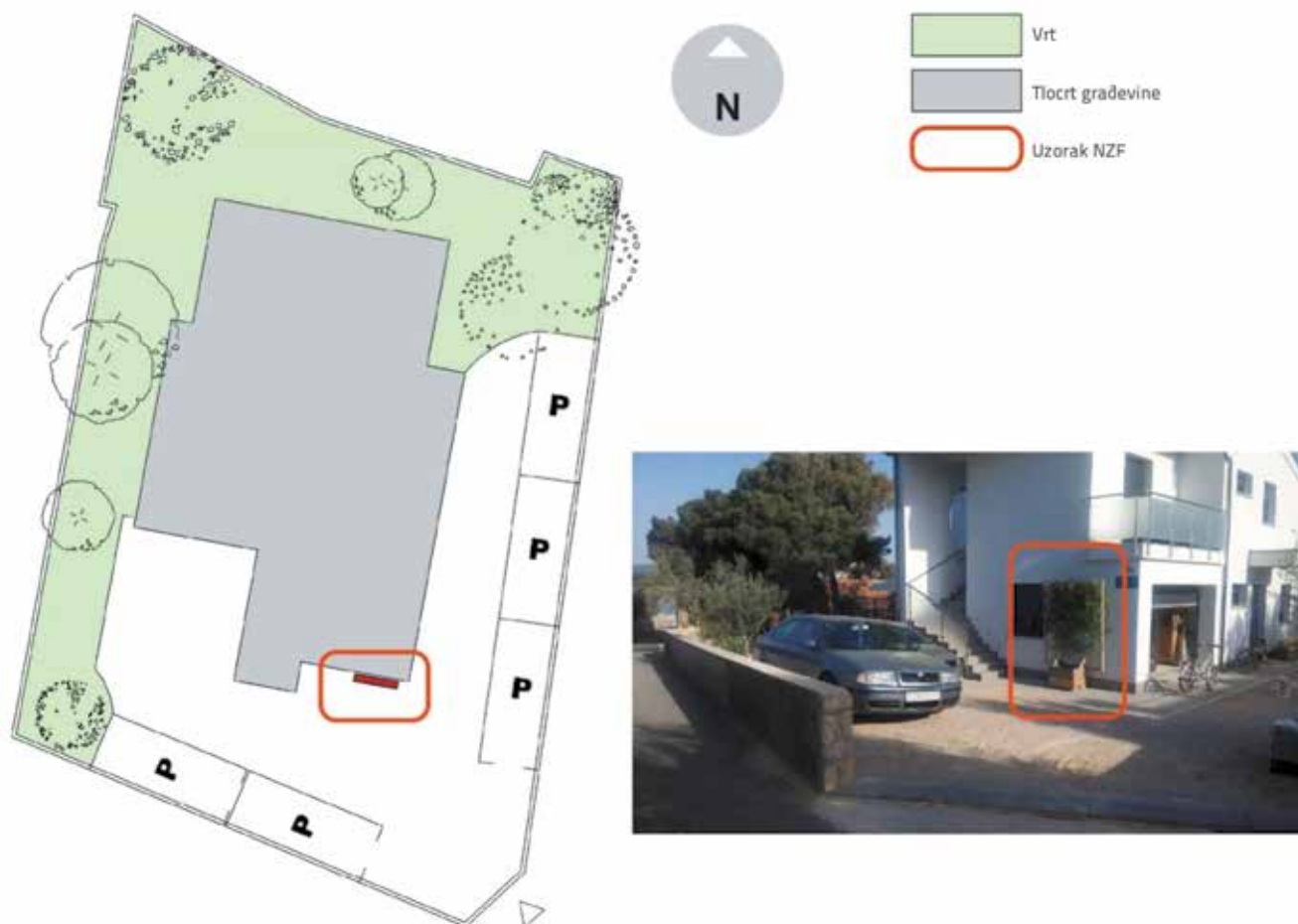
U svim spomenutim istraživanjima analiziran je utjecaj IZF-a na ovojnicu zgrada i na toplinske uvjete u unutrašnjosti zgrada. Međutim, malo toga se zna o ponašanju takvih zelenih sustava u područjima na prijelazu između umjerene i mediteranske klime, kao što je npr. Kvarnerski zaljev. Pokazalo se da je to područje naročito zanimljivo za istraživanje potencijalnih bioklimatskih strategija projektiranja zgrada, osobito tijekom sezone hlađenja [26]. Zbog toga je istraživanje prikazano u ovom radu provedeno na otoku Krku u Hrvatskoj, gdje je u tu svrhu instaliran eksperimentalni IZF sustav. U ovdje prikazanom istraživanju naglasak je na izvedbi jednostavne,

lako postavljive i financijski prihvatljive IZF konstrukcije kako bi se eksperimentalno analizirao njezin utjecaj na smanjenje intenziteta Sunčevog zračenja i površinske temperature na vanjskim površinama, i to za slučaj zgrade s tradicionalnim fasadnim kompozitnim sustavom za vanjsku toplinsku izolaciju tipa ETICS. Osim toga, toplinska ugodnost hipotetske životne okoline (npr. dnevnog boravka) ocijenjena je pomoću programa EnergyPlus simuliranjem triju različitih konfiguracija IZF-a za dvije vrste ovojnice zgrada. Ovo je istraživanje provedeno kako bi se omogućilo bolje razumijevanje ponašanja i utjecaja IZF-a na površinu fasada i na okoliš u unutrašnjosti zgrade.

2. Eksperimentalni dio

2.1. Metodologija

Eksperimentalni dio istraživanja proveden je u mjestu Punat (geografski položaj: 45°01', E 14°63', nadmorska visina: 15 m) na otoku Krku u Hrvatskoj od 16. lipnja do 30. listopada 2018. Eksperiment je proveden na dijelu nedavno izgrađene stambene zgrade. Vanjski zid zgrade sastoji se od nosive konstrukcije od opeke debljine 30 cm i od polistirenske (EPS) toplinske izolacije debljine 8 cm bijele boje (sustav ETICS). Za potrebe



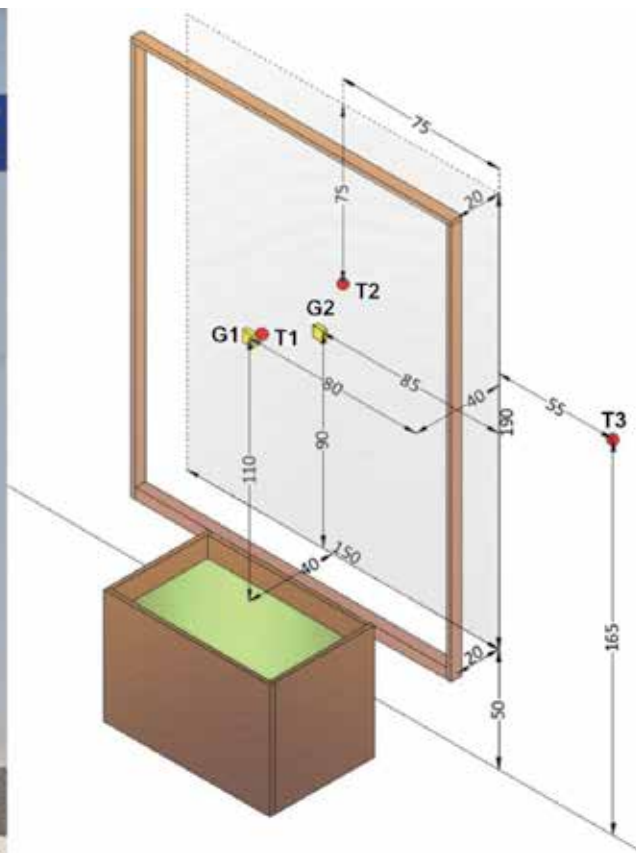
Slika 2. Orijentacija uzorka IZF (lijevo) i njegov položaj na južnoj fasadi kuće (desno)



Slika 3. Prikaz eksperimenta IZF i položaj mjernih točaka

eksperimenta izrađen je uzorak IZF-a. Kako bi se na minimum sveo utjecaj okoline (tj. zasjenjenje) na mjerenje, uzorak IZF-a smješten je uz južnu fasadu (slika 2.). IZF (slika 3.) sastojao se od odgovarajuće posude za biljku, nosive konstrukcije i od same biljke. Nosiva konstrukcija izvedena je kao drveni rešetkasti modularni sustav dodatno stegnut užetom, a posuda za biljku sastojala se od drvenih letvica koje su na unutarnjem dijelu izolirane plastičnom membranom. Kako je cilj eksperimenta bio maksimalno povećati utjecaj IZF-a ljeti te na minimum svesti njegov utjecaj zimi, odabrana je listopadna biljka kineska glicinija (*Wisteria sinensis*).

IZF je pozicioniran tako da se osigura kontinuiran razmak od 15 cm između fasade i biljke, tj. da se postigne odgovarajuća cirkulacija zraka (slika 3.). Grane koje su rasle prema fasadi stalno su "usmjeravane" prema nosivoj rešetki i oko nje kako bi se osiguralo neometano strujanje zraka. Bočne stranice konstrukcije zatvorene su perforiranom tkaninom čime je imitirana kontinuiranost IZF-a, tj. tkanina je djelovala kao bočna zaštita od sunca, ali je istovremeno osiguravala neometan protok zraka.











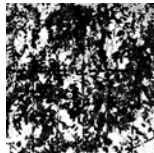
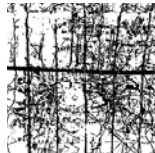
T1	°C	Temperatura zraka u biljnom sloju NZF
T2	°C	Temperatura zraka na površini fasade iza NZF-a
T3	°C	Temperatura zraka na površini fasade
G1	W/m ²	Sunčevo zračenje ispred NZF-a
G2	W/m ²	Sunčevo zračenje iza NZF-a

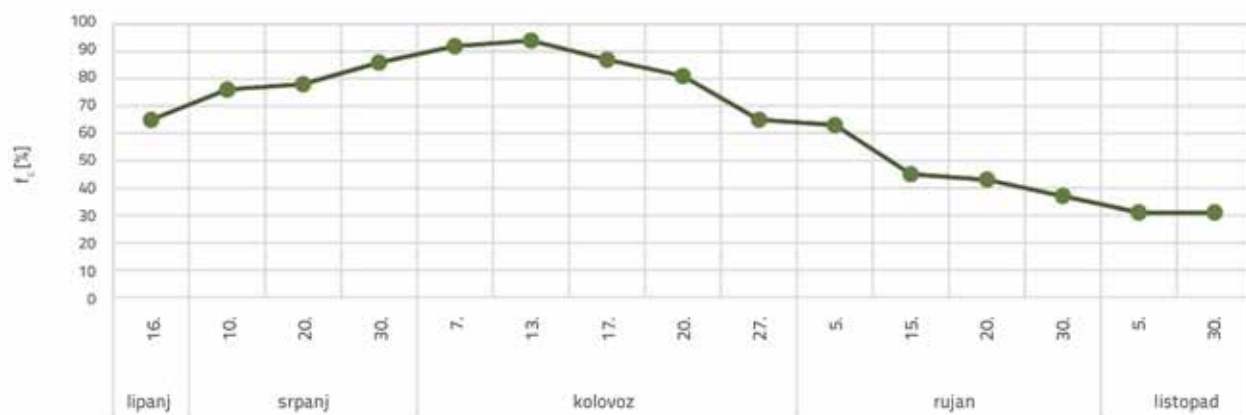
Kako bi se ocijenio utjecaj IZF-a na površinsku temperaturu fasade (°C) te utjecaj Sunčevog zračenja (W/m²), na konstrukciju su postavljeni termočlanci i solarne ćelije. Svi rezultati mjerenja zabilježeni su pomoću datalogera tipa Almemo-2690-8a. Za praćenje vremenskih uvjeta korištena je jednostavna video kamera. Svi podaci o okolnim uvjetima, kao što su temperatura zraka (°C), relativna vlažnost zraka (%), brzina vjetera (m/s) i količina oborina (mm), preuzeti su s lokalne meteorološke stanice udaljene otprilike 2 km od lokacije ispitivanja. Globalno horizontalno Sunčevo zračenje (G3) mjereno je na obližnjoj horizontalnoj ravnini na kojoj nema prepreka. Mjerne točke na IZF-u i iza njega prikazane su na slici 3. Razvoj biljke stalno je praćen i dokumentiran fotografijama koje su naknadno obrađene kako bi se izračunao postotak prekrivenosti fasade – f_c .

2.2. Opći rezultati eksperimenta

Kao što je navedeno u točki 2.1, postotak f_c stalno je praćen tijekom eksperimenta jer je na sposobnost zasjenjenja konstrukcije IZF-om bitno utjecao rast biljke, tj. način

Tablica 1. Praćenje rasta biljke i gustoće listova u promatranom razdoblju

	16. lipanj	20. srpanj	13. kolovoz	5. rujanj	30. listopad
Fotografije razvoja biljke					
Negativi fotografija razvoja biljke					
Izračunana vrijednost f_c	65 %	78 %	94 %	63 %	31 %

Slika 4. Variranje postotka prekrivenosti fasade (f_c) tijekom eksperimentaTablica 2. Prosječno mjesečno Sunčevo zračenje u točkama G1, G2 i G3, prosječna mjesečna temperatura zraka na površini fasade iza IZF-a – T2 i na nezasjenjenoj površini fasade – T3. Prikazane su i karakteristične razlike ΔT i ΔG u vremenu između 12 i 15 sati

		Lipanj	Srpanj	Kolovoz	Rujan	Listopad
$G1_{avg}$ [W/m^2]		/*	/*	477,7	585,7	483,7
$G2_{avg}$ [W/m^2]		/*	/*	107,8	260,7	331,4
$G3_{avg}$ [W/m^2]		/*	653,6	581,9	544,6	315,0
ΔG_{avg} [W/m^2]		/*	/*	370,0	325,0	152,2
$T2$ [$^{\circ}C$]	Min.	17,8	25,1	15,7	18,0	16,1
	Maks.	35,0	39,2	40,5	37,4	38,1
	Pros.	29,4	31,7	33,5	30,5	28,5
$T3$ [$^{\circ}C$]	Min.	18,4	26,4	15,4	20,3	16,1
	Maks.	42,9	48,8	49,1	44,4	40,3
	Pros.	32,9	39,8	42,0	38,2	30,0
ΔT [K]	Min.	-0,8	1,3	-0,4	0,5	-0,2
	Maks.	10,7	10,5	12,3	12,1	3,1
	Pros.	3,5	8,1	8,5	7,7	1,6

* U lipnju i srpnju 2018. premještene su mjerne točke G na optimalna mjesta pa stoga za to razdoblje nisu ni prikazani rezultati jer ne bi bili reprezentativni.

širenja i gustoća listova. Ti su rezultati prikazani u tablici 1. i na slici 4.

Maksimalna pokrivenost fasade iznosila je 94 % za potpuno izraslu biljku, a minimalna vrijednost f_c iznosila je 31 %. Te su vrijednosti rezultat zasjenjenja pomoću grana biljke i rešetkaste konstrukcije (tablica 1.).

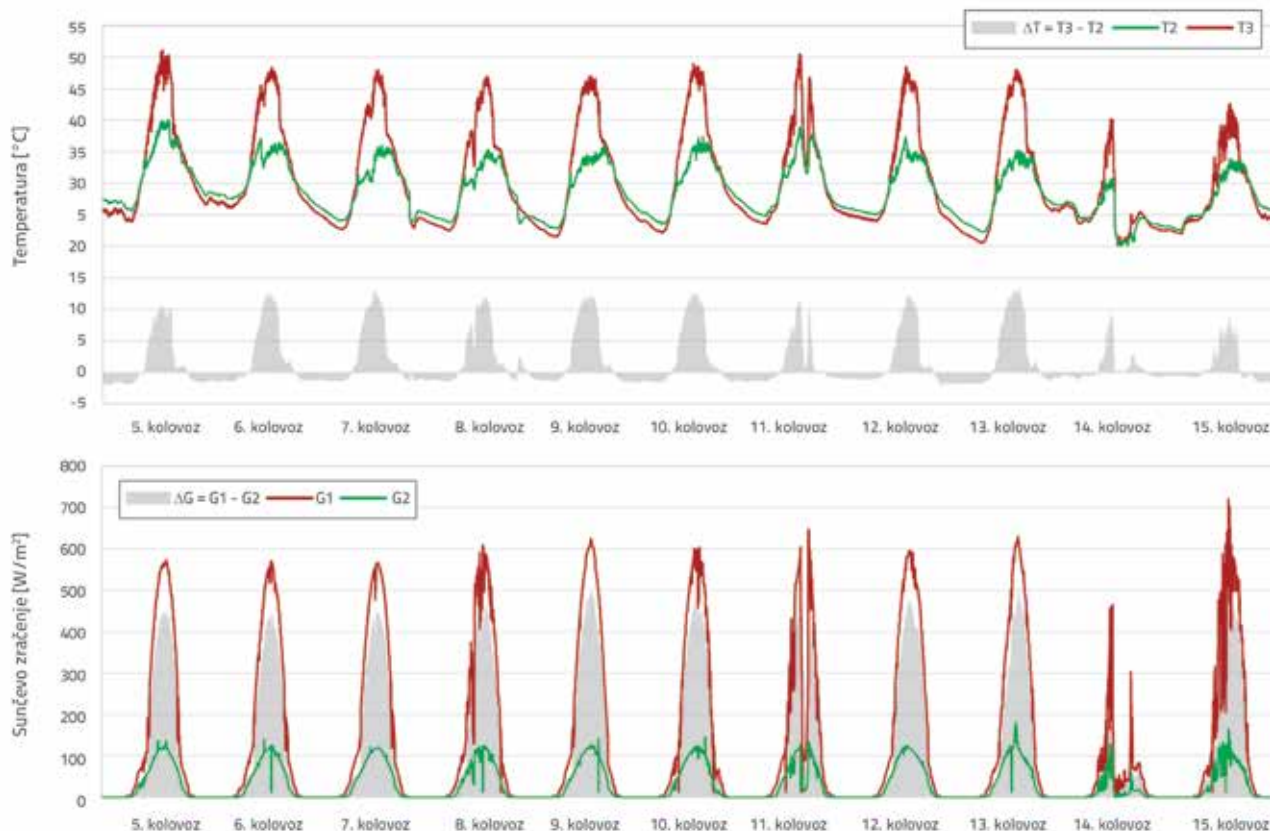
Za potrebe ovog istraživanja vrijednosti temperature i Sunčevog zračenja praćene su u nekoliko različitim točkama. Naknadno su izračunane razlike u temperaturi ($\Delta T = T_3 - T_2$) te vrijednosti Sunčevog zračenja ($\Delta G = G_1 - G_2$). Reprezentativni rezultati prikazani su u tablici 2. Te se vrijednosti odnose na vrijeme od 12 do 15 sati jer je to razdoblje karakterizirano prilično ujednačenim maksimalnim sunčevim zračenjem te ujednačenom razlikom temperature (ΔT) između površinske temperature fasade iza IZF-a (T_2) i površinske temperature referentne točke na fasadi (T_3).

Sunčevo zračenje izmjereno iza biljke (G_2) ovisi o izrastu biljke i o njenoj sposobnosti zadržavanja Sunčevog zračenja. U kolovozu, tj. kada je biljka potpuno razvijena ($f_c > 80\%$), bilježi se najniža vrijednost G_2 . Situacija je sasvim drugačija u listopadu nakon otpadanja lišća ($f_c < 40\%$) kada se bilježi najviša vrijednost G_2 . Stoga se može zaključiti da pad vrijednosti ΔG odgovara postotku pokrivenosti fasade, a posljedica je otpadanja lišća. Osim utjecaja na vrijednosti Sunčevog zračenja, IZF također utječe i na vremenska variranja temperature na površini fasade. Fasada izložena djelovanju Sunca je za 12 K toplija u kolovozu

nego u listopadu, dok porast temperature na fasadi zasjenjenoj IZF-om iznosi samo 5 K više u kolovozu nego u listopadu.

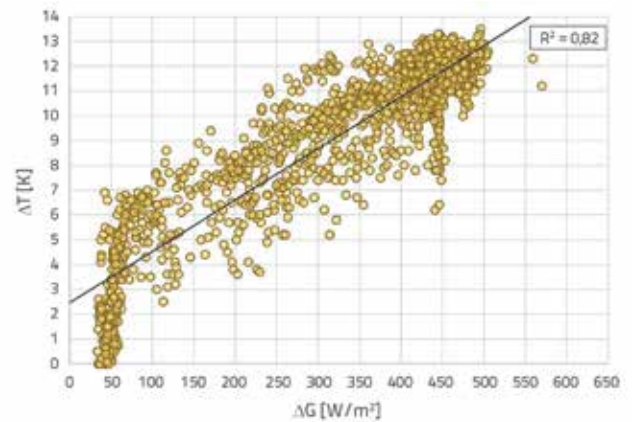
2.3. Specifični rezultati za vruće ljetno razdoblje

Na temelju analize prosječne mjesečne vanjske temperature zraka (θ_{avg}), vanjske relativne vlažnosti (RH_{avg}) za G_1 , ΔG , T_3 i ΔT , vrijeme od 5. do 15. kolovoza 2018. odabrano je kao reprezentativno razdoblje za mjerenje utjecaja IZF-a. U tom je razdoblju postignuta najviša vanjska temperatura zraka (θ_{max}) iako je u tom razdoblju bilo i raznih promjena vremena pa su tako zabilježeni vrlo vrući dani s vedrim nebom, ali i prilično kišoviti dani. U tom razdoblju vrijednost θ_{max} nije bila viša od 35 °C, a vrijednost θ_{min} nije bila niža od 20 °C. Vrijednosti relativne vlažnosti varirale su ovisno o vanjskoj temperaturi zraka (θ) i vremenskim uvjetima. Rezultati mjerenja u reprezentativnom razdoblju prikazani su na slici 5. U danima kada je nebo bilo vedro, prosječne vrijednosti ΔG zabilježene između 12 i 15 sati varirale su od 410 do 465 W/m². To upućuje na sposobnost biljke da u velikoj mjeri spriječi prodor Sunčevog zračenja kroz sloj lišća i grana IZF-a. Međutim, vrijednost ΔG bila je bitno manja u danima s oblačnim vremenom jer oblaci bitno utječu na intenzitet Sunčevog zračenja. U tom smislu je 14. kolovoza zabilježena prosječna vrijednost ΔG od samo 28 W/m², dok je 8. kolovoza ista vrijednost iznosila 425,3 W/m² (slika 5.).



Slika 5. Vrijednosti temperature i Sunčevog zračenja te odgovarajuće razlike ispred i iza IZF-a zabilježene u referentnom razdoblju (5. do 15. kolovoza 2018.)

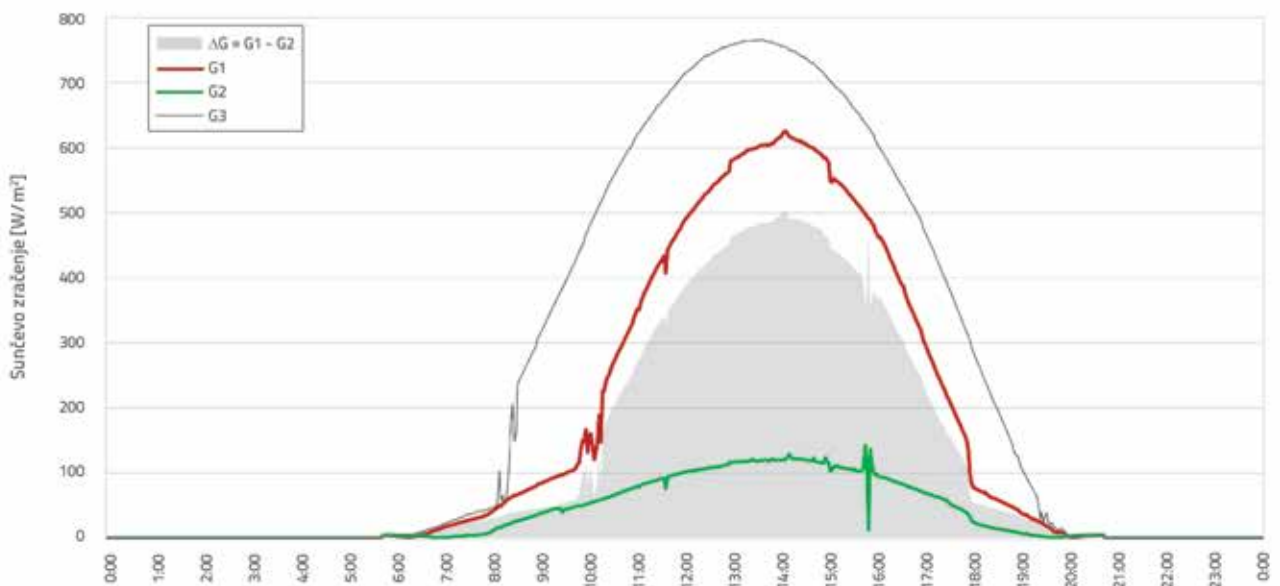
U danima s vedrim nebom, maksimalne vrijednosti ΔT_{avg} (slika 5.) relativno su visoke te variraju od 9,5 K do 12,3 K. U danima s oblačnim vremenom zabilježene su veće varijacije vrijednosti ΔT jer gustoća oblaka i trajanje oblačnog vremena bitno utječu na te vrijednosti. Tako je u vremenu od 12 do 15 sati maksimalna prosječna vrijednost ΔT varirala od 0,2 K do 11,0 K. Tijekom noći (ΔT_{avg} (20:00–6:59)), kada je vrijednost T2 viša od vrijednosti T3, dolazi do inverzije pa ΔT varira od -0,6 do -1,7 K (slika 5.). Treba napomenuti da veća razlika između maksimalne dnevne vrijednosti θ i minimalne noćne vrijednosti θ rezultira višom noćnom vrijednosti ΔT . Pretpostavlja se da vrijednost T3 reagira na promjenu u vrijednosti θ brže od vrijednosti T2, zato što biljka djeluje kao toplinska barijera i usporava promjenu temperature u točki T2. Odnos između ΔT i ΔG prikazan je na slici 6. Vrijednost ΔG je gotovo konstantna za vrijednosti ΔG od otprilike 50 W/m² (tj. kada je mjerni uređaj još uvijek u sjeni). Međutim, vrijednost ΔT brzo se povećava s porastom vanjske temperature zraka. To se objašnjava činjenicom da je termočlanak smješten u neposrednoj blizini ruba uz istočnu fasadu. Ta strana fasade je pod izravnim utjecajem sunčevog zračenja čak i kada je termočlanak još uvijek u sjeni, što uzrokuje porast vrijednosti T3 dok istovremeno vrijednost ΔG stagnira. Kod vrijednosti ΔG većih od 50 W/m², Sunce počinje izravno djelovati na biljku, pa stoga ne raste samo vrijednost ΔT , već i vrijednost ΔG . Kada je vrijednost ΔG visoka, tada je visoka i vrijednost ΔT , što upućuje na dodatno djelovanje Sunčevog zračenja na rezultirajuću temperaturu u točki T3, dok na točku T2 Sunčevo zračenje ne djeluje jer ga u velikoj mjeri blokira IZF. Opisano ponašanje pokazuje da utjecaj IZF-a na površinsku temperaturu fasade uglavnom proizlazi iz zasjenjavajućeg djelovanja biljke, a ne iz efekta hlađenja uslijed evaporacije.



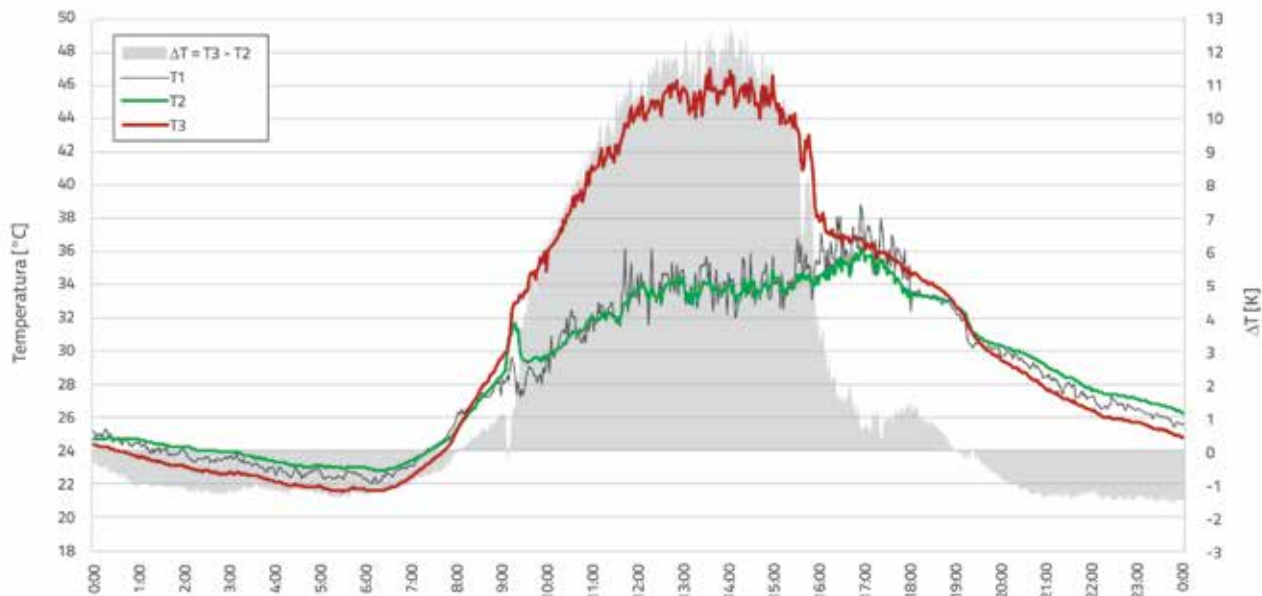
Slika 6. Odnos između ΔT i ΔG u sunčanim danima tijekom referentnog razdoblja

2.3.1. Tipičan vruć sunčan dan – 9. kolovoz

Raspored Sunčevog zračenja tijekom tipičnog vrućeg sunčanog dana prikazan je na slici 7. Maksimalno globalno horizontalno sunčevo zračenje (G_3) u iznosu od 766 W/m² zabilježeno je u 13:18 sati, tj. u solarno podne dotičnog dana. U usporedbi s G_3 , točka G1 bila je za otprilike 20 % niža ($G_{1,max} = 625$ W/m²) zbog prividnog položaja Sunca na nebu. Međutim, utjecaj IZF-a očituje se u izmjerenoj vrijednosti G_2 ($G_{2,max} = 122$ W/m²), koja je dodatno smanjena u odnosu na G_3 i G_1 . Sama zgrada baca sjenu na uzorak IZF-a do 10 sati ujutro zbog njene orijentacije. Do tog vremena, mjerenja u točkama G1 i G2 uglavnom su rezultat difuznog Sunčevog zračenja. Nakon deset sati, Sunce izravno zrači na biljku, pa stoga vrijednosti G_1 počinju naglo rasti. S druge strane, vrijednosti G_2 rastu kontinuirano čak i kada Sunce počinje obasjavati biljku. Razlog tome je činjenica da se Sunčevo



Slika 7. Sunčevo zračenje zabilježeno 9. kolovoza 2018. – tipičan vruć sunčan dan



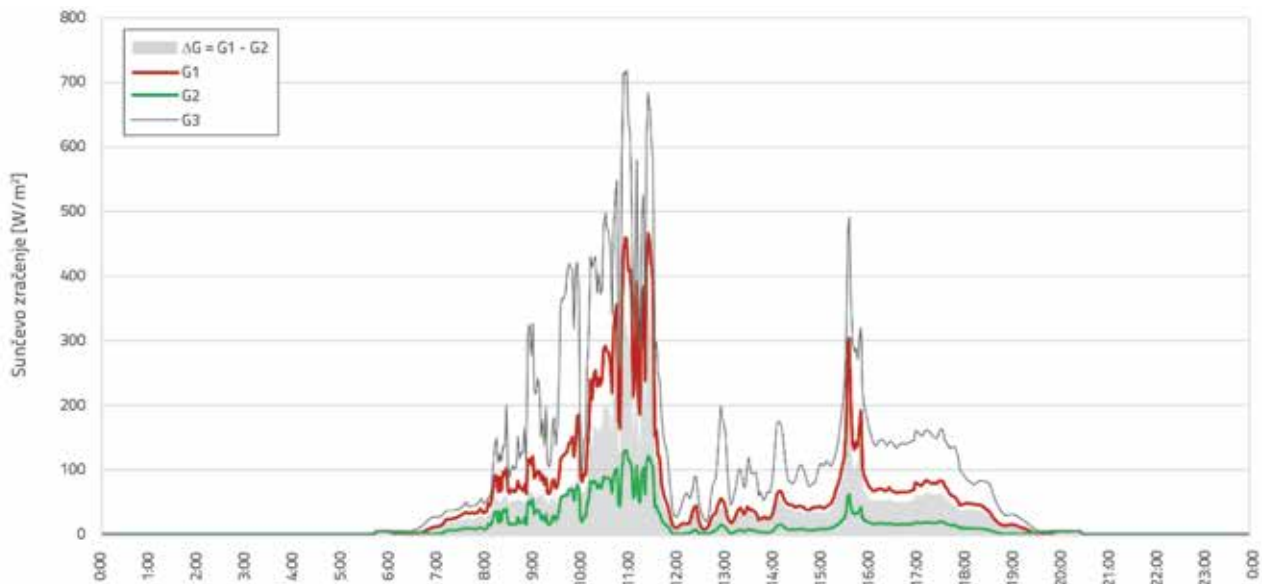
Slika 8. Temperature zabilježene 9. kolovoza 2018. – tipičan vruć sunčan dan

zračenje, izmjereno na mjernoj točki G2, uglavnom sastoji od difuzne komponente Sunčevog zračenja. Vrijednost G2 uvijek je niža od vrijednosti G1, što pokazuje da IZF zaustavlja značajnu količinu Sunčevog zračenja. U vrijeme maksimalne vrijednosti G1, vrijednost G2 iznosi samo 18 % od vrijednosti G1, dok ujutro i navečer, kada biljka nije izravno obasjana Suncem, ta vrijednost raste do 55 %. Razlog za različito djelovanje IZF-a na smanjenje intenziteta Sunčevog zračenja leži u većem utjecaju biljke na smanjenje izravne komponente Sunčevog zračenja u odnosu na difuznu komponentu.

Fluktuacije temperatura izmjerene tijekom definiranog dana prikazane su na slici 8. Po noći su sve izmjerene temperature bile u blizini vrijednosti θ . Međutim, te su se vrijednosti povećavale

tijekom dana zbog utjecaja Sunčevog zračenja. Najviše su vrijednosti očekivano zabilježene u točki T3 kada su temperature bile iznad 45 °C, što je za 14,0 K više od vrijednosti θ .

Kao što se može vidjeti na slici 8., temperature su mnogo niže na fasadi iza IZF-a. Međutim, one kontinuirano rastu tijekom dana kada je intenzitet Sunčevog zračenja visok. Maksimalna temperatura zabilježena u točki T2 nije bila veća od 36 °C, što je još uvijek za 5,0 K iznad vrijednosti θ . Maksimalna vrijednost ΔT u promatranom danu iznosila je 12,9 K u 14 sati, što odgovara maksimalnim vrijednostima T3 (45,9 °C) i G1 (620 W/m²). Vrijednosti ΔT bile su znatno niže u jutarnjim i večernjim satima, dok su po noći bile negativne. Spomenute negativne vrijednosti mogu se objasniti činjenicom da biljka djeluje kao tamponski



Slika 9. Sunčevo zračenje zabilježeno 14. kolovoza 2018. – tipičan vruć oblačan dan s kišom



Slika 10. Temperature zabilježene 14. kolovoza 2018. – tipičan vruć oblačan dan s kišom

sloj, što usporava prijenos topline i smanjuje gubitak zračenja s površine fasade, pa se stoga vrijednost T2 održava na razini nešto višoj od T3.

2.3.2. Tipičan vruć oblačan dan s kišom – 14. kolovoz

Na slici 9. prikazana je raspodjela Sunčevog zračenja na tipičan vrući oblačan dan s povremenom kišom (oluja s grmljavinom). Prije podne oblaci su zaustavili velik dio Sunčevog zračenja pa su stoga rezultirajuće vrijednosti G1, G2 i G3 bile niske. Kasnije, kada je počela kiša (oko podne), sve su se vrijednosti još više spustile zbog izrazito jakog naoblačenja, pa je tako vrijednost G3 iznosila 19,5 W/m², vrijednost G1 iznosila je 9,5 W/m² a vrijednost G2 spustila se na manje od 1,0 W/m². Vrijednosti G1 i G3 varirale su ovisno o udjelu prodora sunca kroz oblake, dok je kod G2 zabilježeno samo 10 do 30 % od vrijednosti G1 zbog utjecaja IZF-a. Dakle vrijednosti ΔG još uvijek su bile pozitivne te su varirale od 6 do 35 W/m².

Na slici 10. prikazane su fluktuacije temperatura na dan kada je obavljeno mjerenje. Zbog kiše su se vrijednosti T1, T2 i T3 spustile ispod vrijednosti 0. Kako je biljka spriječila prodor kiše, nije zabilježeno izravno vlaženje fasade iza biljke. Zato se ta fasada hladila sporije pa je vrijednost T2 bila veća od vrijednosti T3, što znači da je u tom razdoblju vrijednost ΔT bila negativna. Međutim, u suhom periodu dana, vrijednost ΔT i dalje je bila pozitivna, uz gotovo zanemarivu razliku u usporedbi s T3.

3. Simulacija toplinskih varijacija

3.1. Metodologija

Svrha ovog rada bila je provjeriti utjecaj IZF-a na toplinske uvjete u unutrašnjosti zgrade u klimatskom kontekstu koji prevladava

na analiziranoj lokaciji (mjesto Punat u Hrvatskoj). Stoga je utjecaj IZF-a simuliran pomoću jednostavnog modela dnevnog boravka kao dijela stambenog objekta. Model je izrađen pomoću računalnog programa Design Builder [27] te simuliran pomoću programa EnergyPlus. Zbog lokacije eksperimenta, veličina modela određena je na bazi *Pravilnika minimalnih tehničkih uvjeta za projektiranje i gradnju stanova iz Programa društveno poticane stanogradnje* [28] odakle su preuzete minimalne dimenzije dnevnog boravka i prozora (slika 14.a). Pretpostavljeno je da je prozor zapravo jedan panoramski prozor dimenzija 1,3 × 2,0 m, što proizlazi iz odnosa površine prozora i zida od 16,7 %. U modelu je djelovanju Sunca izložena samo jedna površina fasade. Sve ostale površine modela definirane su kao adijabatske površine kako bi se eliminirala izmjena topline između unutarnjih površina u zgradi. Simulacija toplinskog odziva provedena je za tri različite orijentacije fasade izložene djelovanju Sunca, tj za južnu, jugozapadnu i zapadnu orijentaciju. Predviđeno je da u prostoru borave dvije osobe, prema obrascu zadanom u programu Design Builder za dnevni boravak (ukupan unutarnji dobitak topline od 150 W), a električna rasvjeta postavljena je na 5 W/m².

Simulacija toplinskog odziva provedena je za dvije različite konfiguracije vanjskog zida. Prva je tradicionalna kamena gradnja [29] tipična za starije kuće koje se pronalaze na dotičnoj lokaciji, dok se u drugoj simulaciji koristio novi toplinski izolirani vanjski zid sa sustavom ETICS (tablica 3.) koji udovoljava zahtjevima hrvatske regulative ($U < 0.45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) [30]. U oba je slučaja predviđeno da apsorpcija (α) žbuke na vanjskoj fasadi iznosi 0,4 (tablica 3.), što odgovara površinama svjetlije boje kao što su npr. bež boja, žučkastobijela boja, boja pijeska itd. [31]. Vremenska datoteka programa EnergyPlus (EPW) za Punat izrađena je pomoću internetskog programa koji je razvio Zajednički istraživački centar Europske komisije [32]. Datoteka

Tablica 3. Karakteristike dviju razmatranih konfiguracija zida

Tip zgrade	Vanjski zid	U [W/m ² K]	α [-]	Ostakljenje	U [W/m ² K]	g [-]
Tradicionalna kamena kuća	Zid od prirodnog kamena	2,53	0,4	Dvostruko ostakljenje bez niskoemisijskog premaza, ispunjena zrakom	3,16	0,69
Nova toplinski izolirana zgrada	Cigleni zid s vanjskom toplinskom izolacijom EPS(λ = 0,035 W/m ² K)	0,42	0,4	Trostruko ostakljenje s niskoemisijskim premazom, ispunjena argonom	0,79	0,47

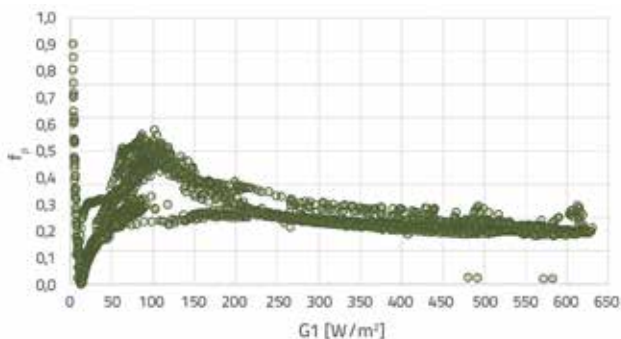
je generirana prema izmjerenim satnim podacima za razdoblje od 2005. do 2014. godine. U tablici 3. prikazana su toplinska (U-vrijednost) i optička (g-faktor) svojstva ostakljenja koja su korištena u simulaciji.

Predviđeno je da ventilacija modela korištenog u simulaciji bude prirodna te da je broj izmjena zraka jednak 0,8 h⁻¹, što predstavlja sumu minimalnog broja izmjene zraka za stambene zgrade (0,5 h⁻¹ [33]) i nekontroliranog broja izmjene zraka zbog infiltracije 0,3 h⁻¹. Za potrebe ovog rada isključena je bilo kakva klimatizacija, tj. grijanje i hlađenje, pa je građevina analizirana u režimu bez bilo kakvih utjecaja mehaničkih sustava (eng. "free-run"). Operativna temperatura (T_o) usvojena je kao parametar koji opisuje unutrašnjost zgrade. Operativna temperatura pruža bolji uvid u kvalitetu toplinske ugodnosti u unutrašnjosti zgrade u usporedbi s unutarnjom temperaturom zraka jer uključuje i utjecaj srednje održane temperature unutar zgrade, a ta komponenta može bitno utjecati na osjećaj toplinske ugodnosti osoba koje u zgradi borave [34].

Utjecaj IZF-a na toplinski odziv modela definiran je kao komponenta zasjenjenja pomoću faktora zasjenjenja ovisnog o vremenu (f_{sh}). Na temelju rezultata eksperimentalnih mjerenja, određeno je da prolaz sunca kroz komponentu zasjenjenja bude jednak IZF-u definiranom kao f_p, kako je to prikazano u izrazu (1).

$$f_p = \frac{G_2}{G_1} \tag{1}$$

Vrijednost f_p = 1,0 znači da biljka propušta ukupnu vrijednost G₁ na fasadu, a vrijednost f_p = 0,0 znači da biljka zaustavlja ukupno zračenje G₁ te da je fasada 100 % zasjenjena. Na slici 11. prikazan je faktor f_p određen u funkciji eksperimentalno izmjerene vrijednosti G₁.

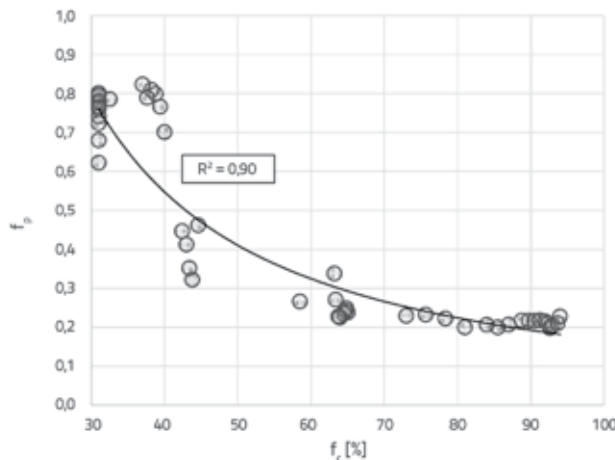


Slika 11. Faktor f_p u funkciji G₁ u sunčanim danima tijekom referentnog razdoblja

Međutim, kako se Sunčevo zračenje (tj. G₁ i G₂) nije pratilo tijekom čitave godine, potrebne godišnje vrijednosti f_p određene su prema postotku izloženosti fasade (f_c) koji je određen na temelju rasta biljke. Dakle, dostupni eksperimentalno određeni faktori propuštanja (f_p) uspoređeni su s postotkom izloženosti fasade (f_c), kao što se to može vidjeti na slici 12. Pri izračunavanju vrijednosti f_p u obzir su uzete vrijednosti G₁ i G₂ zabilježene od 12 do 15 sati. Ova se uzajamna veza može opisati eksponencijalnom regresijskom krivuljom s R² = 0,90. Ta se eksponencijalna krivulja može definirati pomoću jednadžbe (2).

$$f_p = 0,1681 \cdot f_c^{-1,269} \tag{2}$$

Izraz (2) primjenjuje se samo na vrijednosti f_c koje su više od 30 %, jer nižih vrijednosti f_c niti nema zbog prisutnosti ogoljelih grana biljke i rešetkaste nosive konstrukcije.

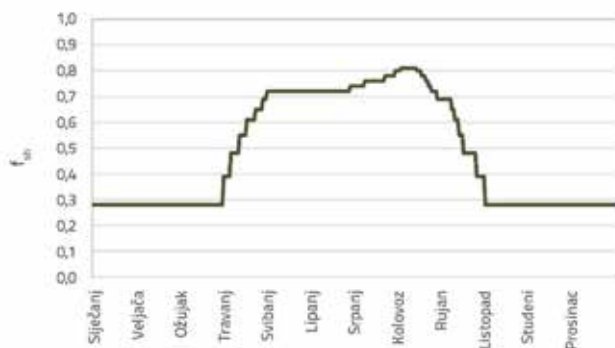


Slika 12. Uzajamni odnos f_p i f_c

Zatim je pomoću izraza (3) izračunan faktor zasjenjenja f_{sh} za svaki dan u mjesecu i to za čitavu godinu. U razdoblju od listopada do travnja vrijednosti f_{sh} su konstantne i iznose 0,28 jer u to vrijeme na biljci nema lišća.

$$f_{sh} = 1 - f_p \tag{3}$$

Stoga je utjecaj IZF-a na zasjenjenost fasade opisan frakcijskim rasporedom f_{sh} ovisno o danu u mjesecu, kao što je to prikazano na slici 13.



Slika 13. Mjesečni razvoj vrijednosti f_{sh} primjenjen u toplinskim simulacijama

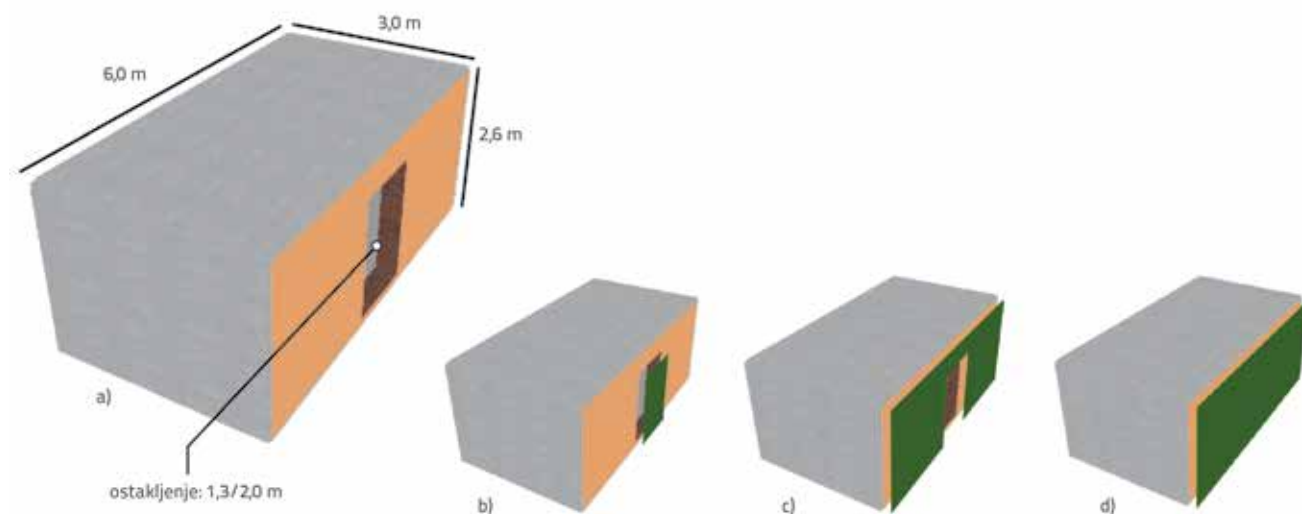
U okviru ovog rada predviđena je i analiza utjecaja različitih konfiguracija IZF-a. Stoga su u tu svrhu definirane tri različite konfiguracije IZF-a. U prvoj je konfiguraciji IZF montiran točno ispred ostakljenja (slika 14.b). U drugoj je konfiguraciji IZF postavljen ispred neprozirnog zida, tako da ne zahvaća ostakljenje (slika 14.c). U trećoj konfiguraciji, IZF je prekrivao čitavu površinu vanjske fasade (slika 14.d). U svim je slučajevima IZF postavljen na takav način da je ostavljen razmak od 20 cm između IZF-a i površine fasade zgrade. Spomenute su konfiguracije uspoređene s osnovnim modelom bez IZF-a (slika 14.a).

3.2. Rezultati simulacija

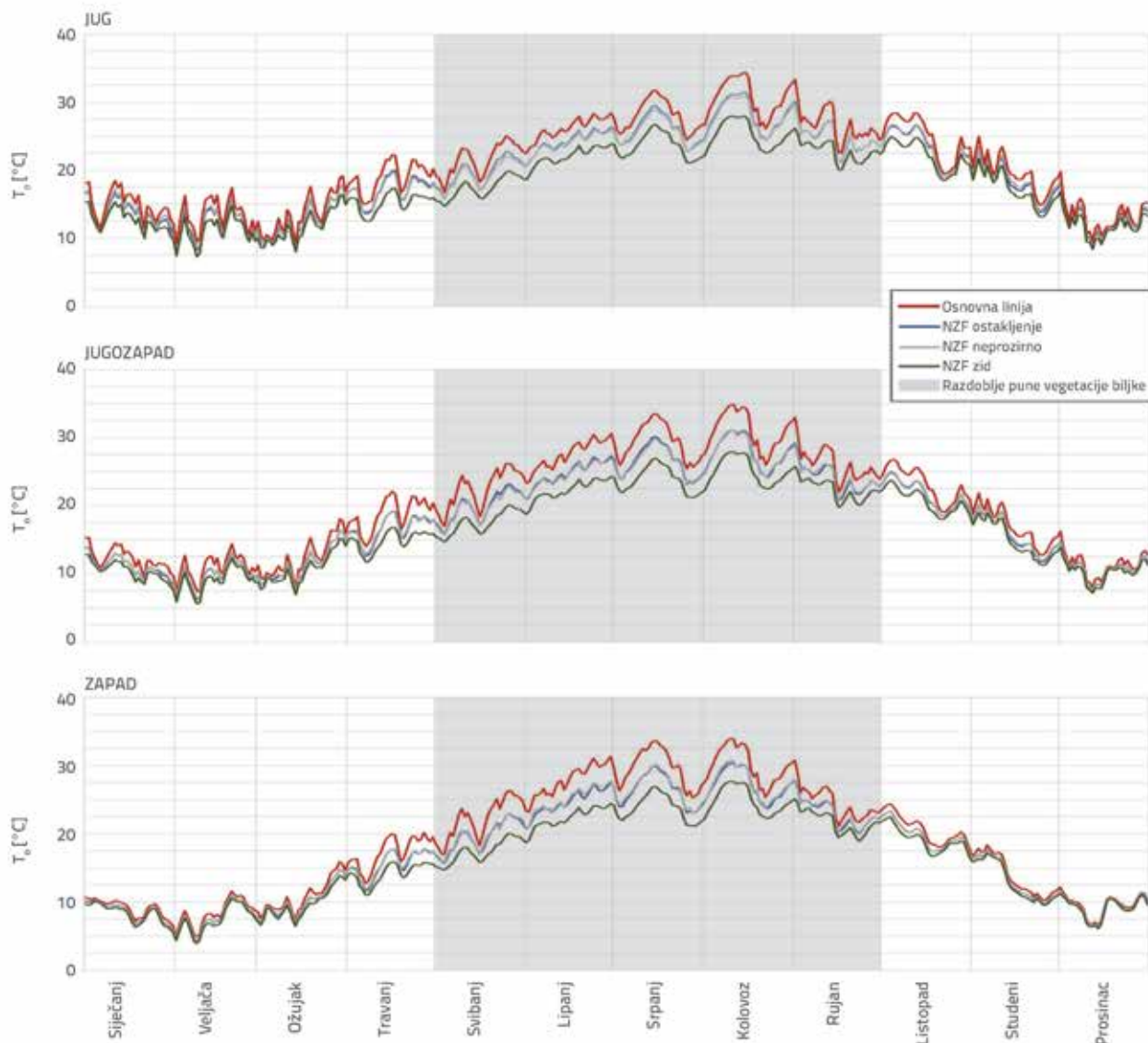
Rezultati simulacija navedeni su u tablici 4. i na slikama 15. i 16. gdje su prikazane fluktuacije operative temperature (T_o) u dnevnom boravku bez klimatizacije tijekom čitave godine. Biljka koja zaustavlja Sunčevo zračenje uzrokuje smanjenje temperature na vanjskoj površini i umanjuje ukupni prolazak topline kroz zid. Na slikama 15. i 16. jasno se vidi kako

postavljanje IZF-a ispred vanjske površine zgrade utječe na T_o i ljeti i zimi. Drugim riječima, može se uočiti smanjenje vrijednosti T_o . Međutim, učinkovitost IZF-a u velikoj mjeri ovisi o stupnju razvoja biljke, što se u simulacijama predstavlja oznakom f_{sh} . Na primjer, tijekom ljeta, kada je biljka u punoj vegetaciji, bilježi se najveće smanjenje T_o uslijed utjecaja IZF-a. S druge strane, tijekom zime, kada na biljci više nema lišća, utjecaj IZF-a na vrijednost T_o je minimalan. Tipičan utjecaj IZF-a definiran je kao razlika između prosječne vrijednosti T_o u slučaju osnovnog modela (bez IZF-a), prosječne vrijednosti T_o , i vrijednosti T_o za različite konfiguracije i orijentacije IZF-a (tablica 4.). U slučaju tradicionalne kamene kuće (slika 15.), utjecaj IZF-a na unutarnju operativnu temperaturu značajan je tijekom ljeta, kada se vrijednost T_o tipično smanjuje za 3 do 6 K ako se koristi IZF. Rezultati pokazuju da je djelotvornost IZF-a (tj. smanjenje vrijednosti T_o) najveća u slučaju jugozapadne orijentacije. Tome je razlog istovremen utjecaj intenzivnog Sunčevog zračenja i nižih upadnih kutova toga zračenja pri toj orijentaciji, dok je temperatura vanjskog zraka još uvijek visoka. Taj su utjecaj već prije prikazali Košir i dr. [35] u analizi pregrijavanja zgrade zasjenjivane pomoću konvencionalnih mehaničkih sredstava za zasjenjivanje, koja se nalazila u području umjerene klime u gradu Ljubljani.

Kao što se može uočiti na slici 15., tijekom ljeta je utjecaj IZF-a najniži za slučaj južne orijentacije, dok je tijekom zime utjecaj pri takvoj orijentaciji najveći. Kao što se moglo i očekivati, vrijednost T_o se najviše smanjuje kada IZF prekriva čitavu površinu fasade (tj. za slučaj "IZF, zid", slika 14.d) i to kod svih promatranih orijentacija. S druge strane, kada se IZF nalazi isključivo ispred ostakljenja (tj. "IZF, ostakljenje") ili kada se nalazi ispred neprozirnog dijela zida (tj. slučaj "IZF, neprozirno"), tada se vrijednost T_o iznenađujuće smanjuje, i to gotovo u jednakoj mjeri (slika 15.). Međutim, kako je kod starijih kamenih kuća omjer ostakljenja obično niži od omjera zadanog u modelu, moglo bi



Slika 14. a) osnovni model; b) IZF samo ispred ostakljenja (IZF, ostakljenje); c) IZF samo ispred neprozirnog zida (IZF, neprozirno); d) IZF prekriva čitavu vanjsku površinu (IZF, zid)

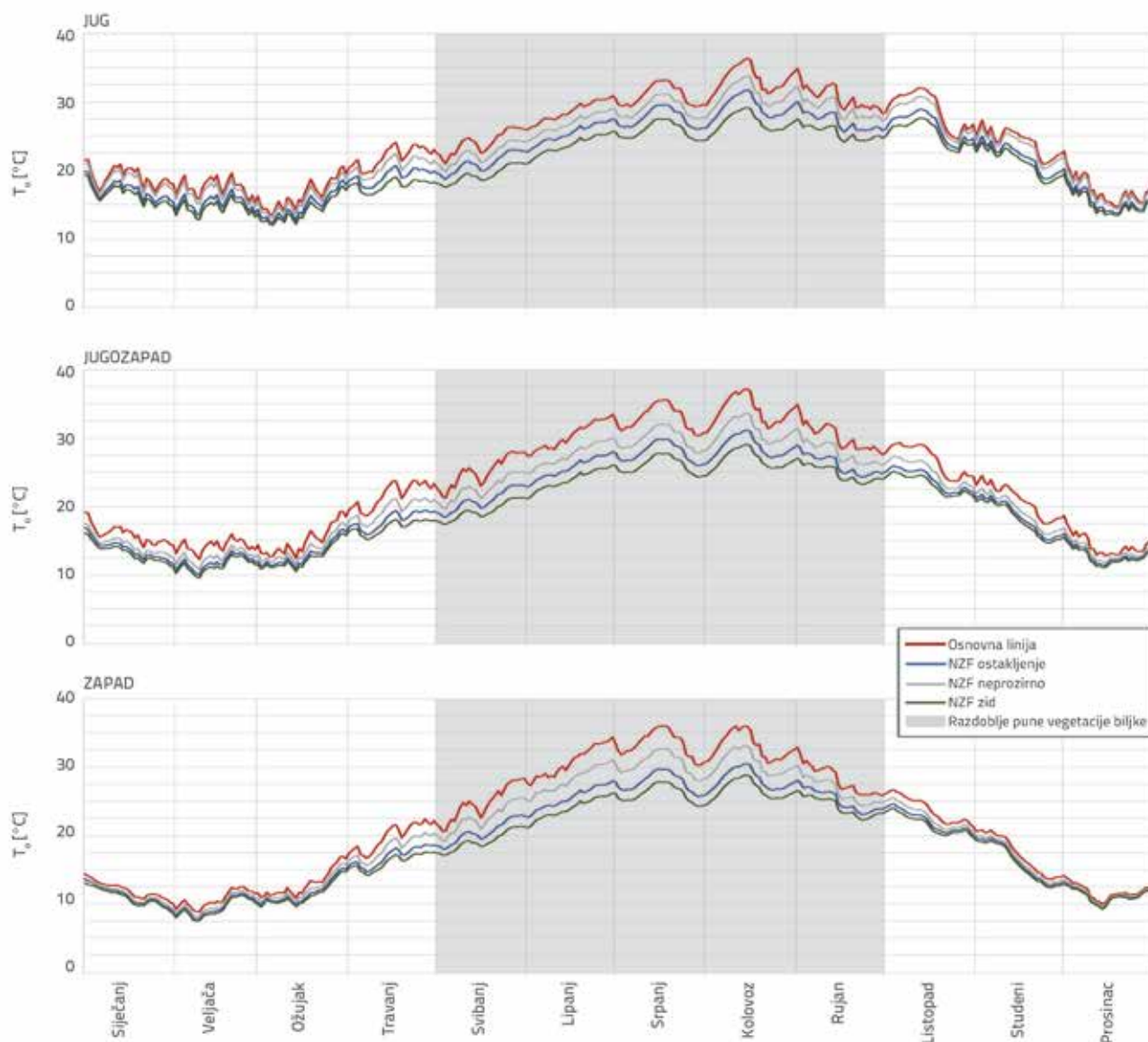


Slika 15. Fluktuacija operative temperature (T_o) tijekom godine u slučaju primjene raznih konfiguracija IZF-a za tradicionalnu kamenu kuću u Puntu, za južnu, jugozapadnu i zapadnu orijentaciju

se zaključiti da postavljanje IZF-a ispred neprozirnog dijela zida (tj. slučaj "NZ, neprozirno", slika 15.) može potencijalno imati veći učinak u smislu smanjenja operative temperature u slučaju tradicionalnih kuća s visokim U-vrijednostima elemenata fasade.

U slučaju nove toplinski izolirane zgrade (slika 16.), postignuti rezultati upućuju na sličan trend. Međutim, postoji razlika u djelovanju IZF. Kako je u ovom slučaju neprozirni dio zida bolje toplinski izoliran, postavljanjem IZF-a ispred ostakljene površine (tj. slučaj "NZ, ostakljenje") ostvaruje se utjecaj na T_o koji je bolji u odnosu na slučaj "IZF, neprozirno". Ako se IZF instalira ispred čitavog zida (tj. slučaj "IZF, zid"), tada prosječna vrijednost ΔT_o za najprikladniju jugozapadnu orijentaciju iznosi do 5,0 K za novu zgradu, tj. do 6,3 K za tradicionalnu kuću (tablica 4.). Iako takav način postavljanja može biti

problematičan zbog prekrivanja ostakljenja te gubljenja na dnevnom svjetlu i pogledu, rezultati pokazuju da se operativa temperatura tijekom ljeta može bitno smanjiti ako se koristi IZF. Posebno vrijedi napomenuti da je u slučaju primjene postupka "IZF, zid" vrijednost T_o u većini slučajeva unutar granica toplinske ugodnosti (tj. ispod 26 °C [33]) i to bez primjene mehaničkih sustava za hlađenje. Na temelju slika 15. i 16. može se također zaključiti da toplinsko ponašanje i utjecaj IZF-a na dvije analizirane zgrade ovisi o prijenosu topline iz vanjskog okoliša na vanjski zid. Na unutrašnjost tradicionalne kamene kuće bez toplinske izolacije bitno utječu vanjski uvjeti, što dovodi do znatnih fluktuacija vrijednosti T_o (slika 15.). S druge strane, interakcija s vanjskom okolinom se smanjuje u novoj zgradi koja ima odgovarajuću toplinsku izolaciju, pa je stoga vrijednost T_o stabilnija (slika 16.).



Slika 16. Fluktuacija operative temperature (T) tijekom godine u slučaju primjene raznih konfiguracija IZF-a za novu toplinski izoliranu kuću u Puntu, za južnu, jugozapadnu i zapadnu orijentaciju

Tablica 4. Prosječni utjecaj IZF-a na smanjenje unutarnje operative temperature (T) u vremenu od 1. svibnja do 30. rujna (tj. u vremenu potpunog razvoja biljke u vrućem dijelu godine)

Orijentacija fasade	Vrsta građevine	ΔT_o , "IZF, ostakljeno" [K]		ΔT_o , "IZF, neprozirno" [K]		ΔT_o , "IZF, zid" [K]	
		Prosjek	Maks,	Prosjek	Maks,	Prosjek	Maks,
Prema jugu	Tradicionalna kamena kuća	2,1	4,1	2,3	3,9	4,4	8,1
	Nova toplinski izolirana zgrada	3,5	5,5	1,8	2,7	5,3	8,2
Prema jugozapadu	Tradicionalna kamena kuća	2,7	4,8	2,7	4,3	5,0	8,1
	Nova toplinski izolirana zgrada	4,7	6,9	2,7	4,0	6,3	9,0
Prema zapadu	Tradicionalna kamena kuća	2,6	4,9	2,4	4,2	4,7	8,1
	Nova toplinski izolirana zgrada	4,6	7,0	2,4	3,7	5,9	8,9

4. Rasprava

Ovo je istraživanje provedeno kako bi se primjenom eksperimentalnih mjerenja i toplinskih simulacija odredio utjecaj indirektno zelene fasade (IZF) na vanjsku ovojnici zgrade i na toplinsku ugodnost unutar zgrade. Kao listopadna biljka, kineska glicinija pokazala je izrazitu sposobnost smanjenja intenziteta Sunčevog zračenja i to za vrijeme sunčanih i oblačnih dana. Ipak, izračunani faktor prijenosa topline (f_p) pokazuje da odabrana biljka ima veću sposobnost zasjenjenja pri visokim intenzitetima Sunčevog zračenja. U uvjetima vedrog neba, vrijednost intenziteta zračenja iza biljke iznosila je samo 20 % do 30 % od vrijednosti intenziteta Sunčevog zračenja ispred biljke, tj. intenzitet toga zračenja smanjen je i do 500 W/m². Čak i tijekom oblačnih dana, IZF je zaustavljao 70-90 % sunčevog zračenja. Međutim, apsolutne vrijednosti bile su u tim slučajevima niže pa je utjecaj IZF-a bio gotovo beznačajan. Mjerenja temperature pokazala su da je temperatura na površini fasade izložene suncu dosežala vrijednosti i do 52,1 °C. Nasuprot tome, temperatura na površini fasade iza IZF-a nikada nije bila viša od 40,3 °C. Osim toga, prosječan utjecaj IZF-a, izražen kao ΔT , iznosio je 9,5-12,3 K tijekom sunčanih dana za vrijeme mjerenja, a maksimalna izmjerena vrijednost ΔT iznosila 13,5 K. Slični su utjecaji zabilježeni i u drugim radovima (vidi npr. [13, 16, 19, 21, 23]). Eksperimentalni su rezultati pokazali da IZF omogućuje toplinsku zaštitu i noću jer je temperatura iza biljke bila u prosjeku za 1,5 K viša od temperature ispred IZF-a. Takva noćna inverzija zabilježena je i u drugim radovima [23, 36]. Smanjenje intenziteta Sunčevog zračenja i temperature na površini fasade od ključnog je značenja u vrućim dijelovima godine. U takvim razdobljima, fasada izložena suncu pod jakim je utjecajem Sunčevog zračenja. Visoke temperature na površini fasade mogu dovesti do degradacije materijala i do povećanja temperature u unutrašnjosti zgrade, zbog čega dolazi do realnog povećanja potrošnje energije potrebne za mehaničko hlađenje unutarnjeg prostora [37].

Rezultati simulacije pokazuju da IZF iskazuje velik potencijal kao način za pasivno povećanje toplinske ugodnosti unutarnjeg prostora zgrade u ljetnim mjesecima i to kroz smanjenje unutarnje operativne temperature (T_o). Kada je korišten IZF, vrijednost T_o u prosjeku se smanjivala za 1,8 – 6,3 K, što općenito znači da je toplinska ugodnost osoba koje borave u zgradi bila zadovoljavajuća (tj. postizala se operativna temperatura niža od 26 °C). Taj je utjecaj naročito poželjan ljeti kada je izuzetno važno spriječiti pregrijavanje unutarnjeg prostora. Općenito uzevši, najbolji su rezultati postignuti kada je IZF bio postavljen

ispred čitavog vanjskog zida. Međutim, utjecaj IZF-a u velikoj je mjeri ovisio o konfiguraciji IZF-a u odnosu na vanjsku ovojnici zgrade, na toplinska svojstva zgrade i na orijentaciju fasade. U slučaju tradicionalne kamene kuće, utvrđeno je da postavljanje IZF-a ispred ostakljenja ili ispred neprozirnog dijela zida dovodi do gotovo jednakog smanjenja vrijednosti T_o . Međutim, u slučaju nove toplinski izolirane zgrade, utjecaj je bio veći kada je IZF bio postavljen ispred ostakljenja i to za sve orijentacije fasade. Općenito uzevši, IZF je u svim konfiguracijama bio najdjelotvorniji u slučaju jugozapadne orijentacije. Ipak treba napomenuti da je IZF bio djelotvorniji kada je korišten za zasjenjenje nove toplinski izolirane zgrade. Dakle, na temelju rezultata simulacije može se primijeniti da se IZF može koristiti za poboljšanje toplinske ugodnosti i za potencijalno smanjenje potreba za hlađenje unutarnjeg prostora u ljetnim mjesecima.

5. Zaključak

Rezultati istraživanja pokazuju da se indirektna zelena fasada (IZF) može primjenjivati kao zaštita od pretjeranog zagrijavanja elemenata zgrade izloženih ekstremnim vremenskim utjecajima poput onih koji prevladavaju u području Kvarnerskog zaljeva u Hrvatskoj. Međutim ti se rezultati mogu koristiti samo u općenitom smislu, tj. svaka se zgrada treba analizirati kao zaseban slučaj. Punat je obalno mjesto u kojem su ljeti vanjske temperature visoke i danju i noću te u kojem se bilježi velik broj sunčanih dana. IZF može biti još korisniji na lokacijama na kojima je utjecaj Sunčevog zračenja na pregrijavanje veći od utjecaja vanjskih temperatura zraka, jer je eksperimentalno utvrđeno da IZF na temperaturu vanjske površine fasade dominantno utječe zasjenjivanjem. Pojednostavljene toplinske simulacije nisu korištene za izračunavanje apsolutne vrijednosti utjecaja već za analizu ponašanja IZF-om zaštićene zgrade bez mehaničkog sustava za klimatizaciju, kako bi se na taj način jasno prikazao pasivni utjecaj IZF-a na toplinski odziv zgrade. Na kraju treba naglasiti da u simulacijama nije razmatran utjecaj različitih načina ventilacije kao što su propuh te primjena dimnjaka ili noćne ventilacije, što bi utjecalo na ukupno djelovanje IZF-a.

Zahvale

Autori zahvaljuju na financijskoj podršci Slovenske agencije za istraživački rad (financiranje izvornog istraživanja br. P2-0158). Također zahvaljujemo i Marku Jankovcu, Bošljanu Glažaru i Joži Stepanu s Fakulteta elektrotehnike Sveučilišta u Ljubljani koji su nam pružili dragocjene savjete i omogućili korištenje mjerne opreme.

LITERATURA

- [1] Department of Economic and Social Affairs, World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, 2018.
- [2] IEA. World energy balances 2017, <https://www.iea.org/statistics/balances/>, 23.08.2019.
- [3] Besir, A.B., Cuce, E.: Green roofs and facades: A comprehensive review, *Renew Sustain Energy Rev*, 82 (2018), pp. 915–939, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.106>.
- [4] Farid, F.H.M., Ahmad, S.S., Raub, A.B.A., Shaari, M.F.: Green "Breathing Facades" for Occupants' Improved Quality of Life, *Procedia - Soc Behav Sci*, 234 (2016), pp. 173–184, <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.10.232>.

- [5] Vox, G., Blanco, I., Schettini, E.: Green façades to control wall surface temperature in buildings, *Build Environ*, 129 (2018), pp. 154–166, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.002>.
- [6] Jim, C.Y.: Green roof evolution through exemplars: Germinal prototypes to modern variants, *Sustain Cities Soc*, 35 (2017), pp. 69–82, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.08.001>.
- [7] Pérez, G., Rincón, L., Vila, A., González, J.M., Cabeza, L.F.: Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings, *Appl Energy*, 88 (2011), pp. 4854–4859, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.032>.
- [8] Radić, M., Brković, M., Auer, T.: Green Facades and Living Walls—A Review Establishing the Classification of Construction Types and Mapping the Benefits, *Sustainability*, 11 (2019) 17, pp. 4579–4602, <https://doi.org/10.3390/su11174579>.
- [9] Pérez, G., Coma, J., Martorell, I., Cabeza, L.F.: Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review, *Renew Sustain Energy Rev*, 39 (2014), pp. 139–165, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.055>.
- [10] Ottelé, M., van Bohemen, H.D., Fraaij, A.L.A.: Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls, *Ecol Eng*, 36 (2010), pp. 154–162, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.02.007>.
- [11] Mayrand, F., Clergeau, P.: Green Roofs and Green Walls for Biodiversity Conservation: A Contribution to Urban Connectivity?, *Sustainability*, 10 (2018) 4, pp. 985–998, <https://doi.org/10.3390/su10040985>.
- [12] Wong, N.H., Kwang Tan, A.Y., Chen, Y., Sekar, K., Tan, P.Y., Chan, D., i suradnici: Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls, *Build Environ*, 45 (2010), pp. 663–672, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.005>.
- [13] Pérez, G., Rincón, L., Vila, A., González, J.M., Cabeza, L.F.: Behaviour of green façades in Mediterranean Continental climate, *Energy Convers Manag*, 52 (2011), pp. 1861–1867, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.11.008>.
- [14] Perini, K., Ottelé, M., Fraaij, A.L.A., Haas, E.M., Raiteri, R.: Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope, *Build Environ*, 46 (2011), pp. 2287–2294, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.009>.
- [15] Koyama, T., Yoshinaga, M., Hayashi, H., Maeda, K., Yamauchi, A.: Identification of key plant traits contributing to the cooling effects of green façades using freestanding walls, *Build Environ*, 66 (2013), pp. 96–103, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.020>.
- [16] Coma, J., Pérez, G., Solé, C., Castell, A., Cabeza, L.F.: New Green Facades as Passive Systems for Energy Savings on Buildings, *Energy Procedia*, 57 (2014), pp. 1851–1859, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.049>.
- [17] Cameron, R.W.F., Taylor, J.E., Emmett, M.R.: What's 'cool' in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls, *Build Environ*, 57 (2014) 57, pp. 198–207, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.005>.
- [18] Jim, C.Y.: Thermal performance of climber greenwalls: Effects of solar irradiance and orientation, *Appl Energy*, 57 (2015) 57, pp. 631–643, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.077>.
- [19] Hoelscher, M.-T., Nehls, T., Jänicke, B., Wessolek, G.: Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation, *Energy Build*, (2016) 114, pp. 283–90, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.047>.
- [20] Ottelé, M., Perini, K.: Comparative experimental approach to investigate the thermal behaviour of vertical greened façades of buildings, *Ecol Eng*, 108 (2017), pp. 152–161, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.016>.
- [21] Pérez, G., Coma, J., Sol, S., Cabeza, L.F.: Green facade for energy savings in buildings: The influence of leaf area index and facade orientation on the shadow effect, *Appl Energy*, 187 (2017), pp. 424–437, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.055>.
- [22] Grabowiecki, K., Jaworski, A., Niewczas, T., Belleri, A.: Green Solutions - Climbing Vegetation Impact on Building - Energy Balance Element, *Energy Procedia*, 111 (2017), pp. 377–386, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.199>.
- [23] Vox, G., Blanco, I., Schettini, E.: Green façades to control wall surface temperature in buildings. *Build Environ*, 129 (2018), pp. 154–166, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.002>.
- [24] Yang, F., Yuan, F., Qian, F., Zhuang, Z., Yao, J.: Summertime thermal and energy performance of a double-skin green facade: A case study in Shanghai, *Sustain Cities Soc*, 39 (2018), pp. 43–51, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.049>.
- [25] Cameron, R.W.F., Taylor, J., Emmett, M.: A Hedera green façade - Energy performance and saving under different maritime-temperate, winter weather conditions, *Build Environ*, 92 (2015), pp. 111–121, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.011>.
- [26] Pajek, L., Košir, M.: Can building energy performance be predicted by a bioclimatic potential analysis? Case study of the Alpine-Adriatic region, *Energy Build*, 139 (2017), pp. 160–173, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.035>.
- [27] DesignBuilder Software Ltd - Home 2019, <https://designbuilder.co.uk/>. 26.07.2019.
- [28] Pravilnik minimalnih tehničkih uvjeta za projektiranje i gradnju stanova iz Programa društveno poticane stanogradnje - NN 106/04, NN 25/06, NN 121/11 2011.
- [29] Živković, Z.: Tradicijska kamena kuća dalmatinskog zaleđa: priručnik za obnovu i turističku valorizaciju, Ministarstvo turizma Republike Hrvatske, Ministarstvo vanjskih i europskih poslova, Zagreb, 2015.
- [30] Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama - NN 128/15, NN 70/18 2018.
- [31] Hudobivnik, B., Pajek, L., Kunič, R., Košir, M.: FEM thermal performance analysis of multi-layer external walls during typical summer conditions considering high intensity passive cooling, *Appl Energy*, 178 (2016), pp. 363–375, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.036>.
- [32] European Commission. TMY Generator 2019, <https://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis5/tmy.html>, 21.07.2019.
- [33] EN 15251:2010. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics, 2010.
- [34] Dovjak, M., Shukuya, M., Krainer, A.: Connective thinking on building envelope - Human body exergy analysis, *Int J Heat Mass Transf*, 90 (2015), pp. 1015–1025, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.021>.
- [35] Košir, M., Gostiša, T., Kristl, Ž.: Influence of architectural building envelope characteristics on energy performance in Central European climatic conditions, *J Build Eng*, 15 (2018), pp. 278–288, <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.11.023>.
- [36] Yang, F., Yuan, F., Qian, F., Zhuang, Z., Yao, J.: Summertime thermal and energy performance of a double-skin green facade: A case study in Shanghai, *Sustain Cities Soc*, 39 (2018), pp. 43–51, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.049>.
- [37] Košir, M., Pajek, L., Igljić, N., Kunič, R.: A theoretical study on a coupled effect of building envelope solar properties and thermal transmittance on the thermal response of an office cell, *Sol Energy*, 174 (2018), pp. 669–682, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.042>.