

Utjecaj temperature vodenih tijela na mikroklimatska obilježja grada Zagreba

Frančić, Lucija

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:730996>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Lucija Frančić

UTJECAJ TEMPERATURE VODENIH
TIJELA NA MIKROKLIMATSKA
OBILJEŽJA GRADA ZAGREBA

Diplomski rad

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA
SMJER: METEOROLOGIJA I FIZIČKA OCEANOGRAFIJA

Lucija Frančić

Diplomski rad

**Utjecaj temperature vodenih tijela na
mikroklimatska obilježja grada Zagreba**

Voditeljica diplomskog rada: izv. prof. dr. sc. Ivana Herceg Bulić

Zagreb, 2024.

Najveće zahvale upućujem svojoj mentorici izv. prof. dr. sc. Ivani Herceg Bulić na uloženom trudu i vremenu te mnoštvu korisnih savjeta tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem kolegicama Marijani Boras i Ireni Nimac na pokretanju simulacija u modelu, dobivenim podacima i pomoći kada mi je ona zatrebala.

Naposljetku, zahvalna sam svojoj obitelji i najbližima na neprestanoj podršci i svim pozitivnim mislima koje su mi uputili tijekom stresnih dana.

Ovaj je rad napravljen u sklopu aktivnosti projekta „Klima i ekstremni vremenski uvjeti u prirodnom i urbanom okolišu Hrvatske – CroClimExtremes“ (HRZZ IP-2022-10-4144).

Sažetak

U ovom radu analiziran je utjecaj temperature vodenih tijela na mikroklimatska obilježja grada Zagreba tijekom toplinskog vala. Odabran je toplinski val koji je u kolovozu 2012. godine rezultirao ekstremno visokim temperaturama zraka i vrlo malim količinama oborine na području Hrvatske, a tako i Zagreba, u odnosu na dugogodišnje razdoblje. Korišteni su meteorološki podaci izmjereni radiosondažama za postaju Zagreb 24. kolovoza 2012. godine preuzeti iz sustava podataka Sveučilišta u Wyomingu. Uz pomoć tih podataka provedeno je pet simulacija modelom MUKLIMO_3 koje se razlikuju u temperaturi vodenih tijela te su dobivene satne vrijednosti temperature zraka, relativne vlažnosti zraka i vjetra na 2 m visine u odabranom danu između 4 h i 21 h na domeni Zagreba. Cilj rada bio je procijeniti jačinu i prostorna obilježja utjecaja vodenih tijela na toplinska obilježja grada Zagreba te tako ispitati mogućnost ublažavanja toplinskog opterećenja u gradu vodenim tijelima. Dobiveni rezultati pokazuju da vodena tijela mogu ohladiti Zagreb, no njihov je utjecaj prostorno i vremenski ograničen. Taj je utjecaj najveći u neposrednoj blizini vodenih tijela i opada s udaljenošću. Najveće ohlađivanje vodenim tijelima uočava se prijepodne kada je razlika između temperature vodenih tijela i njihove okoline najveća, a u ranim jutarnjim i kasnim večernjim satima toplija vodena tijela mogu zagrijati okolni zrak. Usporedbe temperature zraka u različitim simulacijama pokazuju da hladnija vodena tijela više ohlađuju okolni zrak nego što ga toplija vodena tijela zagrijavaju. Odstupanja u temperaturi zraka između simulacija najveća su u jutarnjim i večernjim satima te ovise o vjetru. Pokazano je da temperatura vodenih tijela također utječe na relativnu vlažnost zraka. Advekcija vjetrom može donekle povećati prostorni doseg utjecaja vodenih tijela na temperaturu i relativnu vlažnost zraka, ali se znatnije promjene uočavaju samo u njihovoj neposrednoj blizini.

Ključne riječi: urbana mikroklima, toplinski valovi, toplinsko opterećenje, temperatura vodenih tijela, urbani model MUKLIMO_3

The influence of temperature of water bodies on the microclimatic characteristics of the city of Zagreb

Abstract

In this study, the influence of temperature of water bodies on the microclimatic characteristics of the city of Zagreb during a heatwave was analyzed. The heatwave that was chosen occurred in August 2012 and resulted in extremely high air temperatures and very little precipitation in Croatia, as well as Zagreb, compared to the long-term period. Meteorological data measured by radiosondes at the Zagreb station on August 24, 2012, was used, sourced from the University of Wyoming data system. Using this data, five simulations that differ in the temperature of water bodies were conducted with the MUKLIMO_3 model. Hourly values of air temperature, relative humidity, and wind at a height of 2 m were obtained for the selected day between 4 AM and 9 PM in the Zagreb domain. The aim of the study was to assess the magnitude and spatial characteristics of the impact of water bodies on the thermal characteristics of the city of Zagreb and thus examine the possibility of mitigating heat stress in the city using water bodies. The results show that water bodies can cool Zagreb, but their impact is spatially and temporally limited. The impact is the greatest in the immediate vicinity of the water bodies and decreases with distance. The greatest cooling by water bodies is observed in the morning when the difference between the temperature of the water bodies and their surroundings is the largest, while in the early morning and late evening, warmer water bodies can heat the surrounding air. Comparisons of air temperature in different simulations show that cooler water bodies cool the surrounding air more than warmer water bodies heat it. Deviations in air temperature between simulations are greatest in the morning and evening and depend on wind characteristics. Relative humidity of the air also depends on the temperature of the water bodies. Wind advection can somewhat increase the spatial range of the influence of water bodies on temperature and relative humidity, but significant changes are only found in their immediate vicinity.

Key words: urban microclimate, heatwaves, heat load, temperature of water bodies, MUKLIMO_3 model

Sadržaj

1. Uvod	1
1.1. Toplinski valovi	1
1.2. Urbani toplinski otoci	3
1.3. Klimatska obilježja grada Zagreba	5
1.4. Motivacija i cilj istraživanja	10
2. Podaci i metode	12
2.1. Područje istraživanja	12
2.2. Obilježja toplinskog vala u kolovozu 2012.....	13
2.3. Podaci.....	17
2.4. Model MUKLIMO_3.....	17
2.4.1. Postavke modela	18
3. Rezultati.....	20
3.1. Temperatura zraka	20
3.1.1. Utjecaj temperature vodenih tijela na satne vrijednosti temperature zraka...	20
3.1.2. Prostorna raspodjela temperature zraka i vjetra.....	25
3.1.3. Usporedba temperature zraka eksperimenata s kontrolnom simulacijom.	29
3.2. Relativna vlažnost zraka.....	35
3.3. Diskusija.....	40
4. Zaključak	43
Dodatak	45
Literatura.....	65

1. Uvod

Sunčevo zračenje glavni je izvor energije na Zemlji, ali količina zračenja koja ostane apsorbirana u Zemljinom sustavu ovisi o mnoštvu faktora. Veliku ulogu u zagrijavanju atmosfere ima njezin kemijski sastav zato što pojedini kemijski elementi i spojevi apsorbiraju dugovalno zračenje koje dolazi sa Zemlje. Spojevi poput ugljikovog dioksida, vodene pare, metana, dušikovog (I) oksida i dr. nazivaju se stakleničkim plinovima jer pri visokim koncentracijama zadržavaju toplinu koja bi inače bila vraćena u Svemir te tako stvaraju efekt staklenika. Ljudske aktivnosti poput izgaranja fosilnih goriva i krčenja šuma među glavnim su uzrocima porasta koncentracije stakleničkih plinova u atmosferi koji ubrzavaju zagrijavanje Zemljine površine. Takvo kontinuirano zagrijavanje nazivamo globalnim zatopljenjem. Tijekom posljednjih desetljeća temperatura Zemlje naglo je porasla u odnosu na predindustrijsko razdoblje te je rezultirala mnogim klimatskim promjenama poput učestalih vremenskih ekstrema, sušnih razdoblja, sve češćih toplinskih valova i sl.

Osim porasta koncentracije stakleničkih plinova u atmosferi, jedna od posljedica kontinuiranog porasta ljudske populacije na Zemlji je ta da ljudi sve više mijenjaju Zemljinu površinu krčenjem šuma, izgradnjom novih naselja i sl., koristeći se pritom umjetnim materijalima. Takve antropogene aktivnosti izravno utječu na toplinska obilježja podloge pa tako i na temperaturu okolnog zraka. Štoviše, vrlo je vjerojatno da su upravo ljudske aktivnosti odgovorne za zagrijavanje Zemlje za oko 1 °C u usporedbi s globalnim srednjakom temperature u razdoblju 1850.–1900. (Masson-Delmotte i sur., 2021).

1.1. *Toplinski valovi*

Toplinski valovi su razdoblja s iznimno visokim temperaturama zraka za taj dio godine u usporedbi s višegodišnjim prosjekom, neovisno o tome pojavljuju li se za vrijeme suhog ili vlažnog vremena. Najčešće nastaju tijekom vrlo stabilnog vremena bez naoblake kada velika količina Sunčevog zračenja dopire do Zemljine površine. Mjere se na različite načine, no često se unaprijed definiraju temperaturni pragovi na temelju kojih se određuje intenzitet i duljina trajanja. Osim samog globalnog zatopljenja, mnogo čimbenika može utjecati na stvaranje toplinskih valova, a neki od njih su atmosferska cirkulacija velike prostorne skale i modovi klimatske varijabilnosti

(npr. Sjeverno-atlantska oscilacija), temperatura i procesi u oceanima, koncentracija stakleničkih plinova u atmosferi, vlažnost tla i dr. (Wehrli i sur., 2019). Neki od ovih čimbenika izravno utječu na transport topline i kretanje zračnih masa, a neki imaju svojstvo zadržavanja topline koja dolazi sa Zemljine površine pa tako potiču stvaranje toplinskih valova.

Osim sve češćeg pojavljivanja toplinskih valova, zabilježeno je da se njihove duljine i intenziteti također povećavaju (Hansen i sur., 2012). Klimatski modeli i projekcije pokazuju se da će u budućnosti takvi ekstremni događaji biti još učestaliji i intenzivniji ako se globalno zatopljenje nastavi povećavati trenutnim tempom, tj. događaji koje danas smatramo ekstremnima u drugoj će polovici stoljeća postati uobičajenima. S obzirom na to da se neki dijelovi Zemlje jače zagrijavaju od drugih ovisno o geografskoj širini i ostalim klimatskim obilježjima, tropski i suptropski pojasevi bit će pod najvećim rizikom od pojave duljih i intenzivnijih toplinskih valova, a u umjerenim i polarnim regijama oni će se pojavljivati češće nego posljednjih desetljeća (Russo i sur., 2014).

Ovisno o njihovoj duljini i intenzitetu, pokazano je da toplinski valovi znatno utječu na ljudsko zdravlje. Pogotovo u slučajevima kada su noći karakterizirane ekstremno visokim temperaturama, kod pojedinih skupina ljudi duga razdoblja toplinskih valova mogu uzrokovati umor, iscrpljenost, toplinski udar, pa čak i smrt. Najranjivije skupine su ljudi starije životne dobi, mala djeca te pojedinci s kardiovaskularnim bolestima i bolestima dišnih putova. Budući da je sve više starijeg stanovništva, a toplinski valovi postaju sve češći i intenzivniji, mortalitet povezan s njima također raste, pogotovo kod ljudi koji žive u urbanim područjima (Basu i Samet, 2002). Pored visokih temperatura, velika količina vlage u zraku također može povećati negativan utjecaj toplinskih valova na ljudsko zdravlje pa se zato pri procjeni intenziteta toplinskih valova u obzir mora uzeti i vlažnost zraka (Russo i sur., 2017). Da bi se smanjio negativan učinak toplinskih valova na ljude, uvedeni su sustavi za upozoravanje građana na opasnost od vrućine koji se oglašavaju ako temperature premašuju unaprijed određene pragove. Tako je u Republici Hrvatskoj za oglašavanje zadužen Hrvatski zavod za javno zdravstvo koji u suradnji s Državnim hidrometeorološkim zavodom u razdoblju između 15. svibnja i 15. rujna izdaje upozorenja za razinu opasnosti od vrućine u slučajevima kada temperatura zraka premašuje određeni prag (DHMZ). Osim na ljudsko zdravlje, toplinski valovi mogu

negativno utjecati na vegetaciju, poljoprivredu, čovjekovu potrošnju energije, normalno funkcioniranje ekosustava i dr., ovisno o njihovoj duljini i intenzitetu te karakteristikama pogođenog područja (Domeisen i sur., 2023).

1.2. Urbani toplinski otoci

Urbanizacija je proces razvoja i širenja gradskih sredina potaknut sve većim udjelom gradskog stanovništva. Prema podacima UN-a iz 2018. godine, u gradovima je tada živjelo oko 55% ukupne globalne populacije, a očekuje se da će taj postotak polovicom stoljeća prijeći 65%. U urbanim sredinama umjetni materijali zamjenjuju prirodne te tako mijenjaju toplinska i radijacijska svojstva podloge poput albeda ili toplinskog kapaciteta pa uzrokuju njeno povećano zagrijavanje ili reflektiraju toplinu natrag prema tlu (Li i sur., 2012). Osim što su izgrađene od umjetnih materijala, visoke zgrade povećavaju trenje i usporavaju vjetar, a ponekad i uzrokuju njegovo zakretanje (Klaić i sur., 2002). Količina vegetacije i vodenih tijela u gradovima znatno je manja u odnosu na ruralne dijelove pa je stoga smanjeno ohlađivanje evapotranspiracijom ili stvaranjem prirodne sjene (Massaro i sur., 2023). Osim toga, promet u urbanim sredinama uzrokuje višak stakleničkih plinova koji se zadržavaju u atmosferi. Iako ti plinovi nisu glavni uzročnici povećanja temperature u gradu, oni pojačavaju efekt globalnog zatopljenja pa tako i zagrijavanja Zemlje (Oke i sur., 2017). Zbog nabrojanih čimbenika temperatura zraka u gradovima često je viša od temperature zraka u ruralnim područjima i tada se stvaraju *urbani toplinski otoci*. Horizontalni gradijent temperature između gradova i njihove okoline u situacijama kada je vjetar relativno slab može izazvati strujanje zraka slično obalnoj cirkulaciji ili cirkulaciji obronka gdje zrak izvana struji prema gradu. Takvo strujanje zadržava topli i onečišćeni zrak na tom području te ubrzava stvaranje oblaka i oborine iznad gradova, pogotovo u situacijama ljetnih konvektivnih oborina. Zadržavanje topline u izgrađenim dijelovima gradova tijekom dana rezultira njenim otpuštanjem u atmosferu tijekom noći te sprječava hlađenje zraka. Zato su razlike između temperature zraka u gradovima i temperature zraka u njihovim ruralnim okolinama često najveće noću, no to ovisi o klimatskim tipovima takvih područja (Masson i sur., 2020).

S obzirom na to da se klima u gradovima mijenja, a gustoća naseljenosti u gradskim sredinama naglo raste, meteorološke i klimatske opasnosti velike su prijetnje za gradsko stanovništvo. Učinak urbanih toplinskih otoka može uzrokovati znatne

posljedice za ljudsko zdravlje slične onima koje se javljaju tijekom toplinskih valova ili drugih pojava uzrokovanih ekstremno visokim temperaturama. Neke od posljedica su dehidracija, iscrpljenost, problemi dišnog sustava ili srčani udar, pogotovo tijekom dužih razdoblja ekstremnih vrućina (Hsu i sur., 2021). Stoga se buduća izgradnja i razvoj gradova moraju promišljeno planirati tako da se zagrijavanje zbog efekta urbanog toplinskog otoka minimizira. Neke strategije već se primjenjuju, poput sadnje drveća, implementiranja zelenih i vodenih tijela, korištenja materijala koji reflektiraju zračenje (tj. imaju visok albedo), konstruiranja optimalnog oblika i izgleda građevina i dr. (Gago i sur., 2013). Osim omjera zelenih i vodenih tijela u odnosu na izgrađene dijelove grada, njihova prostorna raspodjela ima velik utjecaj u ohlađivanju urbanih toplinskih otoka. Na primjer, ako se količina parkova ili vodenih tijela u gradu poveća, efekt ohlađivanja bit će veći ako su ti parkovi i vodena tijela grupirani u odnosu na situaciju kada su parkovi i vodena tijela raštrkani. S druge strane, potrebno je uzeti u obzir da ohlađivanje urbanih sredina povećanjem zelenih i vodenih tijela ovisi o mnoštvu drugih faktora, kao što su teren ili vjetar te činjenica da vodena tijela mogu donekle povećati noćno zagrijavanje grada (Žuvela-Aloise i sur., 2016). Također, učinkovitost ohlađivanja zelenim površinama ovisi o vlažnosti tla te ona može biti značajno smanjena u slučaju dugotrajnih sušnih razdoblja (Nimac i sur., 2021a).

Empirijsko istraživanje urbanih toplinskih otoka je ograničeno zbog uglavnom malog broja meteoroloških postaja u gradovima i njihovoj okolini. Premda meteorološke postaje omogućavaju precizna kontinuirana mjerenja meteoroloških parametara poput temperature ili vlažnosti zraka, njihov broj u gradovima nije dovoljan za potrebe detaljnih istraživanja urbanih toplinskih otoka. Zato je potrebno posegnuti za drugim izvorima podataka, poput satelitskih mjerenja koja pokrivaju mnogo veće površine. Kombiniranjem različitih vrsta satelitskih snimaka mogu se dobiti podaci o tome koja vrsta materijala i pokrova se nalazi na površini Zemlje te kako pojedini materijali utječu na stvaranje urbanih toplinskih otoka. Na primjer, upotrebom nekoliko različitih spektralnih pojaseva mogu se izračunati indeksi koji se koriste u klimatskim istraživanjima, poput vegetacijskog indeksa normalizirane razlike NDVI-a (engl. *Normalized Difference Vegetation Index*) koji određuje količinu vegetacije na nekom području ili površinske temperature tla LST-a (engl. *Land Surface Temperature*) koji određuje temperaturu površine (Padmanaban i sur., 2019). S druge strane, nedostatak satelitskih podataka je ta što snimaju samu površinu Zemlje i daju podatak

o površinskoj temperaturi, a ne zraka, tako da se ti podaci ne mogu izravno uspoređivati s mjerenjima temperature zraka na meteorološkim postajama. Osim toga, njihova dostupnost ovisi o količini naoblake i drugih čestica u zraku koje mogu predstavljati prepreku (Shi i sur., 2021).

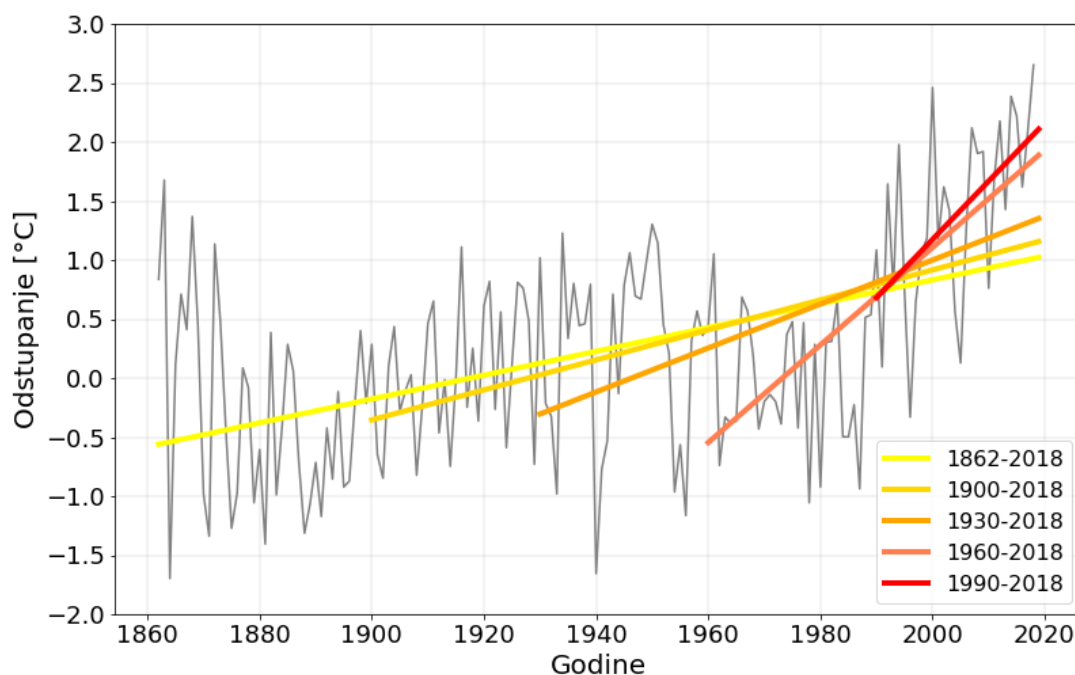
Osim korištenja „*in situ*“ mjerenja poput podataka s meteoroloških postaja ili satelitskih snimaka, za istraživanja urbanih toplinskih otoka često se koriste klimatski modeli. Oni omogućavaju analizu utjecaja pojedinih parametara i njihovih promjena na klimatska obilježja promatranog područja (npr. utjecaj temperature vodenih tijela na toplinska obilježja grada), kao i opisivanje budućih klimatskih scenarija. Postoji mnogo vrsta klimatskih modela koji se upotrebljavaju ovisno o svrsi istraživanja pa su tako globalni klimatski modeli namijenjeni za prikazivanje klimatskog stanja na cijeloj Zemlji, dok se regionalni klimatski modeli koriste za opis klimatskog stanja manjeg područja. Modeli prilagođeni za istraživanja gradske klime nazivaju se urbanim klimatskim modelima koji imaju bolju vremensku i prostornu rezoluciju od globalnih ili regionalnih modela zbog čega često zahtijevaju više računalnih i financijskih sredstava. Primjer urbanog klimatskog modela je MUKLIMO_3 (njem. 3D Mikroskaliges Urbanes KLImaMOdell), nehidrostatički mikroskalni model kojem je cilj simulirati polja atmosferskog strujanja u urbanom okruženju s naglaskom na međudjelovanja između građevina i atmosfere (Früh i sur., 2011).

1.3. Klimatska obilježja grada Zagreba

Grad Zagreb kontinentalan je grad u središnjem dijelu Hrvatske koji je smješten s južne strane planine Medvednice na jugozapadnom rubu Panonske nizine ($\approx 45^{\circ}49'N$, $15^{\circ}59'E$). Kroz grad prolazi rijeka Sava koja je u prošlosti imala velik utjecaj na njegov ekonomski razvoj, a tijekom posljednjih desetljeća njen tok je promijenjen zbog čestih poplava i procesa urbanizacije. Prema posljednjem popisu stanovništva iz 2021. godine, u Zagrebu je tada živjelo 767 131 stanovnika, tj. 19.8% ukupne populacije Hrvatske i taj se postotak prema službenim procjenama povećava (Državni zavod za statistiku).

S obzirom na to da velik utjecaj na klimu Hrvatske imaju velike geografske cjeline poput Dinarida, Panonske nizine i Jadranskog mora, u zagrebačkoj umjerenoj kontinentalnoj klimi također se očituje maritimni utjecaj Sredozemlja (Zaninović i sur., 2008). Osim toga, lokalni faktori poput Medvednice, Save ili vrste površinskog pokrova

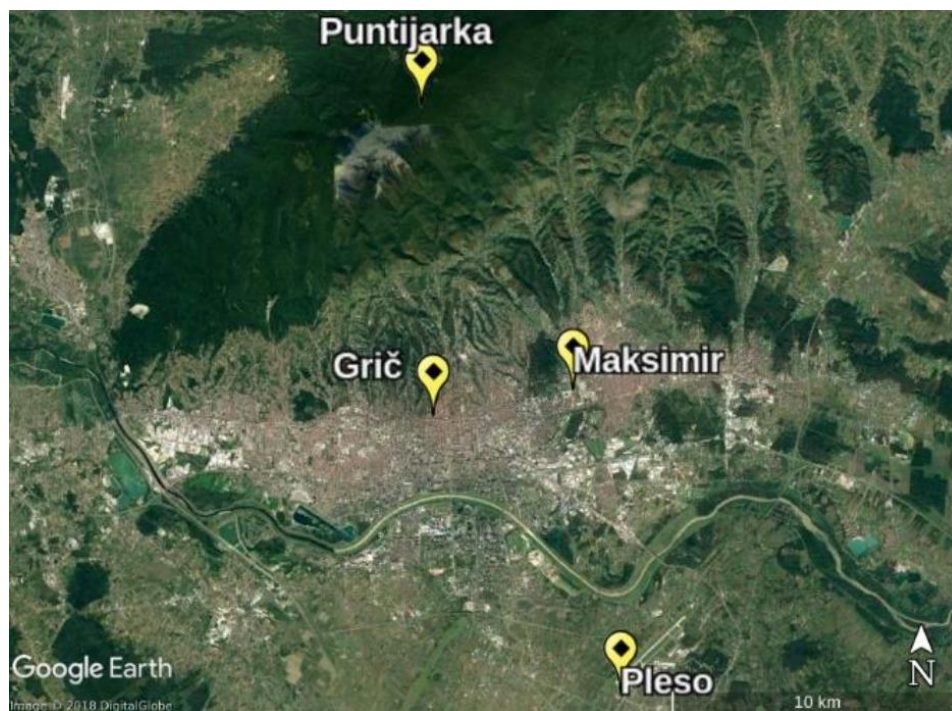
također utječu na njegovu klimu. Medvednica utječe na klimu Zagreba jer omogućava stvaranje cirkulacije obronka (Jurčec, 1985), fensko silaznog strujanja (Volarić, 1999), djeluje kao prepreka sjevernom vjetru (Zaninović i sur., 2008) i dr. Tijekom specifičnih uvjeta poput mirnih anticiklonalnih situacija u Zagrebu se često pojavljuju temperaturne inverzije, pogotovo tijekom zimskih noći (Lončar, 1991). Ubrzano zagrijavanje Zagreba posljednjih desetljeća najlakše se može uočiti iz temperature zraka zabilježene na gradskim meteorološkim postajama Državnog hidrometeorološkog zavoda. Slika 1.1. prikazuje trendove odstupanja srednje godišnje temperature zraka na 5 m visine zabilježene na meteorološkoj postaji Grič od srednjaka izračunatog za referentno razdoblje 1961. – 1990. Trend odstupanja srednje godišnje temperature zraka u razdoblju 1862. – 2014. iznosi $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ na 10 godina u odnosu na referentno razdoblje, dok je trend u razdoblju 1990. – 2018. porastao na $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ na 10 godina što ukazuje na ubrzano zatopljenje grada.



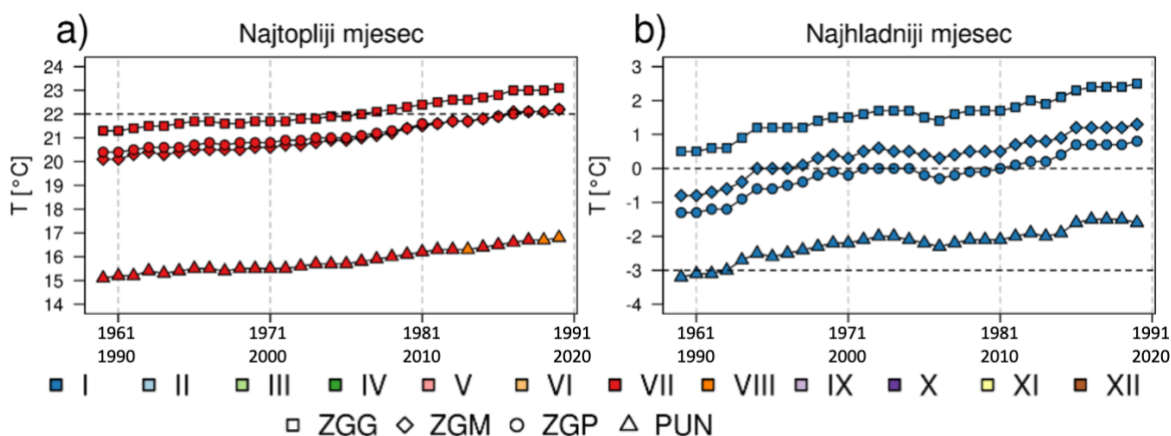
Slika 1.1 Trendovi odstupanja srednje godišnje temperature zraka na 5 m visine zabilježene na meteorološkoj postaji Grič u odnosu na srednju vrijednost godišnje temperature zraka u razdoblju 1961.–1990.

Većina radova koji opisuju karakteristike zagrebačke klime objavljena je tijekom devedesetih godina prošlog stoljeća, a novi opis toplinskih obilježja Zagreba ponudili su Nimac i sur. (2021b). U svom radu promatrali su klimatske ekstreme i pripadajuće

klimatske indekse na području Zagreba koristeći se podacima zabilježenima na četirima meteorološkim postajama smještenim u različitim dijelovima grada (Slika 1.2). Meteorološka postaja Grič je urbana postaja koja se nalazi u gusto izgrađenom dijelu grada, postaje Pleso i Maksimir su suburbane postaje okružene parkom i poljima, a postaja Puntijarka je planinska postaja koja se nalazi na Medvednici i ima najveću nadmorsku visinu. Uz pomoć izmjerenih podataka o temperaturi zraka i količini oborine, za svaku su postaju odredili klimatsku klasu definiranu Köppen-Geigerovom klasifikacijom (Kottek i sur., 2006) za klizna 30-godišnja razdoblja u periodu 1960.–2019. Pokazali su da je na sve četiri postaje u tom razdoblju nastupila promjena klimatske klase s obzirom na povećanje temperature zraka u najhladnijim i najtoplijim mjesecima (Slika 1.3). Na postajama Grič, Maksimir i Pleso je došlo do promjene iz umjereno tople klime s toplim ljetima u umjereno toplu klimu s vrućim ljetima, dok je na postaji Puntijarka nastupila promjena iz snježno-šumske klime s toplim ljetima u umjereno toplu klimu s toplim ljetima (Tablica 1.1). Primijetili su da je do promjene klimatske klase prvo došlo na postaji Puntijarka koja je najbrže promijenila klimatsku klasu u odnosu na ostale postaje što upućuje na to da su planinska područja osjetljivija na klimatske promjene u odnosu na područja niže nadmorske visine. Osim promjene klimatskih klasa, promatrajući povratne periode pojavljivanja minimalnih i maksimalnih godišnjih temperatura zraka, pokazali su da su na svim četirima postajama ekstremno visoke temperature zraka sve češće, dok su ekstremno niske temperature zraka sve rjeđe. Slično tome, u Zagrebu se godišnji broj ljetnih dana ($T_{max} > 25\text{ °C}$) i tropskih noći ($T_{min} > 20\text{ °C}$) povećava, dok se broj ledenih dana ($T_{max} < 0\text{ °C}$) i mrzlih dana ($T_{min} < 0\text{ °C}$) smanjuje.



Slika 1.2 Položaj Zagreba i postaja korištenih u analizi (izvor: Nimac i sur., 2021b)

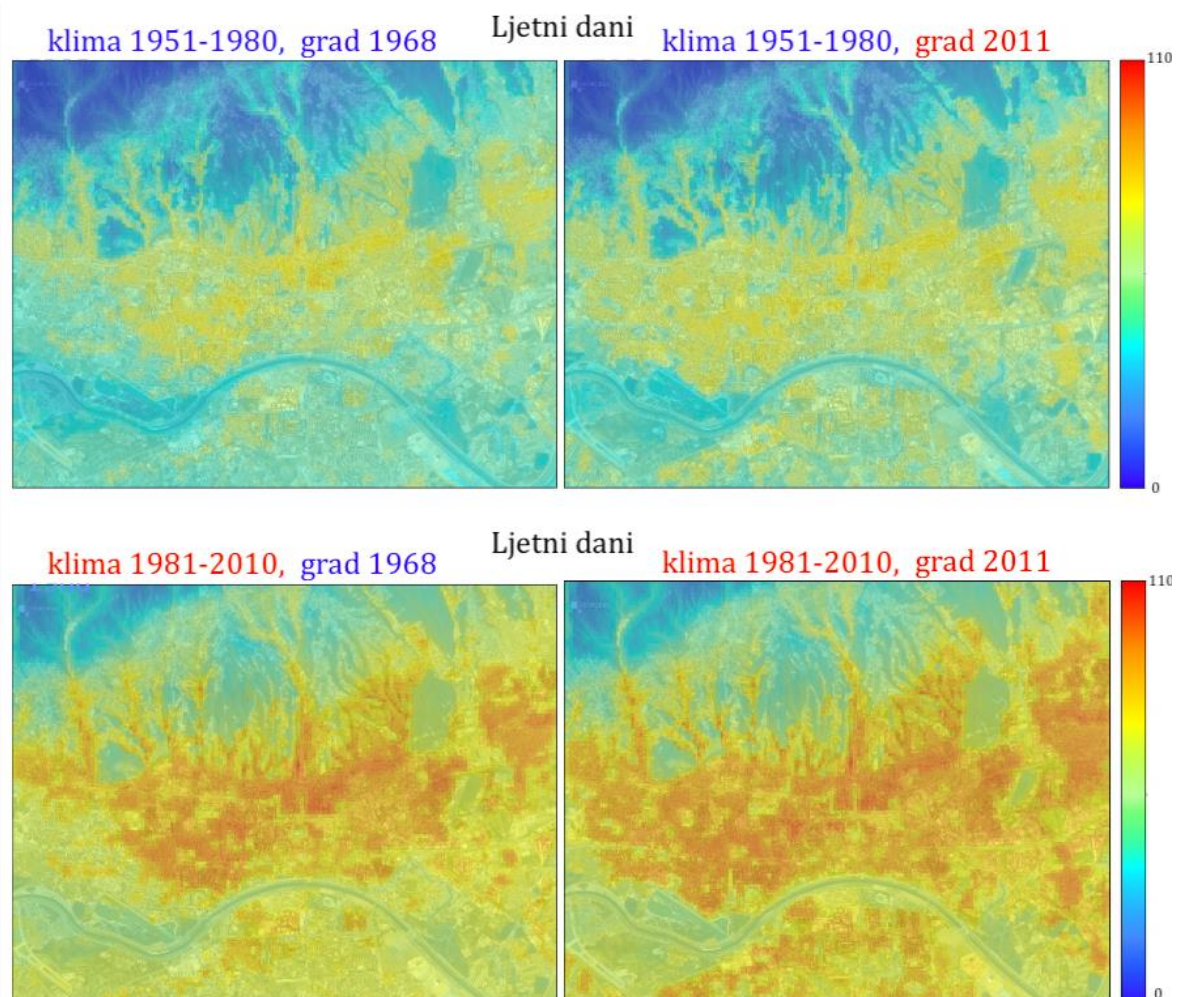


Slika 1.3 Prosječne vrijednosti temperature zraka a) najtoplijeg i b) najhladnijeg mjeseca za klizna 30-godišnja razdoblja (izvor: Nimac i sur., 2021b)

Tablica 1.1 Detektirane promjene klimatskih klasa definiranih Köppen-Geigerovom klasifikacijom na četirima meteorološkim postajama i odgovarajuće vremensko razdoblje promjene (izvor: Nimac i sur., 2021b)

Postaja	Promjena klase	Razdoblje promjene
Grič	Cfb→Cfa	1977.–2006.
Maksimir	Cfb→Cfa	1987.–2016.
Pleso	Cfb→Cfa	1987.–2016.
Puntijarka	Dfb→Cfb	1963.–1992.

U svom sljedećem radu Nimac i sur. (2022) promatrali su utjecaj urbanizacije i globalnog zatopljenja na broj ljetnih dana u Zagrebu ($T_{max} > 25\text{ °C}$) usporedbom dvaju odabranih vremenskih razdoblja: ranijeg razdoblja 1961. – 1990. i novijeg razdoblja 1991. – 2020. Što se tiče promjene namjene zemljišta, promatrali su ranije stanje grada koje odgovara situaciji iz 1968. godine te novije stanje iz 2012. godine u kojem je oko 50% zagrebačke površine promijenjeno u odnosu na ranije stanje. U novijem su razdoblju uglavnom uočili smanjenje rezidencijalnih područja umjerene i niske gustoće, livada i zelenih površina te povećanje rezidencijalnih područja visoke gustoće i parkova. Utjecaj klimatskih promjena na broj ljetnih dana odredili su tako da su promatrali klimatske uvjete u ranijem razdoblju 1961. – 1990. i novijem razdoblju 1991. – 2020. koristeći podatke zabilježene na meteorološkoj postaji Maksimir. Novije razdoblje su ukratko opisali kao toplije, s manjom vlažnošću zraka i slabijim vjetrom u odnosu na ranije razdoblje. Pokazali su da ukupno povećanje broja ljetnih dana u Zagrebu između dvaju odabranih razdoblja iznosi oko 39 dana te da su promjene namjene zemljišta uzrokovale oko 12% ukupnog povećanja, dok je doprinos klimatskih promjena dominantan i iznosi oko 88% ukupnog povećanja (Slika 1.4). Naglašavaju da je utjecaj promjene namjene zemljišta lokaliziran i ne zahvaća sve dijelove domene jednako, a porast broja ljetnih dana zbog klimatskih promjena uglavnom je jednolik u svim dijelovima grada, osim na padinama Medvednice gdje je nešto niži. Zaključili su da globalno zatopljenje ima dominantan utjecaj na klimu Zagreba, dok promjene namjene zemljišta mogu imati značajan utjecaj, ali je lokalnog karaktera.



Slika 1.4 Broj ljetnih dana ($T_{max} > 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$) u situacijama s ranijim i novijim stanjem Zagreba te promijenjenim klimatskim uvjetima (izvor: Nimac i sur., 2022)

1.4. Motivacija i cilj istraživanja

Urbanizacija je globalni trend koji donosi velike promjene u namjeni zemljišta te općenito povećava antropogeni utjecaj na klimu gradova. Nagli porast temperatura u gradovima utječe na različite gospodarske sektore te na svakodnevni život i zdravlje njihovih stanovnika, pa je zato ublažavanje urbanih toplinskih otoka ključno za osiguranje kvalitete života u urbanim sredinama i održivog razvoja gradova (Masson-Delmotte i sur., 2021). Korištenje materijala koji reflektiraju zračenje u gradnji i implementiranje zelenih površina u gradovima u tome su se pokazali uspješnima, a istraživanja su pokazala da vodena tijela poput rijeka i urbanih jezera također mogu ublažiti utjecaj urbanih toplinskih otoka i povoljno djelovati na zdravlje građana (Yao i sur., 2023). Budući da voda ima relativno visok toplinski kapacitet u odnosu na materijale u izgrađenim dijelovima gradova i brzo gubi toplinu isparavanjem,

temperatura vodenih tijela često je niža od temperature izgrađenih površina. Utjecaj vodenih tijela na toplinska obilježja gradova ovisi o mnoštvu faktora, poput veličine vodenih tijela i njihove prostorne raspodjele, meteoroloških uvjeta, dobu dana, dobu godine, klimatskoj klasi i dr. (Hong i sur., 2023) pa zaključci već postojećih istraživanja nisu generalno primjenjivi. Stoga je utjecaj vodenih tijela i procjenu njihove učinkovitosti u ublažavanju toplinskog opterećenja gradova potrebno napraviti za svaki grad posebno.

U ovom radu će se analizirati simulacije dobivene modelom MUKLIMO_3 koje se temelje na meteorološkim podacima zabilježenima radiosondažama uz različitu temperaturu vode. Hipoteza ovog istraživanja je da vodena tijela ublažavaju toplinsko opterećenje Zagreba. Međutim, iznos tog utjecaja kao i njegov prostorni doseg nije jednostavno predvidjeti bez analize rezultata numeričkih simulacija. Stoga je cilj ovog rada procijeniti jačinu i prostorna obilježja utjecaja vodenih tijela na toplinska obilježja grada Zagreba.

2. Podaci i metode

2.1. Područje istraživanja

Područje istraživanja obuhvaća područje grada Zagreba, glavnog grada Hrvatske. Položaj područja istraživanja prikazan je na Slici 2.1 crvenom bojom, zajedno s reljefom Hrvatske i susjednih država. Sjeverno od Zagreba nalazi se planina Medvednica nadmorske visine 1035 m, dok se sjeveroistočno od tog područja proteže Panonska nizina. Kroz Zagreb prolazi rijeka Sava čija širina korita unutar grada iznosi oko 100 m, a urbana jezera poput Jaruna, Savice, Bundeka i maksimirskih jezera neke su od vodenih tijela čiji će se utjecaj promatrati u istraživanju.



Slika 2.1 Reljefna karta Hrvatske i označeno područje istraživanja crvenim pravokutnikom (izrađeno programom QGIS uz pomoć podataka Natural Earth)

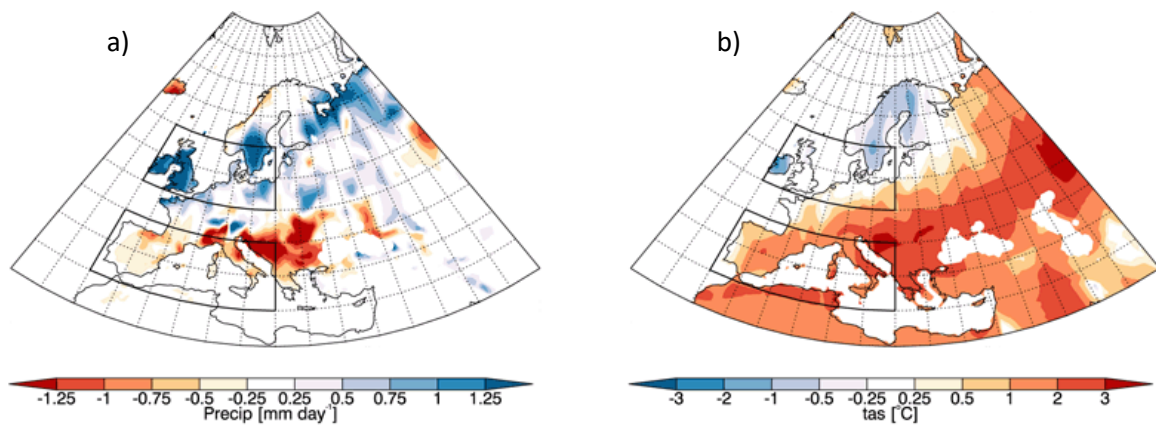
2.2. Obilježja toplinskog vala u kolovozu 2012.

Toplinski valovi opasni su za zdravlje ljudi, pogotovo za ljude u gradskim sredinama budući da je tada efekt urbanog toplinskog otoka dodatno pojačan dugim razdobljima vrlo visokih temperatura. Osim što su jedna od prirodnih pojava koje povećavaju smrtnost ljudi koji žive u gradovima, također povećavaju potrošnju energije i pritisak na gradsku infrastrukturu (Ramamurthy i sur., 2017). Zato će se u ovom radu promatrati utjecaj temperature vodenih tijela na toplinska obilježja Zagreba tijekom toplinskog vala. Odabran je toplinski val koji je u kolovozu 2012. godine rezultirao ekstremno visokim temperaturama na području južne Europe, pa tako i Hrvatske.

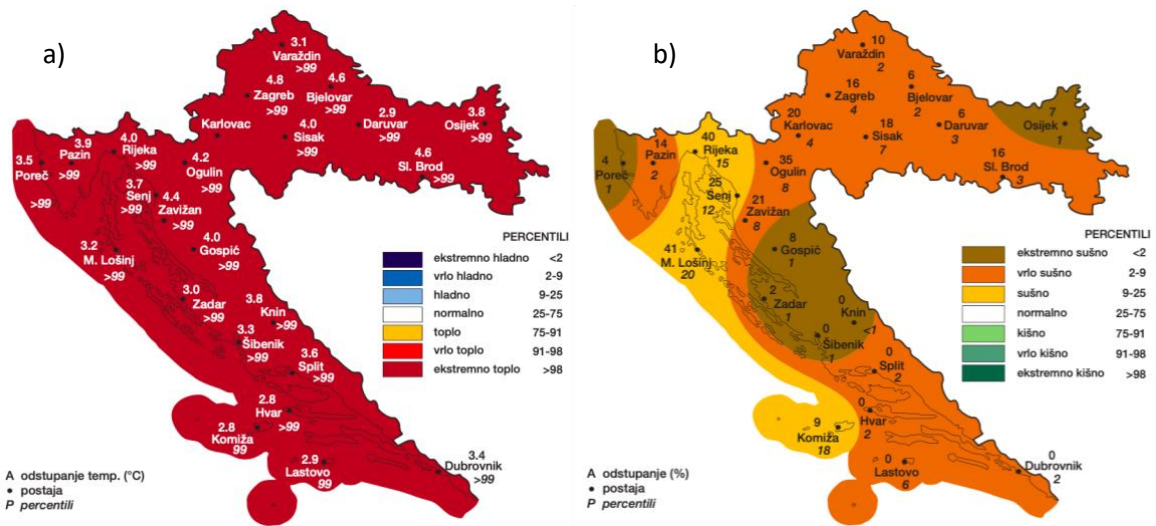
Wilcox i sur. (2018) prikazali su odstupanja srednjaka oborine i temperature zraka pri tlu u Europi u ljetnim mjesecima 2012. godine u usporedbi sa srednjakom za referentno razdoblje 1960.–2012. dobivenih iz *CRU TS* (Climatic Research Unit Timeseries) skupa podataka (Slika 2.2). Ljetni mjeseci 2012. godine u širem području južne Europe bili su topliji od višegodišnjeg prosjeka te su na nekim dijelovima Hrvatske odstupanja temperature zraka pri površini u odnosu na višegodišnji prosjek premašila 3 °C. U ljetnim mjesecima 2012. godine na području Hrvatske i njoj istočnih susjednih zemalja bilo je manje oborine u odnosu na referentno razdoblje što upućuje na to da je promatrani toplinski val bio pojačan dugim sušnim razdobljem. Za južni dio područja na Slici 2.2 izračunali su da je srednja temperatura zraka pri površini u ljetnim mjesecima 2012. godine iznosila dvije standardne devijacije više u odnosu na srednjak u referentnom razdoblju, kao i količina oborine koje je za 2 standardne devijacije niža u odnosu na referentno razdoblje.

Prema Biltenu Državnog hidrometeorološkog zavoda za 2012. godinu, odstupanja srednjih mjesečnih temperatura zraka u kolovozu 2012. godine u odnosu na višegodišnji prosjek za razdoblje 1961.–1990. u cijeloj Hrvatskoj su premašila 98. centil (Slika 2.3a). To je razdoblje opisano kao ekstremno toplo u cijeloj Hrvatskoj, kao i cijelo ljetno razdoblje između lipnja i kolovoza 2012. godine. U Zagrebu je odstupanje srednje mjesečne temperature zraka u kolovozu 2012. godine u odnosu na razdoblje 1961.–1990. iznosilo 4.8 °C, što je više od 99. centila. Budući da su mjesečne količine oborine u Zagrebu u kolovozu 2012. godine između 2% i 9% prosječnih vrijednosti izmjerenih u razdoblju 1961.–1990. (Slika 2.3b), to je razdoblje opisano kao vrlo sušno. Srednja dnevna temperatura zraka zabilježena na postaji Grič u 2012. godini prikazana

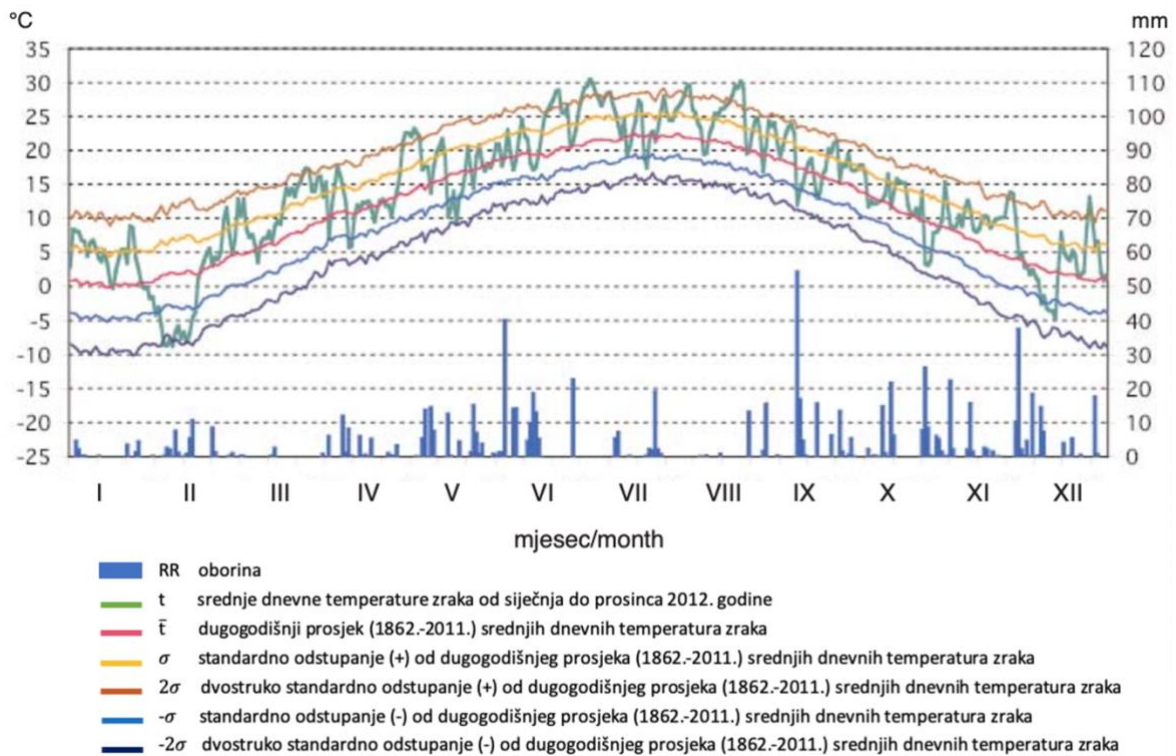
na Slici 2.4, zajedno s dugogodišnjim srednjakom i pripadajućim standardnim devijacijama. Dani između 21. i 25. kolovoza na postaji Grič smatraju se izvanredno toplima prema Chapmanovom kriteriju zato što srednja dnevna temperatura zraka u tim danima premašuje dvije standardne devijacije te se u tom razdoblju može uočiti nedostatak oborine. Na vrijeme u Hrvatskoj između 8. i 25. kolovoza je utjecao ogranak jake i prostrane anticiklone iz sjeverne Afrike i jugozapadne Europe koji je pogodovao pretežno sunčanom, suhom te vrućem i vrlo vrućem vremenu (Čačić i sur., 2012).



Slika 2.2 Odstupanja srednjaka a) količine oborine i b) temperature zraka pri tlu u ljetnim mjesecima (lipanj, srpanj i kolovoz) 2012. godine od srednjaka u razdoblju 1960. –2012. (izvor: Wilcox i su., 2018)



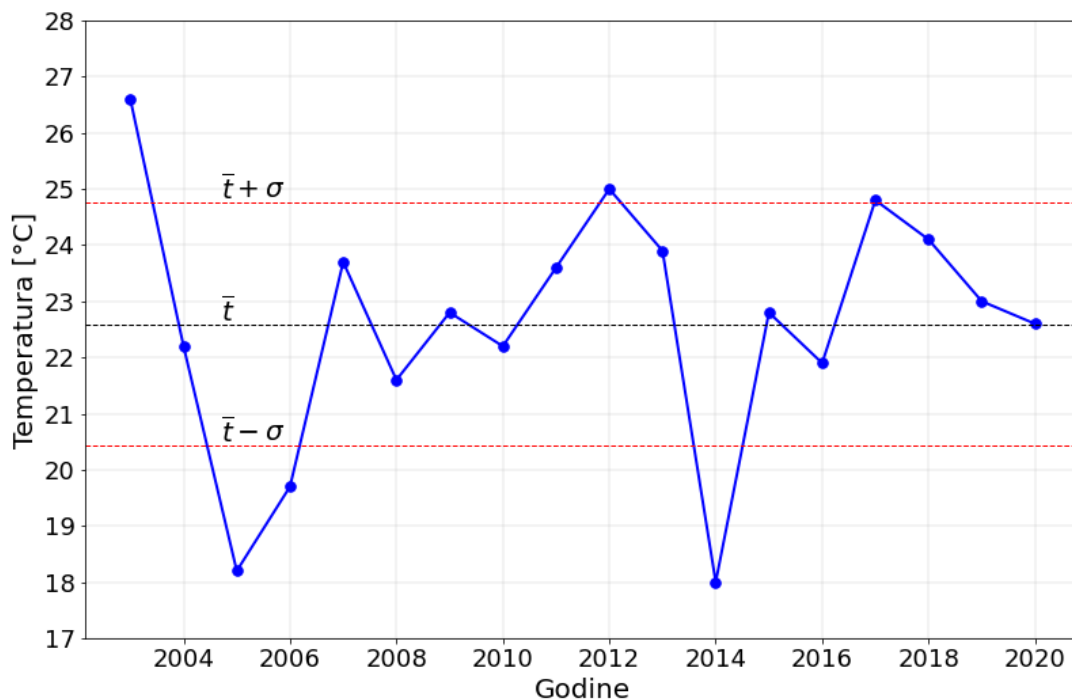
Slika 2.3 Odstupanja srednjaka a) temperature zraka i b) količine oborine zabilježene na meteorološkim postajama u kolovozu 2012. godine od srednjaka za razdoblje 1961.–1990. (izvor: Čačić i sur., 2012)



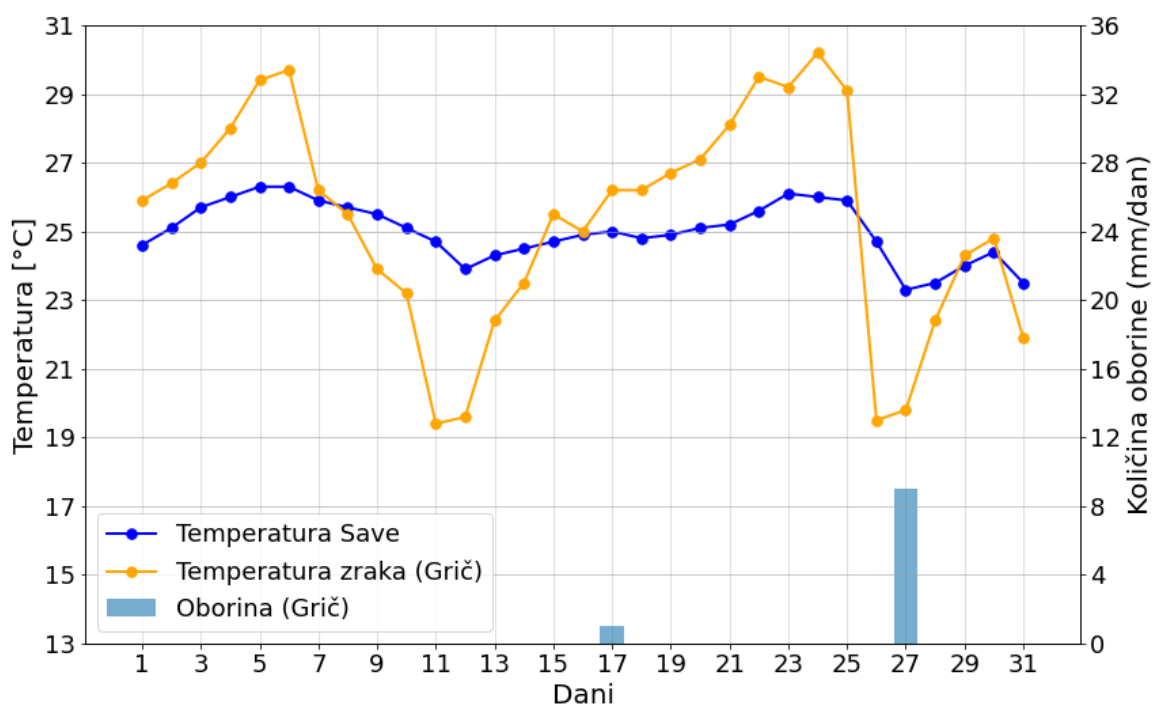
Slika 2.4 Srednje dnevne temperature zraka 2012. godine zabilježene na postaji Zagreb-Grič te srednje dnevne temperature zraka za 1862.–2011. i njihove standardne devijacije (izvor: Čačić i sur., 2012)

Srednja mjesečna površinska temperatura Save zabilježena na hidrološkoj postaji Zagreb¹ u kolovozu za razdoblje 2004.–2020. prikazana je na Slici 2.5, zajedno sa srednjakom i standardnom devijacijom tog razdoblja pa je lako uočiti da je kolovoz 2012. bio drugi najtopliji u promatranom razdoblju, nakon kolovoza 2003. godine. U svrhu određivanja dana kada je u Zagrebu bio vrhunac toplinskog vala, na Slici 2.6 su prikazane srednje dnevne temperature zraka i srednje dnevne količine oborine zabilježene na postaji Zagreb-Grič te srednje dnevne površinske temperature Save zabilježene na postaji Zagreb u kolovozu 2012. Najviša temperatura zraka zabilježena na postaji Grič iznosila je 30,2 °C, 24. kolovoza, a površinska temperatura Save taj dan je iznosila 26 °C. Stoga će se u istraživanju promatrati situacija 24. kolovoza 2012. godine u Zagrebu.

¹ <https://savagis.org/map>



Slika 2.5 Srednje mjesečne površinske temperature Save u kolovozu zabilježene na postaji Zagreb te srednjak (\bar{t}) i standardna devijacija (σ) temperature Save za razdoblje 2004.–2020.



Slika 2.6 Srednje dnevne površinske temperature Save u kolovozu zabilježene na hidrološkoj postaji Zagreb te srednje dnevne površinske temperature zraka i količina oborine u kolovozu zabilježene na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič

2.3. Podaci

U ovom radu korišteni su meteorološki podaci izmjereni radiosondažama 24. kolovoza 2012. u 00 UTC za postaju Zagreb preuzeti iz sustava podataka Sveučilišta u Wyomingu². Parametri koji su izmjereni su sljedeći:

- vertikalni profili temperature zraka
- vertikalni profil relativne vlažnosti zraka
- brzina i smjer vjetra
- temperatura i vlažnost tla
- temperatura vodenih tijela.

Ovi se podaci koriste kao ulazni podaci u model zajedno s digitalnim reljefom i podacima namjene zemljišta za odabrano područje grada Zagreba, dok su izlazni podaci modela temperatura zraka na 2 m visine, relativna vlažnost na 2 m visine te vjetar na 2 m visine za to područje. Analiza podataka dobivenih modelom i njihova vizualizacija odrađena je u programskom jeziku Python.

2.4. Model MUKLIMO_3

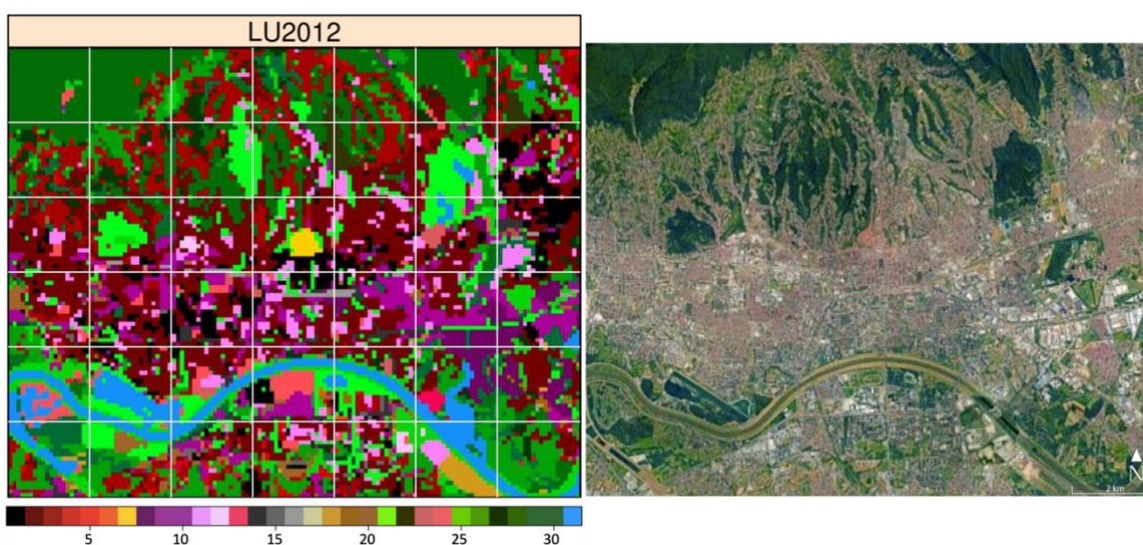
Simulacije utjecaja temperature vodenih tijela na područje Zagreba napravljene su uz pomoć modela MUKLIMO_3 koji je prvenstveno razvijen za istraživanja mikroskalne urbane klime i urbano planiranje, npr. proučavanje urbanih toplinskih otoka. To je nehidrostatički model koji u osnovnoj verziji rješava Navier-Stokesove jednadžbe, dok je za potrebe 3D simulacija osnovna verzija modela poopćena metodom strujne funkcije vrtložnosti. Model je namijenjen simuliranju atmosferskih temperaturnih polja u gradovima osjetljivih na vrstu podloge, s naglaskom na međudjelovanje između zgrada i atmosfere (Früh i sur., 2011). Stoga ulazni podaci u modelu moraju sadržavati detaljne karakteristike zgrada za svaku ćeliju u horizontalnoj mreži te pripadajuće klase namjene zemljišta. Model ima horizontalnu razlučivost 20–300 m koja se može mijenjati unutar domene te može simulirati kratka vremenska razdoblja (npr. nekoliko sati), ali i duga vremenska razdoblja od nekoliko desetljeća pogodna za opis klime u prošlosti ili budućnosti. Neki od nedostataka modela MUKLIMO_3 su nemogućnosti prikazivanja oblaka, oborine, turbulencije, dnevnog hoda temperature vode te drveća u ćelijama u kojima postoje zgrade. Unatoč

² <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

tomu, dosadašnja istraživanja su pokazala da model dobro reproducira toplinsko opterećenje gradova, a između ostalih i Zagreba (Nimac i sur., 2021b, 2022).

2.4.1 Postavke modela

Domena koja se koristi u modelu istovjetna je onoj u radu Nimac i sur. (2022) te je izrađena uz pomoć podataka Grada Zagreba i Urbanog Atlasa za 2012. godinu. Klase namjene zemljišta (LU klase) za svaku ćeliju horizontalne razlučivosti 100 m prikazane su na Slici 2.7, zajedno sa satelitskom snimkom grada za usporedbu, a opis svake LU klase naveden je u Tablici D1 u Dodatku.



Slika 2.7 Klase namjene zemljišta na odabranoj domeni (lijevo; opis klasa namjene zemljišta nalazi se u Tablici D1 u Dodatku) te satelitska snimka Zagreba izrađena pomoću programa Google Earth (desno) (izvor: Nimac i sur., 2022)

Budući da se ovaj rad bavi utjecajem temperature vodenih tijela na toplinska obilježja grada, odabrano je pet iznosa temperature vodenih tijela kojima su definirani eksperimenti. Temperatura vode se ne mijenja tijekom simulacija, tj. nema njezinog dnevnog hoda u modelu. Odabrani iznosi temperature vode u simulacijama i njihovi pripadajući nazivi navedeni su u Tablici 2.1. Temperatura vodenih tijela u kontrolnoj simulaciji koja je najbližnja stvarnoj situaciji iznosi 26 °C što odgovara srednjoj dnevnoj temperaturi Save u Zagrebu 24. kolovoza 2012. godine. Budući da je maksimalna izmjerena srednja dnevna temperatura Save u Zagrebu iznosila 29,2 °C (srpanj, 2003. godine), najviša odabrana temperatura vode u simulaciji iznosi 30 °C. Usporedba simulacija s nižom, odnosno višom temperaturom vode omogućit će procjenu njenog

utjecaja na mikroklimatska obilježja Zagreba. S obzirom da se simulacije razlikuju u temperaturi vode, u ostatku rada će one biti označene kao S22, S24, S26, S28 i S30 gdje broj označava temperaturu vode.

Tablica 2.1 Temperature vode u simulacijama modela

Simulacija	Temperatura vode	Skraćeni naziv
Hladna simulacija s temperaturom vodenih tijela 22 °C	22 °C	S22
Hladna simulacija s temperaturom vodenih tijela 24 °C	24 °C	S24
Kontrolna simulacija s temperaturom vodenih tijela 26 °C	26 °C	S26
Topla simulacija s temperaturom vodenih tijela 28 °C	28 °C	S28
Topla simulacija s temperaturom vodenih tijela 30 °C	30 °C	S30

3. Rezultati

Eksperimentima u modelu dobiveni su rezultati satnih vrijednosti temperature i relativne vlažnosti zraka na 2 m visine te brzine i smjera vjetra na 2 m visine za pet simulacija. Za svaki promatrani slučaj odabrano je nekoliko satnih vrijednosti koje najbolje opisuju dnevni razvoj parametara. U slučajevima kada u rubnim dijelovima domene nema velikih razlika između rezultata simulacija, područje prikaza je smanjeno kako bi se jasnije uočio utjecaj Save koja je najveće vodeno tijelo na promatranoj domeni te stoga ima i najizraženiji utjecaj na temperaturu zraka. Naime, u modelu je temperatura vode jedan parametar koji definira temperaturu svih vodenih tijela u domeni, što slučaju Zagreba predstavlja rijeku Savu i urbana jezera (npr. Bundeck, Jarun, Savica).

3.1. Temperatura zraka

3.1.1. Utjecaj temperature vodenih tijela na satne vrijednosti temperature zraka

Jedan od izlaznih parametara koji su dobiveni modelom je temperatura zraka na odabranoj domeni grada Zagreba dobivena u pet simulacija s različitim temperaturama vodenih tijela. Odabrane su četiri satne vrijednosti koje prikazuju temperaturu zraka na 2 m visine za svih pet simulacija tako da se simulacije mogu međusobno uspoređivati. Rezultati su prikazani na smanjenoj domeni, bez sjevernog dijela Zagreba podno Medvednice jer na izostavljenim dijelovima domene nema velikih razlika između rezultata simulacija.

Slika 3.1 prikazuje temperaturu zraka na 2 m visine u 9 h i 11 h, dok Slika 3.2 prikazuje temperaturu zraka na 2 m visine u 14 h i 16 h za svih pet simulacija. U svakoj odabranoj satnoj vrijednosti utjecaj vodenih tijela na temperaturu zraka najbolje se uočavaju u neposrednoj blizini Save i ostalih vodenih tijela. U 9 h razlike između simulacija najveće su npr. uz Savu te oko Bundecka, Savice, Jaruna i na golf terenima Riverside gdje se nalazi nekoliko malih jezera (Slika 3.1a). Tada je u hladnim simulacijama S22 i S24 zrak iznad vode hladniji od ostalih dijelova, dok je u toplim simulacijama S28 i S30 zrak iznad vode topliji od okolnog zraka. Stoga je u 9 h utjecaj temperature vodenih tijela na temperaturu zraka lokalni i uočava se uglavnom iznad samih vodenih tijela. Kako dan odmiče, zrak se sve više zagrijava od Sunca, a s obzirom da voda zadržava istu temperaturu tijekom simulacije, vodena tijela poprimaju

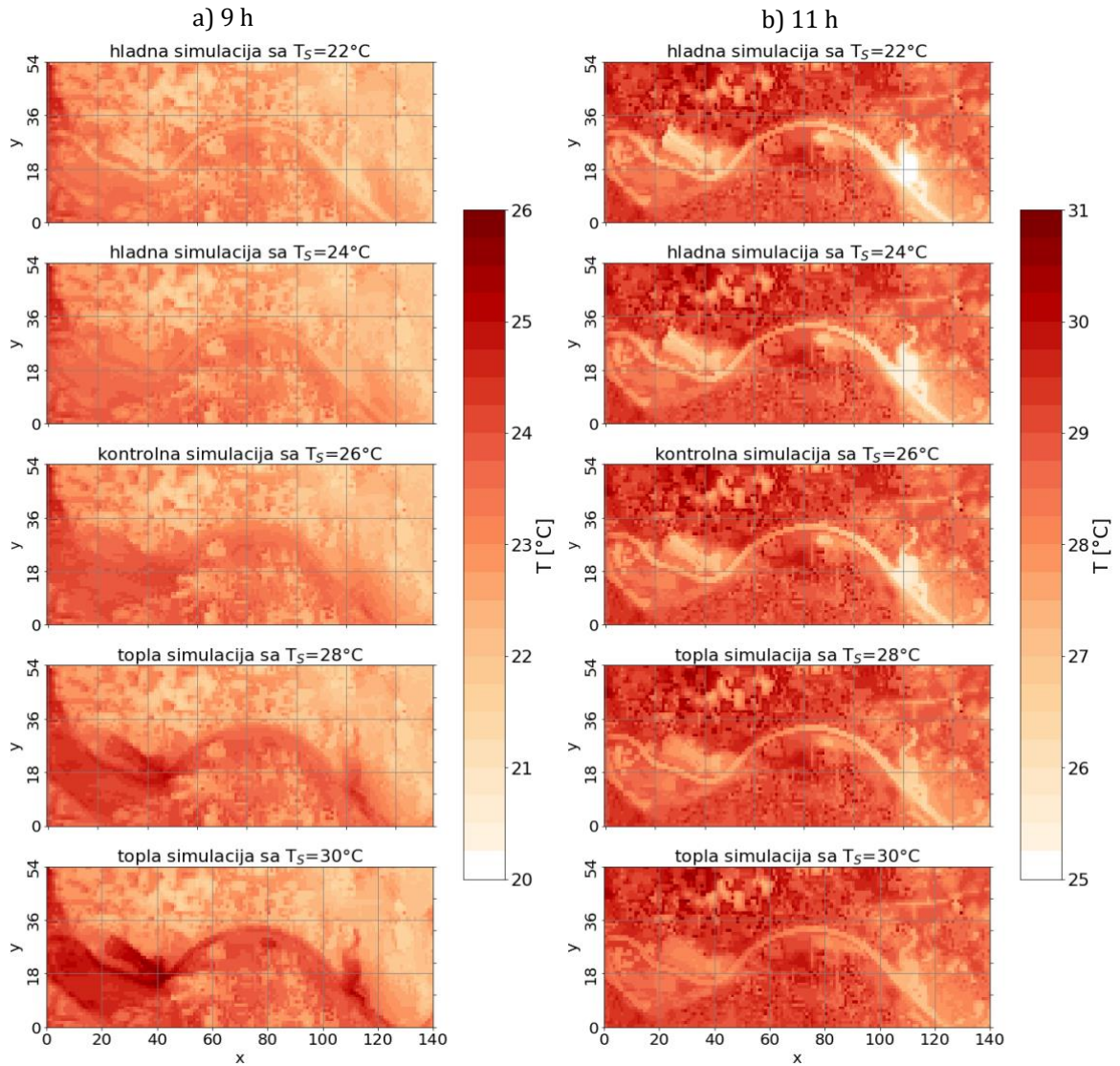
ohladajući učinak te je zrak iznad njih hladniji od okolnog. Kako sati prolaze, razlike između simulacija sve se više povećavaju, pogotovo u temperaturi zraka iznad velikih jezera.

Temperatura zraka iznad jezera Savica u 11 h (Slika 3.1b) znatno je niža u hladnoj simulaciji S22 u odnosu na tople simulacije S28 i S30. Za razliku od jutarnjih satnih vrijednosti, u 11 h temperatura iznad vodenih tijela niža je od okolne temperature za svih pet simulacija što upućuje na to da izgrađeni dijelovi grada (tj. dijelovi gdje prevladavaju umjetni materijali) više apsorbiraju Sunčevo zračenje od prirodnih materijala i jače se zagrijevaju. Tek na nekoliko lokacija u zapadnom dijelu Zagreba koje odgovaraju poslovnim zonama, trgovačkim centrima te javnim institucijama (prema Slici 2.7) temperatura zraka u 11 h doseže 31 °C i te se lokacije podudaraju u svih pet simulacija. Ako se usporede klase namjene zemljišta sa Slike 2.7 s grafovima temperature zraka u 11 h (Slika 3.1b), može se uočiti da su u 11 h sva rezidencijalna područja vrlo visoke gustoće izgrađenosti hladnija od ostatka grada. Slične rezultate dobili su Salameh i sur. (2023) koji su pokazali da grupa podjednako visokih zgrada rezultira nižim temperaturama zraka u odnosu na grupu zgrada s različitim ili manjim visinama te Wang i Xu (2021) koji su primijetili da temperatura zraka opada s povećanjem visine zgrada.

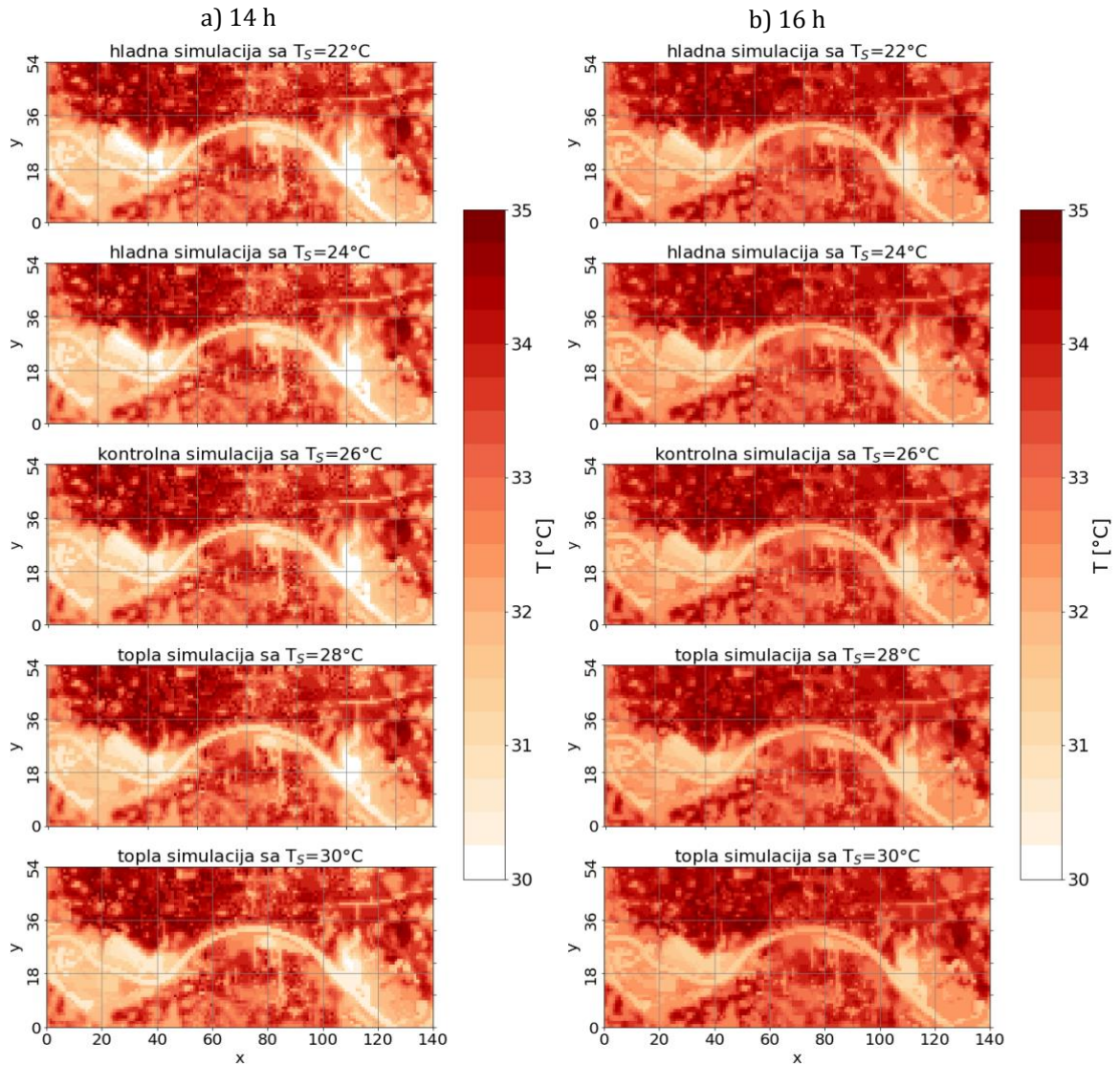
Situacija u 14 h (Slika 3.2a) pokazuje da temperatura zraka od 35 °C zahvaća velik dio zapadnog dijela grada te pojedine lokacije istočno od Savice dok se područja prekrivena vegetacijom najmanje zagrijevaju. Razlike u temperaturi zraka između simulacija najviše uočavaju iznad velikih vodenih tijela poput Jaruna ili Savice i u njihovoj neposrednoj blizini. Situacija u 16 h (Slika 3.2b) slična je onoj u 14 h, osim što se temperatura zraka iznad većeg dijela gradske površine povisila, a razlike između simulacija nisu toliko izražene kao one u 14 h.

Što se tiče ostalih satnih vrijednosti prikazanih na Slikama D1 – D3 u Dodatku, u ranim jutarnjim satima između 4 h i 8 h temperatura zraka iznad vodenih tijela u svim je simulacijama viša od temperature zraka u ostatku grada što je posljedica toga da vodena tijela zadržavaju toplinu tijekom noći pa se uočava lokalni efekt zagrijavanja zraka u neposrednoj blizini vodenih tijela. Od 11 h nadalje temperatura zraka iznad vodenih tijela niža je od temperature zraka iznad ostalih dijelova grada, neovisno o tome promatraju li se hladne ili tople simulacije. To je zato što se zrak zagrijavao od Sunčevog zračenja pa vodena tijela u to doba dana u svim simulacijama imaju

temperaturu koja je niža od temperature okolnog zraka te ohlađuju zrak koji se nalazi iznad njih. Između 7 h i 10 h temperatura zraka u Novom Zagrebu nešto je viša u toplim simulacijama nego u hladnima, pogotovo južno od Jaruna uz područje Arene i golf terena Riverside. Između 10 h i 12 h rezidencijalna područja vrlo visoke gustoće izgrađenosti (prema Slici 2.7) najmanje se zagrijavaju u odnosu na ostale dijelove grada, kao što je već spomenuto za situaciju u 11 h. Kako vrijeme odmiče, razlike između simulacija sve su manje izražene zato što se zrak sve više zagrijava, a relativno male vodena tijela imaju sve manji utjecaj na njegovo ohlađivanje. Štoviše, u kasnim poslijepodnevnim satima (npr. od 16 h nadalje) temperatura zraka iznad pojedinih lokacija sjeveroistočno od Jaruna viša je u hladnim simulacijama u odnosu na tople što upućuje na to da veza između temperature vodenih tijela i temperature zraka u gradu nije jednostavna nego ovisi o mnoštvu faktora. Neki od njih su iznos i smjer vjetra, reljef, stabilnost zraka, antropogeni utjecaj (koji se ne može pripisati samo klasama namjene zemljišta), klimatska klasa, nedostaci modela, i dr. Ovi rezultati pokazuju da se tijekom dana zrak se sve više zagrijava, a zbog miješanja efekt ohlađivanja vodenim tijelima slabi. Kako se ovdje radi o relativno malim vodenim tijelima (a i sama Sava je relativno uska i plitka), njihov ohlađujući učinak slabi u odnosu na sve jače zagrijavanje od Sunca. Ovo je važan rezultat jer pokazuje da tijekom dana efekt zagrijavanja od Sunca nadjačava ohlađujući učinak vodenih tijela te da je ublažavanje toplinskog opterećenja grada vodenim tijelima lokalnog karaktera i vremenski ograničeno.



Slika 3.1 Temperatura zraka na 2 m visine dobivena modelom za hladne simulacije S22 i S24, kontrolnu simulaciju S26 te tople simulacije S28 i S30 u: a) 9 h i b) 11 h



Slika 3.2 Temperatura zraka na 2 m visine dobivena modelom za hladne simulacije S22 i S24, kontrolnu simulaciju S26 te tople simulacije S28 i S30 u: a) 14 h i b) 16 h

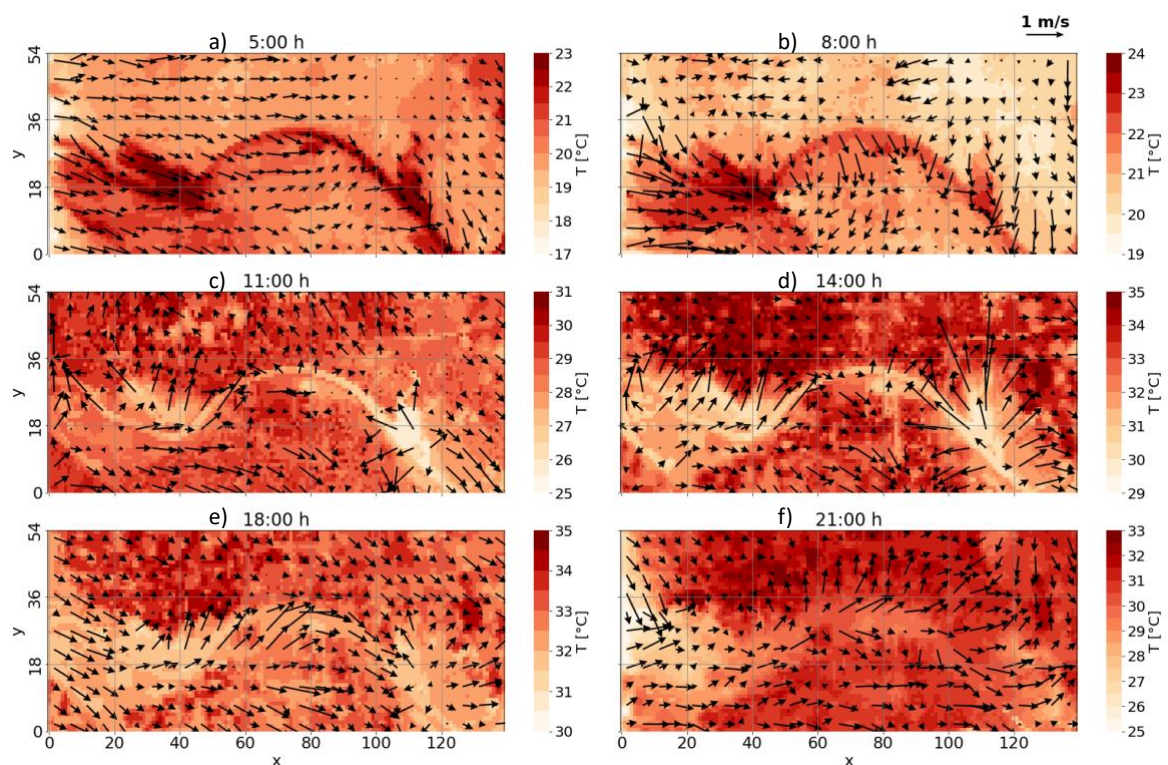
3.1.2. Prostorna raspodjela temperature zraka i vjetra

Vjetar je jedan od faktora koji imaju veliku ulogu u transportu topline, pogotovo u ohlađivanju urbanih sredina koje su često toplije od njihove okoline (Žuvela-Aloise i sur., 2016). Ovdje se razmatraju brzina i smjer vjetra u kontrolnoj simulaciji koja je najbliža realnoj situaciji te se uspoređuju s rezultatima ostalih simulacija. Vektori vjetra za svaku petu točku na smanjenoj domeni zajedno s temperaturom zraka na 2 m visine prikazani su na Slici 3.3 za kontrolnu simulaciju S26, Slikama 3.4 i 3.5 za hladne simulacije S22 i S24, te Slikama 3.6 i 3.7 za tople simulacije S28 i S30 u odabranim satnim vrijednostima. Odabrana je svaka peta točka mreže zato što su vektori u svakoj točki preblizu jedan drugome pa je prikaz vrlo nepregledan.

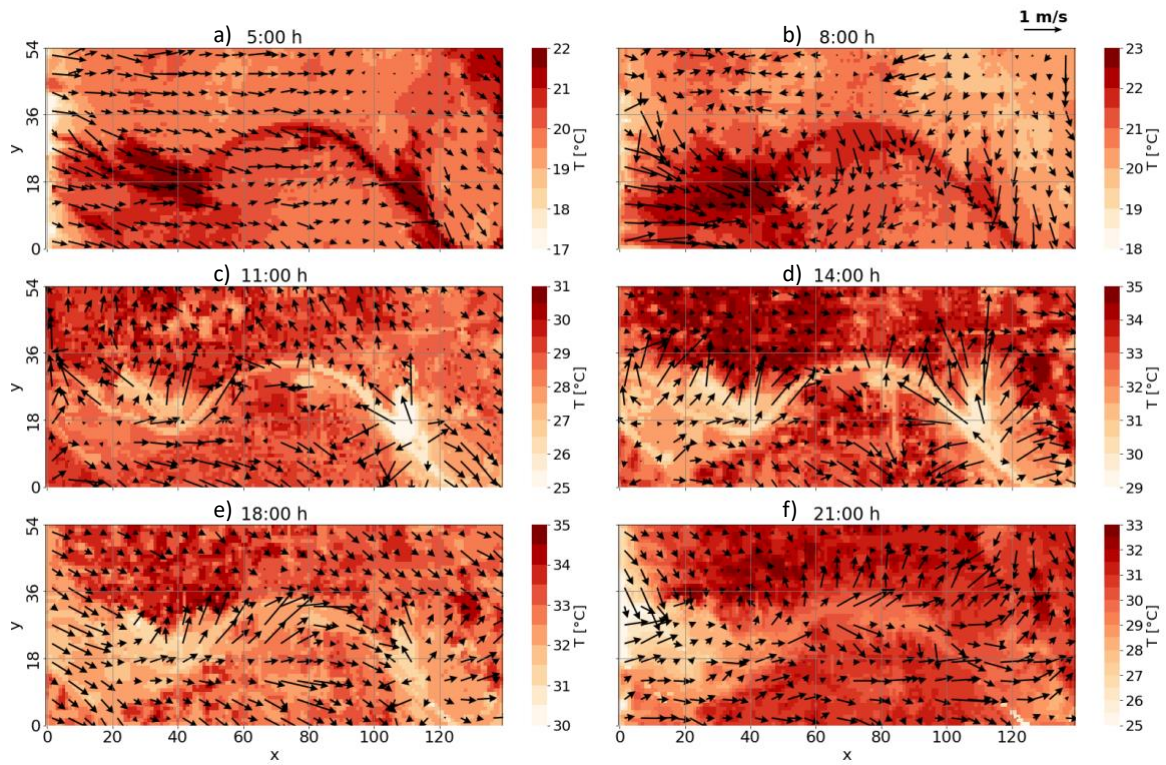
U kontrolnoj simulaciji u ranim jutarnjim satima razlika u temperaturi zraka između izgrađenih dijelova grada i vodenih tijela dovoljno je velika da vjetar većinom puše iz područja hladnijeg grada prema toplijoj Savi te sa sjeverozapada na području Jaruna (Slika 3.3a). U središnjem dijelu grada sjeverno od Save te u Novom Zagrebu vjetar je pretežito zapadni i relativno slab što upućuje na brojne prepreke u izgrađenom dijelu grada. Situacija u 8 h (Slika 3.3b) razlikuje se od one u 5 h po tome što oko Save, na području Savice i u Novom Zagrebu vjetar pretežno puše sa sjevera te oko Jaruna povećava brzinu koja na nekim mjestima premašuje 1 m/s. Oko 11 h (Slika 3.3c) izgrađeni dijelovi grada su postali topliji od onih uz vodena tijela pa vjetar mijenja smjer i puše iz smjera hladnijih vodenih tijela prema toplijem gradu, pogotovo oko Jaruna i Savice gdje iznosi oko 1,5 m/s. U središnjem dijelu grada puše južni, a u Novom Zagrebu istočni i sjeveroistočni vjetar koji nastavlja poslijepodne. U 14 h (Slika 3.3d) divergencija oko Jaruna i Savice izraženija je te brzina vjetra na nekim mjestima iznosi i preko 2 m/s. U 18 h (Slika 3.3e) vjetar slabi, uz Savu prati smjer strujanja vode, a na području Savice nastavlja divergirati. Većinom puše od područja hladnijih vodenih tijela prema toplijem gradu, dok je u Novom Zagrebu jači i većinom zapadni. Kako se temperatura zraka iznad grada i vodenih tijela ujednačava u kasnim večernjim satima (Slika 3.3f), vjetar oslabljuje, no zadržava smjer puhanja od hladnijih vodenih tijela prema toplijem gradu, pogotovo sjeverno od Save.

Smjer vjetra u simulacijama s hladnijim vodenim tijelima (Slike 3.4 i 3.5) vrlo je sličan onome u kontrolnoj, osim što mu je brzina blizu vodenih tijela nešto veća tijekom dana. To je zato što zrak iznad Save i ostalih vodenih tijela u hladnim simulacijama ostaje hladniji tijekom dana, a grad se zagrijava slično kao u kontrolnoj simulaciji. Što

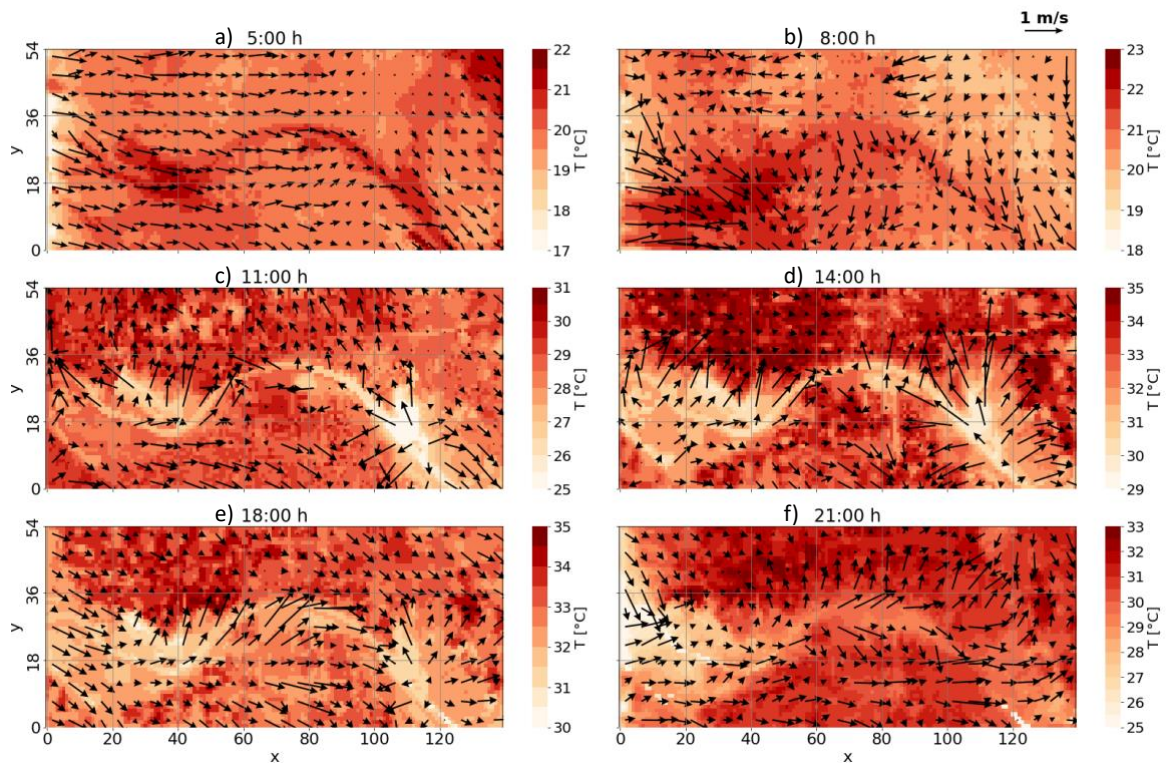
se tiče toplih simulacija (Slike 3.6 i 3.7), tijekom jutra su razlike između zagrijanih vodenih tijela i hladnih dijelova grada izraženije nego u kontrolnoj simulaciji pa je i vjetar u blizini vodenih tijela nešto jači. Suprotno se događa tijekom dana kada je razlika između temperature vodenih tijela i grada manja pa je i vjetar slabiji. Najveće razlike u smjeru vjetra između toplih simulacija i kontrolne je u 11 h kada je na području Jaruna i središnjeg dijela Save vjetar pretežno zapadni u toplim simulacijama, dok je u kontrolnoj simulaciji južni. Osim toga, divergencija oko Savice u kontrolnoj simulaciji zamijenjena je s pretežno sjeverozapadnim vjetrom u toplim simulacijama. Iako razlike u iznosu brzine vjetra između simulacija postoje, važno je napomenuti da su one male (<0.5 m/s).



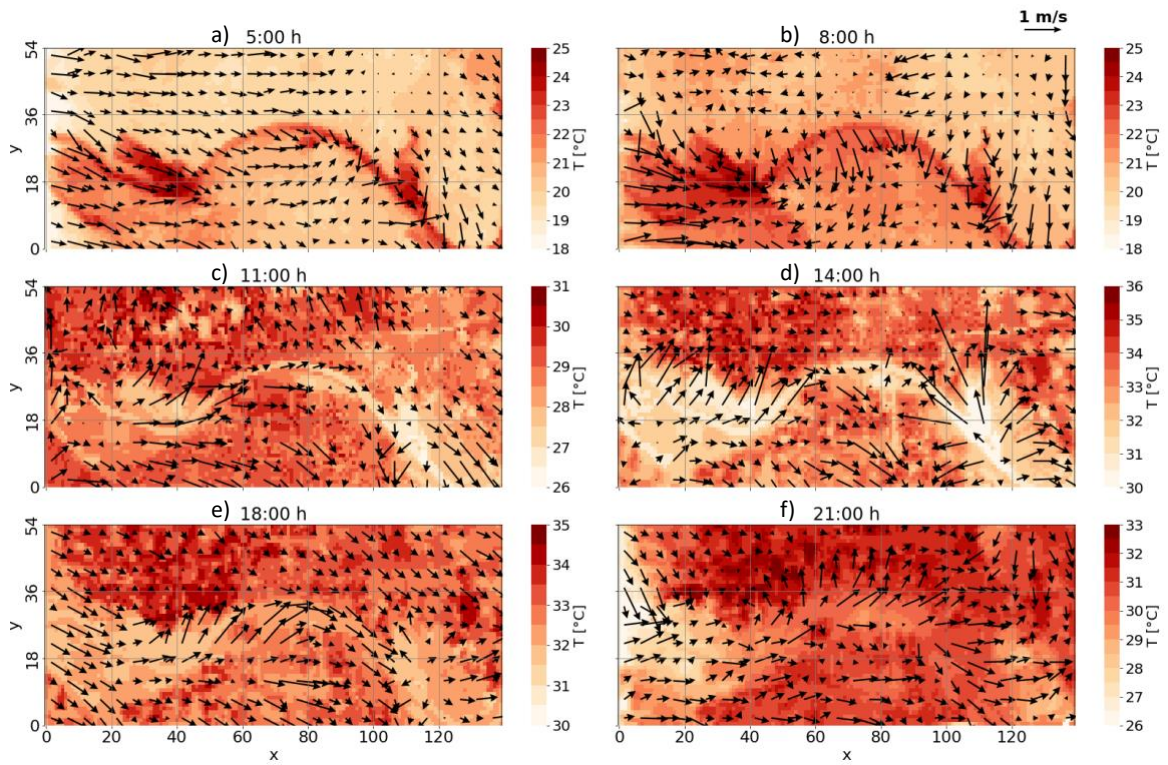
Slika 3.3 Temperatura zraka na 2 m visine te iznos i smjer brzine vjetra za svaku petu točku u kontrolnoj simulaciji S26 u: a) 5 h, b) 8 h, c) 11 h, d) 14 h, e) 18 h i f) 21 h



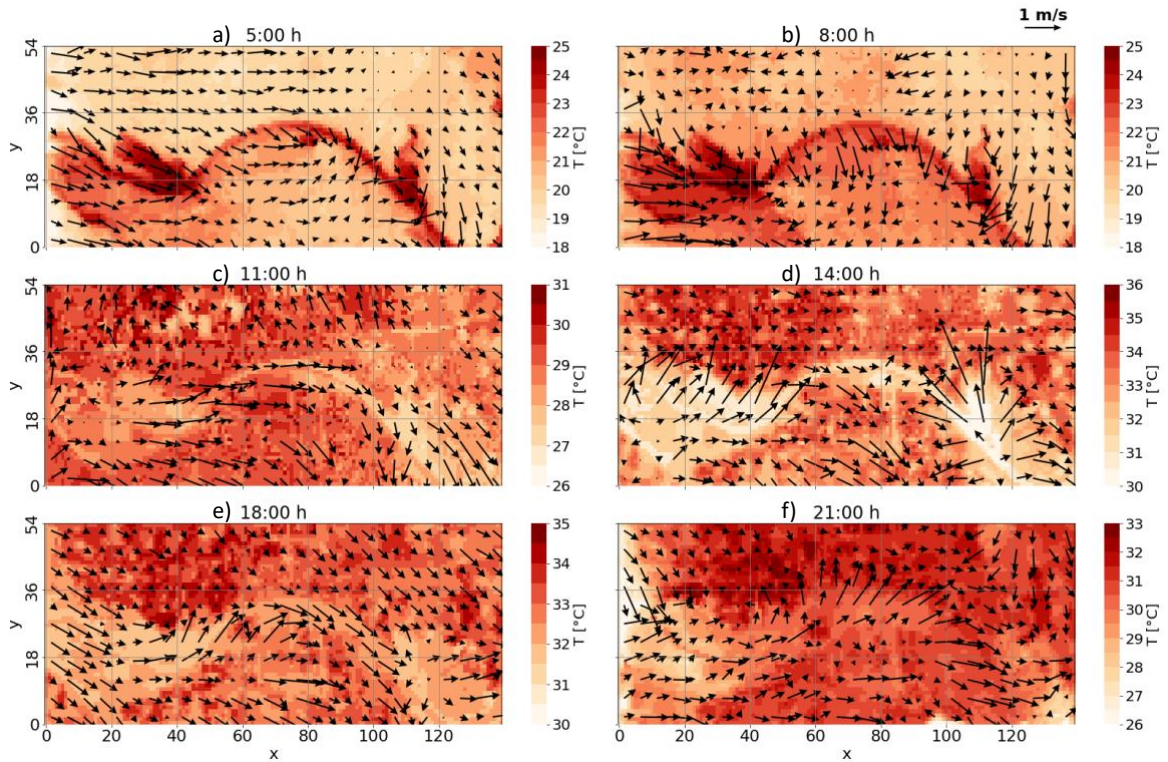
Slika 3.4 Temperatura zraka na 2 m visine te iznos i smjer brzine vjeta za svaku petu točku u hladnoj simulaciji S24 u: a) 5 h, b) 8 h, c) 11 h, d) 14 h, e) 18 h i f) 21 h



Slika 3.5 Temperatura zraka na 2 m visine te iznos i smjer brzine vjeta za svaku petu točku u hladnoj simulaciji S22 u: a) 5 h, b) 8 h, c) 11 h, d) 14 h, e) 18 h i f) 21 h



Slika 3.6 Temperatura zraka na 2 m visine te iznos i smjer brzine vjeta za svaku petu točku u toploj simulaciji S28 u: a) 5 h, b) 8 h, c) 11 h, d) 14 h, e) 18 h i f) 21 h



Slika 3.7 Temperatura zraka na 2 m visine te iznos i smjer brzine vjeta za svaku petu točku u toploj simulaciji S30 u: a) 5 h, b) 8 h, c) 11 h, d) 14 h, e) 18 h i f) 21 h

3.1.3. Usporedba temperature zraka eksperimenata s kontrolnom simulacijom

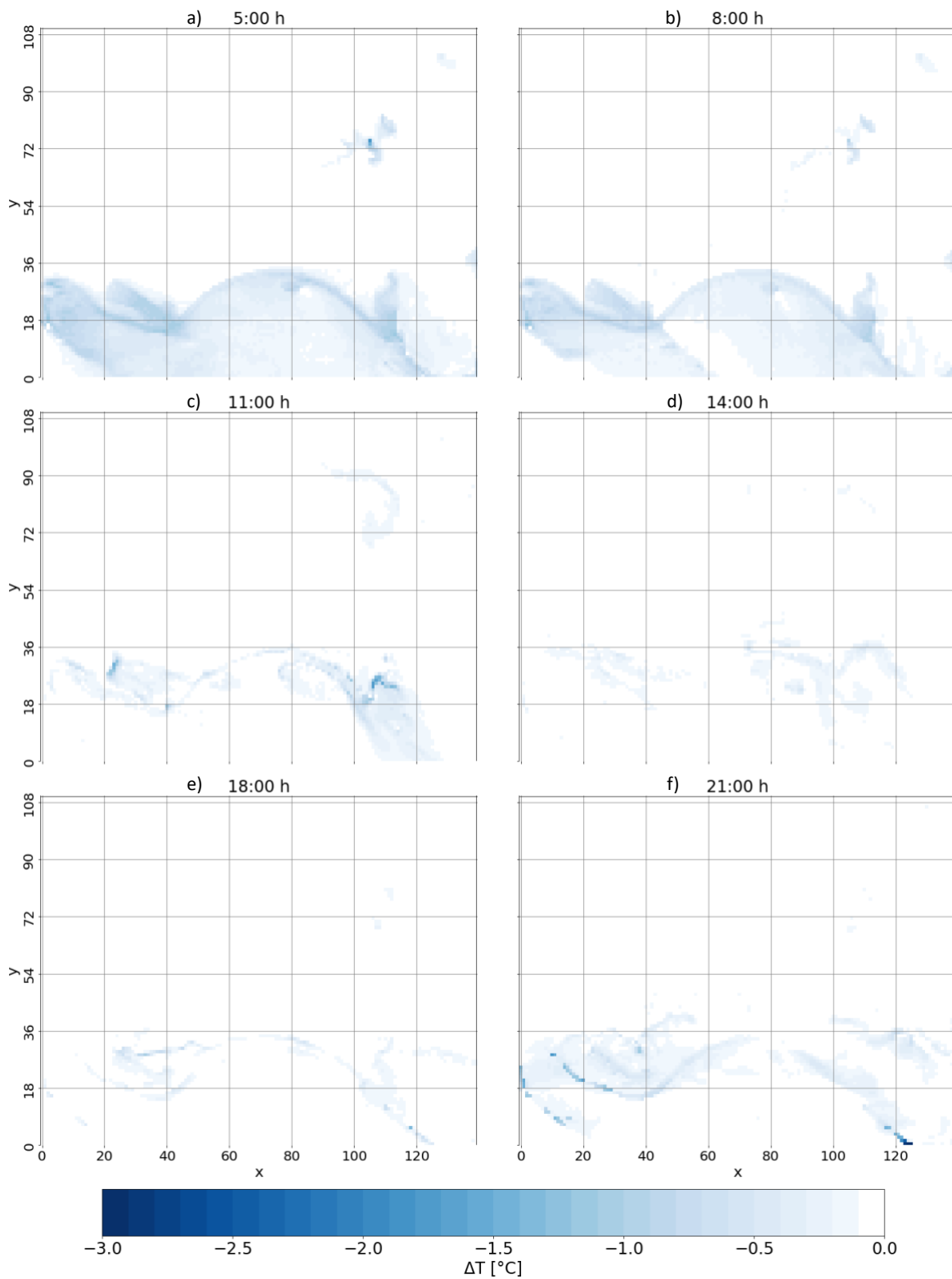
Kako bi se dobile informacije o tome koliko temperatura zraka u gradu ovisi o temperaturi vodenih tijela, uspoređene su temperature zraka u različitim simulacijama. Od temperature zraka u hladnoj ili toploj simulaciji oduzeta je temperatura zraka u kontrolnoj simulaciji te su tako dobiveni iznosi ohlađivanja ili zagrijavanja grada, ovisno o temperaturi vodenih tijela u simulacijama. Na Slikama 3.8 i 3.9 prikazane su razlike između temperature zraka u hladnim eksperimentima i temperature zraka u kontrolnoj simulaciji, dok su na Slikama 3.10 i 3.11 prikazane razlike između temperature zraka u toplim eksperimentima i temperature zraka u kontrolnoj simulaciji. Skale su podešene tako da se prikazuju samo negativne vrijednosti za razlike između hladne i kontrolne simulacije, tj. pozitivne vrijednosti nisu prikazane jer su vrlo male. Analogno tome, za razlike između tople i kontrolne simulacije zanemarene su vrlo male negativne vrijednosti.

Uspoređujući dvije hladne simulacije s hladnijim vodenim tijelima u odnosu na kontrolnu (Slike 3.8 i 3.9), očito je da hladna simulacija S22 pokazuje veće iznose ohlađivanja nego hladna simulacija S24, što je očekivano. U 5 h i 8 h obje hladne simulacije pokazuju prodor hladnog zraka na područje Novog Zagreba što se može pripisati vjetru koji je u jutarnjim satima pretežito sjeverni i sjeverozapadni na središnjem području Save te zapadni na području Jaruna (Slike 3.4 i 3.5). Slična je situacija u ostatku prijedpodneva do 10 h (Slike D4–D9 u Dodatku) nakon čega se iznosi ohlađivanja i prodor hladnog zraka na jug smanjuju u obje hladne simulacije. Osim toga, u hladnim simulacijama niže temperature vodenih tijela u parku Maksimir utječu na ohlađivanje okolnog zraka koje je izraženo do oko 11 h. Amplitude ohlađivanja ponovo rastu tek kasnije navečer te u hladnoj simulaciji S22 u 21 h na nekim mjestima uz Savu premašuju 3 °C.

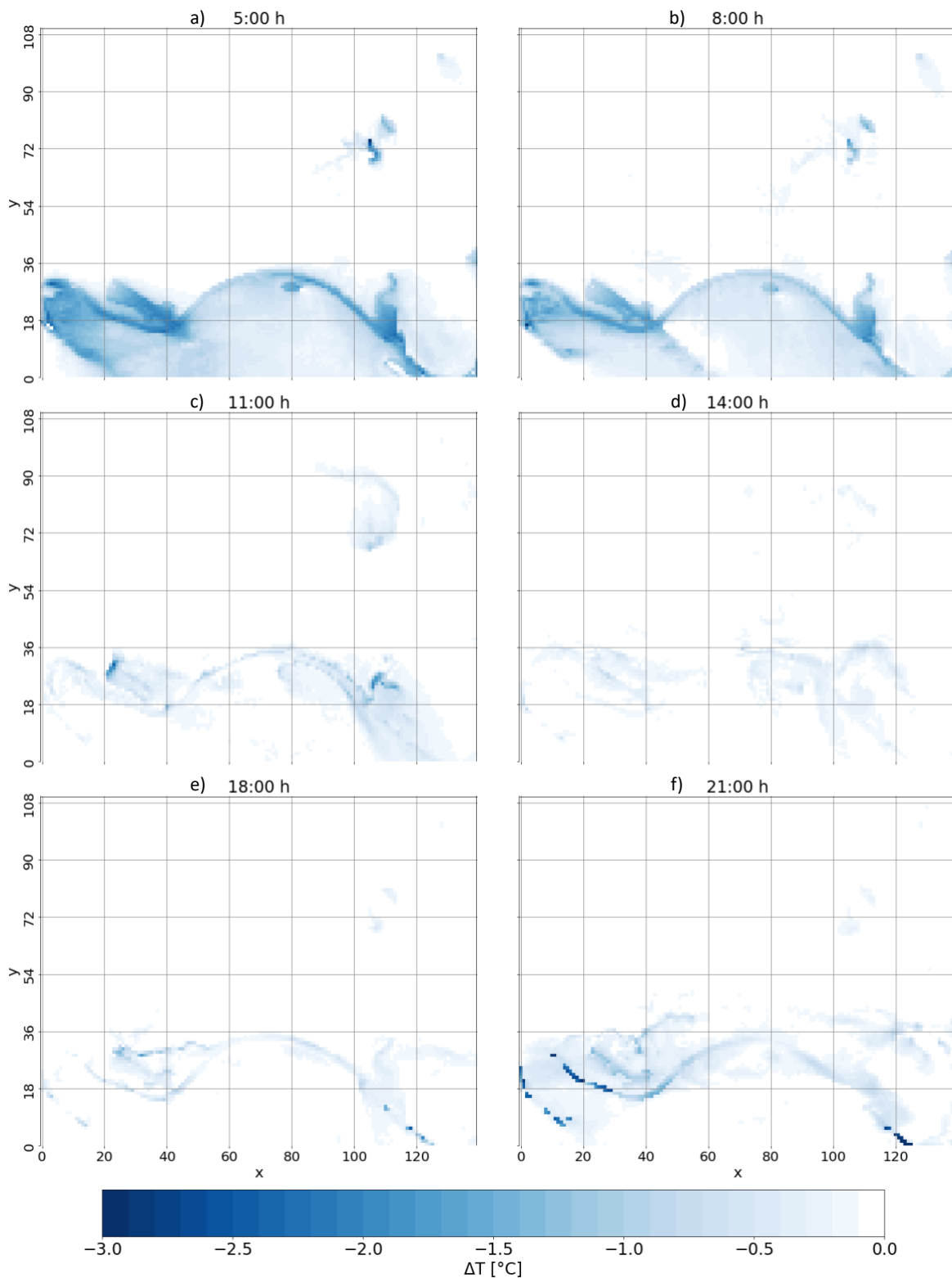
Slično vrijedi i za tople simulacije u kojima su amplitude zagrijavanja veće u simulaciji S30 (Slika 3.11) nego u simulaciji S28 (Slika 3.10), što je očekivano. Osim toga, u toploj simulaciji S28 zagrijavanje je najizraženije ujutro i prijedpodne do 11 h te nakon 21 h (Slike D10–D12 u Dodatku). Slično je i u toploj simulaciji S30 (Slike D13–D15 u Dodatku) s time da topli zrak između 4 h i 11 h prodire dublje na jug u odnosu na toplu simulaciju S28. Tome može biti uzrok vjetar koji je prijedpodne na središnjem području Save sjeverni, a na području Jaruna pretežito zapadni (Slika 3.7). Zagrijavanje na području Maksimira sličnog je iznosa kao ohlađivanje u hladnim

simulacijama s time da se u simulaciji S30 zagrijavanje opaža do oko 14 h i obuhvaća šire područje, kao i na području Savice. U 21 h u toploj simulaciji S30 zagrijavanje je izraženije u odnosu na ohlađivanje u hladnoj simulaciji S22 u odnosu na kontrolnu S26, pogotovo na zapadnom dijelu Save gdje su razlike između najvećih iznosa oko 2 °C.

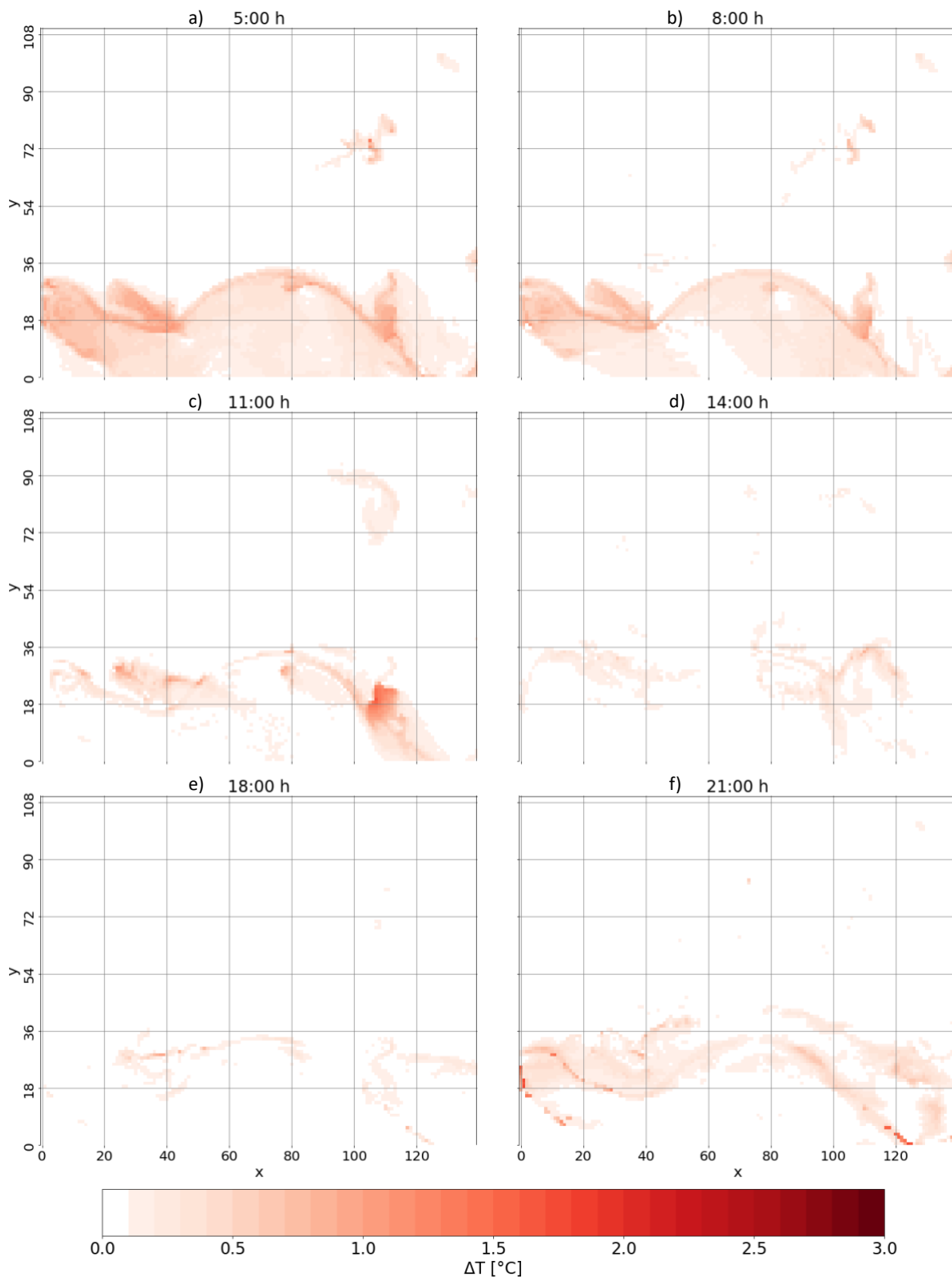
Za svaku od šest odabranih satnih vrijednosti izračunata je najveća razlika u temperaturi zraka između simulacija tako da se dobije informacija o maksimalnom iznosu i lokaciji najvećeg zagrijavanja ili ohlađivanja grada. Iznosi najvećih odstupanja između simulacija navedeni su u Tablici 3.1, zajedno s pripadajućim koordinatama u domeni. Najjače ohlađivanje je nastupilo u 21 h s iznosima $-4,2$ °C za hladnu simulaciju S22 te $-3,72$ °C za hladnu simulaciju S24 uz najjužniji dio Save obuhvaćen u istraživanju. Najveće amplitude zagrijavanja nastupile su također u 21 h s iznosima $1,77$ °C za toplu simulaciju S28 te $3,72$ °C za toplu simulaciju S30 kod jezera Ontario u blizini golf terena Riverside. U svim odabranim satnim vrijednostima iznosi ohlađivanja veći su od iznosa zagrijavanja osim u 14 h. Lokacije najvećeg ohlađivanja približno su jednake u obje hladne simulacije u svim odabranim satnim vrijednostima osim u 11 h kada hladna simulacija S22 pokazuje najveće ohlađivanje na području zapadnog Jaruna dok hladna simulacija S24 pokazuje najveće ohlađivanje na području Savice. U toplim simulacijama lokacije najvećeg zagrijavanja podjednake su u svim satnim vrijednostima osim u 5 h. Treće maksimirsko jezero pokazuje najveće ohlađivanje u 5 h u obje hladne simulacije te najveće zagrijavanje u toploj simulaciji S28, dok je najveće zagrijavanje u toploj simulaciji S30 u 5 h na području Savice.



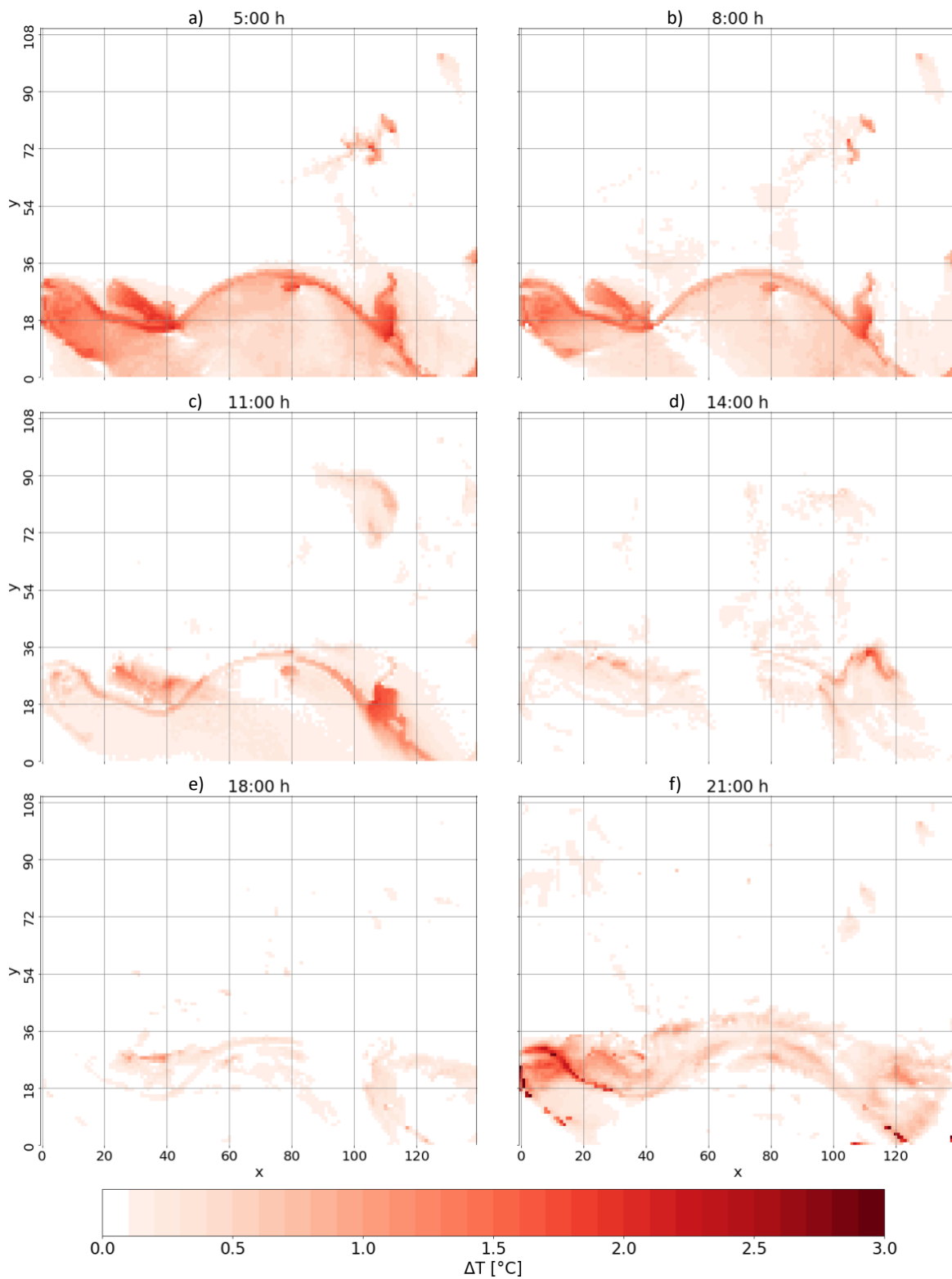
Slika 3.8 Razlika u temperaturi zraka na 2 m visine između hladne simulacije S24 i kontrolne simulacije S26 u: a) 5 h, b) 8 h, c) 11 h, d) 14 h, e) 18 h i f) 21 h



Slika 3.9 Razlika u temperaturi zraka na 2 m visine između hladne simulacije S22 i kontrolne simulacije S26 u: a) 5 h, b) 8 h, c) 11 h, d) 14 h, e) 18 h i f) 21 h



Slika 3.10 Razlika u temperaturi zraka na 2 m visine između tople simulacije S28 i kontrolne simulacije S26 u: a) 5 h, b) 8 h, c) 11 h, d) 14 h, e) 18 h i f) 21 h



Slika 3.11 Razlika u temperaturi zraka na 2 m visine između tople simulacije S30 i kontrolne simulacije S26 u: a) 5 h, b) 8 h, c) 11 h, d) 14 h, e) 18 h i f) 21 h

Tablica 3.1 Maksimalne razlike u temperaturi zraka između hladnih i toplih simulacija u odnosu na kontrolnu za svaki odabrani sat te x i y koordinate tih točaka na mreži domene

sat	$(T_{22^{\circ}C} - T_{26^{\circ}C})_{min}[^{\circ}C]$	(x, y)	$(T_{24^{\circ}C} - T_{26^{\circ}C})_{min}[^{\circ}C]$	(x, y)
5 h	-3,01	(105,75)	-1,82	(105,75)
8 h	-2,86	(2,17)	-1,26	(2,17)
11 h	-2,33	(23,31)	-1,79	(106,25)
14 h	-0,82	(71,36)	-0,55	(73,36)
18 h	-2,43	(118,6)	-1,35	(118,6)
21 h	-4,2	(124,1)	-3,72	(124,1)
sat	$(T_{28^{\circ}C} - T_{26^{\circ}C})_{max}[^{\circ}C]$	(x, y)	$(T_{30^{\circ}C} - T_{26^{\circ}C})_{max}[^{\circ}C]$	(x, y)
5 h	1,37	(105,75)	2,2	(112,14)
8 h	1,03	(110,13)	1,82	(112,18)
11 h	1,61	(107,20)	1,95	(107,19)
14 h	0,89	(110,35)	1,87	(111,35)
18 h	0,97	(38,29)	1,24	(39,28)
21 h	1,77	(1,19)	3,72	(1,21)

3.2. Relativna vlažnost zraka

Osim na temperaturu zraka, temperatura vodenih tijela također može utjecati na relativnu vlažnost zraka koja predstavlja informaciju o tome koliko vodene pare se nalazi u zraku u odnosu na maksimalnu moguću količinu vodene pare koju zrak može primiti pri istim uvjetima. Slike 3.12 i 3.13 prikazuju relativnu vlažnost zraka na 2 m visine za svih pet simulacija u odabrane četiri satne vrijednosti. Rezultati su prikazani na smanjenoj domeni budući da na izostavljenim dijelovima domene nema velikih razlika između rezultata simulacija. Razlike u relativnoj vlažnosti zraka između simulacija najveće su uz Savu i ostala vodena tijela, što je očekivano budući da se simulacije razlikuju po temperaturi vodenih tijela. U svim odabranim satnim vrijednostima razlike u relativnoj vlažnosti zraka između hladne simulacije S22 i kontrolne simulacije S26 veće su od razlika između hladne simulacije S24 i kontrolne simulacije S26. Isto vrijedi za tople simulacije, tj. najveće razlike između toplih simulacija i kontrolne simulacije S26 dobivene su za simulaciju s toplijom vodom (S30).

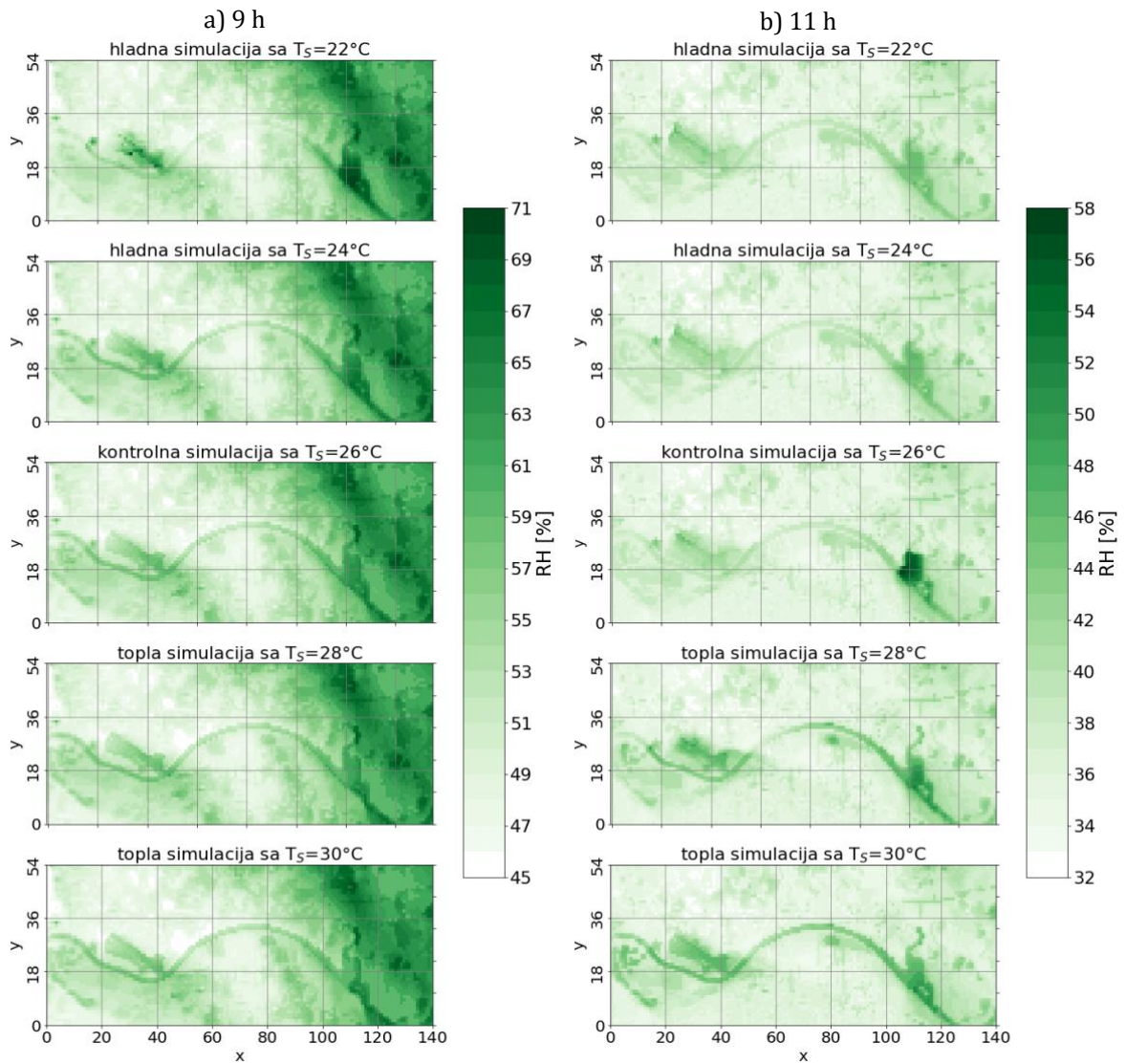
Relativna vlažnost zraka u 9 h (Slika 3.12a) je veća u istočnom dijelu Zagreba u odnosu na zapadni dio u svih pet simulacija i ima najveće iznose iznad rezidencijalnih

područja visoke gustoće izgrađenosti (izuzevši relativnu vlažnost zraka u blizini vodenih tijela). Na području Jaruna, Savice i Trećeg maksimirskog jezera relativna vlažnost zraka u hladnoj simulaciji S22 viša je nego u kontrolnoj simulaciji S26 te razlike na tim lokacijama iznose oko 10% (Slika D16 u Dodatku). S druge strane, relativna vlažnost zraka iznad Save, Bundeka i golf terena Riverside u hladnoj simulaciji S22 niža je od relativne vlažnosti zraka u kontrolnoj simulaciji S26, no razlike su relativno male i iznose do 5%. Suprotno tome, relativna vlažnost zraka u 9 h na području Save, Bundeka i golf terena Riverside u toploj simulaciji S30 je viša od relativne vlažnosti zraka u kontrolnoj simulaciji S26, dok je na području Savice, Jaruna i Maksimira niža te razlike iznose do 7% (Slika D17 u Dodatku). Hladna simulacija S24 slična je hladnoj simulaciji S22, no pokazuje manja odstupanja u odnosu na kontrolnu simulaciju S26 (Slika D18 u Dodatku). Isto vrijedi za toplu simulaciju S28 koja je slična toploj simulaciji S30 s manjim razlikama u odnosu na kontrolnu simulaciju S26 (Slika D19 u Dodatku). U hladnoj simulaciji S22 u 9 h može se uočiti prodor vlažnog zraka s područja Maksimira prema središnjem dijelu grada, vlažnog zraka s područja Savice prema istoku te suhog zraka sa zapadnog dijela Save prema Novom Zagrebu. Suprotno tome, u toploj simulaciji S30 suh zrak s područja Maksimira prodire u središnji dio grada, suh zrak s područja Savice prodire prema istoku te vlažan zrak s područja golf terena Riverside i Bundeka prodire prema Novom Zagrebu što odgovara smjeru vjetra (Slike 3.4–3.7).

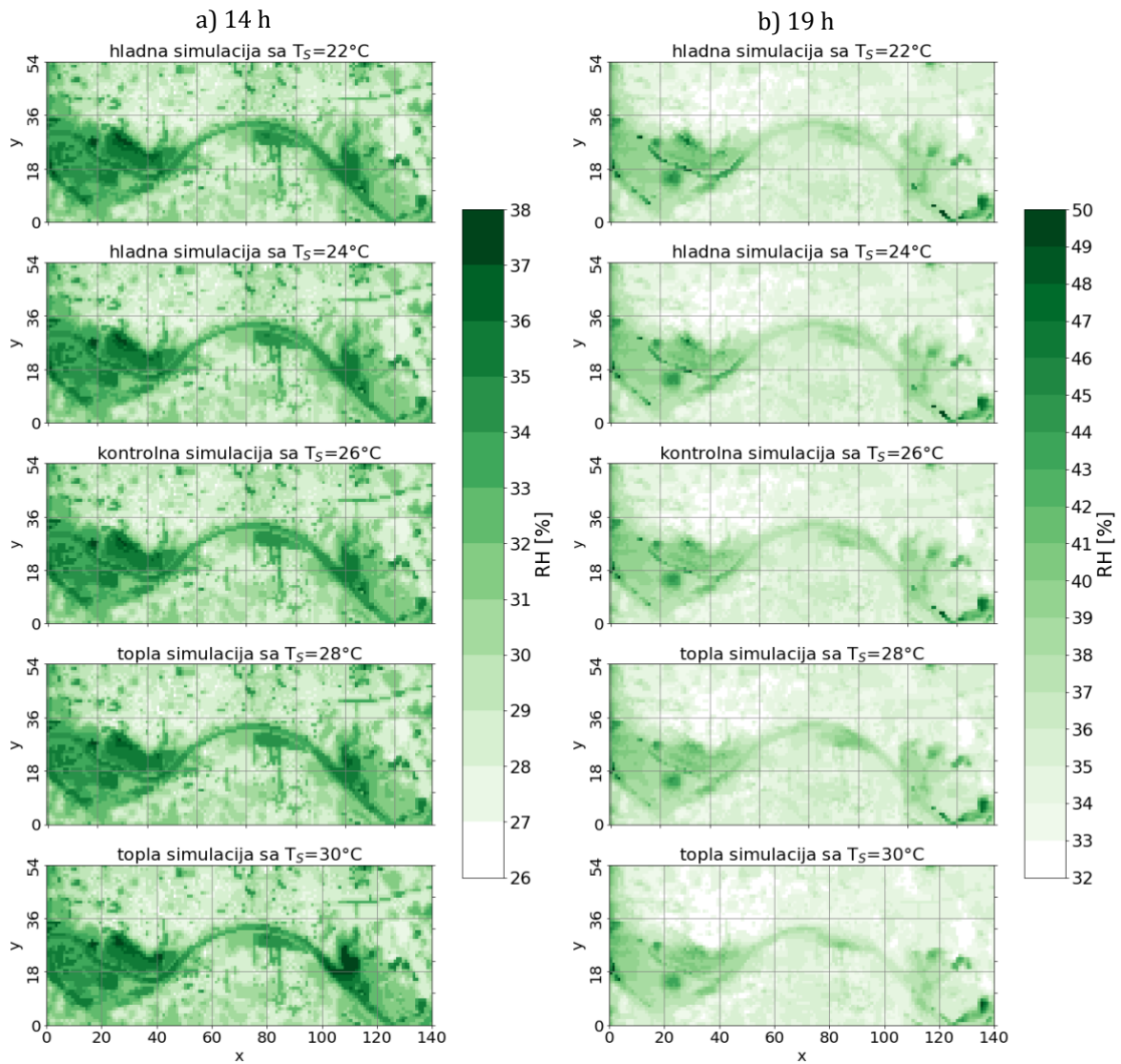
Situacija u 11 h (Slika 3.12b) zanimljiva je po tome što je na području Save i ostalih vodenih tijela osim jezera Savice relativna vlažnost zraka u hladnim simulacijama S22 i S24 te toplim simulacijama S28 i S30 viša u odnosu na kontrolnu simulaciju S26. Razlike su najveće između tople simulacije S30 i kontrolne simulacije S26 te na nekim mjestima iznose oko 10%. Također, relativna vlažnost zraka iznad središnjeg dijela jezera Savice u hladnim simulacijama S22 i S24 te toplim simulacijama S28 i S30 niža je za barem 9% u odnosu na kontrolnu simulaciju S26. U toplim simulacijama S28 i S30 relativna vlažnost zraka sjeveroistočno od Maksimira i Jaruna je niža u odnosu na kontrolnu simulaciju S26 te vlažan zrak s područja Save i Jaruna prodire prema Novom Zagrebu.

Što se tiče poslijepodnevni sati, u 14 h (Slika 3.13a) najveći iznosi relativne vlažnosti zraka u svim simulacijama su iznad zelenih i vodenih tijela, a razlike između simulacija vrlo su male (<3%). U 19 h (Slika 3.13b) relativna vlažnost zraka u blizini

vodenih tijela te istočno od Savice u hladnim simulacijama S22 i S24 viša je u odnosu na kontrolnu simulaciju S26, dok je u toplim simulacijama S28 i S30 niža tu odnosu na kontrolnu. Razlike su najveće na najjužnijem dijelu Save obuhvaćenom u istraživanju gdje za hladnu simulaciju S22 i toplu simulaciju S30 iznose oko 10% u odnosu na kontrolnu simulaciju S26. Hladna simulacija S24 slična je hladnoj simulaciji S22, no s manjim odstupanjima u odnosu na kontrolnu simulaciju S26 te isto vrijedi za tople simulacije S28 i S30. Osim u neposrednoj blizini vodenih tijela, najveći iznosi relativne vlažnosti zraka u 19 h su iznad zelenih površina istočno od Savice, na području golf terena Riverside te na području Bundeka u svim simulacijama.



Slika 3.12 Relativna vlažnost zraka na 2 m visine dobivena modelom za hladne simulacije S22 i S24, kontrolnu simulaciju S26 te tople simulacije S28 i S30 u: a) 9 h i b) 11 h



Slika 3.13 Relativna vlažnost zraka na 2 m visine dobivena modelom za hladne simulacije S22 i S24, kontrolnu simulaciju S26 te tople simulacije S28 i S30 u: a) 14 h i b) 19 h

3.3. *Diskusija*

Simulacije temperature zraka na 2 m visine u Zagrebu 24. kolovoza 2012. godine pokazuju da je u ranim jutarnjim satima (do 9 h) temperatura zraka u neposrednoj blizini Save i ostalih vodenih tijela najviša te opada s udaljenošću. To je zato što noću voda sporije gubi toplinu, a zrak se brže hladi pa vodena tijela tada mogu imati suprotan učinak od željenoga, tj. noću mogu zagrijati okolni zrak i povećati efekt urbanog toplinskog otoka. Slične rezultate ponudili su već postojeći radovi, npr. Theeuwes i sur. (2013), Ampatzidis i Kershaw (2020) te Hong i sur., (2023) u kojima je noćno zagrijavanje pripisano velikom toplinskom kapacitetu vode u usporedbi s toplinskim kapacitetom zraka zbog čega voda dulje zadržava toplinu. Unatoč tome, noćno zagrijavanje zraka u većini slučajeva je manjeg iznosa u odnosu na dnevno ohlađivanje vodenim tijelima.

Velik toplinski kapacitet vode tijekom dana ima suprotan učinak, tj. zrak se zbog Sunčevog zračenja brže zagrijava od vode pa je danju temperatura vodenih tijela niža od temperature zraka. Tome može pridonijeti proces isparavanja u kojem se iskorištava toplina s površine vode i tako se ohlađuje (Gunawardena i sur., 2017). Pokazano je da vodena tijela u Zagrebu imaju najveći učinak ohlađivanja u prijepodnevnim i večernjim satima kada je razlika između temperature vode i okolnog zraka najveća. Na prostornu raspodjelu temperature zraka u gradu utječu klase namjene zemljišta. Tako se za Zagreb pokazalo da su između 10 h i 12 h rezidencijalna područja vrlo visoke gustoće izgrađenosti hladnija od ostatka grada. Taj rezultat objasnili su Wang i Xu (2021) te Salameh i sur. (2023) koji su primijetili da temperatura zraka generalno opada s povećanjem visine zgrada. Mogući razlozi takve povezanosti visine zgrada i okolne temperature zraka su efekt sjene zato što visoke zgrade sjenom prekrivaju površine koje bi inače bile osunčane i zagrijane, povoljna prostorna raspodjela zgrada te poremećaji cirkulacije zraka i lokalnog vjetra. Tijekom dana su zelene površine i vodena tijela generalno hladnija od ostatka grada, no, kako dan odmiče, efekt ohlađivanja vodenim tijelima sve je manji zbog miješanja zagrijanog zraka i zraka iznad vode. Makar je veličina vodenog tijela generalno proporcionalna njegovoj sposobnosti ohlađivanja, rad Jacobsa i sur. (2020) sugerira kako veličina vodenih tijela ne mora biti ograničavajući faktor u ohlađivanju grada jer postoje mehanizmi koji bi proširili područje ohlađivanja, kao npr. vjetar.

Vjetar na 2 m visine iznad izgrađenog dijela Zagreba u svim je simulacijama relativno slab, s iznosima oko 1 m/s pa se pokazalo da dominantan utjecaj na iznos i smjer vjetra u blizini vodenih tijela ima razlika između temperature zraka iznad vodenih tijela i temperature okolnog zraka. Vjetar većinom puše iz područja s nižom temperaturom zraka prema području s višom temperaturom zraka zato što se u toplijim područjima lakši zrak uzdiže i rezultira nižim tlakom zraka u odnosu na hladnije okolno područje. Budući da se razlike između temperature zraka iznad vodenih tijela i okolnog zraka smanjuju kako dan odmiče, vjetar također slabi, no zadržava smjer puhanja. Razlike u iznosu i smjeru vjetra između simulacija s različitim temperaturama vodenih tijela su male (<0.5 m/s) te ovise o razlici u temperaturi zraka iznad vodenih tijela i okolnog zraka.

Usporedbe kontrolne simulacije S26 koja je najbližnja realnoj situaciji te simulacija s hladnijim i toplijim vodenim tijelima pokazale su da su razlike u iznosima ohlađivanja hladnijim vodenim tijelima ili zagrijavanja toplijim vodenim tijelima najveće u neposrednoj blizini vodenih tijela poput Save, Jaruna, Savice i maksimirskih jezera. Razlike su najveće u večernjim satima kada iznose $-4,2$ °C za hladnu simulaciju S22 te $3,72$ °C za toplu simulaciju S30 u odnosu na kontrolnu simulaciju S26. Iznosi odstupanja od kontrolne simulacije nisu simetrični za hladne i tople simulacije, tj. hladne simulacije S22 i S24 više ohlađuju grad nego što ga tople simulacije S28 i S30 zagrijavaju u svim odabranim satnim vrijednostima osim u 14 h kada su razlike između simulacija ionako mnogo manje u odnosu na jutro ili kraj dana. U jutarnjim satima ohlađivanje ili zagrijavanje (ovisno o temperaturi vodenih tijela) jednoliko je na području Save i urbanih jezera, dok se poslijepodne i navečer uočava prostorna ovisnost ohlađivanja ili zagrijavanja. Pokazano je da vjetar ima značajnu ulogu u transportu hladnog ili toplog zraka iz područja iznad vodenih tijela u okolno područje. Ujutro se u simulacijama s hladnijim vodenim tijelima u odnosu na kontrolnu simulaciju uočava prodor hladnog zraka iz područja Save i okolnih jezera na područje Novog Zagreba te s područja Maksimira prema središtu Zagreba, dok navečer vjetar mijenja smjer i prenosi hladan zrak s područja Save prema sjeveru. Situacija je obrnuta u simulacijama s toplijim vodenim tijelima u odnosu na kontrolnu simulaciju te se uočava prodor toplog zraka iz područja vodenih tijela u okolno područje.

Prema dosadašnjim istraživanjima (npr. Yao i sur., 2023), učinkovitost ohlađivanja gradova vodenim tijelima te ublažavanje toplinskog stresa je vremenski i

prostorno ograničena te ovisi o isparavanju i količini vlage u zraku koja može smanjiti sposobnost hlađenja organizma. Za Zagreb se pokazalo da povezanost relativne vlažnosti zraka i temperature vodenih tijela nije jednostavna. U ranim jutarnjim satima u istočnom dijelu grada relativna vlažnost zraka veća je nego u zapadnom dijelu grada, dok je u ostatku dana relativna vlažnost zraka najveća iznad vodenih tijela i pojedinih lokacija u izgrađenim dijelovima grada. U hladnoj simulaciji S22 relativna vlažnost zraka je niža na području Save i viša na području Jaruna, Savice i Maksimira u odnosu na kontrolnu simulaciju S26, dok je topla simulacija S30 suprotna i pokazuje manja odstupanja. Situacija u 11 h zanimljiva je zato što je u hladnim simulacijama S22 i S24 te u toplim simulacijama S28 i S30 relativna vlažnost zraka na području Savice niža od kontrolne simulacije S26, dok je na području Save, Jaruna i Maksimira viša. Pokazano je da vjetar nema toliki utjecaj na transport vlažnog zraka kao što ima na transport hladnog ili toplog zraka iz područja vodenih tijela u okolno područje. Jedan od nedostataka modela MUKLIMO_3 je činjenica da model ne može predvidjeti niti prikazati oblake pa su sukladno tome Hollósi i sur. (2021) u svom radu pokazali da model općenito podcjenjuje visoke vrijednosti relativne vlažnosti zraka u gradu, pogotovo tijekom visokih temperatura zraka, a niske vrijednosti precjenjuje u usporedbi s izmjerenim podacima. Stoga se rezultati relativne vlažnosti zraka dobiveni u ovom radu mogu odstupati od realne situacije.

4. Zaključak

Analizirani su rezultati simulacija modelom MUKLIMO_3 kojima su dobiveni temperatura i relativna vlažnost zraka na 2 m visine te vjetar na 2 m visine za područje Zagreba tijekom toplinskog vala 24. kolovoza 2012. godine. Pet simulacija s različitom temperaturom vodenih tijela pokazuju da temperatura Save i gradskih jezera utječe na mikroklimatska toplinska obilježja Zagreba tijekom toplinskog vala te da donekle ublažava toplinsko opterećenje grada.

Pokazano je da je ohlađivanje vodenim tijelima najveće u prijepodnevnim satima kada su razlike između temperature vodenih tijela i okolnog zraka najveće. Kako dan prolazi, razlike između temperature vodenih tijela i okolnog zraka sve su manje pa se efekt ohlađivanja također smanjuje. S druge strane, u ranim jutarnjim i kasnim večernjim satima temperatura vodenih tijela viša je od temperature zraka što rezultira zagrijavanjem grada. Ti su rezultati u skladu s postojećim istraživanjima koja upućuju na to da noću vodena tijela mogu pojačati efekt urbanog toplinskog otoka i imati negativan učinak na ljude uslijed povećanog toplinskog stresa. Temperatura zraka u gradu pokazuje prostornu promjenjivost ovisno o klasama namjene zemljišta pa su tako zelene površine većinom hladnije od ostatka grada. Suprotno tome, u popodnevnim i poslijepodnevnim satima rezidencijalna područja vrlo visoke gustoće izgrađenosti hladnija su od ostatka grada što se može objasniti efektom sjene, povoljnom prostornom raspodjelom zgrada i poremećajima u cirkulaciji zraka.

Usporedbe simulacija s različitom temperaturom vodenih tijela pokazuju da su odstupanja u temperaturi zraka u simulacijama s hladnijim vodenim tijelima veća nego odstupanja u temperaturi zraka u simulacijama s toplijim vodenim tijelima u odnosu na kontrolnu simulaciju. Odstupanja su najveća u neposrednoj blizini vodenih tijela, no vjetar ima značajan utjecaj na transport hladnog ili toplog zraka u okolno područje. Također je uočen i određeni utjecaj vjetra na relativnu vlažnost zraka koja u Zagrebu pokazuje prostornu i vremensku ovisnost.

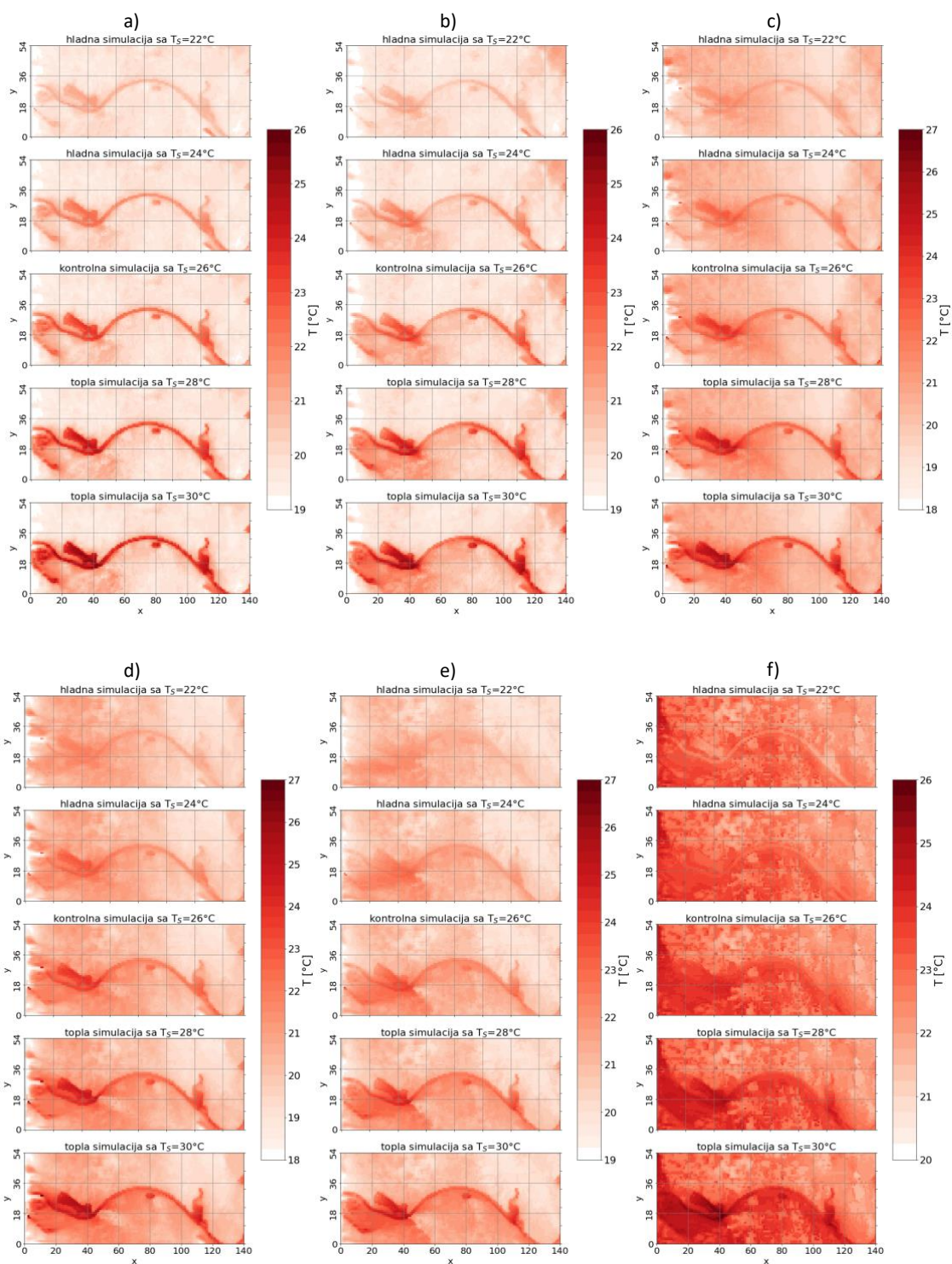
Ovo istraživanje pruža uvid u ulogu vodenih tijela u ublažavanju toplinskog opterećenja grada Zagreba tijekom toplinskih valova i njihov potencijal za poboljšanje otpornosti grada na toplinski stres u budućnosti. U isto vrijeme otvara prostor za daljnja istraživanja koja bi mogla uključivati ispitivanje dugoročnih učinaka vodenih tijela na promjenjivu mikroklimu i strukturu grada, utjecaj veličine i oblika vodenih

tijela na toplinska obilježja grada, analizu dodatnih čimbenika poput naoblake i drugih atmosferskih uvjeta koji nisu razmatrani u ovom istraživanju.

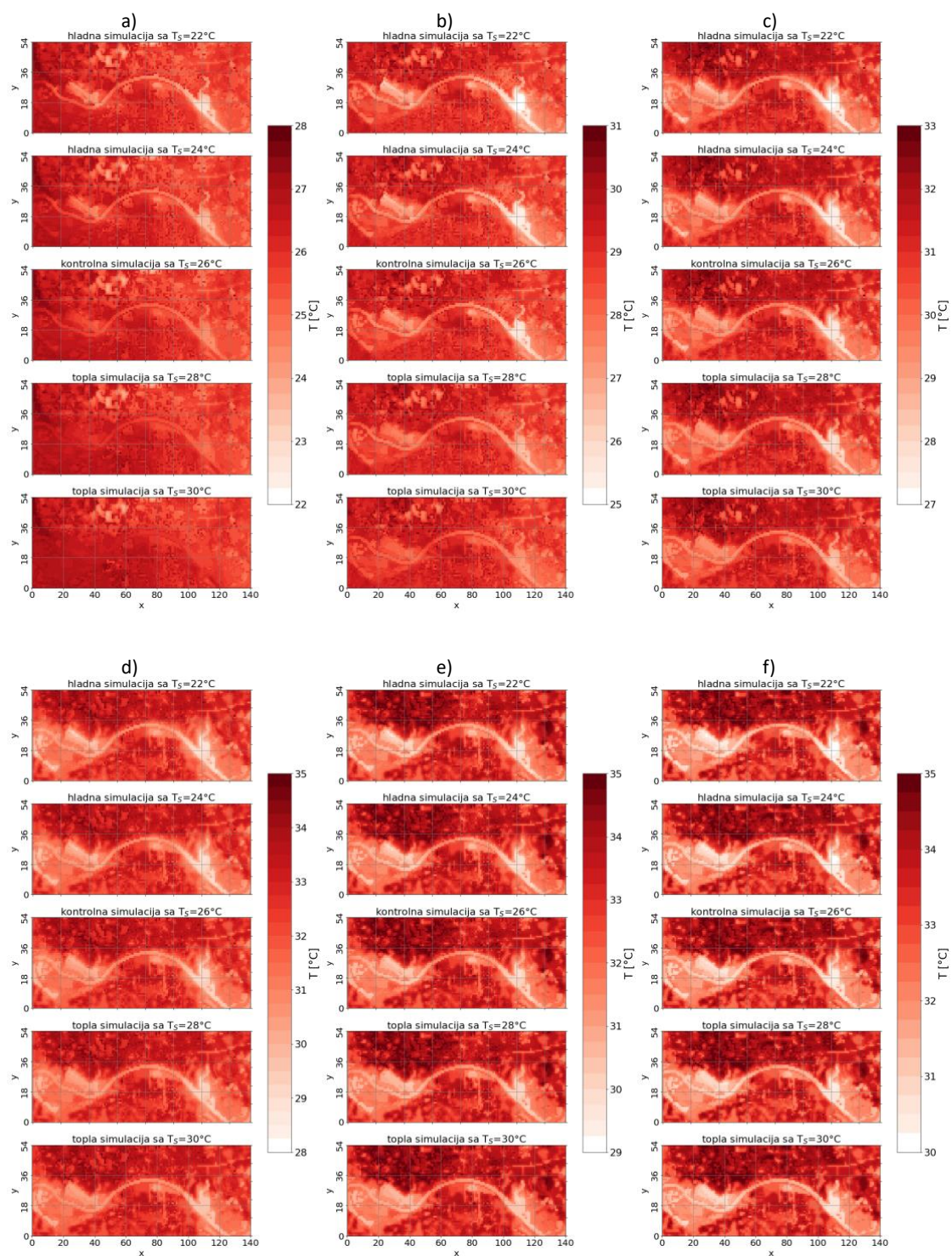
Dodatak

Tablica D1 Klase namjene zemljišta na području Zagreba i njihov opis

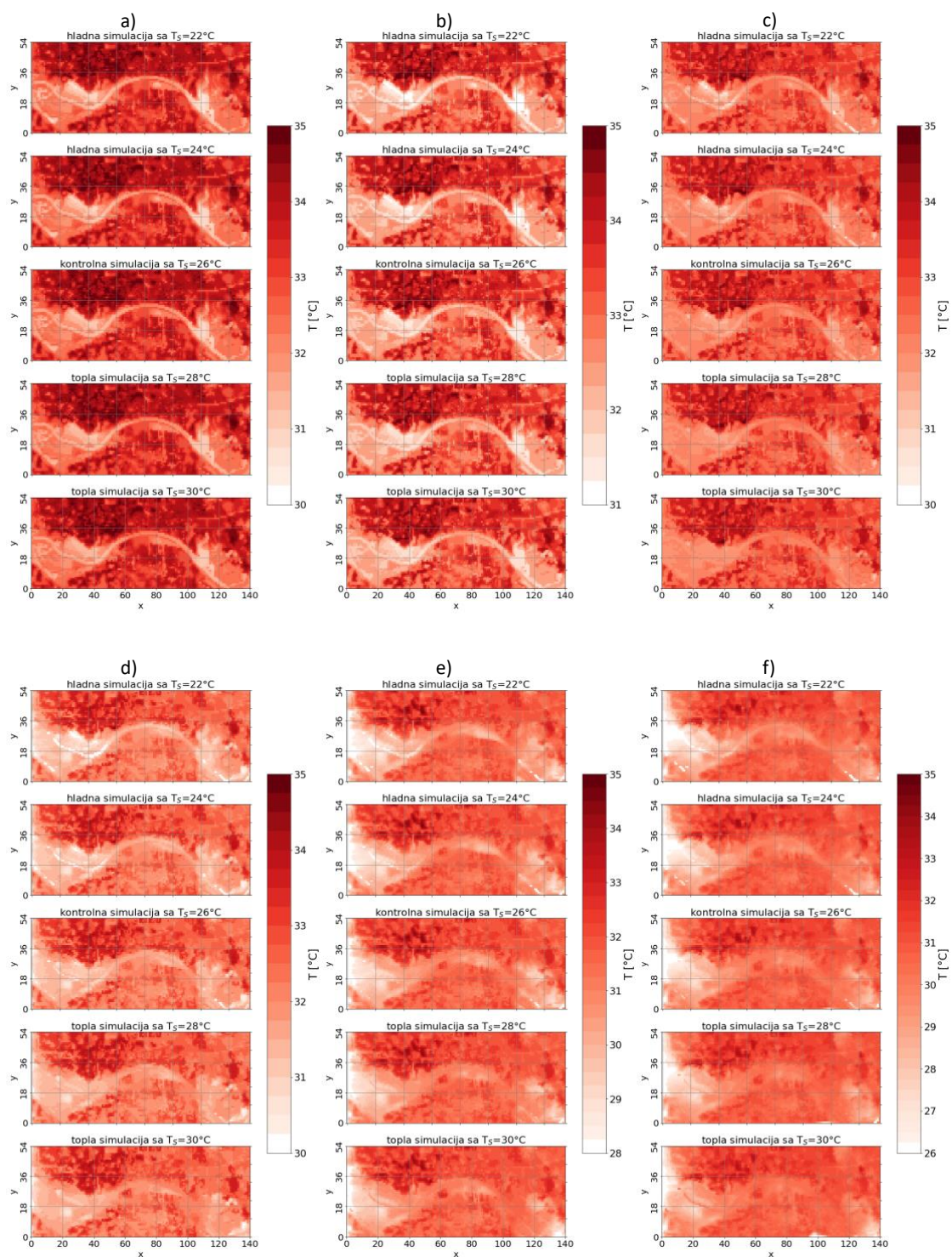
LU klasa	Opis	LU klasa	Opis
1	Rezidencijalna područja vrlo visoke gustoće naseljenosti	16	Željeznice
2	Rezidencijalna područja visoke gustoće naseljenosti	18	Odlagališta
3	Rezidencijalna područja srednje gustoće naseljenosti	19	Gradilišta
4	Rezidencijalna područja niske gustoće naseljenosti	20	Zemlja bez namjene
5	Rezidencijalna područja vrlo niske gustoće naseljenosti	21	Parkovi
6	Mješovita rezidencijalna područja	22	Groblja
7	Stara gradska jezgra	23	Sportski objekti s građom
8	Industrija	24	Sportski objekti bez građe
9	Poslovna zona	25	Pašnjaci
10	Trgovački centri	26	Poljoprivredna područja
11	Javne institucije	27	Poljoprivredna područja s vegetacijom
12	Vojni objekti	28	Šume
13	Energetski objekti	29	Grmolika vegetacija
14	Ceste	31	Vode
15	Parkirališta		



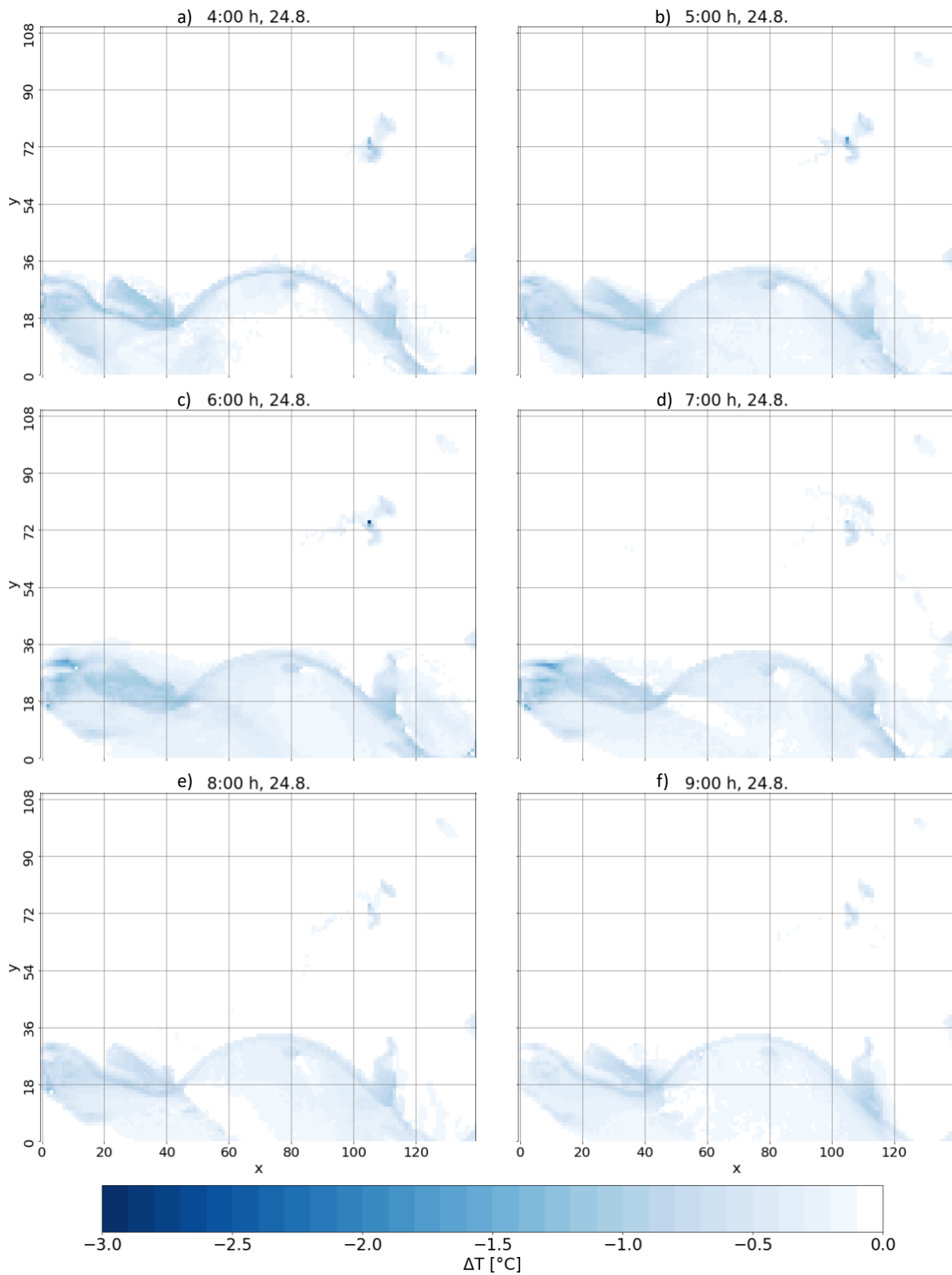
Slika D1 Temperatura zraka na 2 m visine dobivena modelom za hladne simulacije S22 i S24 kontrolnu simulaciju S26 te tople simulacije S28 i S30 u: a) 4 h, b) 5 h, c) 6 h, d) 7 h, e) 8 h i f) 9 h



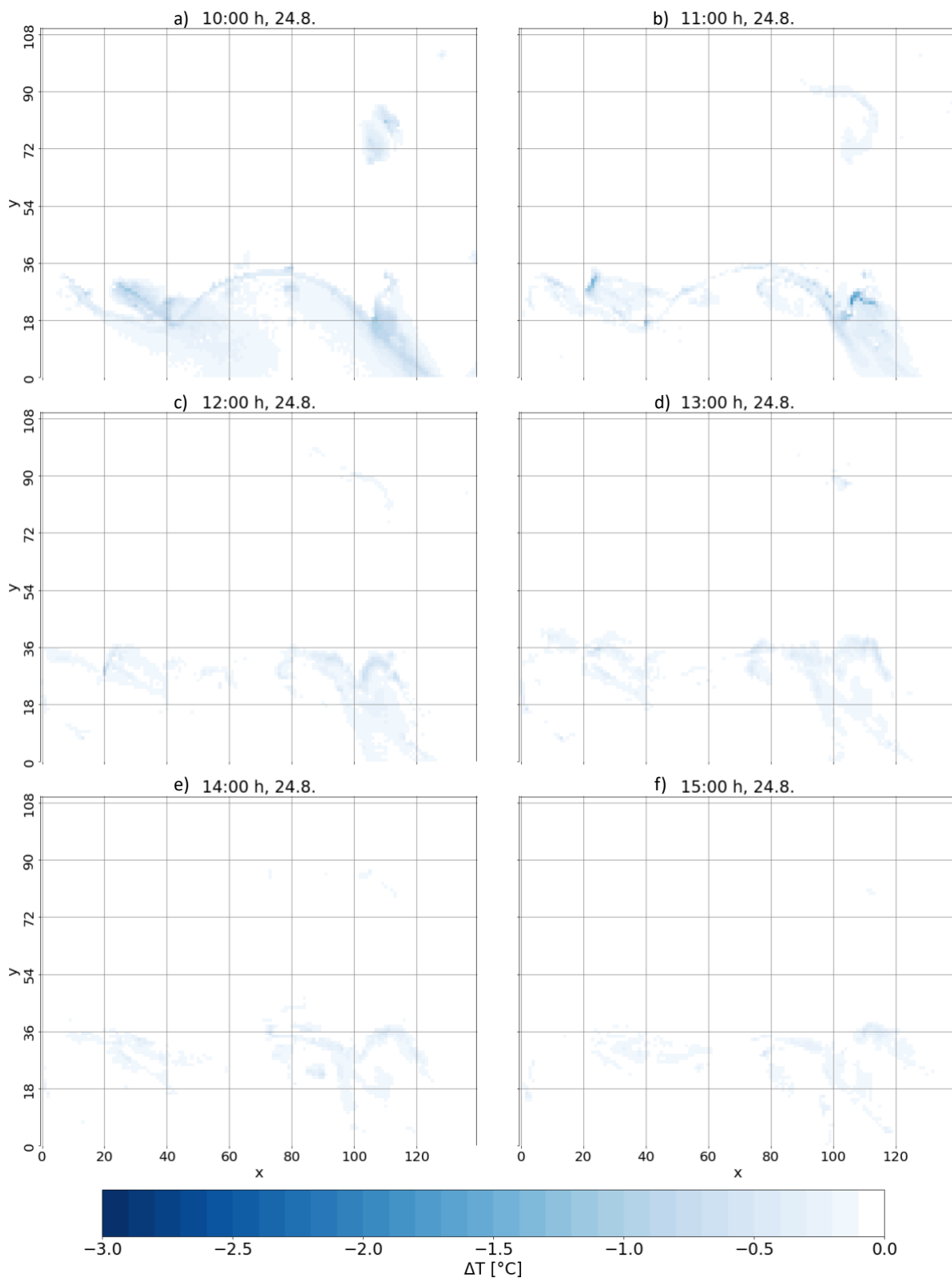
Slika D2 Temperatura zraka na 2 m visine dobivena modelom za hladne simulacije S22 i S24 kontrolnu simulaciju S26 te tople simulacije S28 i S30 u: a) 10 h, b) 11 h, c) 12 h, d) 13 h, e) 14 h i f) 15 h



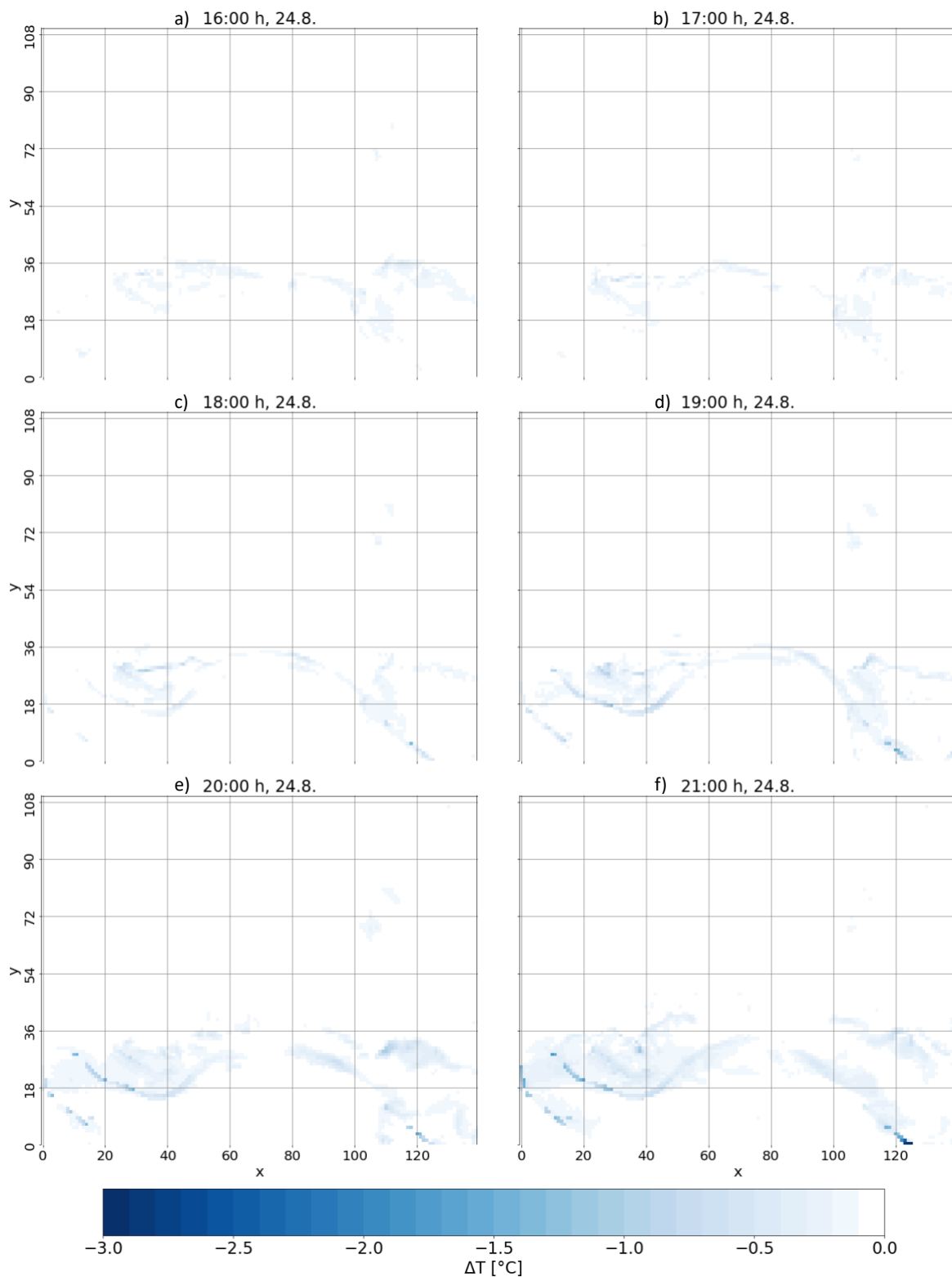
Slika D3 Temperatura zraka na 2 m visine dobivena modelom za hladne simulacije S22 i S24 kontrolnu simulaciju S26 te tople simulacije S28 i S30 u: a) 16 h, b) 17 h, c) 18 h, d) 19 h, e) 20 h i f) 21 h



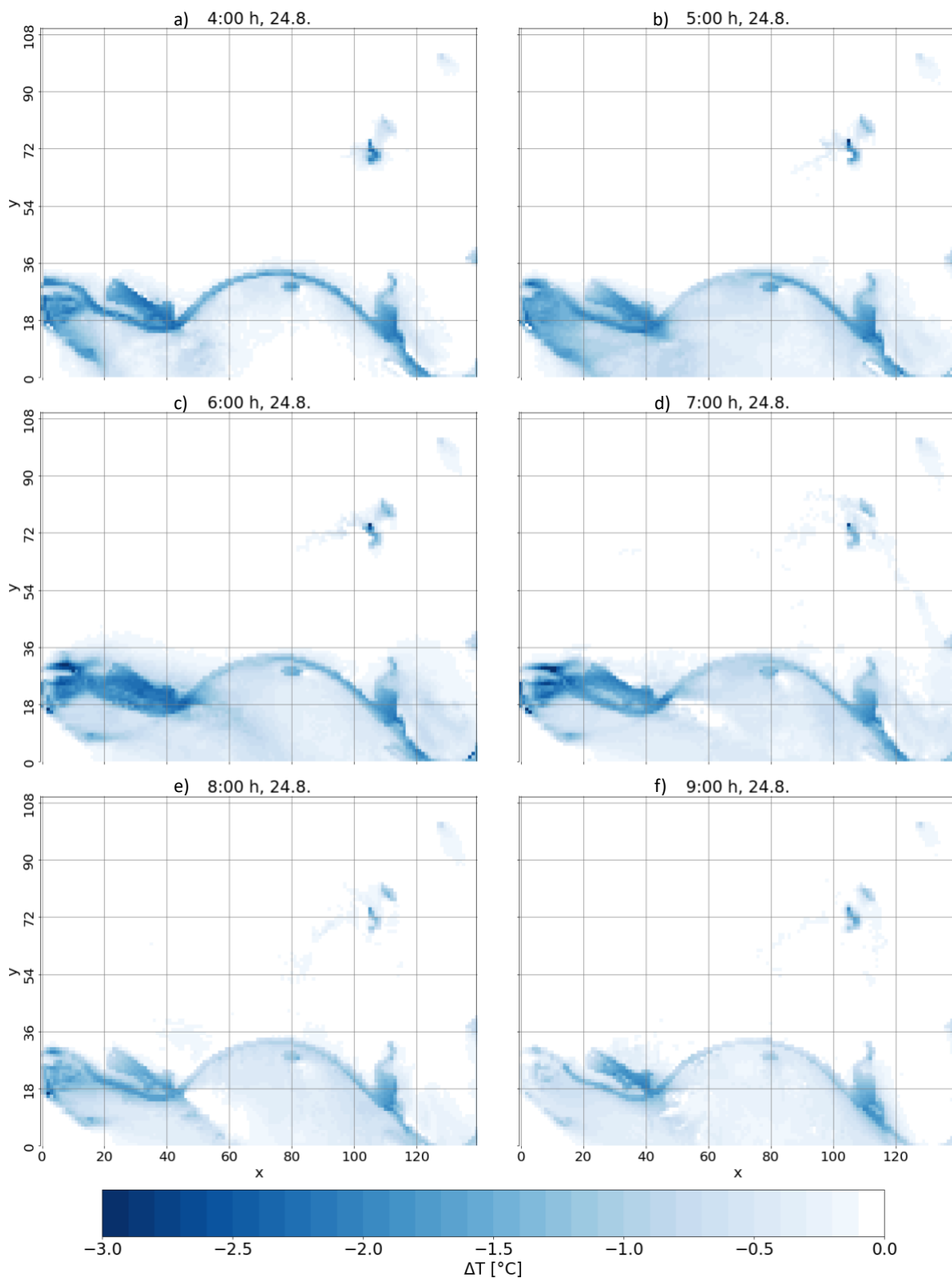
Slika D4 Razlika u temperaturi zraka na 2 m visine između hladne simulacije S24 i kontrolne simulacije S26 u: a) 4 h, b) 5 h, c) 6 h, d) 7 h, e) 8 h i f) 9 h



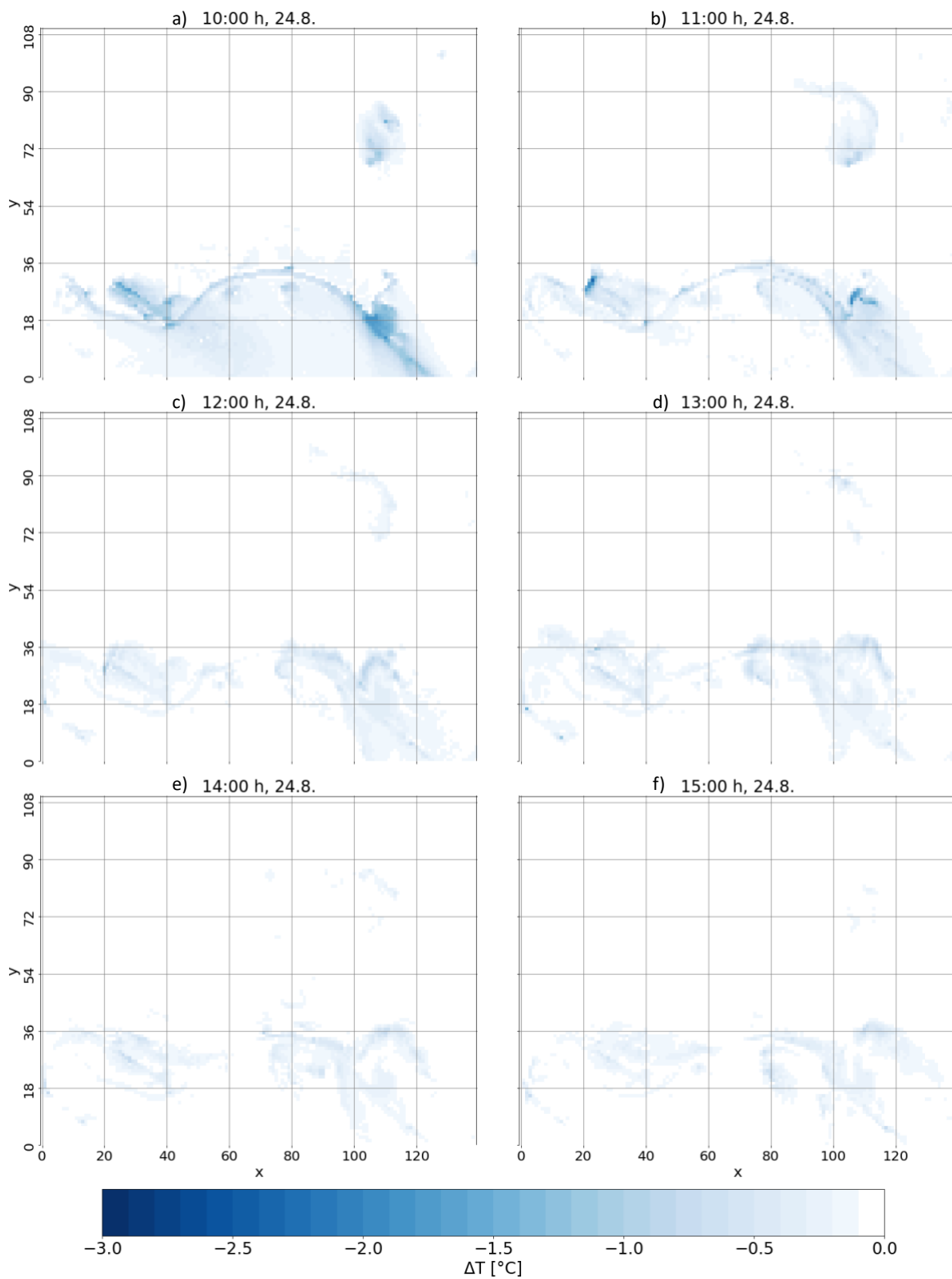
Slika D5 Razlika u temperaturi zraka na 2 m visine između hladne simulacije S24 i kontrolne simulacije S26 u: a) 10 h, b) 11 h, c) 12 h, d) 13 h, e) 14 h i f) 15 h



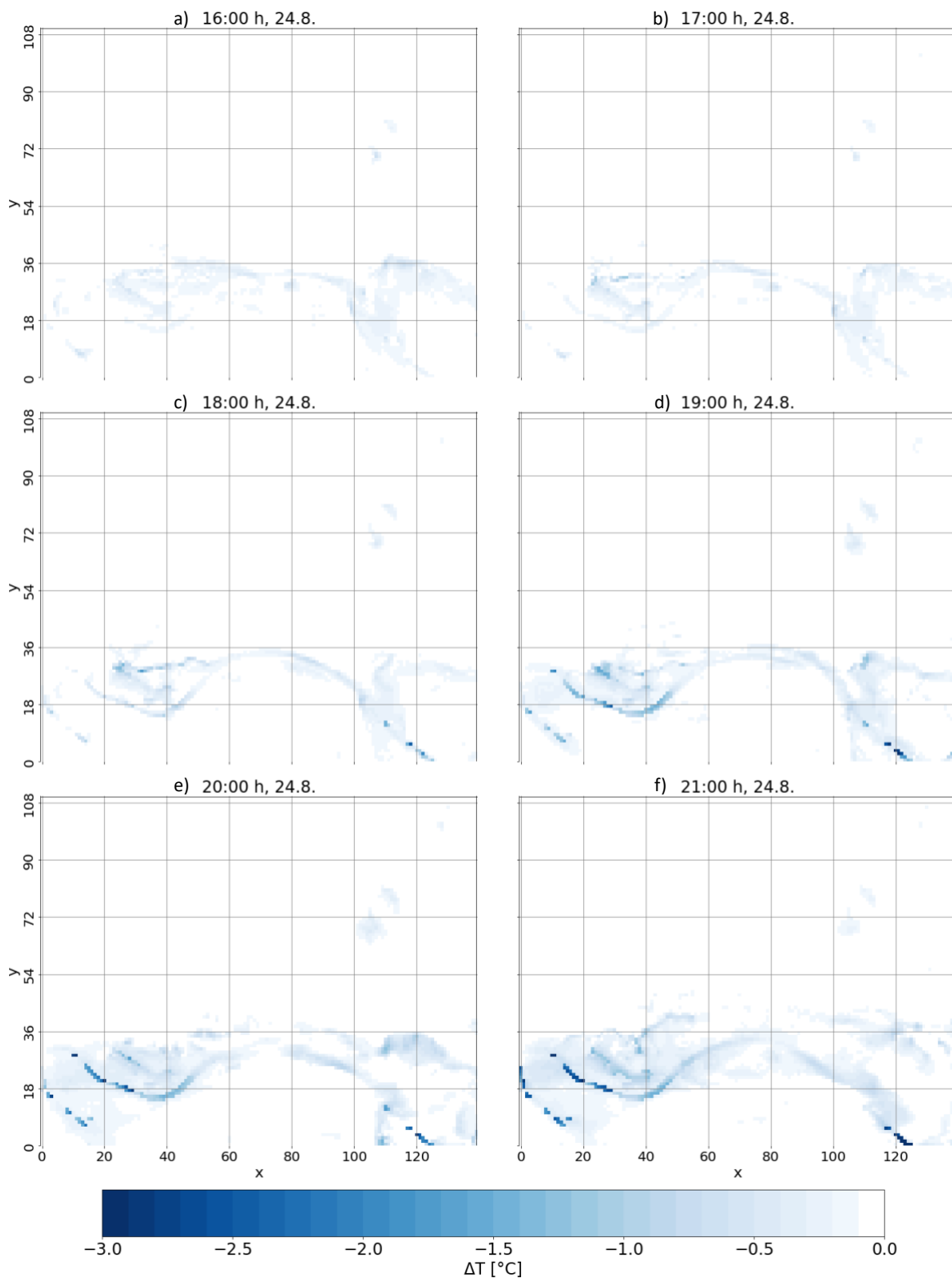
Slika D6 Razlika u temperaturi zraka na 2 m visine između hladne simulacije S24 i kontrolne simulacije S26 u: a) 16 h, b) 17 h, c) 18 h, d) 19 h, e) 20 h i f) 21 h



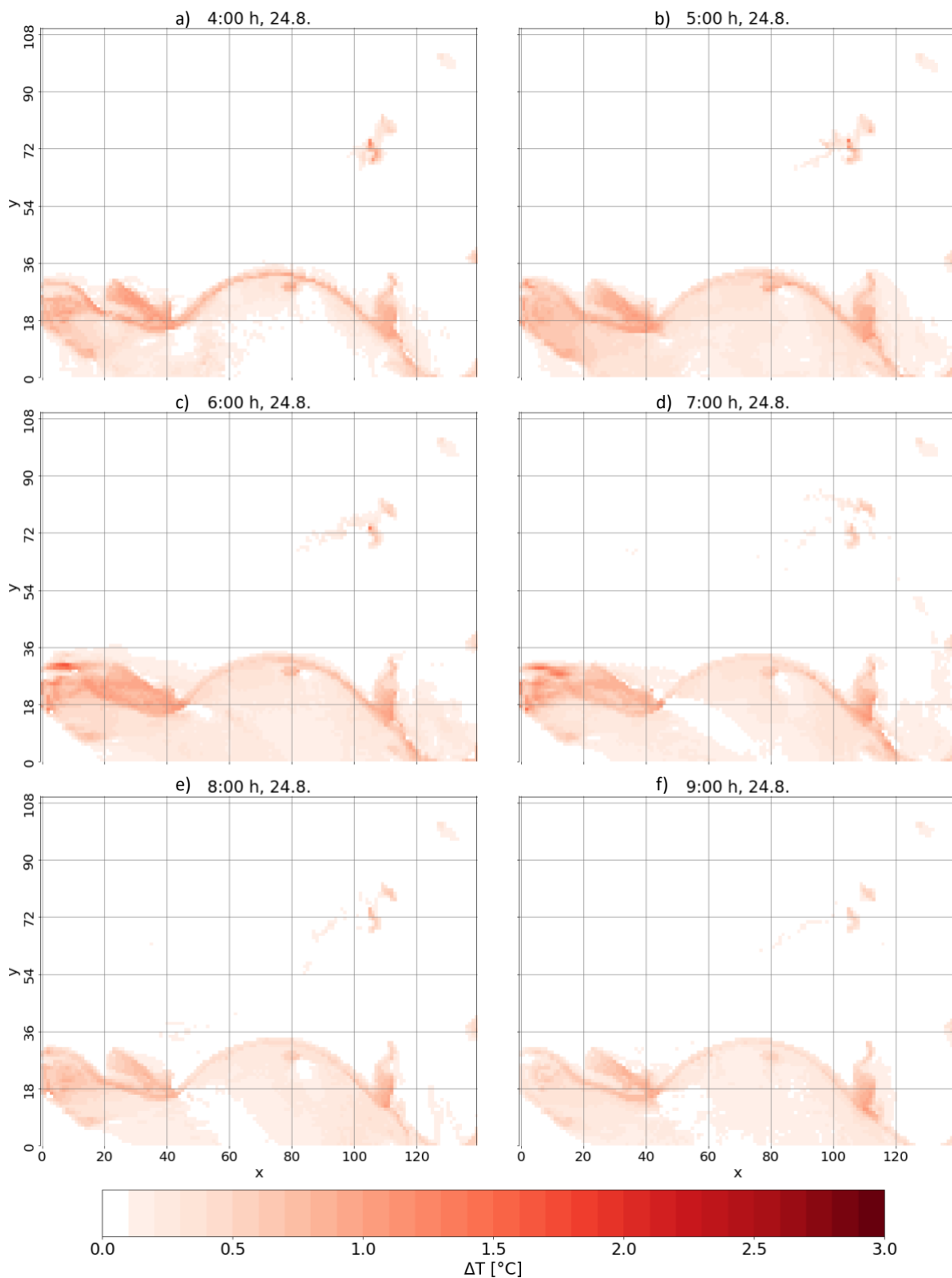
Slika D7 Razlika u temperaturi zraka na 2 m visine između hladne simulacije S22 i kontrolne simulacije S26 u: a) 4 h, b) 5 h, c) 6 h, d) 7 h, e) 8 h i f) 9 h



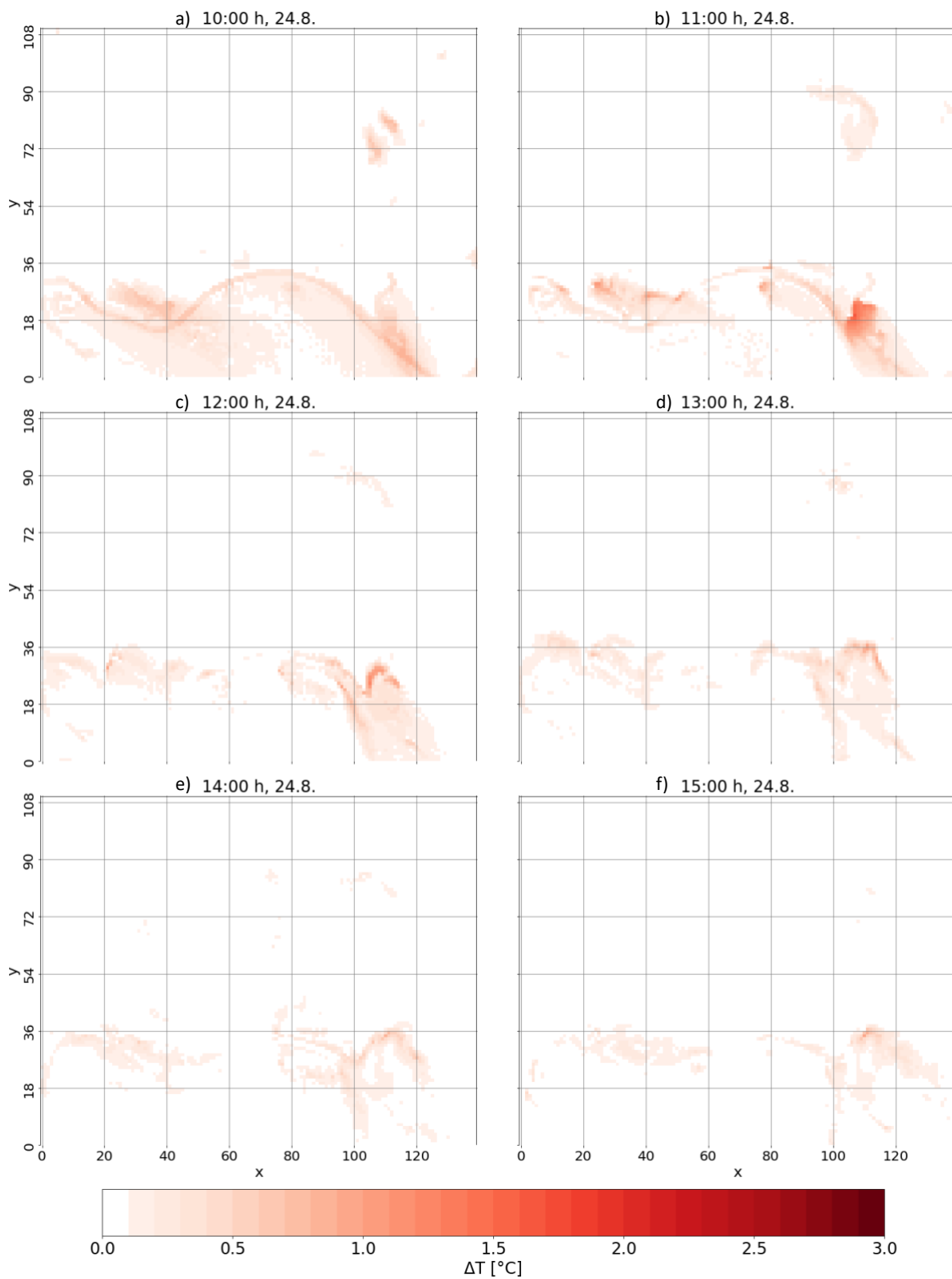
Slika D8 Razlika u temperaturi zraka na 2 m visine između hladne simulacije S22 i kontrolne simulacije S26 u: a) 10 h, b) 11 h, c) 12 h, d) 13 h, e) 14 h i f) 15 h



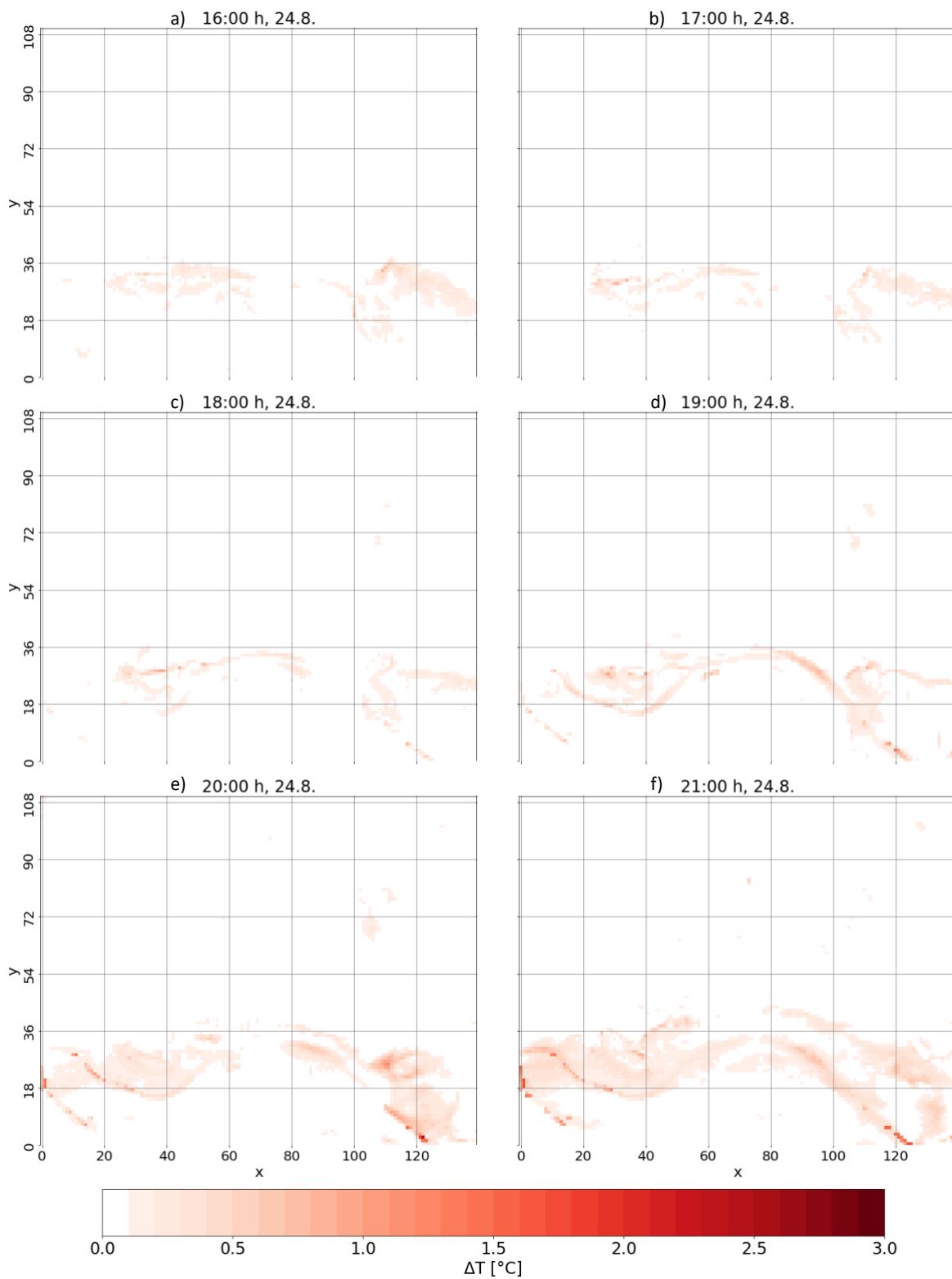
Slika D9 Razlika u temperaturi zraka na 2 m visine između hladne simulacije S22 i kontrolne simulacije S26 u: a) 16 h, b) 17 h, c) 18 h, d) 19 h, e) 20 h i f) 21 h



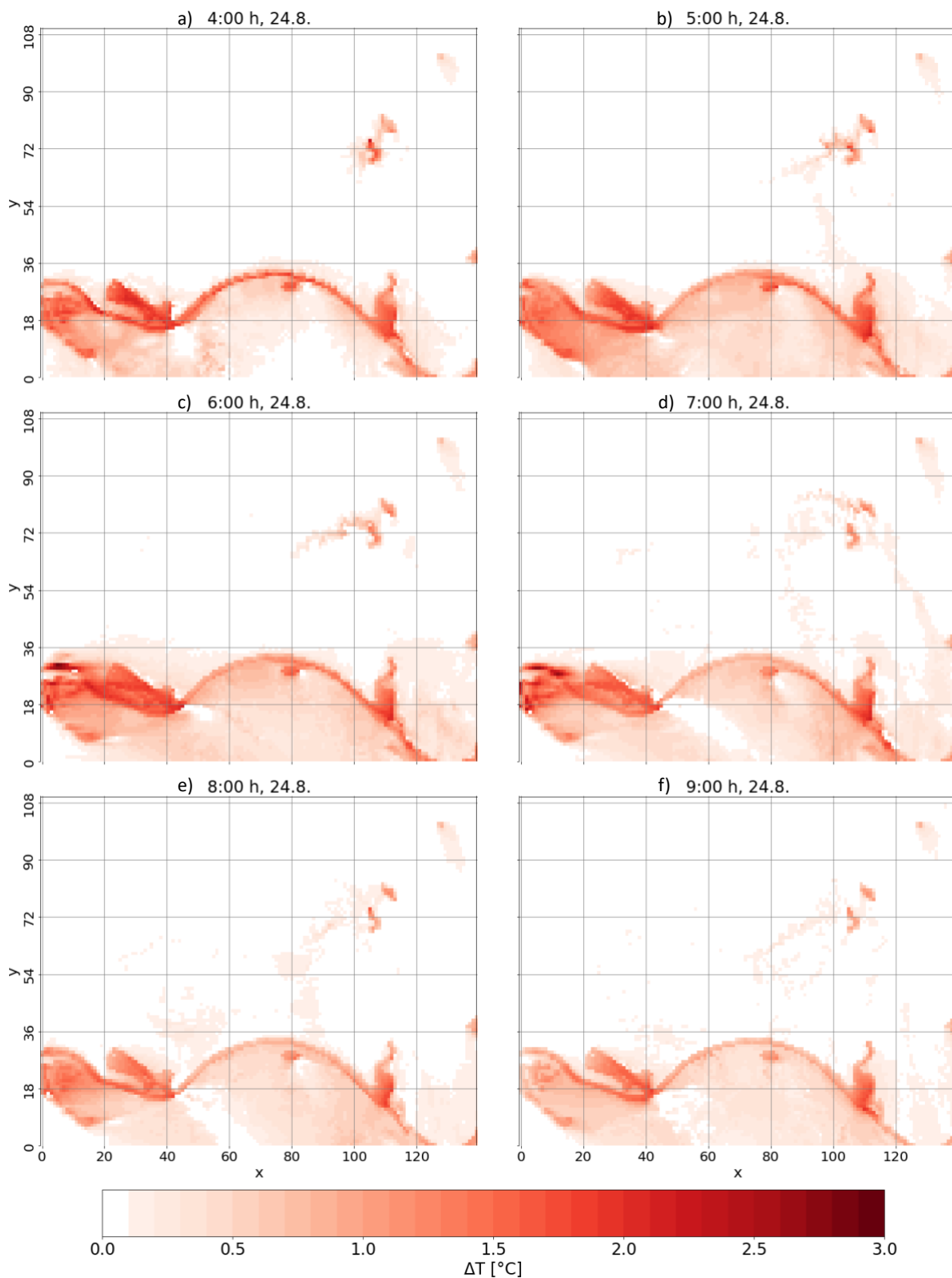
Slika D10 Razlika u temperaturi zraka na 2 m visine između tople simulacije S28 i kontrolne simulacije S26 u: a) 4 h, b) 5 h, c) 6 h, d) 7 h, e) 8 h i f) 9 h



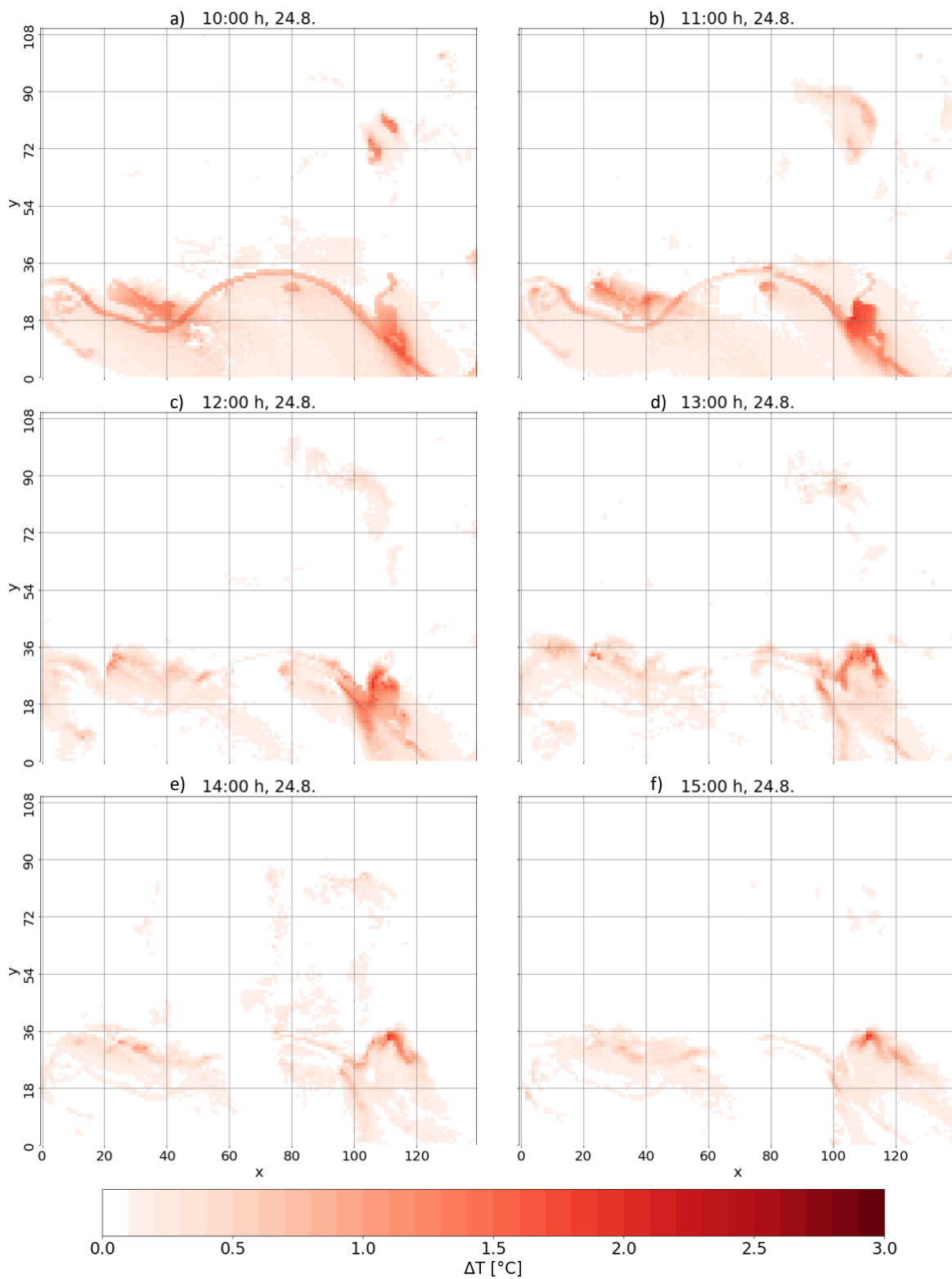
Slika D11 Razlika u temperaturi zraka na 2 m visine između tople simulacije S28 i kontrolne simulacije S26 u: a) 10 h, b) 11 h, c) 12 h, d) 13 h, e) 14 h i f) 15 h



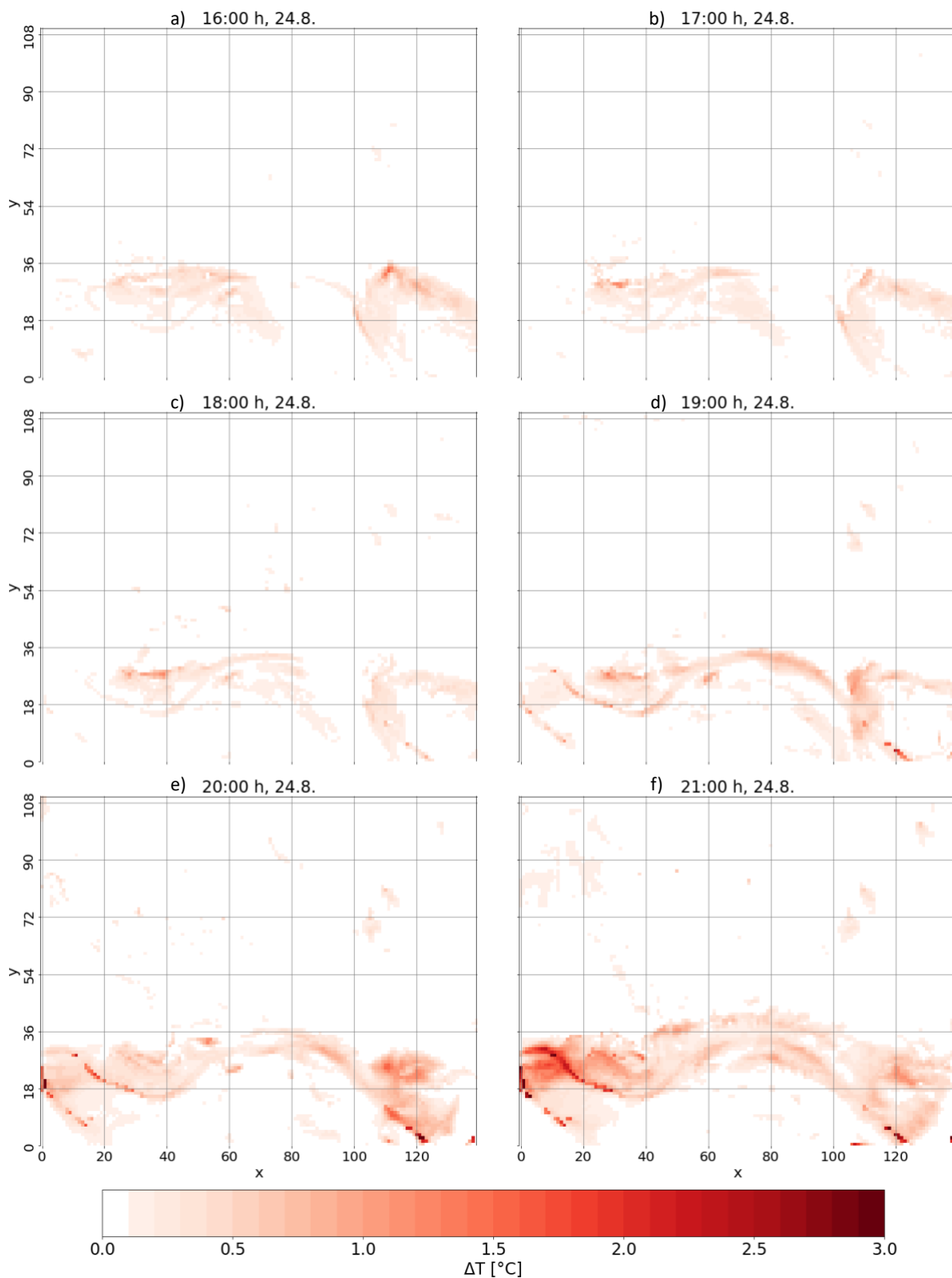
Slika D12 Razlika u temperaturi zraka na 2 m visine između tople simulacije S28 i kontrolne simulacije S26 u: a) 16 h, b) 17 h, c) 18 h, d) 19 h, e) 20 h i f) 21 h



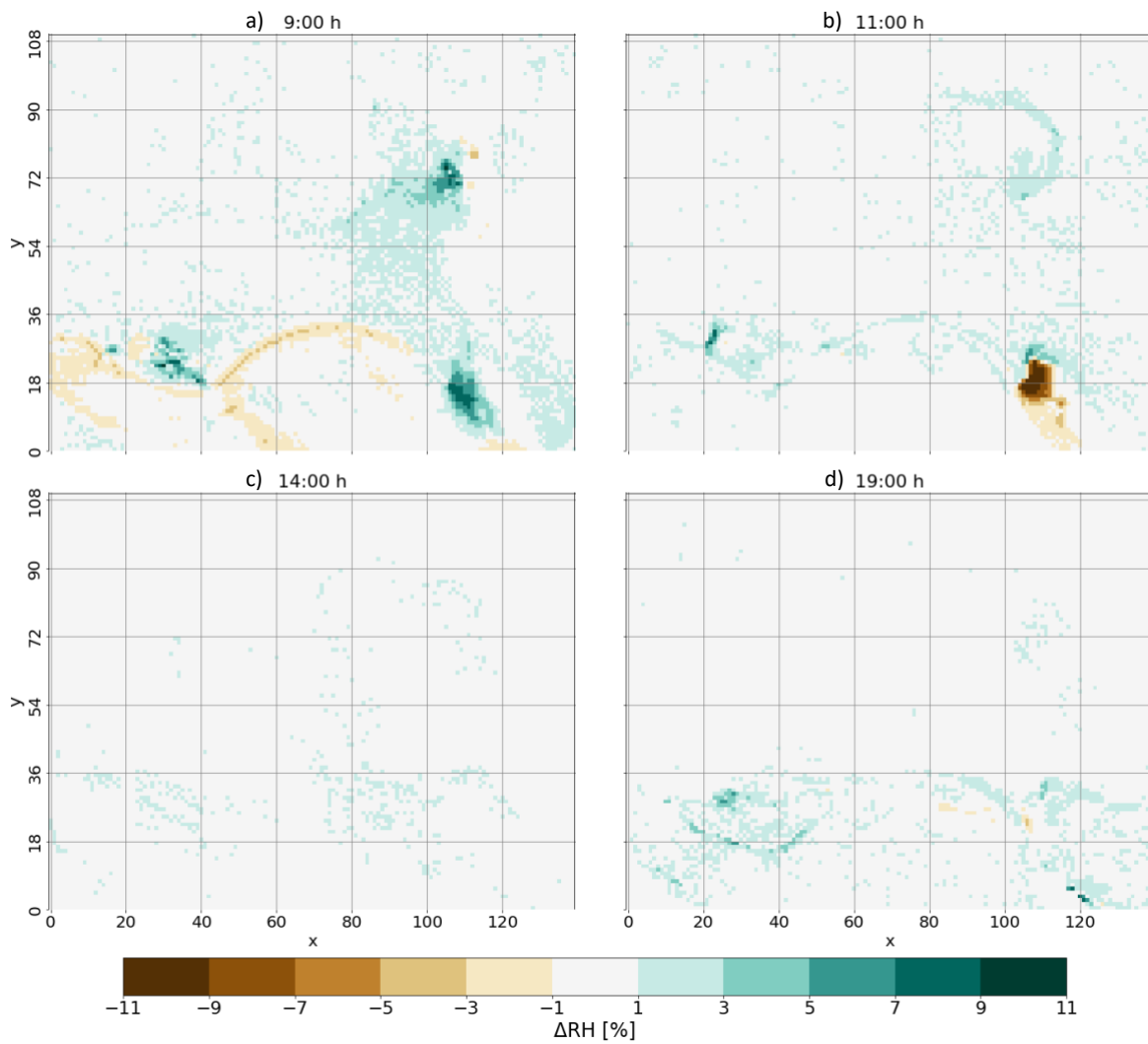
Slika D13 Razlika u temperaturi zraka na 2 m visine između tople simulacije S30 i kontrolne simulacije S26 u: a) 4 h, b) 5 h, c) 6 h, d) 7 h, e) 8 h i f) 9 h



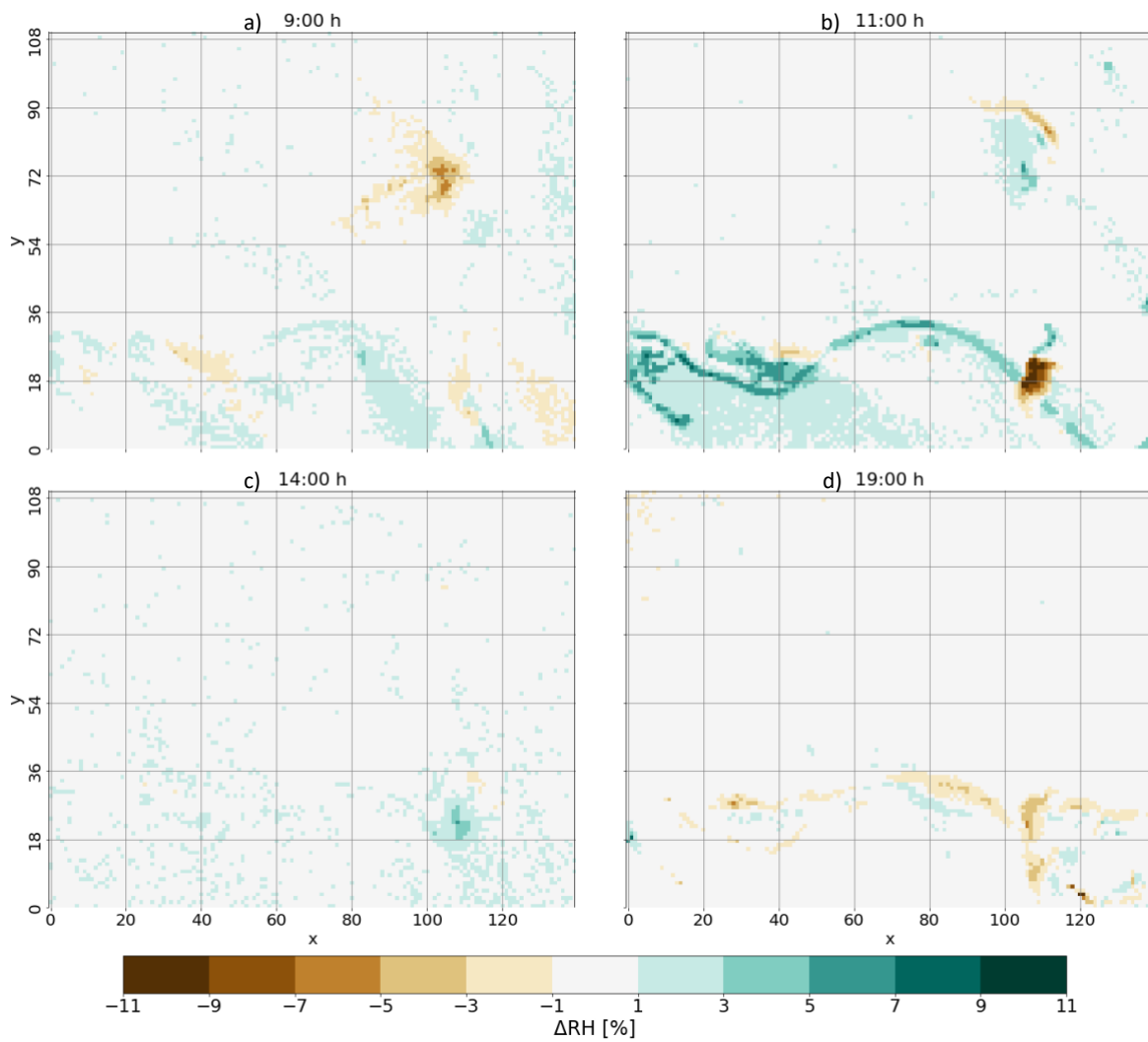
Slika D14 Razlika u temperaturi zraka na 2 m visine između tople simulacije S30 i kontrolne simulacije S26 u: a) 10 h, b) 11 h, c) 12 h, d) 13 h, e) 14 h i f) 15 h



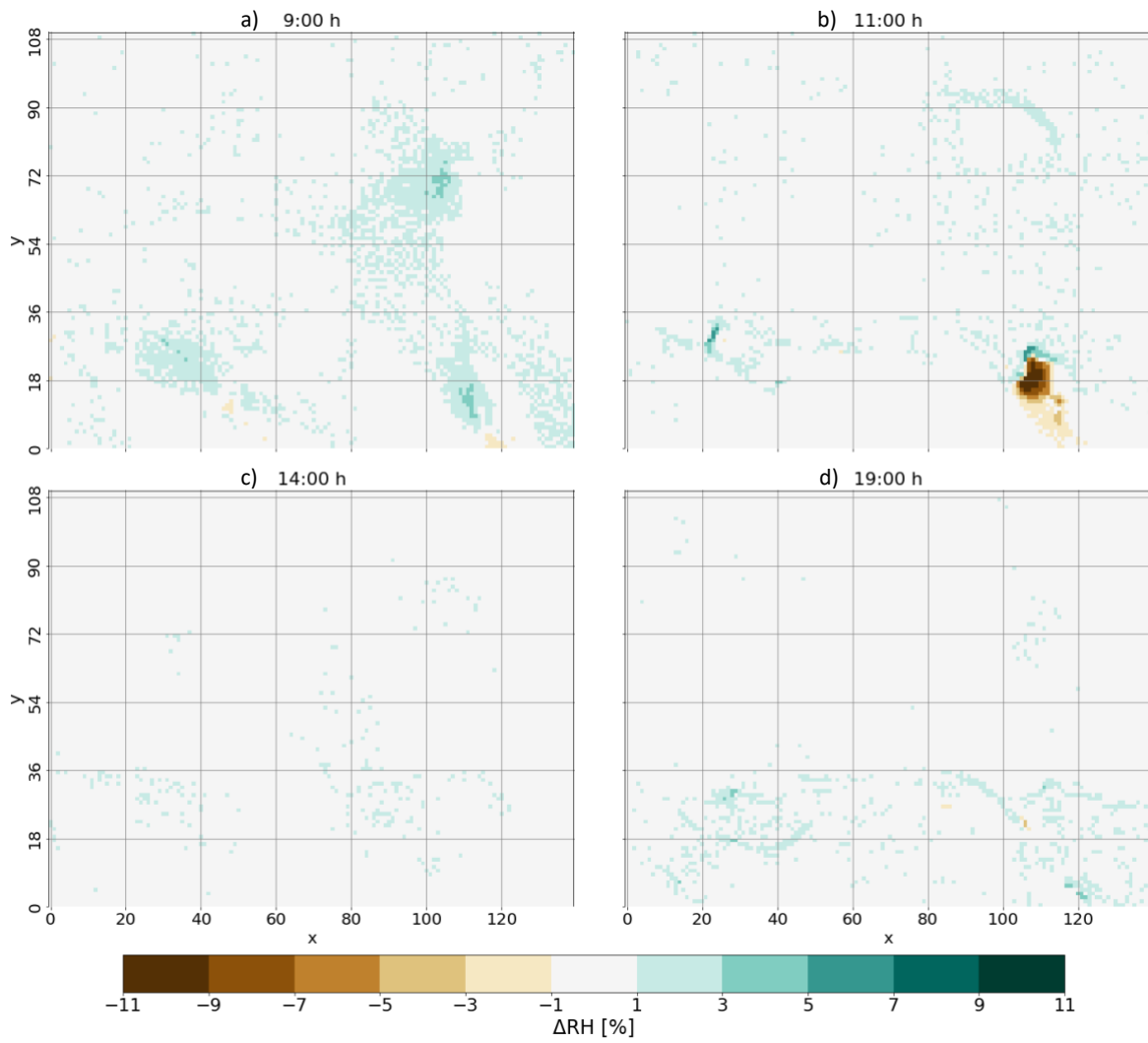
Slika D15 Razlika u temperaturi zraka na 2 m visine između tople simulacije S30 i kontrolne simulacije S26 u: a) 16 h, b) 17 h, c) 18 h, d) 19 h, e) 20 h i f) 21 h



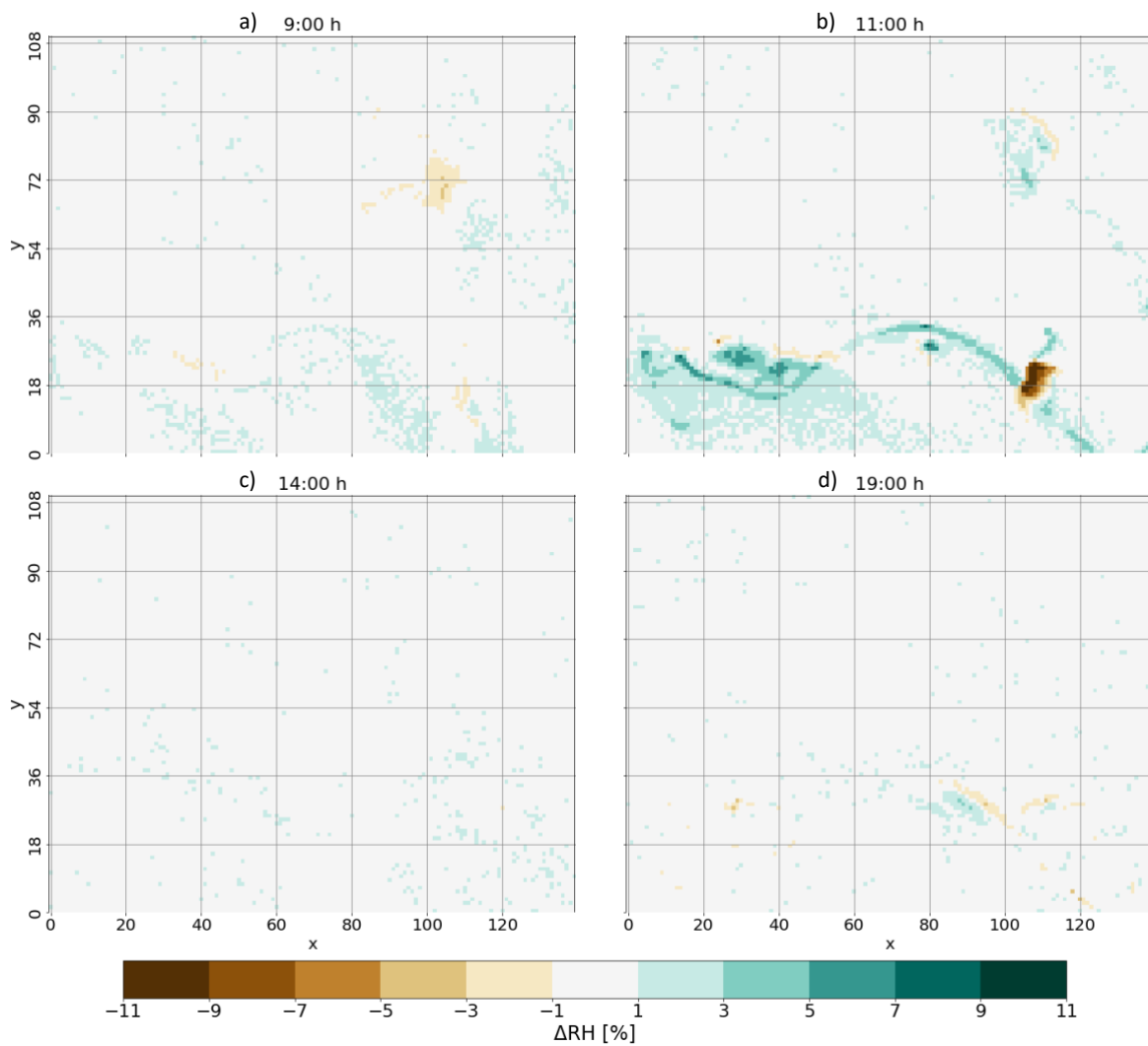
Slika D16 Razlika u relativnoj vlažnosti zraka na 2 m visine između hladne simulacije S22 i kontrolne simulacije S26 u: a) 9 h, b) 11 h, c) 14 h i d) 19 h



Slika D17 Razlika u relativnoj vlažnosti zraka na 2 m visine između tople simulacije S30 i kontrolne simulacije S26 u: a) 9 h, b) 11 h, c) 14 h i d) 19 h



Slika D18 Razlika u relativnoj vlažnosti zraka na 2 m visine između hladne simulacije S24 i kontrolne simulacije S26 u: a) 9 h, b) 11 h, c) 14 h i d) 19 h



Slika D19 Razlika u relativnoj vlažnosti zraka na 2 m visine između tople simulacije S28 i kontrolne simulacije S26 u: a) 9 h, b) 11 h, c) 14 h i d) 19 h

Literatura

- Ampatzidis, P. i Kershaw, T. (2020). A review of the impact of blue space on the urban microclimate. *Science of the Total Environment* (Vol. 730). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139068>
- Basu, R. i Samet, J. M. (2002). Relation between elevated ambient temperature and mortality: A review of the epidemiologic evidence. *Epidemiologic Reviews* (Vol. 24, Izdanje 2). <https://doi.org/10.1093/epirev/mxf007>
- Čačić, I., Dragojlović, D., Nikolić, D. (2012). *Meteorološki i hidrološki bilten 08/12*. <https://radar2.dhz.hr/~stars2/bilten/2012/bilten0812.pdf>
- Čačić, I., Pandžić, K., Likso, T., Hercigonja, D. (2012). *Praćenje i ocjena klime u 2012. godini*. https://klima.hr/razno/publikacije/prikazi/prikazi_24_12.pdf
- Domeisen, D. I. V., Eltahir, E. A. B., Fischer, E. M., Knutti, R., Perkins-Kirkpatrick, S. E., Schär, C., Seneviratne, S. I., Weisheimer, A., Wernli, H. (2023). Prediction and projection of heatwaves. *Nature Reviews Earth and Environment* (Vol. 4, Izdanje 1). <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00371-z>
- Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ). *Upozorenja na vrućine*. (n.d.). https://meteo.hr/prognoze.php?section=prognoze_specp¶m=toplinski_val_5&el=toplinski_val_opsirnije (pristupljeno 5. lipnja 2024.)
- Državni zavod za statistiku. *Procjena stanovništva Republike Hrvatske u 2022. godini* <https://podaci.dzs.hr/2023/hr/58063#:~:text=U%20Republici%20Hrvatskoj%2052%2C2.037%20ili%201%2C6%25>). (pristupljeno 13. lipnja 2024.)
- Früh, B., Becker, P., Deutschländer, T., Hessel, J. D., Kossmann, M., Mieskes, I., Namyslo, J., Roos, M., Sievers, U., Steigerwald, T., Turau, H., Wienert, U. (2011). Estimation of climate-change impacts on the urban heat load using an urban climate model and regional climate projections. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(1). <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2377.1>
- Gago, E. J., Roldan, J., Pacheco-Torres, R., Ordóñez, J. (2013). The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 25). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.057>

- Gunawardena, K. R., Wells, M. J., Kershaw, T. (2017). Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of the Total Environment*, 584–585. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.158>
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R. (2012). *Perception of climate change*. <https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.1205276109>
- Hollósi, B., Žuvela-Aloise, M., Oswald, S., Kainz, A., Schöner, W. (2021). Applying urban climate model in prediction mode—evaluation of MUKLIMO_3 model performance for Austrian cities based on the summer period of 2019. *Theoretical and Applied Climatology*, 144(3–4). <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03580-6>
- Hong, C., Qu, Z., Xu, W., Gu, Z. (2023). Study on water cooling island effects under different climatic conditions. *City and Built Environment*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s44213-022-00004-7>
- Hsu, A., Sheriff, G., Chakraborty, T., Manya, D. (2021). Disproportionate exposure to urban heat island intensity across major US cities. *Nature Communications*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22799-5>
- Jacobs, C., Klok, L., Bruse, M., Cortesao, J., Lenzholzer, S., Kluck, J. (2020). Are urban water bodies really cooling? *Urban Climate* (Vol. 32). <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100607>
- Jurčec, V. (1985). Lokalni režim vjetra na području Zagreba i planinska cirkulacija. *Geofizika 2*. http://geofizika-journal.gfz.hr/Vol_02/02-09-jurcec.pdf
- Klaić, Z. B., Nitis, T., Kos, I., Moussiopoulos, N. (2002). Modification of the local winds due to hypothetical urbanization of the Zagreb surroundings. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 79(1–2). <https://doi.org/10.1007/s703-002-8225-z>
- Kotteck, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3). <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Li, Y. Y., Zhang, H., Kainz, W. (2012). Monitoring patterns of urban heat islands of the fast-growing Shanghai metropolis, China: Using time-series of Landsat TM/ETM+ data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19(1). <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.05.001>
- Lončar, E. (1991). Statistička analiza inverzija i visine sloja miješanja na području Zagreba. *Hrvatski Meteorološki Časopis*, 26. <https://hrcak.srce.hr/file/102178>

- Massaro, E., Schifanella, R., Piccardo, M., Caporaso, L., Taubenböck, H., Cescatti, A., Duveiller, G. (2023). Spatially-optimized urban greening for reduction of population exposure to land surface temperature extremes. *Nature Communications*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38596-1>
- Masson, V., Lemonsu, A., Hidalgo, J., Voogt, J. (2020). Urban climates and climate change. *Annual Review of Environment and Resources* (Vol. 45). <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083623>
- Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou. (2021). IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Chemistry International* (Vol. 43, Izdanje 4). <https://doi.org/10.1515/ci-2021-0407>
- Nimac, I., Herceg-Bulić, I., Žuvela-Aloise, M., Žgela, M. (2021a). Impact of North Atlantic Oscillation and drought conditions on summer urban heat load - a case study for Zagreb. *International Journal of Climatology*, 42(9). <https://doi.org/10.1002/joc.7507>
- Nimac, I., Herceg-Bulić, I., Cindrić Kalin, K., Perčec Tadić, M. (2021b). Changes in extreme air temperatures in the mid-sized European city situated on southern base of a mountain (Zagreb, Croatia). *Theoretical and Applied Climatology*, 146(1–2). <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03689-8>
- Nimac, I., Herceg-Bulić, I., Žuvela-Aloise, M. (2022). The contribution of urbanisation and climate conditions to increased urban heat load in Zagreb (Croatia) since the 1960s. *Urban Climate*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101343>
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., Voogt, J. A.. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press, Cambridge
- Padmanaban, R., Bhowmik, A. K., Cabral, P. (2019). Satellite image fusion to detect changing surface permeability and emerging urban heat islands in a fast-growing city. *PLoS ONE*, 14(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208949>

- Ramamurthy, P., Li, D., Bou-Zeid, E. (2017). High-resolution simulation of heatwave events in New York City. *Theoretical and Applied Climatology*, 128(1–2). <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1703-8>
- Russo, S., Dosio, A., Graversen, R. G., Sillmann, J., Carrao, H., Dunbar, M. B., Singleton, A., Montagna, P., Barbola, P., Vogt, J. V. (2014). Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 119(22). <https://doi.org/10.1002/2014JD022098>
- Russo, S., Sillmann, J., Sterl, A. (2017). Humid heat waves at different warming levels. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07536-7>
- Salameh, M., Elkhazindar, A., Touqan, B. (2023). The effect of building height on thermal properties and comfort of a housing project in the hot arid climate of the UAE. *Frontiers in Built Environment*, 9. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1174147>
- Shi, H., Xian, G., Auch, R., Gallo, K., Zhou, Q. (2021). Urban heat island and its regional impacts using remotely sensed thermal data—a review of recent developments and methodology. *Land* (Vol. 10, Izdanje 8). <https://doi.org/10.3390/land10080867>
- Theeuwes, N. E., Solcerová, A., Steeneveld, G. J. (2013). Modeling the influence of open water surfaces on the summertime temperature and thermal comfort in the city. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118(16). <https://doi.org/10.1002/jgrd.50704>
- Volarić, B. (1999). Klasična teorija fena i njegova zemljopisna raspodjela. *Hrvatski Meteorološki Časopis*. <https://hrcak.srce.hr/file/100871>
- Wang, M., Xu, H. (2021). The impact of building height on urban thermal environment in summer: A case study of Chinese megacities. *PLoS ONE*, 16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247786>
- Wehrli, K., Guillod, B. P., Hauser, M., Leclair, M., Seneviratne, S. I. (2019). Identifying Key Driving Processes of Major Recent Heat Waves. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(22). <https://doi.org/10.1029/2019JD030635>
- Wilcox, L. J., Yiou, P., Hauser, M., Lott, F. C., van Oldenborgh, G. J., Colfescu, I., Dong, B., Hegerl, G., Shaffrey, L., Sutton, R. (2018). Multiple perspectives on the attribution of the extreme European summer of 2012 to climate change. *Climate Dynamics*, 50(9–10). <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3822-7>

- Yao, L., Sailor, D. J., Yang, X., Xu, G., Zhao, L. (2023). Are water bodies effective for urban heat mitigation? Evidence from field studies of urban lakes in two humid subtropical cities. *Building and Environment*, 245, 110860. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110860>
- Zaninović, K., Gajić-Čapka, M., Perčec Tadić, M., Vučetić, M., Milković, J., Bajić, A., Cindrić, K., Cvitan, L., Katušin, Z., Kaučić, D., Likso, T., Lončar, E., Lončar, Ž., Mihajlović, D., Pandžić, K., Patarčić, M., Srnec, L., Vučetić, V. (2008). *Klimatski atlas Hrvatske*. https://klima.hr/razno/publikacije/klimatski_atlas_hrvatske.pdf
- Žuvela-Aloise, M., Koch, R., Buchholz, S., Früh, B. (2016). Modelling the potential of green and blue infrastructure to reduce urban heat load in the city of Vienna. *Climatic Change*, 135(3–4). <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1596-2>