

ODPORNOST URBANEGA OKOLJA PROTI VROČINI

FAZA



Odpornost urbanega okolja proti vročini



UNIVERZA
V LJUBLJANI

FA

Fakulteta
za arhitekturo

Odpornost urbanega okolja proti vročini

Urednici

Martina Zbašnik-Senegačnik in **Alenka Fikfak**

Recenzenta

Peter Šenk in **Aleksander S. Ostan**

Lektorica

Tina Kralj

Oblikovanje

Gašper Mrak

Prelom

CTP d.o.o.

Založila:

© **Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo**

Za izdajatelja:

Mihael Dešman, dekan Fakultete za arhitekturo Univerze v Ljubljani

Kraj in leto izida

Ljubljana, 2026

Publikacija je brezplačna. Spletni dostop: <https://www.fa.uni-lj.si/odpornost-urbanega-okolja-proti-vrocini>

Monografija je del Raziskovalnega projekta Ciljnega raziskovalnega programa »CRP 2024« »Vpliv pregrevanja prostora na spremembe morfologije grajenega prostora slovenskih naselij ter zdravje uporabnikov«, ki sta ga sofinancirala Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS) in Ministrstvo za naravne vire in prostor (MNVP).



Javna agencija za znanstvenoraziskovalno
in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije



REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA NARAVNE VIRE IN PROSTOR

Za vsebino posameznih prispevkov so odgovorni njihovi avtorji.

Brez soglasja založnika je prepovedano vsakršno razmnoževanje ali prepis v katerikoli obliki.

Cobiss ID
280666371

Zapis CIP

Kataložni zapis o publikaciji (CIP) pripravili
v Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani
COBISS.SI-ID 280666371
ISBN 978-961-7032-75-8 (PDF)

Kazalo

Predgovor	8
Martina Zbašnik-Senegačnik, Alenka Fikfak	
 Podnebni izzivi urbanega okolja	
Prostorski, okoljski in družbeni vidiki urbanega pregrevanja	12
Alenka Fikfak	
Smernice za blaženje urbanih toplotnih otokov	24
Martina Zbašnik-Senegačnik	
Izzivi mest pri blaženju in prilagajanju podnebnih sprememb	35
Lučka Kajfež Bogataj	
 Zdravstveni vidiki urbanega okolja	
Mikroklima kot dejavnik tveganja za zdravje ljudi	42
Rok Fink	
Toplotna psihologija mesta in vpliv vročine na počutje	56
Matija Svetina	
Vpliv urbanega toplotnega otoka na toplotno ugodje	63
Samo Drobne	
Vloga pristopa Eno zdravje pri povezavi okolja in zdravja	73
Damjana Drobne, Sara Novak	
Merjenje temperature in relativne vlage ter kakovost bivanja	80
Gregor Geršak, Valentina Stanić, Andraž Janežič, Janko Drnovšek	
Globalno segrevanje in zdravje človeka	89
Marko Vudrag	

Okoljski vidiki urbanega okolja

Vloga zelenih površin pri blaženju pregrevanja in vplivu na zdravje	98
Barbara Goličnik Marušič, Živa Ravnikar	
Načrtovanje zelene infrastrukture za varovanje narave	108
Jože Bavcon, Blanka Ravnjak	
Potencial vertikalne ozelenitve pri blaženju toplotnih obremenitev	117
Jana Kozamernik	
Večkriterijsko vrednotenje modro-zelene infrastrukture	125
Matej Radinja, Nataša Atanasova	

Praktični vidiki prilagajanja urbanega okolja

Učinkoviti prostorski odzivi pri pregrevanju urbanega prostora	138
Aleš Švigelj, Marko Lazić	
Odziv lokalnih skupnosti na pregrevanje urbanega prostora v Singapurju	150
Blaž Križnik, Yoonhee Jung	
Temperatura tal kot pokazatelj vpliva urbanizacije	157
Marina Lovrić, Katarina Kuk, Alen Mangafić	
Kulturna dediščina in podnebne spremembe	176
Aleksandra Ažman, Barbara Mušič	
Obvladovanje pregrevanja kot podnebnega tveganja	183
Barbara Mušič	
Materiali kot sooblikovalci urbane mikroklime	190
Janez Peter Grom, Tadej Glažar	
Grajeno okolje in pregrevanje	198
Jernej Červek	
Recenzija	208
Peter Šenk	
Recenzija	210
Aleksander S. Ostan	
Seznam avtorjev	213
Stvarno kazalo	217

Potencial vertikalne ozelenitve pri blaženju toplotnih obremenitev

Jana Kozamernik

Urbanistični inštitut Republike Slovenije

Izvleček

Zavedanje o pomenu naravnih prvin v mestih se zaradi prepoznanih okoljskih težav in podnebnih sprememb, ki vplivajo tudi na bivalno kakovost, povečuje v strokovni in splošni javnosti. Sistemi vertikalnih ozelenitev (VO) imajo pomembno vlogo kot arhitekturni element, hkrati pa so tip zelene infrastrukture z možnimi pozitivnimi učinki na urbano okolje, predvsem v gosto pozidanih urbanih območjih. Poglavje se osredotoča na vpliv vertikalnih ozelenitev z vidika mikroklimatskih razmer v urbanem odprtem prostoru, pri čemer proučujemo možnosti zmanjšanja toplotne obremenitve na uporabnike zunanjega prostora v poletnem času, v pasu zmerno toplega podnebja. Raziskava je izvedena na primeru dveh urbanih območij Ljubljane, z uporabo računalniškega modeliranja toplotnega odziva gradnikov urbanega prostora na podlagi primerjav variant z vertikalnimi ozelenitvami ozelenjenih in neozelenjenih javnih prostorov. Ugotovitve temeljijo na izračunih fiziološko nadomestne temperature (PET), ki je podlaga za razvrstitev v razrede toplotne obremenitve. Kljub zmanjšanju PET na posameznih lokacijah v obravnavanih območjih rezultati raziskave kažejo zanemarljiv vpliv VO na spremembo toplotnega ugodja v tipičnem vročem poletnem dnevu. Raziskava predstavlja del doktorskega dela avtorice z naslovom Vpliv ozelenjevanja fasad na doživljanje urbanih ambientov in urbano mikroklimo – primer Ljubljane.

Ključne besede:

vertikalno ozelenjevanje, zelene stene, toplotno ugodje, toplotni stres, modeliranje urbane mikroklimo

Abstract

The awareness of the importance of natural elements in cities is growing among both experts and the public due to recognized environmental problems and climate change, which also affect the quality of life. Vertical greening (VG) systems play an important role as an architectural element and a type of green infrastructure with potential positive effects on the urban environment, especially in densely built-up urban areas. This paper focuses on the impact of vertical greening from the perspective of microclimatic conditions in urban open spaces, examining the potential for reducing heat stress on outdoor space users in summer in a temperate climate zone. The research was conducted on two urban areas in Ljubljana, using computer modelling of the thermal response of urban space components based on comparisons of variants with vertical greening and non-vertical green public spaces. The findings are based on calculations of physiologically equivalent temperature (PET), which is the basis for classification into heat stress categories. Despite reductions in PET at individual locations, the results of the study show a negligible impact of VO on changes in thermal comfort on a typical hot summer day. The study is part of the author's doctoral thesis entitled How Green Facades Impact Perceptions of Urban Space and Microclimate: The Case of Ljubljana.

Keywords:

vertical green systems, green walls, thermal comfort, heat stress, urban microclimate modeling

1 Uvod

Med pomembnimi sodobnimi izzivi načrtovanja mest so usmerjenost v trajnostni razvoj, prilagajanje na podnebne spremembe, zmanjševanje okoljskega odtisa ter zagotovitev kakovostnega bivalnega okolja in s tem zdravja prebivalcev. Različne raziskave in urbane strategije že dalj časa obravnavajo pomembnost zelenih prvin v urbanem okolju z vidika prilagajanja na podnebne izzive, pregrevanje v poletnem času, pa tudi na splošno javno zdravje (Russo in Cirella, 2018). Eden izmed tipov tako imenovanih na naravi temelječih rešitev (angl. *nature-based solutions*) so sistemi vertikalnih ozelenitev, prepoznani kot možni ukrep za zagotavljanje izboljšanja okoljskih razmer v gosto pozidanih urbanih območjih (Bustami, Belusko, Ward in Beecham, 2018; de Jesus, Lourenço, Arce in Macias, 2017; Jim, 2015; Ottelé, 2011). Ti sistemi se na svetovni ravni promovirajo kot tisti gradniki, ki lahko pripomorejo k izboljšanju mikroklimе v zunanjem prostoru, čeprav dosedanje raziskave kažejo, da je opredeljevanje njihovih vplivov na zunanje okolje težavno, saj, kot navajata Perini in Rosaco (2013), »ni mogoče količinsko opredeliti vrednosti vplivov zaradi nemogoče ocene učinka«. Namen raziskave, izdelane v okviru doktorskega dela vstaviti naslov doktorskega dela Vpliv ozelenjevanja fasad na doživljanje urbanih ambientov in urbano mikroklimo – primer Ljubljane, je preveritev oziroma ovrednotenje vplivov ozelenjevanja fasad na kakovost urbanih mikroambientov v smislu njihovega morebitnega hladilnega učinka oziroma ugodnejšega stanja zunanjega okolja z vidika doživljanja toplotnega stresa na vroč poletni dan.

Poletni toplotni stres je v urbanem okolju povezan z lokalnimi mikroklimatskimi razmerami. Ker imajo mesta v primerjavi z okoliškim prostorom drugačno energijsko ravnovesje med površjem in ozračjem, se mestno podnebje razlikuje od primestnega in podeželskega. Glavni procesi, ki vplivajo na nastanek toplotnih otokov v mestih, so povezani s strukturo mestnega tkiva. Vpliv mesta na lastno podnebje je odvisen od več dejavnikov, predvsem segrevanja in ohlajanja površja, kar pomeni, da s spreminjanjem strukture površja lahko vplivamo tudi na fizikalne procese. Oke (2017) med najpomembnejšimi procesi pojava pregrevanja mest navaja poleg večje absorpcije sončnega sevanja zaradi večkratnega odboja od stavb in večjega območja, ki sprejema sevanje, tudi nižji faktor vidljivosti neba, ki preprečuje učinkovito nočno hlajenje mestnega površja, predvsem zapoznelo oddajanje toplote zaradi stavb in tlakovanih površin, saj se večji delež absorbirane toplote pretvori v zaznavno toploto, manjši pa v latentno toploto (kot posledica manjšega števila vodnih oz. vlažnih, npr. zelenih površin in večje suhosti urbanih površin). Poleg tega k pregrevanju pomembno prispeva tudi sproščanje toplote zaradi različnih virov oziroma dejavnosti ljudi (npr. industrija, promet itd.). Izpodrivanje naravnih površin z grajenimi povzroča, da se v mestnem okolju oblikujejo specifične mikroklimatske razmere. Ukrepi za zmanjšanje toplotnih otokov so predmet številnih študij in se nanašajo na obliko, usmerjenost in postavitev stavb, izkoriščanje naravnih vzorcev vetra pri načrtovanju razporeditve stavb, na strategije zagotavljanja večje prisotnosti vode v obliki mestnih vodnih teles, uporabo materiala visokega albeda za tlakovanje ter na povečevanje zelenih površin in ozelenjevanje na splošno (Fikfak idr., 2017; Vidrih in Medved, 2011). Ozeleneli gradniki mestnega okolja imajo zaradi rastlinskih delov in vsebnosti vode pomembno vlogo pri uravnavanju mikroklimatskih razmer v okolju. Zaradi visoke absorptivnosti sončnega sevanja in visoke emisivnosti toplotnega sevanja delujejo kot mikro senčila, ki se naravno hladijo s procesom evapotranspiracije. Posledica evapotranspiracije je hlapilno hlajenje zraka v mikroprostoru rastline. Pri sistemih vertikalnih ozelenitev je vegetacija vezana na fasado stavbe oziroma steno objekta in raste ob/na njej na način, da se ustvarja vertikalna vegetacijska ploskev. Vegetacija tako pokriva večjo ali manjšo površino vertikalne stene, odvisno od zasnove fasade in razporejenosti fasadnih odprtín. Definicija ozelenjenih fasad, ki jo uporabljamo v tej raziskavi, je bila oblikovana na podlagi pregleda terminologije več raziskav (Bustami idr., 2018; Jim, 2015; Pfoser, 2016). Opredeljujemo jih kot vertikalne fasadne sisteme z rastlinami, neposredno ali s podpornim sistemom integrirane v zunanjo steno (ovoj) stavbe. Tipologija vertikalnih ozelenitev je raznovrstna, določajo jo konstrukcijski elementi, način vgradnje rastlin in izbor le-teh. Osnovna tipa VO sta: zelene fasade (angl. *green facades*) in žive stene (angl. *living walls*). Za zelene fasade sta značilna stik s tlemi oziroma izraščanje rastlin iz tal in uporaba rastlin, ki se vzpenjajo po steni, neposredno ob njej ali ob opori. Žive stene so sistemi, ki nimajo stika s tlemi, so stenski element, iz katerega rastline rastejo (paneli, moduli, ploskve z žepi ipd.). Glede na konstrukcijske značilnosti je pogost tudi kombinirani tip oziroma sistem VO, ki vključuje uporabo sadilnih korit (angl. *pot-based green facades*), ki so lahko sestavni del balkonskih konstrukcij, sistem posod na zunanji nosilni konstrukciji ob fasadi ali neposredno na fasado pritrjena korita (Hoffmann idr, 2023).

2 Opredelitev toplotne obremenitve oziroma toplotnega stresa v urbanem odprtem prostoru

Običajno se rezultati izračunov, merenj in modeliranja urbane mikroklimе izražajo v temperaturi zraka. Na področju človeške biometeorologije, ki se ukvarja z vplivi toplotnega okolja na človeka oziroma z oceno toplotne komponente različnih podnebnih razmer, so se na področju uporabne klimatologije začeli že v preteklosti uporabljati različni toplotni indeksi, ki temeljijo na meteoroloških parametrih (Matzarakis idr., 1999; Shevchenko idr., 2022). Danes je vedno več poudarka na izračunih toplotnih indeksov s fiziološkim pomenom, ki izhajajo iz energijske bilance človeka oziroma počutja človeka, ob hkratnem upoštevanju meteoroloških parametrov. Eden od njih je fiziološka ekvivalentna (nadomestna) temperatura (PET – *Physiological Equivalent Temperature*), ki se v primerjavi z drugimi toplotnimi indeksi izraža v stopinjah Celzija (°C), zaradi česar so rezultati širše razumljivi tako različnim strokam kot javnosti. Fiziološka ekvivalentna temperatura je zaznavna temperatura oziroma temperatura, kot bi jo zaznala (občutila) oseba v nekem prostoru. Za izračun PET je treba določiti vse meteorološke parametre, ki so pomembni za energijsko bilanco človeka, na višini človeka (povprečna višina težišča stoječe osebe). Pri izračunu stopnje toplotnega zaznavanja se upošteva tudi notranja proizvodnja toplote človeka in toplotna upornost oblačil. Matzarakis idr. (1999) razvrščajo višino PET v različne stopnje zaznavanja toplotne obremenitve pri ljudeh in tako opredeljujejo devet razredov toplotnega stresa. Primerno toplotno ugodje (prijetno okolje, brez toplotnega stresa) v zunanjem okolju je doseženo, ko je vrednost fiziološke nadomestne temperature PET od 18,1 do 23 °C. Mali toplotni stres je PET od 23,1 do 29 °C, zmerni toplotni stres PET od 29,1 do 35 °C, močni toplotni stres PET od 35,1 do 41 °C ter ekstremna toplotna obremenitev PET nad 41,1 °C (Matzarakis idr., 1999). V tej raziskavi privzemamo razrede toplotnega stresa po raziskavi Matzarakisa idr. (1999).

3 Metoda modeliranja urbane mikroklimе

Preveritve toplotnih obremenitev na vroč poletni dan smo izvedli z modeliranjem urbane mikroklimе izbranih urbanih območij v Ljubljani. Za ta namen sta se pripravila dva modela obstoječih območij, simuliranih v različnih variantah z vertikalnimi ozelenitvami in brez njih. Modeliranje je bilo izvedeno z ENVI-met programsko opremo za 3D modeliranje urbane mikroklimе visoke ločljivosti. Uporabljeni model v raziskavi je validiran glede na eksperimentalne podatke (Envi-met, 2024).

3.1 Izbira območij

Izbrani sta bili dve manjši območji v Ljubljani z različnimi značilnostmi tako glede urbane strukture kot funkcij oziroma rabe. Izbor območij je sledil izhodiščem raziskave, in sicer z namenom preveritve različnih tipov odprtih prostorov glede na njihovo funkcijo, zgradbo ter različno umestitev stavbnih volumnov ter preveritve možnosti za umeščanje vertikalnih ozelenitev na njih. Izbrani območji sta bili vključeni tudi v raziskavo zaznavanja vertikalnih ozelenitev (Kozamernik, 2020; Kozamernik idr., 2020), ki je prav tako del doktorske disertacije avtorice. Prvo izbrano območje (Šiška), območje 1 – Šiška, je območje ob vpadnici v središče mesta, ki vključuje raznolike stavbe stanovanjskih blokov, stavbo osnovne šole Riharda Jakopiča ter stavb mešane rabe (stanovanjske, storitvene, centralne dejavnosti), stavbe so glede na starost različnega nastanka. Odprti prostori med njimi so pretežno javnega značaja, ulice, trgi in ploščadi, športno in otroško igrišče ob šoli ter zelene površine. Fasade so raznolike, med njimi so tudi slepe fasade. Možnosti ozelenitve fasad na območju so bile ugotovljene za fasade osnovne šole, slepe fasade na stanovanjskih blokih in stavbi bližnjega hotela. Drugo izbrano območje je območje poslovno-trgovinskega centra BTC v vzhodnem delu mesta, območje 2 – BTC, ki se navezuje na razsežno gospodarsko-obrtno območje. Večina stavb v območju so predelana industrijska skladišča, nastala v povojnem obdobju. Trgovski center promovira trajnostno preobrazbo, a je zaradi svoje urbane zgradbe eden od največjih toplotnih otokov v Ljubljani. V uličnih koridorjih na obravnavanem območju se na fasadah stavb nizajo servisni in glavni vhodi v poslovne, trgovinske in druge prostore. Tako se na dolgih straneh pretežno nizkih volumnov pojavljajo raznolike odprtine in deli slepih fasad. Možnosti ozelenitve fasad na območju so bile v modelu ugotovljene za vse slepe fasade.

3.2 Oblikovanje modelov in simuliranje

Obravnavani območji v Ljubljani sta obsegali 25 ha (območje 1 – Šiška) in 63 ha (območje 2 – BTC). Obe območji sta bili za obdelavo pripravljene v programu QGIS 3.34. S pomočjo vtičnika »Geodata to ENVI-met« so se v Envi-met prenesli osnovni prostorski podatki obravnavanih območij, kjer so se nato izvedli 3D modeliranje, dopolnitev in prilagoditev stavbnih volumnov, izdelali ločeni scenariji ter določile značilnosti materialov glede na variante ozelenitev, poleg tega so se pripravile datoteke z meteorološkimi spremenljivkami in izvedle simulacije. V simulaciji je bilo območje opredeljeno na mreži s horizontalno in vertikalno ločljivostjo 2 m. Celica nad tlemi je bila dodatno razdeljena na pet podcelic za namene boljše višinske ločljivosti v višini pešcev oziroma uporabnikov prostora. Po izvedenih simulacijah so bili rezultati pregledani in v obliki kart analizirani v programu QGIS 3.34. Za ustrezno pripravo obravnavanih območij so se izdelale ločene datoteke geolociranih slojev območij s podatki o obstoječih stavbah, površinah in vegetaciji. Za pripravo območij so bile uporabljene te podatkovne zbirke: kataster stavb (stavbe) (GURS, 2021), kataster GJI (ceste) (GURS, 2021), dejanska raba stavbnih zemljišč (površine) (GURS, 2023), DOF (Google LLC, 2024). Uporabljeni so bili tudi podatki občine (evidenca dreves na javnih površinah) (MOL, 2018), ki so bili dopolnjeni ročno glede na potrebe raziskave (terenski pregled vseh dreves v območju obdelave). V slojih podatkov so bili dodani atributi, prevedeni skladno z načinom zapisa lastnosti posameznih elementov za uporabo v programu ENVI-met (material, sestave, vrste ipd.). Pripisanim vrednostim atributom modela obstoječega stanja (brez zelenih fasad) so bile določene vrednosti za stavbe in površine (npr. beton, asfalt, peščene površine ipd.). Lastnosti atributov vegetacije so bile privzete vrednosti zbirke podatkov ENVI-met, ki vključuje večino dreves, ki se v praksi sadijo v urbanem okolju v mestih primerljivega podnebja. V primeru vrste drevesa na lokaciji, ki je v programski zbirki podatkov še ni, se je uporabil atribut podobne vrste (podobnost drevesa glede na listno sestavo in obliko krošnje). Za zelene stene na posameznih objektih so bile izdelane nove sestave oziroma sloji materialov, in sicer dve sestavi za zelene fasade (zelena fasada z vzpenjalkami, debelina zelenega sloja 20 in 30 cm) in štiri sestave za žive stene (žive stene s substratno mešanico s peščenimi in glinenimi delci in štirje tipi vegetacije – praproti, kosteničevje, trave in hoste).

Ker se raziskava osredotoča na toplotne obremenitve v poletnem času, so bili za namen simuliranja izbrani meteorološki podatki za tipičen vroč poletni dan, 15. avgust 2021, iz meteorološke postaje Ljubljana – Bežigrad ARSO (107). Izbrana meteorološka postaja je območjem najbližja in je ena od državnih postaj, ki zagotavlja urne podatke z opazovanimi vrednostmi (temperatura, vlažnost, smer in hitrost vetra). Meteorološki podatki so bili pridobljeni z arhivske strani ARSO (Agencija Republike Slovenije za okolje, 2021). V vseh simulacijah so bili uporabljeni enaki vhodni meteorološki podatki z namenom medsebojne primerjave scenarijev. Simulacija je obsegala obdobje enega dneva oziroma 24 ur. Izvedenih je bilo šest simulacij, za vsako območje obdelave po tri simulacije (simulacija mikroklimatskih razmer obstoječega stanja, simulacija z uvedenimi vertikalnimi ozelenitvami tipa zelene fasade in simulacija z vertikalnimi ozelenitvami tipa žive stene oz. kombiniranimi sistemi).



Slika 1: Izdelani 3D model območja 2 (BTC) za simulacijo v programu ENVI-met

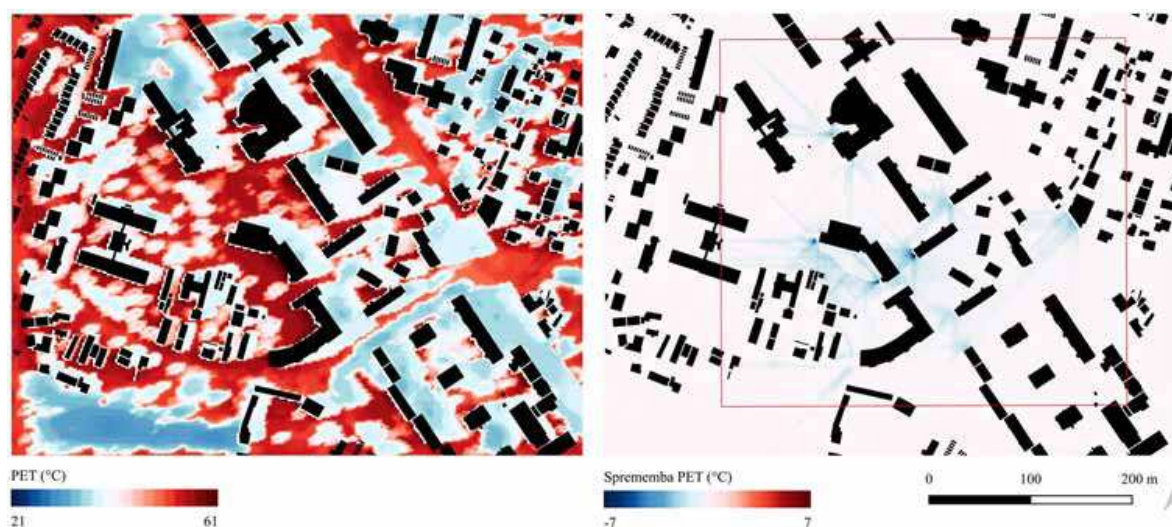
4 Simulacije učinka vertikalne ozelenitve na spremembo ravni toplotnega stresa

S simulacijami dveh urbanih območij v Ljubljani (Šiška in BTC) smo izdelali izračune fiziološke ekvivalentne temperature v teh območjih na posamezno modelirano celico, povprečne vrednosti PET v posameznem območju ter primerjave v zastavljenih scenarijih. Z namenom preveritve učinka vertikalne ozelenitve z vidika morebitne spremembe ravni toplotnega stresa smo v obeh simuliranih območjih za podrobnejšo analizo analizirali tudi dva mikroambienta, igrišče ob šoli Riharda Jakopiča v Šiški in vstopni trg ob vhodu v halo A v trgovskem središču BTC.

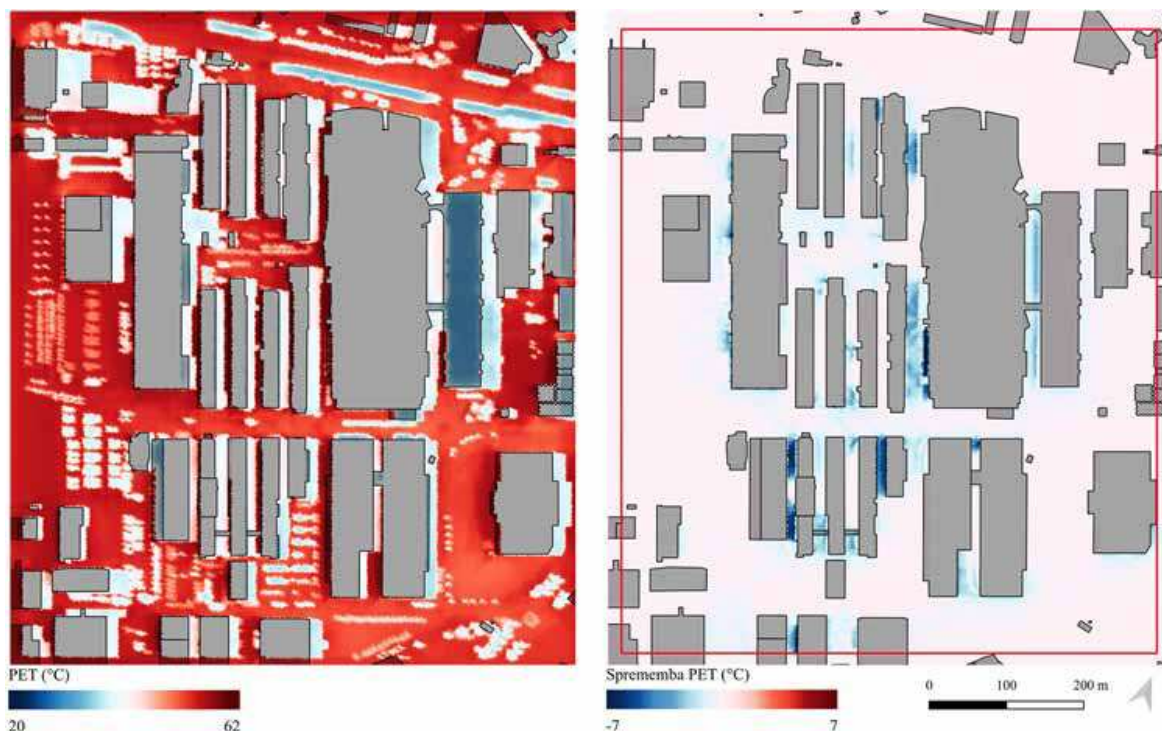
4.1 Toplotna obremenitev v izbranih urbanih območjih in učinki ob vključevanju vertikalnih ozelenitev

Obravnavani območji sta urbanistično zelo različni, tako glede na morfološko zgradbo kot prostorski kontekst, s čimer so pogojene tudi podnebne značilnosti. Rezultat povprečja modelirane PET v simulacijah obstoječega stanja brez vertikalnih ozelenitev kaže na razlike med obravnavanima območjema tako v višini PET kot trajanju toplotne obremenitve čez dan. V modeliranem poletnem dnevu je toplotna obremenitev nad mejo ekstremne toplotne obremenitve ($41,1\text{ }^{\circ}\text{C PET}$) v območju Šiška med 11. in 16. uro (pet ur), medtem ko je v območju BTC med 10. in 18. uro (osem ur). Na ta dan je v obeh območjih PET padla na raven toplotnega ugodja (med $18,1$ in $23\text{ }^{\circ}\text{C PET}$) le ponoči, od polnoči do 6. ure zjutraj, kar nakazuje, da je v Ljubljani v vročih poletnih dneh toplotna obremenitev prisotna večino dneva.

V variantah z vertikalnimi ozelenitvami v obeh obravnavanih območjih se PET, izračunana na celotni območji, ne spremeni oziroma je zanemarljiva (zmanjšanje za $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$), je pa učinek – zmanjšanje PET – viden v grafični ponazoritvi rezultatov, in sicer v neposredni bližini ozelenjenih fasad. V območju 1 – Šiška so največje razlike vidne v poznopopoludanskih urah (16.00–19.00), in sicer tako glede znižanja PET kot glede širjenja hladilnega učinka v okoliški prostor. Z bližino fasadi se povečuje učinek VO ter zmanjšuje PET, prav tako časovno trajanje učinka. Pregled posameznih odprtih prostorov med stavbami v obravnavanih območjih je pokazal zanemarljiv vpliv VO na večje odprte površine, na primer v območju 2 – BTC je učinek na območju Ameriške ulice ob ozelenjeni fasadi le $0,3\text{ }^{\circ}\text{C PET}$, sledi območje Argentinske ulice, najmanjši oziroma skoraj neznamenat pa je učinek na območju Trga mladih, ki je osrednja peš promenada v trgovskem središču (za $0,1\text{ }^{\circ}\text{C PET}$). Učinek pa se kaže v nekaterih uličnih koridorjih, kjer je učinek VO pogojen tudi z morfologijo gradnje oziroma širino in orientacijo koridorjev. Toplotna obremenitev se zaradi ozelenjenih fasad najbolj zniža v ožjih koridorjih, ki so glede na pokritost fasad ozelenjeni v večini (vsaj ena fasada 100% ali dve nasprotni fasadi po najmanj 50% ozelenjene vertikalne ploskve), zmanjšanje je za največ $4\text{ }^{\circ}\text{C PET}$, učinek je tudi v primerih



Slika 2: Grafično prikazani rezultati simulacije na območju 1 (Šiška), levo: vrednosti fiziološke ekvivalentne temperature (PET) ob 16.00 v primeru obstoječega stanja brez VO; desno: sprememba PET v simulaciji z zelenimi fasadami na višini 1,4 m



Slika 3: Grafično prikazani rezultati simulacije na območju 2 (BTC), levo: vrednosti fiziološke ekvivalentne temperature (PET) ob 16.00 uri v primeru obstoječega stanja brez VO; desno: sprememba PET v modelu oziroma simulaciji z zelenimi na višini 1,4 m

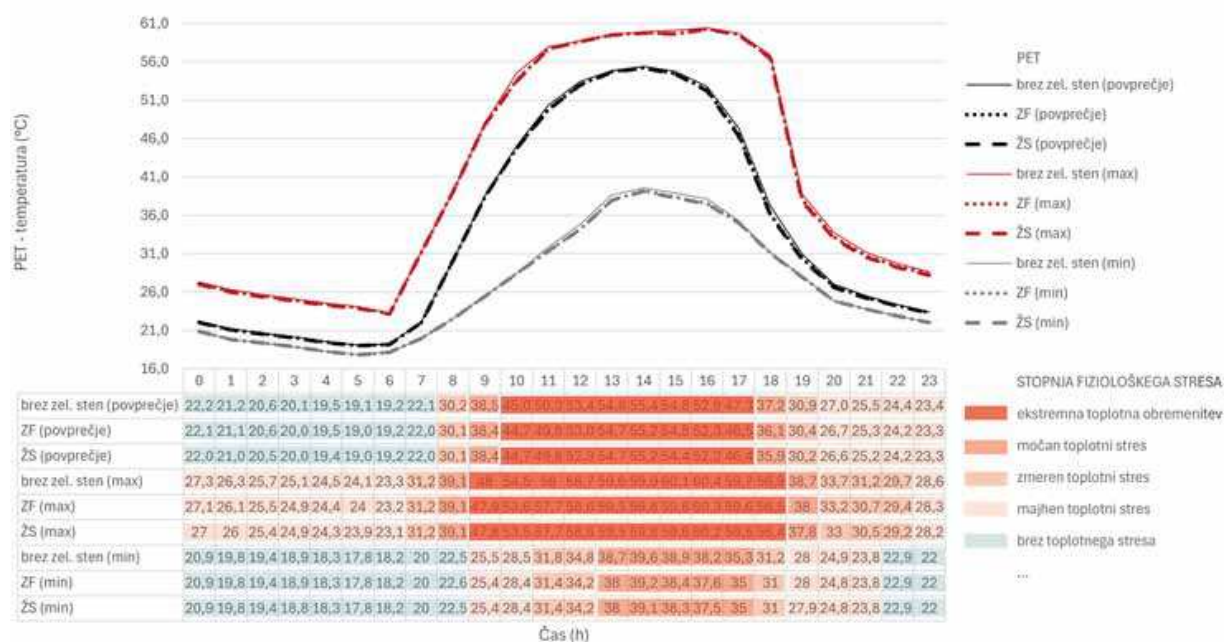
koridorjev z dvema tretjinama ozelenjenih fasad, pri katerih je vpliv ozelenitve na zmanjšanje PET za okvirno 2 °C PET. Rezultati so pokazali, da imajo žive stene minimalno večji učinek na analizirani višini pešca. Če so umeščene na višini, večji od pešca, (npr. od prvega nadstropja višje), v primerjavi z učinkom tipa zelenih fasad nimajo večjega učinka.

Na slikah 2 in 3 so grafični prikazi rezultatov modeliranja zaznavne temperature (PET) na višini 1,4 m od tal, na sliki 2 za območje 1 in na sliki 3 za območje 2. Slike na levi strani predstavljajo izračune PET ob 16. uri za obstoječe stanje (model brez vertikalnih ozelenitev), na desni strani pa izračun razlike med modelom obstoječega stanja (brez vertikalnih ozelenitev) in modelom z VO, umeščenimi na fasade. Na desnih slikah se kažejo stanje oziroma lokacije, kjer je z izračunom simulacije opredeljen hladilni učinek VO.

4.2 Toplotna obremenitev na izbranih mikroobmočjih igrišča in trga

Natančneje sta bili v raziskavi z vidika toplotne obremenitve analizirani dve manjši območji, igrišče ob šoli Riharda Jakopiča (izsek območja Šiška) in trg pred trgovsko stavbo hale A (izsek območja BTC). Analiza rezultatov simulacij PET glede na opredeljene razrede toplotnega stresa po Matzarakis idr. (1999) je pokazala zelo majhne spremembe ob uvedbi VO. V primeru območja OŠ Riharda Jakopiča se PET ob uvedbi vertikalne ozelenitve na stavbi šole sicer zmanjša, vendar nima vpliva na raven toplotnega stresa v območju šolskega igrišča. Na celotnem območju se PET zmanjša za > 0,5 °C med 11. in 12. uro in med 16. in 19. uro, za približno 1 °C pa med 17. in 18. uro. V dopoldanskem času ta razlika ne pomeni zmanjšanja pod mejo ekstremne toplotne obremenitve. Lokalno, na posamezno modelirno celico natančno, v delu analiziranega območja tik ob jugozahodni fasadi stavbe, se v popoldanskem času zniža raven toplotne obremenitve za eno uro, med 17. in 18. uro. Znižanje za največ 7,5 °C PET (pri simulaciji z živimi stenami) oziroma 6,5 °C PET (pri simulaciji z zelenimi fasadami) ob 17. uri pomeni znižanje ravni ekstremne obremenitve na raven velike obremenitve za čas ene ure.

V primeru območja vstopnega trga pred halo A v BTC vertikalne ozelenitve nimajo vpliva na raven toplotnega stresa. Povprečje PET v območju se sicer zmanjša za > 0,5 °C med 9. in 11. uro in med 16. in 17. uro, a ne doseže zmanjšanja za 1 °C. Glede na posamezne lokalne celice je največje zmanjšanje PET za 3,6 °C ob 9. uri, ki pa ne pomeni zmanjšanja pod mejo ekstremne toplotne obremenitve. Na sliki 4 je prikaz primera mi-



Slika 4: Grafični prikaz izračunov PET po posameznih urah za okolje ob šoli Riharda Jakopiča – povprečne PET na območju in PET v posameznih celicah (2 x 2 m) z maksimalnimi in minimalnimi vrednostmi ter razvrstitev vrednosti v skupine glede na stopnje fiziološkega stresa po Matzarakis. V primeru simulacij z VO (ZF, ŽS) znižanje vrednosti PET ni zadostno za znižanje razreda toplotne obremenitve (Matzarakis idr., 1999)

kroobmočja igrišča ob OŠ Riharda Jakopiča glede na modelirane povprečne PET na območju ter razvrstitev v razrede glede na stopnje fiziološkega stresa po Matzarakis (Matzarakis idr., 1999). Izračuni, predstavljeni na grafikonih, kažejo na omejenost učinkovanja vertikalnih ozelenitev. Kljub nekolikšnemu znižanju PET na ravni pešca ob uvedbi ozelenitev ti vplivi ne pomenijo dovolj velike spremembe za doseganje znižanja ravni toplotne obremenitve na nižji obremenitveni razred.

5 Sklep

Učinek ozelenjenih fasad je močno povezan z morfologijo urbanega prostora in umeščenostjo ozelenitev na fasade ter z velikostjo ozelenjene površine. Predvsem je pomembno merilo širina odprtega prostora pred oziroma med ozelenjenimi fasadami – večja je širina, manjši je učinek vertikalne ozelenitve. Ključno merilo je tudi sklenjenost ozelenjene površine na fasadi in velikost te površine glede na površino celotne fasade. Na PET imata vpliv razmerje površine ozelenjene in neozelenjene fasade ter bližina ozelenjene površine na ravni pešca. Rezultati simulacij so sicer dokazali vpliv zelenih fasad na znižanje PET v grajenem okolju, vendar je ta učinek zanemarljiva vrednost oziroma premajhna za znižanje povprečne PET in razreda toplotne obremenitve. Vendar pa zaradi vpliva vertikalnih ozelenitev lahko na posameznih mikrolokacijah pride do znižanja PET v taki višini, da lahko te lokacije opredelimo kot hladne točke, saj se z njimi doseže, da se PET zniža pod raven ekstremne toplotne obremenitve v določenem časovnem intervalu. Te točke sicer lahko opredelimo glede na resolucijo simulacije (velikosti mreže 2 x 2 m) kot možne prostore za zadrževanje, na primer za umeščanje urbane opreme.

Rezultati raziskave tako kažejo, da učinka VO na toplotno ugodje v zunanjem prostoru v času vročih poletnih dni ne moremo opredeliti kot pomembnega za nižanje toplotne obremenitve uporabnika zunanjega prostora oziroma za izboljšanje toplotnega ugodja v tem prostoru, saj je učinek VO majhen in izjemno lokalnega značaja. VO lahko opredelimo kot ustrezen ukrep za doseganje koristi le v posameznih specifičnih okoljih oziroma na lokacijah, ob zavedanju časovno omejenih učinkov. Pri sledenju cilja znižanja toplotnega stresa v urbanem okolju je smiselno več pozornosti nameniti drugim, bolj učinkovitim ukrepom s področja zelene infrastrukture v proučevanem zmerno toplem podnebni pasu. Pri tem moramo opozoriti, da so omejitve te raziskave z vidika uporabe programa modeliranja urbane mikroklimе majhne, saj je program ENVI-met

validiran z meritvami (Kong idr., 2016) in eden izmed vodilnih v raziskovanju in praksi. Omejitve raziskave so povezane predvsem z natančnostjo izdelanega modela (priprava za urbanistično raven). Večja podrobnost modelov stavb, pomožnih elementov in posnetek drugih gradiv (urbane opreme, vegetacije itd.) bi omogočila natančnejše rezultate, a hkrati znatno podaljšala čas simuliranja za vse variantne primere. Raziskava se ob tem ni podrobneje posvečala tematiki vzpostavitve sistemov vertikalnih ozelenitev, v modelu smo privzeli predpostavko o idealnih razmerah oziroma zagotovljenih vseh virih za učinkovito in nemoteno popolno delovanje sistemov VO (zagotovljena količina vode za namakanje, ustrezni prostor za koreninski sistem ipd.). Zaradi urbanistične ravni proučevanja je v modelih tudi zanemarljiv parameter statične lastnosti stavb, ki mora sicer biti ustrezno upoštevan ob uvedbi VO. Izdelani modeli v raziskavi omogočajo dopolnitev raziskave z dodatnimi analizami glede na različne višinske plasti (npr. učinek nad strehami stavb), kombiniranje z drugimi vidiki opredeljevanja učinkov vertikalnih ozelenitev na ljudi (npr. zaznavanje) ter nadgradnjo modelov za preveritev drugih ukrepov s področja zelene infrastrukture ali kombiniranja različnih ukrepov v primeru iskanja učinkovitejših rešitev za doseganje ciljev večjega učinka zmanjšanja toplotnega stresa v posameznih odprtih prostorih.

Viri in literatura

- Agencija Republike Slovenije za okolje. (2021). Arhiv opazovanih in merjenih meteoroloških podatkov po Sloveniji. <https://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/>
- Bustami, R. A., Belusko, M., Ward, J. in Beecham, S. (2018). Vertical greenery systems: A systematic review of research trends. *Building and Environment*, 146, 226–237. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.045>
- de Jesus, M. P., Lourenço, J. M., Arce, R. M. in Macias, M. (2017). Green façades and in situ measurements of outdoor building thermal behaviour. *Building and Environment*, 119, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.03.041>
- Envi-met. (2024). Envi-met GmbH. <https://www.envi-met.com/>
- Fikfak, A., Kosanović, S., Konjar, M., Grom, J. P. in Zbašnik-Senegačnik, M. (2017). The impact of morphological features on summer temperature variations on the example of two residential neighborhoods in Ljubljana, Slovenia. *Sustainability*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/su9010122>
- Hoffmann, K. A., Schröder, S., Nehls, T., Pitha, U., Pucher, B., Zluwa, I., Gantar, D., Šuklje Erjavec, I. in Kozamernik, J. (ur.) (2023). *Vertical Green 2.0 – The Good, the Bad and the Science*. Universitätsverlag der TU Berlin. <https://doi.org/10.14279/depositon-16619>
- Jim, C. Y. (2015). Greenwall classification and critical design-management assessments. *Ecological Engineering*, 77, 348–362. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.01.021>
- Kong, F., Sun, C., Liu, F., Yin, H., Jiang, F., Pu, Y., Cavan, G., Skelhorn, C., Middel, A. in Dronova, I. (2016). Energy saving potential of fragmented green spaces due to their temperature regulating ecosystem services in the summer. *Applied Energy*, 183, 1428–1440. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.070>
- Kozamernik, J. (2020). Green Walls: Shaping Urban Communication. V F. Berlingieri in F. Zanotto (ur.), *Comparison: Conference for Artistic and Architectural Research*. (str. 155–163). Politecnico Milano. <https://www.letteraventidue.com/it/prodotto/453/comparison>
- Kozamernik, J., Rakuša, M. in Nikšič, M. (2020). How green facades affect the perception of urban ambiances: Comparing Slovenia and the Netherlands. *Urbani izziv*, 31(2), 88–100. <https://doi.org/10.5379/urbani-izziv-en-2020-31-02-003>
- Matzarakis, A., Mayer, H. in Iziomon, M. G. (1999). Applications of a universal thermal index: Physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 76–84. <https://doi.org/10.1007/s004840050119>
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A. in Voogt, J. A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- Ottelé, M. (2011). *The Green Building Envelope - Vertical Greening*. Doktorska disertacija. TU Delft. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A1e38e393-ca5c-45af-a4fe-31496195b88d>
- Perini, K. in Rosasco, P. (2013). Cost-benefit analysis for green façades and living wall systems. *Building and Environment*, 70(12), 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.012>
- Pfoser, N. (2016). *Fassade und Pflanze, Potenziale einer neuen Fassadengestaltung*. Doktorska disertacija. Technische Universität Darmstadt. <https://tuprints.ulb-tu-darmstadt.de/5587/>
- Russo, A. in Cirella, G. T. (2018). Modern compact cities: How much greenery do we need? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(10). <https://doi.org/10.3390/ijerph15102180>
- Shevchenko, O., Snizhko, S., Zapototskyi, S. in Matzarakis, A. (2022). Biometeorological Conditions during the August 2015 Mega-HeatWave and the Summer 2010 Mega-Heat Wave in Ukraine. *Atmosphere*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/atmos13010099>
- Vidrih, B. in Medved, S. (2011). *Vpliv globalnih podnebnih sprememb in urbanizacije na lokalne klimatske razmere v mestih*. <https://doi.org/10.1016/j.newideapsych.2010.04.001>