

Određivanje toplinskih parametara asfaltnih kolničkih konstrukcija inverznim postupkom

Cuculić, Marijana

Doctoral thesis / Disertacija

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:157:692911>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-22**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Marijana Cuculić

**ODREĐIVANJE TOPLINSKIH
PARAMETARA ASFALTNIH KOLNIČKIH
KONSTRUKCIJA INVERZNIM
POSTUPKOM**

DOKTORSKI RAD

Rijeka, 2021. godina

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Marijana Cuculić

**ODREĐIVANJE TOPLINSKIH
PARAMETARA ASFALTNIH KOLNIČKIH
KONSTRUKCIJA INVERZNIM
POSTUPKOM**

DOKTORSKI RAD

Mentor: Prof. dr.sc. Ivica Kožar

Komentor: Prof. dr.sc. Aleksandra Deluka Tibljaš

Rijeka, 2021. godina

**UNIVERSITY OF RIJEKA
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING**

Marijana Cuculić

**DETERMINATION OF THERMAL
PROPERTIES OF PAVEMENT
STRUCTURES BY INVERSE METHOD**

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2021. year

Mentor rada: Prof. dr.sc Ivica Kožar

Komentor rada: Prof. dr.sc. Aleksandra Deluka Tibljaš

Doktorski rad obranjen je dana _____ u/na
_____, pred povjerenstvom u sastavu:

1. _____
2. _____
3. _____
4. _____
5. _____

Zahvala

Provođenje istraživanja i pisanje ovog rada nesumnjivo je najteži i najizazovniji zadatak kojeg sam napravila. Međutim, sreća je gledati unatrag i prisjećati se svih osoba koje su mi proteklih godina pomogle na ovom putu.

Željela bih se zahvaliti svojem mentoru Prof.dr.sc. Ivici Kožaru i komentorici prof.dr.sc. Aleksandri Deluka Tibljaš na ukazanom povjerenju, razumijevanju, savjetima i svakodnevnim ohrabrivanjima tijekom izrade ovog rada.

Srdačno zahvaljujem kolegama i prijateljima na stvaranju poticajne radne sredine i nesebičnu pomoć u svim fazama izrade ovog rada.

Na više osobnoj razini željela bih se zahvaliti prijateljicama na jutarnjim kavama koje su pomogle da dan počne lakše. Hvala vam na svim razgovorima, filozofskim raspravama i inspirativnim razgovorima. Hvala vam na svojoj potpori, ohrabrenju i strpljenju. Hvala vam što vjerujete u mene čak i kada ja ne vjerujem u sebe. Hvala vam što ste me nesebično pratili na ovom putu.

Veliko hvala mojoj obitelji na ljubavi, bezuvjetnoj podršci i neizmjerljivoj vjeri u moj uspjeh.

I na kraju, najveću zahvalnost želim izraziti suprugu Goranu i mojim prekrasnim djevojčicama Sigrid i Idi na riječima podrške, strpljenju i razumijevanju zbog mojih čestih odsutnosti duhom i tijelom za vrijeme pisanja dokorskog rada. Hvala vam na borbi s promjenama mog raspoloženja i razdražljivošću s vremena na vrijeme. Hvala vam na izuzimanju od obiteljskih poslova kako bih ovo putovanje završila. Zbog toga što to ne bih mogla bez vas, ovaj rad posvećujem upravo vama.

SAŽETAK

Cilj ovog rada je razvoj numeričkog modela za izračun distribucije temperature u kolničkim konstrukcijama s obzirom na mjerene meteorološke podatke uz uvođenje nelinearnog koeficijenta prijenosa topline koji je funkcija temperaturne razlike kolnika i okolnog zraka. Prednost ovog modela je što isti izračunava toplinsko zračenje kolnika (toplinu vraćenu u okolni zrak) što je u važan dio procesa prijenosa topline kod „otvorenih“ prostora.

Tijekom perioda 2011. – 2012. godine vršena su preliminarna mjerenja temperatura površina različitih tipova površina kolnika uz praćenje meteoroloških parametara u svrhu utvrđivanja vrsta materijala koji doprinose nepovoljnim toplinskim uvjetima u gradovima.

Zatim, tijekom perioda 2013. – 2015. godine provedena su mjerenja temperatura površina asfaltnih kolnika koji su se u preliminarnim mjerenjima pokazali kao nepovoljni, a u velikoj mjeri su prisutni u gradovima. Mjerenja su obuhvatila i mjerenja sunčevog zračenja i meteoroloških parametara. Mjerenja su vršena u svrhu validacije i kalibracije parametara modela. Numerički model temelji se na nestacionarnoj diferencijalnoj jednadžbi diskretiziranoj metodom konačnih elemenata sa posebnim konačnim elementom toplinskog toka prema tlu. U radu je dokazano da je nelinearni koeficijent konvektivnog prijenosa topline, koji je ovisan o vremenu i temperaturnoj razlici kolnika i okolnog zraka, neophodan za opis ovakvog problema. Razvijeni model uključuje kalibraciju koeficijenta konvektivnog prijenosa topline s obzirom na lokalne meteorološke uvjete inverznim iterativnim postupkom.

Ključne riječi: temperatura kolnika, toplina zračenjem, koeficijent konvektivnog prijenosa topline, urbani kolnici, nelinearni koeficijent

SUMMARY

The aim of this paper is to develop a numerical model for calculating the temperature distribution in pavement structures with according to the measured meteorological data, with the introduction of a non-linear heat transfer coefficient which is a function of temperature difference between pavement and ambient air. Developed model calculates heat radiated from the pavement back in the air, which is an important part of the heat transfer process in the open air surfaces.

During the period 2011-2012, preliminary measurements of surface temperatures (different types of pavement materials) were performed with monitoring of meteorological parameters, in terms of determining the types of materials that contribute to the increased temperatures in cities.

During the period 2013-2015, the temperature of the asphalt surfaces, solar radiation and meteorological parameters were measured. The measurement was performed for the purpose of validation and calibration of model parameters. The mathematical model is based on a nonstationary differential equation, discretized by use of finite element method with a special finite element for heat flux towards the soil. It is proved that a nonlinear heat transfer, coefficient, which is a function of time and temperature difference between the pavement and the surrounding air, is necessary to describe this phenomena. The developed model includes heat transfer coefficient calibration for specific local conditions through the iterative inverse procedure.

Keywords: Pavement temperature, radiated heat, convective heat transfer coefficient, urban pavements, non-linear coefficient

SADRŽAJ

1. UVOD	3
1.1. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA	5
1.2. CILJ I HIPOTEZA ISTRAŽIVANJA.....	6
1.3. METODOLOGIJA I PLAN ISTRAŽIVANJA	6
1.4. ZNANSTVENI DOPRINOS DOKTORSKOG RADA.....	9
2. URBANI TOPLINSKI OTOCI	10
2.1. UČINCI URBANIH TOPLINSKIH OTOKA	11
2.2. STRATEGIJE ZA SMANJENJE EFEKTA URBANIH TOPLINSKIH OTOKA	18
3. PRIJENOS TOPLINE I TOPLINSKA SVOJSTVA MATERIJALA	27
3.1. VOĐENJE TOPLINE ILI KONDUKCIJA	28
3.2. PRIJENOS TOPLINE ILI KONVEKCIJA	29
3.3. TOPLINSKO ZRAČENJE ILI RADIJACIJA	31
3.4. TOPLINSKA SVOJSTVA MATERIJALA	39
3.4.1. <i>Toplinska vodljivost (eng. thermal conductivity)</i>	40
3.4.2. <i>Albedo i indeks sunčeve refleksije</i>	41
3.4.3. <i>Izračivost (emisivnost)</i>	43
3.4.4. <i>Specifični i volumetrijski toplinski kapacitet</i>	43
3.4.5. <i>Toplinska difuzivnost (eng. thermal diffusivity)</i>	45
4. MODELI ZA PRORAČUN TEMPERATURE KOLNIKA	47
4.1. ANALITIČKI MODELI	48
4.2. NUMERIČKI MODELI	49
4.3. EMPIRIJSKI MODELI	51
4.4. UTJECAJNI ČINITELJI	54
4.4.1. <i>Meteorološki parametri</i>	55
4.4.2. <i>Parametri kolnika</i>	66
5. ISTRAŽIVAČKI PRISTUP I METODOLOGIJA IN SITU MJERENJA	73
5.1. ISTRAŽIVANJA PROVEDENA 2011. GODINE.....	73
5.2. ISTRAŽIVANJA PROVEDENA 2012. GODINE.....	83
5.3. ISTRAŽIVANJA PROVEDENA U PERIODU OD 2013. – 2015. GODINE	86
5.3.1. <i>Opis polja</i>	87
5.3.2. <i>Uređaji i postupak mjerenja</i>	90
5.3.3. <i>Preliminarni rezultati provedenih mjerenja</i>	91

6.	NUMERIČKI MODEL PRIJENOSA TOPLINE U KOLNIČKIM KONSTRUKCIJAMA	95
6.1.	MODEL PRIJENOSA TOPLINE	95
6.2.	KOEFICIJENT KONVEKTIVNOG PRIJENOSA TOPLINE.....	99
6.3.	ANALIZA REZULTATA	102
6.3.1.	<i>Utjecaj meteoroloških parametara na temperaturu površine kolnika</i>	<i>102</i>
6.3.2.	<i>Odabir modela konvektivnog prijenosa topline.....</i>	<i>106</i>
6.3.3.	<i>Kalibracija modela</i>	<i>110</i>
6.3.4.	<i>Toplinsko ponašanje materijala kolnika</i>	<i>115</i>
6.4.	NUMERIČKI PRIMJERI	115
6.4.1.	<i>Mjerenja provedena u srpnju 2013. godine.....</i>	<i>116</i>
6.4.2.	<i>Mjerenja provedena u kolovozu 2013. godine</i>	<i>139</i>
6.4.3.	<i>Mjerenja provedena u srpnju 2015. godine.....</i>	<i>155</i>
6.4.4.	<i>Mjerenja provedena u kolovozu 2015. godine</i>	<i>174</i>
7.	ZAKLJUČAK I SMJERNICE ZA BUDUĆA ISTRAŽIVANJA	190
	LITERATURA.....	194

1. UVOD

Gradovi mogu biti nekoliko stupnjeva topliji od susjednih ruralnih područja, uglavnom zbog sunčeve energije koja se apsorbira i pohranjuje u urbani izgrađeni okoliš. Ovaj fenomen se naziva efekt urbanog toplinskog otoka (eng. urban heat island - UHI). Kolnici koji obično zauzimaju 30-45% kopnene površine u velikim gradovima, zbog smanjene sposobnosti refleksije, dolaznog sunčevog zračenja i povećanog toplinskog kapaciteta, značajno doprinose efektu urbanih toplinskih otoka (Gartland 2008).

Tijekom ljeta, povišene temperature površina i zraka mogu imati niz nepoželjnih učinaka na zdravlje i okoliš. Osim povišene temperature uzrokuju povećanu nelagodu ljudi a efekt urbanih toplinskih otoka povećava učestalost i intenzitet toplinskih valova, što može dovesti do smrtnosti. Efekt urbanih toplinskih otoka može značajno smanjiti kvalitetu zraka i formiranje prizemnog ozona. Različite studije procjenjuju da je u Los Angelesu efekt urbanih toplinskih otoka povećao razinu prizemnog ozona za više od 10%. To je u mnogim zemljama rezultiralo razvojem strategije za smanjenje efekta urbanih toplinskih otoka kao mjere za poboljšanje kvalitete zraka u planskoj dokumentaciji. Više temperature površina kolnika mogu narušiti kvalitetu otpadnih voda sa tih površina što uzrokuje toplinski šok ekosustava i narušava zdrav razvoj urbanog zelenila. Veliki negativni učinak efekta urbanih toplinskih otoka jest povećana potrošnja električne energije koja proizlazi iz upotrebe sustava za hlađenje kako bi se neutralizirali učinci povećane topline. Osim toga, povišene temperature površina kolnika mogu narušiti performanse ugrađenih materijala. Mnoge deformacije kolnika povezuju se s povećanim temperaturama ili fluktuacijama temperatura (Giguere 2009), (Doulos, Santamouris i Livada 2001), (Akbari, Pomerantz i Taha 2001), (Santamouris 2012).

Kao što je navedeno uočeni su mnogi nedostaci i negativni efekti povećanih temperatura u gradovima. Rezultat toga trebao bi biti da regulatorna tijela počnu vrednovati nove propise i poticaje u vidu korištenih materijala u urbanim sredinama.

Za razumijevanje problema urbanih toplinskih otoka, te kontrolu njihovog utjecaja na okoliš potrebna je sinteza sljedećih istraživanja:

- utjecaj materijala kolnika na površinske temperature i promjene temperatura ispod površine
- karakterizaciju materijala za kolnike u vidu toplinskih parametara i parametara zračenja
- laboratorijska i terenska ispitivanja toplinskih svojstava materijala kolnika
- modeliranje utjecaja urbanih toplinskih otoka na povećanje temperatura i razvoj korisnički orijentiranih alata za izračun i modeliranje utjecaja pojedinih konstrukcija i materijala na povećanje temperatura
- ocjenjivanje utjecaja urbanih toplinskih otoka na utrošak energije
- ocjenjivanje utjecaja urbanih toplinskih otoka na kvalitetu zraka i zdravlje ljudi
- ispitivanje novih mjera i proizvoda kao dio strategije za umanjene efekta urbanih toplinskih otoka.

U svrhu gore navedenih točaka 1, 2 i 4 u ovom radu je načinjeno istraživanje utjecaja materijala kolnika na površinske temperature i promjene temperatura ispod površine, te je razvijen model za izračun distribucije temperature u kolničkim konstrukcijama s obzirom na mjerene meteorološke podatke uz uvođenje nelinearnog koeficijenta prijenosa topline koji je funkcija temperaturne razlike kolnika i okolnog zraka.

1.1.Pregled dosadašnjih istraživanja

Temperatura kolnika definirana je kao promjena površinske temperature tijekom vremena u međudjelovanju s meteorološkim parametrima. Naime, temperatura kolnika ovisi o meteorološkim parametrima, a na neke od njih opet utječe materijal kolnika, toplinska vodljivost, toplinska emisivnost, specifična toplota i površinska konvekcija. Metode i modeli za predviđanje temperatura kolnika neprestano se razvijaju, a novija istraživanja obuhvaćaju razvoj nemričkih modela za predviđanje temperatura u slojevitom sustavu asfaltnih kolnika (Khan, Islam i Tarefder 2019), (Wang, Roesler i Guo 2009). Numeričke

metode uključuju i stvarne (promjenjive u vremenu) klimatske parametre u rubne uvjete (Chen, Li, i dr. 2014).

Meteorološki parametri (rubni uvjeti) utječu na temperaturu kolnika kroz promjenu energije na površini kolnika. Točna ocjena prijenosa topline uslijed meteoroloških parametara je vrlo važna za preciznost predviđanja temperature kolnika. U nekim modelima, mjereno sunčevo zračenje se koristi kao rubni uvjet (Wang, Roesler and Guo 2009), (Wang and Roesler 2014), (Alavi, Pouranian and Hajj 2014), (Hermansson 2004), (Chen, Wang and Zhu 2017), (Wang and Roesler 2012), (Han, Jin and Glover 2011), (Gui, et al. 2007), dok se u pojedinim modelima sunčevo zračenje izračunava empirijskim jednadžbama (Dempsey and Thompson 1970), (Li, Harvey and Jones 2014), (Nuijten 2016), (Mrawira and Luca 2002), (Y. Qin 2015), (Huang, et al. 2017).

Konvektivni toplinski koeficijent izračunava se empirijskim izrazima ovisnim o temperaturnoj razlici zraka i površine kolnika i/ili brzini vjetra. Najprikladnijim su se pokazali tzv. Vehrencampovi modeli koji uključuju i temperaturu razliku i utjecaj vjetra. Utjecaj vjetra uvodi se koeficijentom konvektivnog prijenosa topline (Solaimanian and Kennedy 1993), (Hermansson 2000), (Dempsey and Thompson 1970), (Mrawira and Luca 2002), (Hermansson 2001), (Hermansson 2004), (Teltayev and Aitbayev 2015), (Minhoto, et al. 2005), (Ho and Romero 2009), (Han, Jin and Glover 2011).

Iako je utjecaj različitih parametara istraživao, još uvijek postoje ograničenja koja se mogu poboljšati. Pojedini modeli za izračun prijenosa topline uslijed meteoroloških parametara koriste određene empirijske parametre koji mogu imati različite vrijednosti u različitim lokacijskim uvjetima. Međutim, kalibracija parametara često izostaje (Solaimanian and Bolzan 1993). Istraživanja jasno ukazuju da još uvijek ne postoji jasan stav koji od meteoroloških parametara ima najveći utjecaj na temperaturu kolnika. Razlog tome je međusobna ovisnost meteoroloških parametara te iz navedenog nije moguće kvantificirati i unificirati utjecaj meteoroloških parametara na temperaturu kolnika bez njihove međuovisnosti.

U ovom radu je predložen model u kojem je uveden nelinearni koeficijent konvektivnog prijenosa topline koji u sebi sadrži sve utjecajne činitelje, upravo kako bi se obuhvatili svi utjecajni parametri i otklonio nedostatak utvrđivanja utjecaja pojedinih parametara na

temperaturu kolnika. Također su vršena mjerenja meteoroloških parametara (temperature zraka, sunčevog zračenja i brzine vjetera) koji predstavljaju rubne uvjete u modelu predikcije temperature kolnika.

1.2. Cilj i hipoteza istraživanja

Cilj ovog doktorskog rada je istražiti i analizirati utjecaj asfaltnih kolničkih konstrukcija i meteoroloških parametara na temperaturu površine kolnika, te odrediti mjeru utjecaja na temperaturu okolnog zraka. Asfalt se u svim okolnostima pokazao kao najnepovoljniji materijal u smislu toplinskih svojstava. Povećanje temperature u urbanim područjima može se predvidjeti numeričkim modelom, a koji se temelji na zakonitostima širenja topline u materijalima te karakteristikama materijala, uzimajući u obzir stvarne vremenske uvjete. Cilj ovog rada je razvoj numeričkog modela za izračun distribucije temperature u kolničkim konstrukcijama s obzirom na mjerene meteorološke parametre uz uvođenje nelinearnog koeficijenta prijenosa topline.

Iz prethodnih istraživanja i pregleda stanja područja utvrđeni su nedostaci pojedinih postojećih metoda temeljem čega je definirana hipoteza ovog rada:

- nelinearni koeficijent konvektivnog prijenosa topline je funkcija vremena i temperaturne razlike zraka i površine kolnika i nužan je za numeričku simulaciju prijenosa topline kroz kolnik, te povratnog prijenosa topline u okolinu
- utjecaj temperaturne razlike zraka i površine kolnika je veći od utjecaja brzine vjetera
- koeficijent konvektivnog prijenosa topline neophodno je kalibrirati na specifične lokalne meteorološke uvjete.

1.3. Metodologija i plan istraživanja

Ponašanje kolničkih konstrukcija pod utjecajem zagrijavanja pokušali su simulirati mnogi znanstvenici u svojim radovima. Provedene su različite studije kako bi se interpretiralo nastajanje urbanih toplinskih otoka u različitim klimatskim uvjetima (Arnfield 2003).

Niz autora prikazao je broj, odnosno, gustoću stanovništva kao utjecajan faktor za nastajanje urbanih toplinskih otoka (T. Oke 1973), (Stone i Norman 2006), (Yamashita, i dr. 1986), (Yamashita i Sekine 1990/1991), (Memon, Leung i Chunho 2008).

Određeni autori u obzir uzimaju geometrijski utjecaj urbanog projektiranja i faktor vidljivosti neba te izvore antropogene topline (Sailor i Lu 2004), (Offerle, Grimmond i Fortuniak 2005), (Simmonds i Keay 1997), (Ichinose, Shimodozono i Hanaki 1999), (Taha 1997), (Weng i Yang 2004), (Yamashita, i dr. 1986), (Unger 2009), (Blankenstein i Kuttler 2004), (Jusuf i Hien 2009), (Yamashita i Sekine 1990/1991), (Wong, i dr. 2008), (T. Oke 1988).

Manji dio istraživača bavio se utjecajem toplinskih svojstava materijala na nastajanje urbanih toplinskih otoka (Sarrat, i dr. 2006), (Wong, i dr. 2008), (King Johnson i Davies 2007), (Offerle, Grimmond i Fortuniak, i dr. 2006), (Yamashita i Sekine 1990/1991), (Asaeda, Ca i Wake 1996), (Alonso, Labajo i Fridalgo 2003), (Lai i Cheng 2009). Kroz ova istraživanja najčešće su korelirani meteorološki podaci s podatkom o zauzetosti površina (izgrađeno – neizgrađeno, urbanizirano – neurbanizirano). Manji dio istraživača pokušao je povezati sama svojstva materijala sa nastajanjem urbanih toplinskih otoka. Najčešći parametri uzimani u obzir su boja ugrađenog materijala, tekstura površine i refleksivnost površine.

U ovome radu će se dati pregled toplinskih svojstava materijala koja doprinose razvoju urbanih toplinskih otoka. Koristiti će se prikupljeni mjereni podaci temperatura preliminarnih istraživanja provedenih u gradu Rijeci i podaci mjerenja sa ispitnog polja (uz podatke sa postojeće meteorološke postaje na istoj lokaciji - temperatura zraka, vlažnost zraka, podaci o oborinama, smjer i brzina vjetra).

Materijali koji se uobičajeno koriste u urbanim područjima, kao što su asfalt i beton, imaju značajno različita toplinska i optička svojstva od okolnih ruralnih područja. Da bi se razumio uzrok razvoja urbanih toplinskih otoka i pronašlo rješenje za ublažavanje njihovog utjecaja, potrebno je ispitati optička i toplinska svojstva uobičajeno korištenih materijala u urbanim područjima.

U cilju utvrđivanja potencijalno povoljnih materijala za korištenje na kolničkim površinama u urbanim sredinama tijekom ljeta 2011. i 2012. godine provedeno je na prostoru užeg centra grada u Rijeci opsežno ispitivanje temperatura ugrađenih materijala. Tijekom ljeta 2011. godine mjerenja su provedena na različitim vrstama materijala kolničke površine

(asfalt, beton, granitne kocke, kamen), bojanim površinama (beton bojan različitim bojama) te na površinama različite namjene (pješačke površine, vozne trake, parkiralište). Cjelokupno istraživanje je obuhvaćalo ukupno 40 mjernih točaka (17 na kamenim površinama, 13 na asfaltnim površinama, 9 na betonskim površinama i 1 unutar zelene površine). Tijekom ljeta 2012. godine mjerenja su vršena na ukupno 32 mjerne točke, od čega je 11 točaka obuhvaćeno i 2011. godine. Kroz objavljene radove je prikazana analiza rezultata mjerenja različitih vrsta materijala u različitim uvjetima osunčanosti. Kako su preliminarno izvršena mjerenja pokazala da boja materijala (primjerice asfalta) utječe na njegovo zagrijavanje kod mjerenja je variran i ovaj element. Kroz navedenu analizu nastojalo se utvrditi osjetljivost pojedinog materijala na sunčevo zračenje te izmjeriti razlike između temperatura zraka i kolničkih površina. Rezultat preliminarnih istraživanja je određivanje materijala koji ima najveći utjecaj na zagrijavanje okolnog zraka, na kojem će biti fokus u daljnjoj analizi.

Tijekom ljeta 2013. godine ispitivanje je provedeno na ispitnom polju izvan centra grada u drugačijim uvjetima: bez utjecaja prometa i na području različitih mikroklimatskih uvjeta od onih u samom centru grada. Vršena su mjerenja temperature površina asfaltnih kolničkih konstrukcija i temperature podloge. Također su prikupljeni podaci o meteorološkim uvjetima sa iste lokacije.

Na osnovu analiza izmjerenih podataka razvit će se numerički model za izračun distribucije temperature u kolničkim konstrukcijama s obzirom na mjerene meteorološke podatke uz uvođenje nelinearnog koeficijenta prijenosa topline.

Na taj način, poznavanjem podataka o otpuštenoj toplini, može se definirati primjenjivost određenih materijala kolničkih konstrukcija u urbanim sredinama. Dobiveni rezultati omogućiti će analizu prostora te mogućnost evidentiranja lokacija i pridruženih materijala za ugradnju. Model će se odnositi na asfaltne kolničke konstrukcije koje predstavljaju dominantan tip kolničkih površina kako voznih tako i pješačkih.

1.4. Znanstveni doprinos doktorskog rada

Rezultati ovog istraživanja omogućiti će proširenje saznanja i bolje razumijevanje ponašanja asfaltnih kolničkih konstrukcija u uvjetima zagrijavanja. Razvoj numeričkog modela omogućiti će predviđanje ponašanja kolničkih konstrukcija u uvjetima zagrijavanja, a uz izvjesne korekcije model će se moći primijeniti i na druge vrste kolničkih konstrukcija. Cilj definiranja modela su izlazni podaci pomoću kojih bi se mogle razviti preporuke za utvrđivanje potencijalno povoljnih materijala za korištenje na kolničkim konstrukcijama u urbanim sredinama.

Izvorni znanstveni doprinos ovog doktorskog rada ogleda se u:

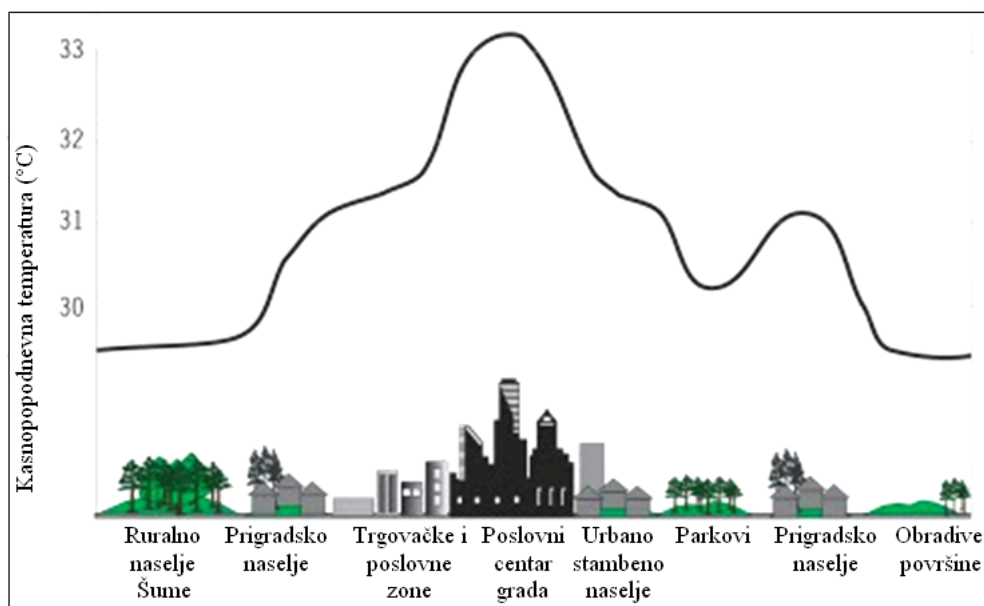
- razvoju numeričkog modela koji omogućava predviđanje ponašanja asfaltnih kolničkih konstrukcija izloženih zagrijavanju (prijenos u tlo, zračenje) uzimajući u obzir meteorološke uvjete (zračenje, temperatura zraka, vjetar, oborine)
- predloženom inetrznom numeričkom postupku za određivanje koeficijenta konvektivnog prijenosa topline kojim je definirana međuovisnost meteoroloških utjecaja iz mjerenih podataka
- bazi mjerenih podataka koja služi za daljnja istraživanja
- predloženom postupku kalibracije parametara modela za pojedino klimatsko područje

2. URBANI TOPLINSKI OTOCI

Prvi zapis urbanih toplinskih otoka pojavljuje se 1818 godine kada je Luke Howard u studiji provedenoj za grad London uvidio višak topline u gradu u odnosu na ruralno područje (Howard 1833).

Slična otkrića tijekom druge polovice 19. stoljeća dokumentirao je Emilien Renou u Parizu (Renou 1855), (Renou 1862), (Renou 1968), a početkom 20. stoljeća Wilhelm Smidth u Beču (Smidth 1917), (Smidth 1929). Studije na temu toplinskih otoka u SAD-u započinju u prvoj polovici 20. stoljeća (Mitchell 1953), (Mitchell 1961).

U gradskim i prigradskim područjima odavno su primijećena područja na kojima su temperature zraka i temperature površina veće nego u ruralnim područjima (Slika 2.1). Takva područja, tzv. urbani toplinski otoci, nastaju dominantno na izgrađenim površinama gradova kao posljedica urbanizacije kojom se onemogućavaju prirodni procesi upijanja vode u tlo i evaporacija (Golden 2004). Urbani toplinski otoci najbolje se opisuju kao nepokretne kupole toplog zraka iznad gusto naseljenih područja gradova (Emmanuel 2005). Srednja godišnja temperatura zraka u gradovima sa više od milijun stanovnika može biti veća za 1 do 3 °C od okolnog područja. Međutim, u ljetnom periodu ta razlika može se kretati do 12 °C. (Akbari, Pomerantz i Taha 2001).



Slika 2.1: Shematski prikaz promjene temperature (Santamouris 2007)

Razlika u toplini između grada i njegove okoline ovisi o tome koliki je postotak tla prekriven vegetacijom, a razumijevanje procesa urbanog zagrijavanja u budućnosti će biti važno za gradnju novih i modernizaciju postojećih gradova (Doulos, Santamouris i Livada 2004)

Ubrzani razvoj urbanih područja rezultira promjenama u mikroklimi, jednom od značajnih faktora koji doprinosi problemu urbanih toplinskih otoka. Istraživanja vezana na urbane toplinske otoke obično se odnosi na ispitivanje intenziteta urbanih toplinskih otoka, što predstavlja maksimalnu toplinsku razliku između područja grada i okolnog područja. Rezultati različitih istraživanja pokazuju da intenzitet urbanih toplinskih otoka se može kretati do 15°C. Santamouris i sur. proveli su opsežna istraživanja na području Atene. Rezultati su pokazali razlike temperature od 5 do 15°C između ruralnih i urbanih područja (Santamouris, Nasimakopoulos, i dr. 2001). Stanovnici gradova troše više od 75 % ukupnih izvora energije kao rezultat aktivnosti u urbanom okolišu (Madlener i Sunak 2011). Dio te energije pretvara se u toplinu, koja se dodatno povećava sa utjecajem sunčevog zračenja. U tim uvjetima, navedena toplina se pohranjuje u urbanim konstrukcijama, i onda noću postepeno otpušta (Satterthwaite 2008).

2.1.Učinci urbanih toplinskih otoka

Toplinski otoci imaju niz negativnih utjecaja na život u gradovima. Doprinosе zdravstvenim problemima, višim troškovima struje i povećanom zagađenju (Konopacki i Akbari 2002), (Fahed, et al. 2020). S obzirom da više od 77 % svjetskog stanovništva živi u tim područjima, utjecaj toplinskih otoka je vrlo važan (United Nations 2012). Iz navedenog razvija se čitav niz mjera kojima se utjecaj nastoji suzbiti.

Prema (Gartland 2008) toplinski otoci pokazuju pet zajedničkih obilježja:

1. *Viša temperatura zraka*: Toplinski otoci su općenito toplija područja u gradovima u odnosu na nerazvijena, ruralna područja s jasnim dnevnim uzorkom ponašanja. Toplinski otoci su često najtopliji (u odnosu na ruralna područja) nakon što Sunce zađe, i najhladniji nakon što Sunce izlazi. Zrak u urbanim sredinama u natkrivenom sloju (eng. canopy layer), ispod vrhova stabala i zgrada, može biti i do 6°C topliji od zraka u ruralnim područjima.

Morris i Simmonds 2000 proveli su istraživanja na području Melbourne (centralno poslovno područje i aerodrom). Rezultati su pokazali da su temperature zraka uvijek više u području centralnog poslovnog područja (do 2,4°C) (Morris, Simmonds i Plummer 2001). Rezultati istraživanja provedena za Phoenix pokazuju razlike temperature (urbano – ruralno) od 3 do 8 °C. Rezultati također pokazuju povećanje 0,5°C u deset godina (Brazel, i dr. 2000). Rezultati istraživanja provedenih u Tokyo-u pokazuju više temperature u urbanom području i to zimi 4 – 5°C, a ljeti 1 – 1,5°C (S. Yamashita 1996). Također je za područje Tokyo-a evidentirano povećanje srednje vrijednosti temperature od 3 – 4°C u proteklih 100 godina (Okada, i dr. 2008). Rezultati istraživanja provedenih u Rimu pokazuju razlike od 5°C (Bonacquisti, i dr. 2005). Istraživanja provedena za područje Londona ukazuju na razlike u temperaturama do 8,9°C (Kolokotroni, Giridharan i Santamouris 2008). U Grčkoj je provedeno više opsežnih studija koje pokazuju intenzitet urbanih toplinskih otoka 2°C i više (Giannopoulou, i dr. 2010), (Giannaros i Melas 2012), (Papanastasiou i Kittas 2012).

2. *Više temperature površina*: Temperature zraka su povišene zbog zagrijavanja gradskih površina, budući da mnoge umjetno stvorene površine apsorbiraju više sunčeve topline nego prirodna vegetacija. Važnost temperatura površina uočila se početkom 20. stoljeća nakon prve termalne snimke iz zraka. Rezultati mjerenja pokazali su više temperature površina u gradskim blokovima i niže temperature u područjima urbanih parkova i prigradskih područja. Provedena su različita istraživanja na temu utjecaja površinskih temperatura na temperature zraka u urbanim područjima. Rezultati pokazuju veliku ovisnost o meteorološkim uvjetima (Imamura 1989), (Kawashima, i dr. 2000), (Watkins, i dr. 2002).
3. *Veći utjecaj za stabilnog i mirnog vremena*: Razlike u temperaturama zraka i površina su povećane kada je vrijeme mirno i stabilno. Rezultati istraživanja provedenih u Bukureštu pokazuju da su tijekom vjetrovitog vremena razlike u temperaturama između ruralnog i urbanog područja manje nego tijekom stabilnog vremena (Tumanov, i dr. 1999)
4. *Povećanje s vremenom*: Područja s najmanjom količinom vegetacije i najvećim razvojem imaju tendenciju da postanu najtoplija tj. toplinski otoci imaju tendenciju da postanu intenzivniji s porastom gradova. Termalne

snimke gradova Phoenix i Mesa i Tempe pokazuju na povećanje minimalne noćne temperature za približno 4°C. Navedeno ukazuje da gradovi pohranjuju više topline tijekom dana i otpuštaju je u noćnom periodu te na taj način povećavaju intenzitet urbanih toplinskih otoka tijekom godina (Gartland 2008).

5. *Termalna inverzija*: Toplinski otoci, također uzrokuju topliji zrak u graničnom sloju, sloju zraka do 2000 metara visine. Toplinski otoci često stvaraju velike oblake toplijeg zraka nad gradovima, a temperaturene inverzije (topliji zrak iznad hladnijeg zraka) uzrokovane toplinskim otocima nisu rijetkost.

Prema (Santamouris, Papanikalaou, i dr. 2001) postoje tri glavna uzroka nastanka fenomena urbanih toplinskih otoka:

1. Smanjena brzina vjetra u gusto izgrađenom okolišu, što rezultira smanjenom prirodnom cirkulacijom zraka u centralnim gradskim područjima.
2. Smanjenje propusnih površina kao što su tlo i zelenilo, što rezultira ubrzanim procesom odvodnje čime se smanjuje prirodni efekt hlađenja.
3. Povećanje utroška energije što oslobađa otpadnu toplinu (eng. waste heat) dobivenu iz procesa hlađenja, osvjetljenja, automobila i tvornica.

Urbani toplinski otoci zabilježeni su u stotinama gradova diljem svijeta. Intenzivna istraživanja na ovu temu osigurala su potpunu dokumentaciju o problemu i cjelokupno razumijevanje učinaka (Mirzaei i Haghighat 2010), (Santamouris 2007), (Mihalakakou, i dr. 2002), (Mihalakakou, i dr. 2004) (Livada, i dr. 2002), (Fahed, et al. 2020), (Ferrari, et al. 2020). Općeniti zaključak navedenih studija je da povišene temperature u urbanim područjima utječu na povećanje potrošnje energije za hlađenje što utječe na povećanje električne energije u vršnim satima. Povećanje utroška energije utječe na povećanje zagađenja zraka što je direktno povezano sa ugodom življenja u gradovima i zdravljem stanovnika.

Toplinski otoci mogu se definirati za različite slojeve urbane atmosfere i za različite površine (T. Oke 1995).

Postoje dva tipa urbanih toplinskih otoka – površinski i atmosferski. Ova dva osnovna tipa urbanih toplinskih otoka razlikuju se u načinu njihovog nastanka i tehnikama mjerenja njihovog utjecaja.

Tablica 2.1 prikazuje osnovne karakteristike pojedinog tipa urbanih toplinskih otoka (T. Oke 1987), (Voogt i Oke 2003).

Tablica 2.1: Osnovne karakteristike površinskog i atmosferskog tipa urbanih toplinskih otoka (T. Oke 1987), (Voogt i Oke 2003)

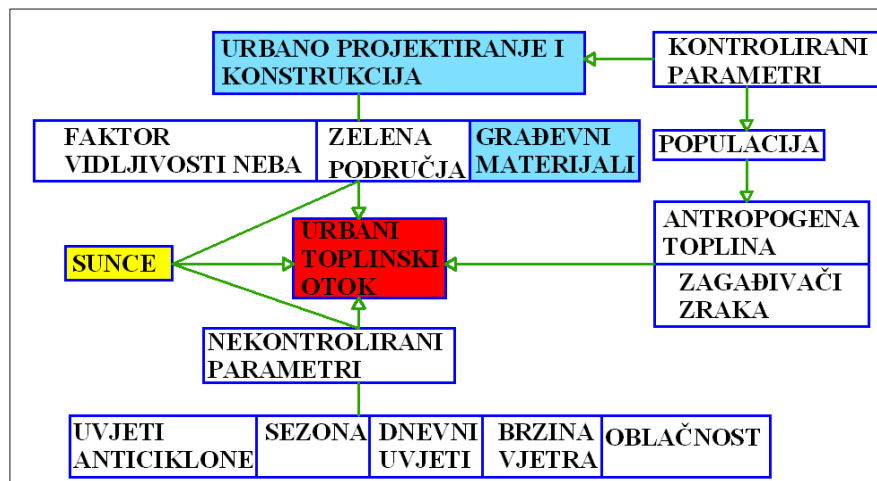
Obilježje	Površinski tip urbanih toplinskih otoka	Atmosferskih tip urbanih toplinskih otoka
Vrijeme	○ Prisutan cijelo vrijeme dana i noći ○ Najintenzivniji tijekom dana i u ljetnom periodu	○ Mali ili ga nema tijekom dana ○ Najintenzivniji tijekom noći ili pred svitanje i u zimi
Vršni intenzitet (najintenzivniji UHI)	○ Više prostorna i vremenska varijacija: • Dan: 10 do 15 °C • Noć: 5 do 10 °C	○ Manje varijacija: • Dan: -1 do 3 °C • Noć: 7 do 12 °C
Uobičajena metoda identifikacije	○ Indirektna mjerenja • Daljinska istraživanja	○ Direktna mjerenja • Fiksne meteorološke postaje • Pokretne stanice
Uobičajeni prikaz rezultata	○ Termalna snimka	○ Izotermne karte ○ Grafovi temperatura

Praćenje površinskih urbanih toplinskih otoka vrši se mjerenjem temperatura površina (kolnici, krovovi...). Temperature površina u urbanim sredinama više su 27 do 50 °C od temperatura zraka dok su zasjenjene površine i površine u ruralnim sredinama približno jednake temperaturama zraka (Berdahl i Bretz 1997).

Topliji zrak u urbanim područjima u odnosu na hladniji zrak u prigradskim i ruralnim područjima definira atmosferski urbani toplinski otok. Atmosferski urbani toplinski otoci dijele se na (T. Oke 1982):

- Urbani natkriveni sloj – postoji u sloju zraka gdje ljudi žive (od površine tla do razine zelenila i krovova), i
- Rubni sloj – počinje iznad razine krovova i zelenila i kreće se do razine u kojoj urbani okoliš više nema utjecaj na atmosferu (uobičajeno 1,5 km od razine tla).

Na pojavu toplinskih otoka utječu faktori koje možemo kontrolirati i na njih utjecati kroz planove i projektna rješenja te faktori povezani sa okolišem i prirodom koje ne možemo kontrolirati (Slika 2.2) (Memon, Leung i Chunho 2008).



Slika 2.2: Stvaranje urbanih toplinskih otoka (Memon, Leung i Chunho 2008)

Faktori koji se mogu kontrolirati i faktori koji se ne mogu kontrolirati dalje se mogu podijeliti u trenutne utjecajne varijable (kao što su brzina vjetra i pokrivenost oblacima), stalne utjecajne varijable (kao što su zelene površine, građevni materijali i faktor vidljivosti neba) i cikličke utjecajne varijable (kao što su Sunčevo zračenje i antropogeni izvori topline) (Memon, Leung i Chunho 2008), (Zhu, Yu and Li 2019). Oblici prijenosa topline, kao što su konvekcija, kondukcija i radijacija, u procesu nastajanja urbanih toplinskih otoka imaju veliku ulogu. Konstrukcije na razini tla, kao što su zidovi, kultivirani vrtovi, nekultivirane zelene površine, livade, popločane površine itd., „zarobljuju“ Sunčevo zračenje do različitih granica. Ove prirodne i umjetno stvorene konstrukcije kontinuirano apsorbiraju i pohranjuju ovo zračenje u vidu toplinske energije od izlaska Sunca do kasnog popodneva. Zatim, Sunce zalazi i okoliš se počinje hladiti. Toplinska energija pohranjena u konstrukcijama počinje se otpuštati u okoliš. Način i količina otpuštene topline iz urbanih konstrukcija ovisi o faktorima koji se mogu kontrolirati kao što su faktor vidljivosti neba i građevni materijali (Memon, Leung i Chunho 2008) (Zhang, et al. 2019). U tipičnim urbanim područjima, velika količina građevnih materijala smještena je na malom području koje „zarobljava“ veliki intenzitet Sunčevog zračenja. Sposobnost otpuštanja topline u gradovima dugovalnim zračenjem je mala uslijed smanjenog faktora vidljivosti

neba što rezultira pohranom topline u konstrukcijskim materijalima. Pretpostavlja se da su vrijednosti albeda (omjera odbijenog i primljenog elektromagnetskog zračenja) također male zbog tipičnih konfiguracija uličnih kanjona. Iz navedenog, u radu (Giridharan, Ganesan i Lau 2004), ova dva parametra definirani su kao ključni faktori u nastajanju urbanih toplinskih otoka. Zbog nedostatka vegetacije gradovi su izloženi smanjenoj latentnoj toplini isparavanja. Istraživanja provedena za Tokyo pokazala su smanjenje evapotranspiracije za 38.1% u razdoblju od 1972. do 1995. godine (Kondoh i Nishiyama 1999). Velika hrapavost konstrukcija u urbanim područjima smanjuje količinu konvekcijskog prijenosa topline i prijenos vjetrom. Pongracz i dr. (2006) utvrdili su da uvjeti anticiklone povećavaju intenzitet urbanih toplinskih otoka (Pongracz, Bartholy i Dezso 2006). Rezultati više studija ukazuju na negativan utjecaj brzine vjetra i naoblake na nastajanje urbanih toplinskih otoka. (T. Oke 1982), (Kim i Baik 2005). Hung i dr. (2006) proveli su istraživanje urbanih toplinskih otoka za dvanaest azijskih velegradova gdje su ukazali da je značaj i veličina urbanih toplinskih otoka pozitivno povezana sa brojem stanovnika u gradu. Navedeno istraživanje pokazalo je maksimalni intenzitet urbanih toplinskih otoka od 8°C u Bangkoku sa brojem stanovništva od 11 milijuna i 7°C u Shanghai-u sa sa brojem stanovništva od 12,55 milijuna. Također je uočen maksimalni intenzitet urbanih toplinskih otoka od 7°C u Manili sa gustoćom stanovništva od 15 617 stanovnika/km² i maksimalni intenzitet urbanih toplinskih otoka od 12°C u Tokyo-u sa gustoćom stanovništva od 6218 stanovnika/km² (Hung, i dr. 2006). Broj stanovnika može imati dvostruki učinak na nastajanje urbanih toplinskih otoka. Izravno, veći broj stanovnika znači više metabolizama, a neizravno znači više zgrada, vozila, tvornica, itd. Međutim, ostali faktori kao što su faktor vidljivosti neba, antropogena toplina, građevni materijali, ne ovise o broju stanovnika.

Materijali koji se koriste u završnim slojevima zgrada i urbanih struktura imaju veliku ulogu u toplinskoj ravnoteži urbanog područja. Kada se govori o materijalima onda postoje dva glavna razloga za zagrijavanje urbanih područja. Prvo, većina urbanih građevinskih materijala su vodonepropusni pa vlažnost nema utjecaja na smanjenje sunčeve topline. Drugo, tamne površine u sklopu s formacijama urbanih kanjona prikupljaju i „zarobljuju“ više sunčeve energije. Temperature tamnih, suhih površina na izravnom Suncu tijekom dana mogu doseći i do 60°C, dok površine prekrivene vegetacijom na vlažnom tlu mogu doseći samo 18°C. Formaciji urbanih toplinskih otoka također doprinosi i antropogena toplina ili ljudski proizvedena

toplina, sporija brzina vjetra i zagađenje u urbanim područjima (Gartland 2008), (Newton, et al. 2019) (Chiarelli, et al. 2017).

Građevinski materijali apsorbiraju sunčevo i infracrveno zračenje te otpuštaju dio pohranjene topline u atmosferu procesima konvekcije i radijacije te na taj način povećavaju ambijentalnu temperaturu. Dakle, na temelju tehničkih karakteristika upotrijebljenog materijala može se u velikoj mjeri odrediti potrošnja energije i ugodnost življenja kako u pojedinoj zgradi tako i na otvorenim prostorima. Provedeno je više istraživanja za bolje razumijevanje optičkih i toplinskih karakteristika materijala kao i njihov utjecaj na gradsku klimu te su dani rezultati razlika u ambijentalnoj temperaturi u odnosu na različite tipove materijala (Yap 1975), (Berg i Quinn 1978), (Gustavsson i Bogren 1991), (Taha, Sailor i Akbari 1992), (Asaeda, Ca i Wake 1996), (Doulos, Santamouris i Livada 2001) (Niachou, Livada i Santamouris 2008) (Santamouris, Papanikolaou, i dr. 1999) (Chem, Wei i Wu 2009) (White, i dr. 2010), (Qi., et al. 2019).

Kao što je navedeno, ne postoji jedan uzrok nastajanja toplinskih otoka. Faktori koji uzrokuju nastanak toplinskih otoka prikazani su u Tablici 2.2 (Gartland 2008), (Min, et al. 2019).

Tablica 2.2: Karakteristike važne za nastajanje toplinskih otoka i njihov utjecaj na energetske bilancu površine Zemlje (Gartland 2008), (Min, et al. 2019)

Faktori koji doprinose nastajanju toplinskih otoka	Utjecaj na energetske bilancu
Nedostatak vegetacije	Smanjenje evaporacije
Široka upotreba nepropusnih površina	Smanjenje evaporacije
Povećana toplinska difuznost urbanih materijala	Povećanje „zarobljene“ topline
Smanjena sunčeva refleksija urbanih materijala	Povećanje neto zračenja
Urbana geometrija koja „zarobljava“ toplinu	Povećanje neto zračenja
Urbana geometrija koja smanjuje brzinu vjetra	Smanjenje konvekcije
Povećani nivo zagađenja zraka	Povećanje neto zračenja
Povećana upotreba energije	Povećanje antropogene topline

Pojam energetske bilance i prijenosa topline biti će objašnjen u daljnjim poglavljima.

2.2.Strategije za smanjenje efekta urbanih toplinskih otoka

Postoje mnoge strategije za smanjenje efekta urbanih toplinskih otoka koje su povezane s ekspertizama različitih stručnih područja uključujući planiranje, arhitekturu, upravljanje prirodnim resursima i promet (Giguere 2009).

Budući da ograničavanje rasta urbanih područja je nemoguće, jedna od metoda za smanjenje efekta urbanih toplinskih otoka je poboljšanje karakteristika materijala kolnika, krovova i zidova koji se koriste u urbanim područjima (Akbari, Konopacki i Pomerantz 1999) (Chen, Wang and Xie 2019), (Chen, Zhou, et al. 2019). Na razini prostornog planiranja u cilju ublažavanja ove negativne pojave predlaže se povećanje udjela zelenih površina i površina pod vodom unutar područja centra grada. Kako krovovi i kolničke površine predstavljaju najizloženije dijelove urbanih područja sunčevoj toplinskoj energiji istraživanja mogućih mjera za umanjivanje efekta toplinskih otoka usmjerena su na materijale i oblikovanje ovih gradskih površina.

Strategija umanjivanja efekta toplinskih otoka u različitim studijama (Santamouris 2007), (Memon, Leung i Chunho 2008), (EPA 2008) (Torok, i dr. 2001) (Lai, et al. 2019), (Carpio, et al. 2020), (Maduabuchukwu, et al. 2020) ide u tri smjera:

- (1) razvoj tzv. urbanih šumskih područja (eng. urban forestry),
- (2) primjenu reflektirajućih materijala za pokrivanje krovova i
- (3) primjenu hladnih kolnika i, u novije vrijeme, reflektirajućih kolnika.

Većina kolnika i zgrada napravljena je od materijala s niskim albedom i visokim toplinskim kapacitetom. To znači da takvi materijali apsorbiraju veliki dio sunčevog zračenja tijekom dana i njihove površine ostaju toplije od okolnog zraka tijekom noći. Iz navedenog, smanjenje apsorpcije ovih materijala ili smanjenje temperature površina postaje učinkovita mjera za suzbijanje efekta urbanih toplinskih otoka (Wei i He 2013), (Carpio, et al. 2020), (Chen, Wang and Xie 2019), (Chen, Zhou, et al. 2019). Hladni krovovi i hladni kolnici, u više provedenih studija, predlagani su kao strategije za smanjenje efekta urbanih toplinskih otoka (Rosenfeld, i dr. 1995), (Bretz, Akbari i Rosenfeld 1998), (Akbari, Pomerantz i Taha 2001), (Xu, i dr. 2012), (Carpio, et al. 2020), (Zhang, et al. 2019).

Provedeno je više istraživanja za ocjenu koristi svjetlijih površina u smislu poboljšanja okolišnih uvjeta i uštede energije. Detaljni prikaz ovih mjera objavila je

Američka agencija za zaštitu okoliša (Akbari i Taha 1992). Rezultati istraživanja su pokazali moguće uštede energije kod upotrebe svjetlijih površina uz sadnju novih stabala.

Korišteni materijali određuju ukupni albedo gradova. Albedo uobičajenih europskih i američkih gradova kreće se u rasponu od 0,15 do 0,30. Puno veći albedo (0,45 do 0,60) izmjeren je u nekim sjevernoafričkim gradovima (Chen, Zhou, et al. 2019). Taha (1997) je iz različitih istraživanja prikazao podatke albeda za više gradova bez snijega (Taha 1997). Niz istraživanja je provedeno za bolje razumijevanje optičkih i toplinskih svojstava materijala urbanih površina kao i njihov utjecaj na urbanu klimu (Chen, Wang and Xie 2019). Niže temperature površina doprinose smanjenju temperatura okolnog zraka. Santamouris (2001) iz rezultata istraživanja ukazuje na temperature asfalta približno 63°C i bijelih kolnika približno 45°C (Santamouris, Papanikalaou, i dr. 2001). Oke i dr. (1991) su simulirali utjecaj optičkih i toplinskih svojstava urbanih materijala na intenzitet urbanih toplinskih otoka tijekom noćnog perioda. Rezultati su pokazali da je utjecaj emisivnosti zanemariv. S povećanjem emisivnosti od 0,85 do 1,0 pokazalo se blago povećanje u od 0,4°C u razlici temperature između urbanog i ruralnog područja. Naprotiv, utvrđeno je da je utjecaj toplinskih svojstava materijala mnogo važniji. Utvrđeno je da za ravno tlo u urbanom području koeficijent prolaska topline iznosi 2200 W/m²K, u ruralnom području isti koeficijent iznosi 800 jedinica manje te se onda tijekom noćnog perioda razvija urbani toplinski otok intenziteta otprilike 2°C (Oke, Johnson, i dr. 1991). U drugoj studiji Asaeda i dr. (1996) su prikazali eksperimentalne rezultate ispitivanja različitih materijala kolnika koji se najčešće koriste u urbanim područjima. Rezultati su ukazali da su površinske temperature, pohrana topline i njeno naknadno otpuštanje značajno više za asfalt nego za beton i tlo (Asaeda, Ca i Wake 1996). Gustavsson i Bogren (1991) su istraživali utjecaj konstrukcije kolnika na površinsku temperaturu. Rezultati ispitivanja su pokazali maksimalnu noćnu razliku od 1,5°C između kolnika na podlozi od troske iz visoke peći i kolnika na podlozi od šljunka (Gustavsson i Bogren 1991). Istraživanje koje su proveli Berg i Quinn (1978) je pokazalo da bijelo bojani kolnici s albedom približno 0,55 imaju gotovo istu temperaturu kao okoliš, dok nebojani kolnici s albedom približno 0,15 su otprilike 11°C topliji od zraka (Berg i Quinn 1978). Taha i dr. (1992) su mjerili albedo i temperature površina različitih materijala korištenih u urbanim područjima. Istraživanje je pokazalo da je temperatura bijelih elastomernih presvlaka s albedom

0,72 45°C manja od crnih presvlaka s albedom 0,08. Također su ukazali da bijele površine s vrijednosti albeda 0,61 su samo 5°C toplije od okolnog zraka, dok šljunak s vrijednošću albeda 0,09 je 30°C topliji (Taha, Sailor i Akbari 1992).

Istraživanje koje su proveli autori Doulos, Santamouris i Livada unutar kojega je u istim uvjetima osunčanja analizirano ponašanje 93 vrste uobičajeno korištenih materijala kolničkih konstrukcija ukazuje na one od ispitivanih materijala koji u navedenim mikroklimatskim uvjetima (Atena, Grčka) mogu doprinijeti smanjenju efekta toplinskog otoka, smanjiti utrošak električne energije i unaprijediti toplinske uvjete na otvorenim prostorima (Doulos, Santamouris i Livada 2004). Ista grupa autora u daljnjim istraživanjima analizira posebne materijale koji mogu doprinijeti smanjenju zagrijavanja podloge pa samim time i okolnog zraka (Santamouris, Synnefa i Karlessi 2011). Santamouris (2012) u svom radu daje pregled mjera za ublažavanje urbanih toplinskih otoka i poboljšanje urbanog okoliša upotrebom materijala povećane refleksivnosti i zelenih krovova (Santamouris 2012). Takebayashi i Moriyama (2012) istraživali su toplinsku bilancu različitih površina kolnika u istim meteorološkim uvjetima na ispitnom polju u Japanu (Takebayashi i Moriyama 2012). Kubo i dr. (2006) istraživali su utjecaj tehnologije izvedbe kolnika na smanjenje utjecaja urbanih toplinskih otoka. Studija je pokazala da novije vrste kolničkih površina, kao što su kolnici koji zadržavaju vodu (eng. water retention pavements) i kolnici sa „toplinskom“ zaštitom (eng. heat shield pavements), bitno smanjuju temperaturu površina samih kolnika, temperaturu zraka, a imaju utjecaj i na bolji toplinski komfor pješaka (Kubo, Kido i Ito 2006). Istom tematikom u Japanu bavili su se i drugi istraživači (Wei i He 2013), (Nakayama i Fujita 2010).

Prema stogodišnjem nizu mjerenja (1906 – 2005) porast globalne prizemne temperature zraka, procijenjen iz linearnog trenda, iznosio je 0,74°C. Promatra li se posljednjih pedeset godina tog razdoblja, porast je bio gotovo dvostruko veći nego u cijelom stogodišnjem razdoblju, te još veći u posljednjih dvadeset i pet godina čemu je pridonijela činjenica da su, od kada postoje instrumentalna mjerenja temperature zraka (1850. godina), najtoplije bile 1998. I 2005. godina, a zatim 2002., 2003. I 2004. godina. Trend porasta temperature zraka u 20. stoljeću zabilježen je i na postajama u Hrvatskoj. Stoljetni nizovi mjerenja temperature zraka upućuju na porast između 0,02°C i 0,07°C na deset godina. Kao i na globalnoj razini

trend porasta temperature zraka osobito je izražen u posljednjih pedeset, odnosno dvadeset i pet godina (Gajić Čapka, Zaninović i Cindrić 2010).

Tablica 2.3: Faktori koji utječu na nastajanje urbanih toplinskih otoka (Lafrance 2009)

Utjecajni faktor	Broj stanovnika/gustoća stanovništva	Toplinska svojstva materijala (tlo i zgrade)	Izvori antropogene topline	Geometrijski utjecaj urbanog projektiranja i faktor vidljivosti neba
Razmatran o područje	Sjeverna Amerika, Azija	Azija, Europa, Australija, Sjeverna Amerika	Sjeverna Amerika, Azija, Europa, Australija	Azija, Europa
Tip klime	Snježno šumska klima, Umjereno topla kišna klima	Umjereno topla kišna klima	Umjereno topla kišna klima	Umjereno topla kišna klima
Autori	(T. Oke 1973), (Stone i Norman 2006), (Yamashita i dr. 1986), (Yamashita i Sekine 1990/1991), (Memon, Leung i Chunho 2008)	(Sarrat, i dr. 2006) (Wong, i dr. 2008), (King Johnson i Davies 2007), (Offerle, Grimmond, i dr., Intraurban differences of surface energy fluxes in a central european cities 2006) (Yamashita i Sekine 1990/1991), (Asaeda, Ca i Wake 1996), (Alonso, Labajo i Fridalgo 2003), (Lai i Cheng 2009)	(Sailor i Lu 2004), (Offerle, Grimmond i Fortuniak 2005), (Simmonds i Keay 1997), (Ichinose, Shimodozono i Hanaki 1999), (Taha 1997), (Weng i Yang 2004)	(Yamashita, i dr. 1986), (Unger 2009), (Blankenstein i Kuttler 2004), (Jusuf i Hien 2009), (Yamashita i Sekine 1990/1991), (Wong, i dr. 2008), (T. Oke 1988)

Brojne studije (Tablica 2.3) uzimaju u obzir odnos između stanovništva i intenziteta urbanih toplinskih otoka. Studija koju je proveo Oke 1973 pokazala je korelaciju između veličine grada i intenziteta urbanih toplinskih otoka (T. Oke 1973).

Drugi učinak urbanizacije je promjena zemljišta i smanjenje vegetacije uslijed povećanja površina izgrađenosti. To utječe na energetska ravnotežu zemljišta. Uobičajeni građevinski materijali na stvaranje urbanih toplinskih otoka utječu kroz sunčevu refleksiju, termalnu emisiju i toplinski kapacitet (Wong, i dr. 2008). Kod urbanih materijala sunčeva refleksija (albedo) je općenito niska pa je rezultat manje reflektiranje sunčeve energije i veća apsorpcija čime se povećava temperatura površine. Toplinska emisija opisuje način otpuštanja topline materijala natrag u atmosferu. Urbani građevinski materijali imaju visoke vrijednosti emisivnosti što znači da toplinu otpuštaju relativno brzo (Y. Qin 2015), (Santamouris 2013), (Villena Del Carpio, et al. 2016). U studiji koju je proveo Asaeda mjeren je površinski toplinski tok za različite građevinske materijale. Studija je pokazala da asfalt ima znatno veći nivo toplinskog kapaciteta i toplinske emisije nego beton i tlo (Asaeda, Ca i Wake 1996). Offerle i dr. proučavali su turbulentni toplinski tok u Lodzu u Poljskoj. Studija je pokazala inverznu povezanost između latentnog toka topline i povećane pokrivenosti vegetacijom (Offerle, Grimmond, i dr. 2006). U različitim studijama povezuje se hrapavost građevinskih materijala i povećana toplinska vodljivost (Yamashita i Sekine 1990/1991).

Određeni učinci urbanih toplinskih otoka, kao što je povećanje vegetacijske sezone određenih biljaka, su pozitivni iako je većina učinaka negativna. Povećana temperatura zraka utječe na pogoršanje kvalitete zraka i vode, povećanu potrošnju energije, smanjenu kvalitetu života u gradovima, te moguće veće financijske gubitke uslijed ekstremnih vremenskih događaja (Wong, i dr. 2008). U Tablici 2.4 dan je popis literature svrstan prema grupi utjecajnih parametara.

Tablica 2.4: Utjecajni parametri (Lafrance 2009)

Parametar	Razmatrano područje	Tip klime (prema Koppenovoj klasifikaciji)	Autori
Povećana temperatura	Azija, Južna Amerika, Europa	Tropska kišna klima, Suha klima, Umjereno topla kišna klima	(Wong, i dr. 2008), (Yamamoto 2006), (Weng 2001), (Weng i Yang 2004), (Xiao i Weng 2007), (Ihara, i dr. 2008), (Costa, Labaki i Araujo 2007), (Nichol 1996), (Nichol, Fung, i dr. 2009), (Karl, Diaz i Kukla 1988), (Kolokotroni, Giridharan i Santamouris 2008), (Ministry of Environment 2001), (Akbari 1992)
Kvaliteta zraka	Sjeverna Amerika, Afrika, Azija	Tropska kišna klima, Suha klima, Umjereno topla kišna klima	(Wong, i dr. 2008), (Akbari 1992), (Tsai i Chen 2004), (Weng i Yang 2006), (Jonsson, i dr. 2004), (McPherson, Herrington i Heisler 1988), (Sarrat, i dr. 2006), (Yoshikado i Tsuchida 1996), (Lai i Cheng 2009)
Upotreba energije	Azija, Sjeverna Amerika, Europa	Tropska kišna klima, Suha klima, Umjereno topla kišna klima, Snježno šumska klima, Polarna klima	(Wong, i dr. 2008), (Gao, i dr. 2006), (Chen, Yoshino i Li 2010), (Lariviere i Lafrance 1999), (Santamouris, Papanikalaou, i dr. 2001), (Souza, i dr. 2007), (Akbari 2002), (Akbari 1992)
Vršna energija	Azija, Sjeverna Amerika, Europa	Umjereno topla kišna klima, Snježno šumska klima	(Akbari, Kurn, i dr. 1997), (Akbari, Bretz, i dr. 1997)
Emisija CO ₂	Sjeverna Amerika, Europa, Azija	Suha klima, Umjereno topla kišna klima, Snježno šumska klima	(Nasrallah, i dr. 2003), (Idso, Idso i Bailling 2002), (George, Ziska i Quebedeaux 2007)
Utjecaj na zdravlje	Europa, Sjeverna Amerika	Suha klima, Umjereno topla kišna klima	(Wong, i dr. 2008), (Conti, i dr. 2005), (Patz, i dr. 2008)
Utjecaj na ekonomiju	Sjeverna Amerika	Umjereno topla kišna klima	(Akbari 2002), (Baker 2002)

Hamdi i Schayes (2008) proveli su detaljno istraživanje urbanih toplinskih otoka tijekom ljetnog perioda u gradu Baselu u Švicarskoj. U studiji grad je podijeljen na osnovne klase – ceste, krovovi i zidovi. Kroz model varirani su parametri koji utječu na stvaranje urbanih toplinskih otoka. Rezultati su pokazali razlike u utjecaju na dnevni i noćni intenzitet urbanih toplinskih otoka. Kroz studiju je uočeno da (Hamdi i Schayes 2008):

- a) Povećanje toplinske difuzivnosti, toplinskog kapaciteta, površinskog albeda i udjela zelenila smanjuje ljetne vršne temperature tijekom dana.
- b) Povećanje toplinske difuzivnosti, toplinskog kapaciteta i ozelenjavanja krovova daje suprotan učinak tijekom noći.
- c) Tijekom noći utjecaj uličnih kanjona na intenzitet urbanih toplinskih otoka je najveći.
- d) Površinska emisivnost ima mali utjecaj na intenzitet urbanih toplinskih otoka.

Kod usporedbe strategija za umanj enje efekta urbanih toplinskih otoka potrebno je razumijevanje glavnih varijabli koje utječu na nastajanje istih. Glavne varijable mogu se podijeliti u četiri osnovne kategorije (Tablica 2.5) (Santamouris 2012).

Tablica 2.5: Popis glavnih varijabli (Santamouris 2012)

Varijabla	Parametri
Klimatološke varijable	Sunčevo zračenje, temperatura zraka, vlažnost zraka, brzina vjetra, oborine.
Optičke varijable	Albedo, emisivnost.
Toplinske varijable	Toplinski kapacitet.
Hidrološke varijable	Parametri koji definiraju latentnu toplotu.

Od klimatoloških varijabli od posebnog značenja su sunčevo zračenje, ambijentalna temperatura, vlažnost, brzina vjetra i oborine. Sunčevo zračenje uvelike određuje pohranu topline i površinsku temperaturu. Ambijentalna temperatura je ključna varijabla koja određuje količinu senzibilne (osjetne) topline koju otpuštaju urbane konstrukcije. Konvektivni toplinski tok je direktna funkcija temperaturne razlike između urbanih konstrukcija i ambijentalne temperature. Brzina vjetra i atmosferske turbulencije definiraju koeficijent prijenosa topline između površine i atmosfere i

određuje senzibilni toplinski tok. Atmosferska relativna vlažnost određuje gradijent tlaka vodene pare između zraka i urbanih konstrukcija. Oborine povećavaju vlažnost i određuju količinu latentnog toplinskog toka. Od optičkih varijabli od posebnog značaja su albedo i emisivnost. Albedo je ključna varijabla koja definira toplinsku ravnotežu. Više vrijednosti albeda smanjuju apsorpciju i akumulaciju topline u urbanim konstrukcijama, a time i smanjenje površinskih temperatura što odgovara nižem senzibilnom toplinskom toku i većem potencijalu umanjenja efekta urbanih toplinskih otoka. Emisivnost definira sposobnost urbanih konstrukcija da rasipaju toplinu kroz emisiju infracrvenog zračenja. Od toplinskih varijabli od posebnog značaja je toplinski kapacitet. Povećani toplinski kapacitet dovodi do veće pohrane topline smanjujući površinsku temperaturu i senzibilni toplinski tok. Hidrološke varijable vezane su na one parametre koji definiraju latentnu toplinu (Santamouris 2012).

U posljednje vrijeme izvršena su mnogobrojna ispitivanja vezana na strategije umanjenja efekta urbanih toplinskih otoka. Popis važnijih istraživanja uz navođenje promatranih parametara dan je u Tablici 2.6.

Tablica 2.6: Popis važnijih istraživanja

Autor	Mjesto	Parametri	Mjera	Rezultat
(Synnefa, Dandou, i dr. 2008)	Atena, Grčka	• Temperatura zraka, • Prosječna temperatura zraka, • Relativna vlažnost, • Smjer vjetra, i • Brzina vjetra.	• Hladni kolnici • Hladni krovovi • Visoko reflektirajući materijali	• Promjena albeda
(Chang, Li i Chang 2007)	Taipei	• Temperatura zraka, • Veličina površine, i • Namjena površine.	• Povećanje udjela parkova u gradovima	• Smanjena temperatura zraka u parkovima
(Nakayama i Fujita 2010)	Kawasaki, Japan	• Temperatura ispod površine uzoraka različitih materijala, • Sunčevo zračenje, • Atmosfersko dugovalno zračenje • Albedo površina, • Temperatura zraka, • Brzina vjetra, i • Vlažnost (1m ispod površine).	• Kolnici koji zadržavaju vodu (porozni kolnici)	• Smanjena temperatura zraka

(Millstein i Menon 2011)	Više američkih	• Albedo, • Temperatura površine, • Oborine, i • Naoblaka.	• Hladni krovovi, • Hladni kolnici, • Reflektirajući materijali	• Smanjena temperatura zraka
(Li, i dr. 2013)	Kalifornija	• Propusnost, • Površinska temperatura, i • Albedo.	• Propusni kolnici od betona i asfalta • Kolnici povećane refleksije materijala	• Smanjena temperatura zraka
(Synnefa, Saliari i Santamouris 2012)	Atena, Grčka	• Temperatura zraka, • Temperatura površine, i • Relativna vlažnost	• Hladni krovovi (povećana refleksija)	• Smanjena površinska temperatura • Smanjena ambijentalna temperatura (unutar zgrade)
(Alchapar, Correa i Canton 2014)	Mendoza, Argentina	• Refleksivnost, • Emisivnost, • Temperatura površine, • Sunčevo zračenje, • Temperatura zraka, • Vlažnost, i • Brzina vjetra	• Različite površine (pješačke, vozne, krovovi...) • Različiti materijali (beton, crijepovi i fasade različitih tekstura i boja,	• Klasifikacija materijala u lokalnim uvjetima prema načinu zagrijavanja

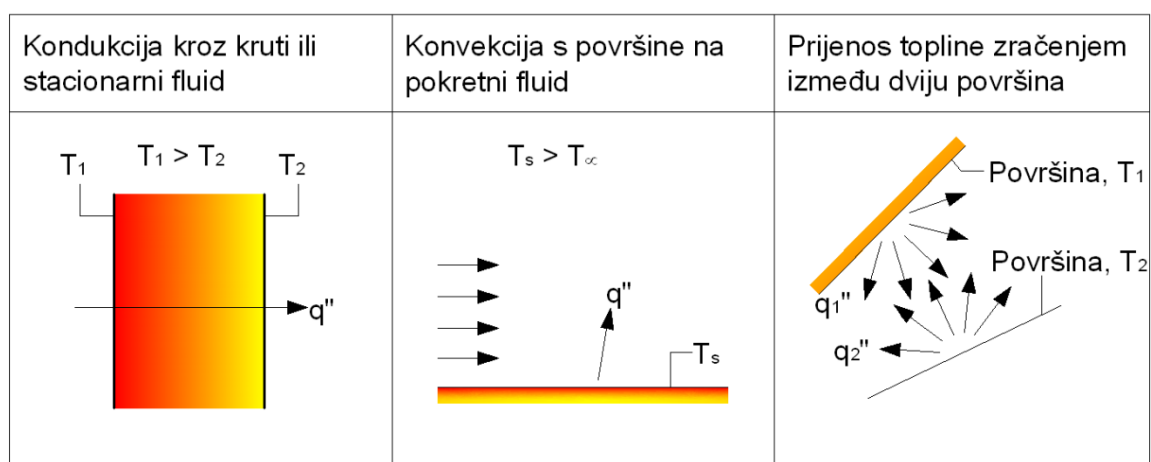
U cilju utvrđivanja ponašanja standardno korištenih materijala kolničkih površina pri maksimalnim temperaturama zraka i pri maksimalnom sunčevom zračenju tijekom ljetnih mjeseci 2011. i 2012. godine u gradu Rijeci provelo se sustavno mjerenje temperatura različitih kolničkih površina. Rezultati ovih ispitivanja upućuju na značajan utjecaj koji zagrijavanje kolničkih površina ima na temperaturu okolnog prostora (Cuculić, Babić, i dr. 2012), (Cuculić, Deluka-Tibljaš i Babić 2014), (Cuculić, Šurdonja, i dr. 2012), (Babić, i dr. 2012), (Deluka-Tibljaš, i dr. 2015).

3. PRIJENOS TOPLINE I TOPLINSKA SVOJSTVA MATERIJALA

Prijenos topline podrazumijeva rasprostiranje toplinske energije u mediju ili izmjenju te energije među raznim medijima (Incropera, i dr. 2006).

Toplinska energija sadržana u nekoj tvari je proporcionalna kinetičkoj energiji gibanja njezinih molekula, a prema vanjskom svijetu se manifestira kroz temperaturu te tvari (Incropera, i dr. 2006).

Prijenos topline u mediju i među njima nastaje djelovanjem temperaturnih razlika. Priroda nastoji postići izjednačenu temperaturu u materijalima, odnosno toplinsku ravnotežu, što znači da će toplinska energija uvijek prelaziti s mjesta s višom temperaturom na mjesta s nižom temperaturom. Postoje tri načina prijenosa topline (Slika 3.1): vođenje topline ili kondukcija (eng. conduction), konvektivni prijenos topline (eng. convection) i toplinsko zračenje (eng. thermal radiation) (Incropera, i dr. 2006)



Slika 3.1: Prijenos topline kondukcijom, konvekcijom i zračenjem (Incropera, i dr. 2006)

Vođenje topline u najvećem broju se promatra unutar krutih tvari. Medij koji vodi toplinu sastavljen je iz čestica koje uglavnom ne mijenjaju svoj položaj u prostoru, a energija se širi prijenosom kinetičkih energija vibracija molekula ili toka slobodnih elektrona u metalima. Prijenos toplinske energije nastaje djelovanjem temperaturnih razlika u tvari (Incropera, i dr. 2006).

Za razliku od vođenja topline, kod konvektivnog prijelaza topline uz temperaturnu razliku bitan je i prijenos tvari, odnosno kretanje fluida (Incropera, i dr. 2006).

Svako tijelo zrači u okoliš elektromagnetsko zračenje male valne duljine (infracrvene zrake) čija energija i spektar ovise o temperaturi tijela. Toplinsko

zračenje je važno za prijenos topline između tijela s velikom temperaturnom razlikom, a posebno za prijenos topline u svemirskim razmjerima (zračenje Sunca na Zemlju) (Incropera, i dr. 2006).

3.1. Vođenje topline ili kondukcija

Vođenje topline je proces kojim se topline prenosi s čestice na česticu unutar tijela (obično se misli na krute tvari). Uvjet za odvijanje ovog procesa je postojanje temperaturnih razlika, dakle toplijih i hladnijih mjesta, unutar tijela.

Toplinska energija prenosi se direktnom molekularnom komunikacijom bez vidljive promjene položaja molekula tj. dijelova materije. Kod plinova to je prijenos kinetičke energije s jednih molekula na druge, kod metala se ostvaruje elektronskom vodljivošću, a kod izolatora prijenosom oscilacija atoma ili molekula. Prenesena topline je dakle vektorska veličina usmjerena suprotno od temperaturnog gradijenta. Fourier je na temelju takvih spoznaja još početkom 19. stoljeća postavio zakon vođenja topline (Lienhard IV i Lienhard V 2008).

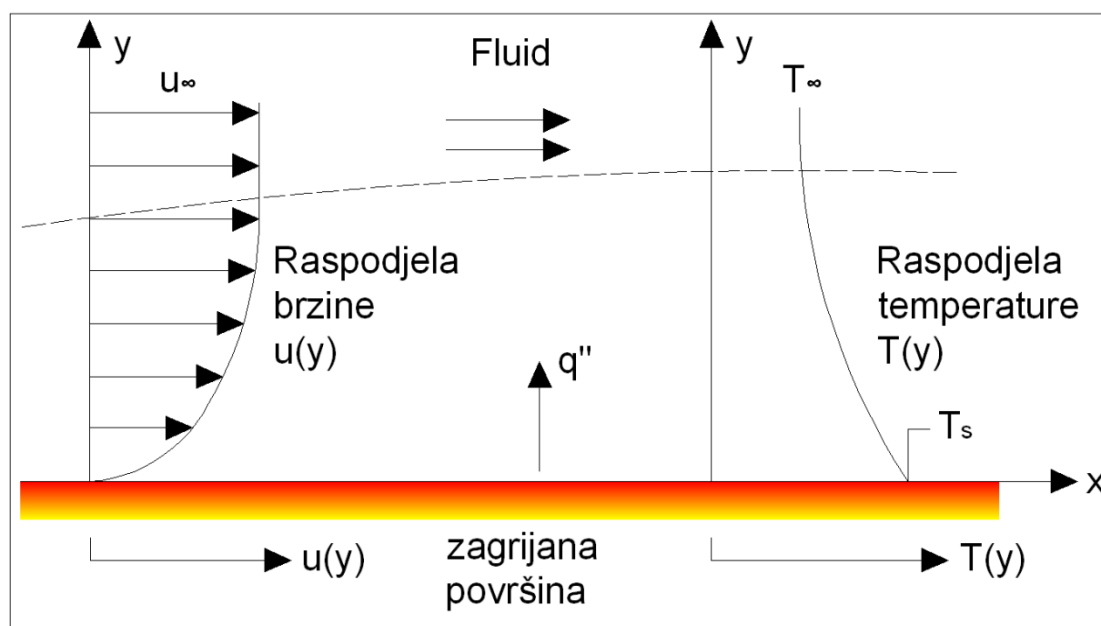
$$q = -k \frac{dt}{dx} \quad (\text{Jednadžba 3.1})$$

Prema Fourierovu zakonu (Jednadžba 3.1) toplinski tok (eng. heat flux) je proporcionalan negativnom gradijentu temperature. Prenesena topline (eng. heat flux) (W/m^2) je omjer topline po jedinici površine i može se prikazati kao Q/A gdje je A odgovarajuća površina. Koeficijent proporcionalnosti (koeficijent toplinske vodljivosti) k ovisi o materijalu kroz koji se topline provodi. Što je koeficijent veći, to će se uz isti gradijent temperature prenijeti više topline. Prenesena topline je vektorska veličina što znači da će biti pozitivna ako se temperatura smanjuje sa x odnosno da će se prenositi u x smjeru (Lienhard IV i Lienhard V 2008).

Koeficijent toplinske vodljivosti pokazatelj je stupnja propusnosti materijala za vođenje topline. Njegova vrijednost mijenja se u širokom rasponu od materijala koji dobro provode toplinu do onih koji je vode veoma loše.

3.2. Prijenos topline ili konvekcija

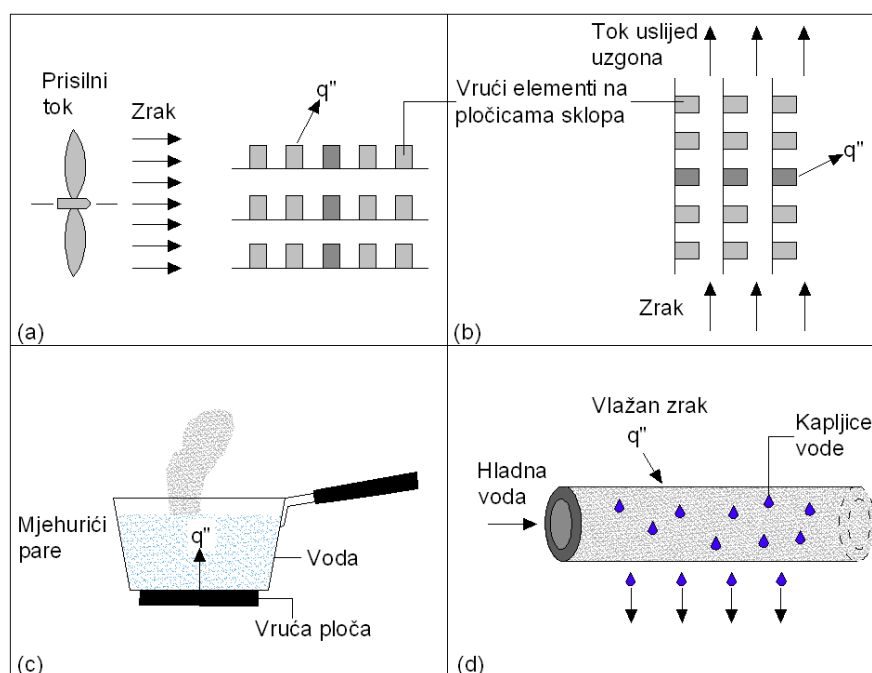
Prijenos topline ili konvekcija je usmjereno gibanje odnosno strujanje fluida (kapljevina i plinova). Konvekcija je jedan od glavnih načina prijenosa topline. U fluidima se promjena topline odvija kroz dva mehanizma: difuziju i prijenos topline gibanjem mase fluida (eng. advection). Difuzija je miješanje molekula uslijed nasumičnog termičkog gibanja, dok je advekcija prijenos topline u kojem se fluid ili toplina prenosi u većim strujama. Također, kada promatramo prijelaz topline između tvari različitih agregatnih stanja, govorimo o konvektivnom prijelazu topline. Najčešći slučaj konvektivnog prijenosa topline je između fluida u pokretu i granične površine pri različitim temperaturama (Slika 3.2). Posljedica interakcije površine i fluida je razvoj područja unutar fluida u kojem brzina varira od nule na površini do konačne vrijednosti u_{∞} povezane s tokom. Ovo područje fluida naziva se hidrodinamički sloj ili granični sloj brzine. Ukoliko se temperatura površine i fluida razlikuju, postojat će područje fluida u kojem temperatura varira od T_s pri $y=0$ do T_{∞} u vanjskom toku. Ovo područje naziva se toplinski granični sloj, i može biti manji, veći odnosno jednake veličine kao i onaj kroz koji brzina varira. U svakom slučaju, ako je $T_s > T_{\infty}$, javit će se konvektivni prijelaz topline od površine prema vanjskom toku (Incropera, i dr. 2006).



Slika 3.2: Razvoj graničnog sloja pri konvektivnom prijelazu topline (Incropera, i dr. 2006)

Prijenos topline odvija se kroz difuziju i advekciju unutar graničnog sloja. Utjecaj difuzije značajan je blizu površine gdje su brzine fluida male. U stvari, na granici fluida i površine brzina fluida jednaka je nuli, pa se topline prenosi isključivo ovim načinom. Doprinos uslijed advekcije proizlazi iz činjenice da se granični sloj povećava sa strujanjem u smjeru x (Incropera, i dr. 2006).

Prijenos topline može se podijeliti na prirodnu i prisilnu konvekciju (Slika 3.3). Prirodna konvekcija (Slika 3.3b) posljedica je lokalne razlike gustoće uslijed razlike temperatura, a intenzitet konvekcije ovisi o toplinskim uvjetima, o svojstvima fluida te o volumenu i obliku prostora u kojem se odvija proces. Prisilna konvekcija (Slika 3.3a) posljedica je stanovitog vanjskog djelovanja na fluid (ventilator, pumpe, atmosferski vjetar), a ovisna je o brzini fluida, dimenzijama i obliku putova kojim struji (Incropera, i dr. 2006).



Slika 3.3: Konvekcijski prijenos topline a) Prisilna konvekcija, b) Prirodna konvekcija, c) Ključanje, d) Kondenzacija (Incropera, i dr. 2006)

Prisilna i prirodna konvekcija opisana je kao prijenos energije koji se događa unutar fluida uslijed kombiniranih utjecaja kondukcije i advekcije. Prenesena energija predstavlja unutarnju toplinsku energiju fluida. Međutim, postoji i konvekcijski prijelaz topline gdje se oslobađa latentna topline. Ova latentna izmjena topline povezana je s faznom promjenom između tekućeg i plinovitog stanja fluida. Dva su

posebna slučaja konvekcije - ključanje i kondenzacija (Slika 3.3c i Slika 3.3d) (Incropera, i dr. 2006).

Bez obzira na prirodu procesa prijelaza topline, gustoća konvektivnog toplinskog toka može se prikazati Newtonovim zakonom hlađenja (Jednadžba 3.2) (Incropera, i dr. 2006):

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (\text{Jednadžba 3.2})$$

gdje su:

q'' – gustoća konvektivnog toplinskog toka [W/m^2],

h – konvekcijski koeficijent (koeficijent prijelaza topline) [$\text{W/m}^2 \text{ K}$],

T_s – temperatura površine, i

T_∞ – temperatura fluida.

Koeficijent prijelaza topline ovisi o uvjetima graničnog sloja u smislu geometrije i površine rubne plohe krutine i prirodom strujanja fluida (fizikalne osobine fluida, temperatura, vrsta strujanja i vrsta prijenosa topline) (Incropera, i dr. 2006).

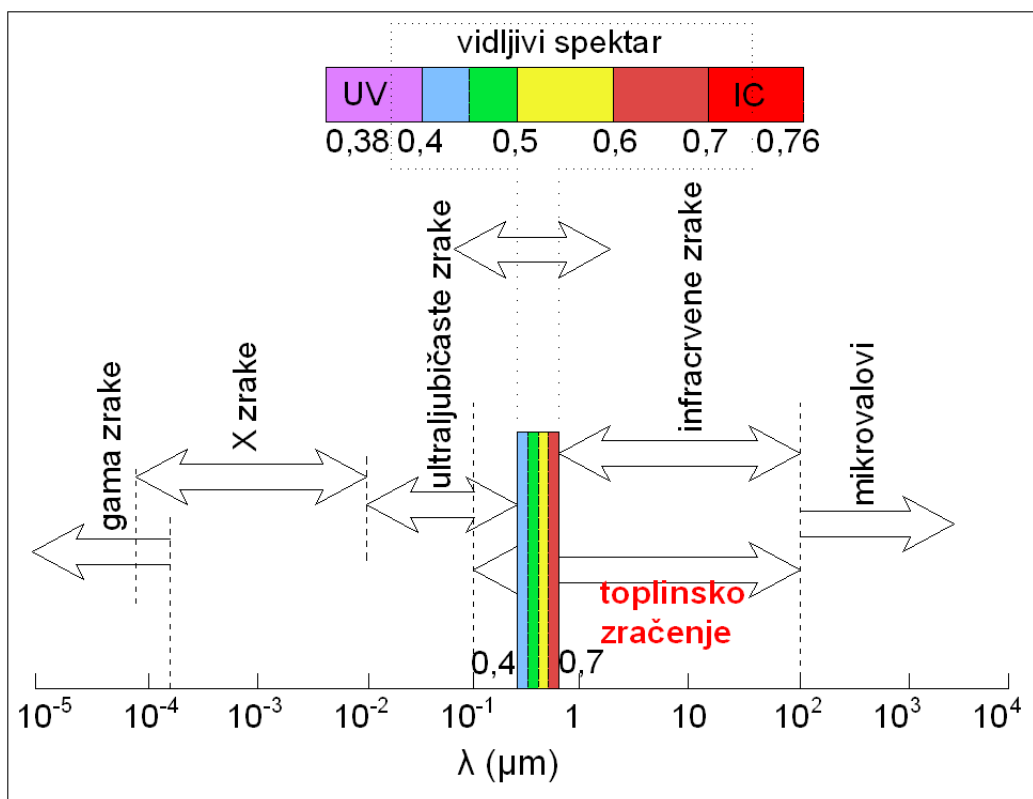
Pozitivan predznak gustoće konvektivnog toplinskog toka ukazuje da se toplina prenosi s površine ($T_s > T_\infty$), dok negativan predznak ukazuje da se toplina prenosi na površinu ($T_s < T_\infty$).

3.3. Toplinsko zračenje ili radijacija

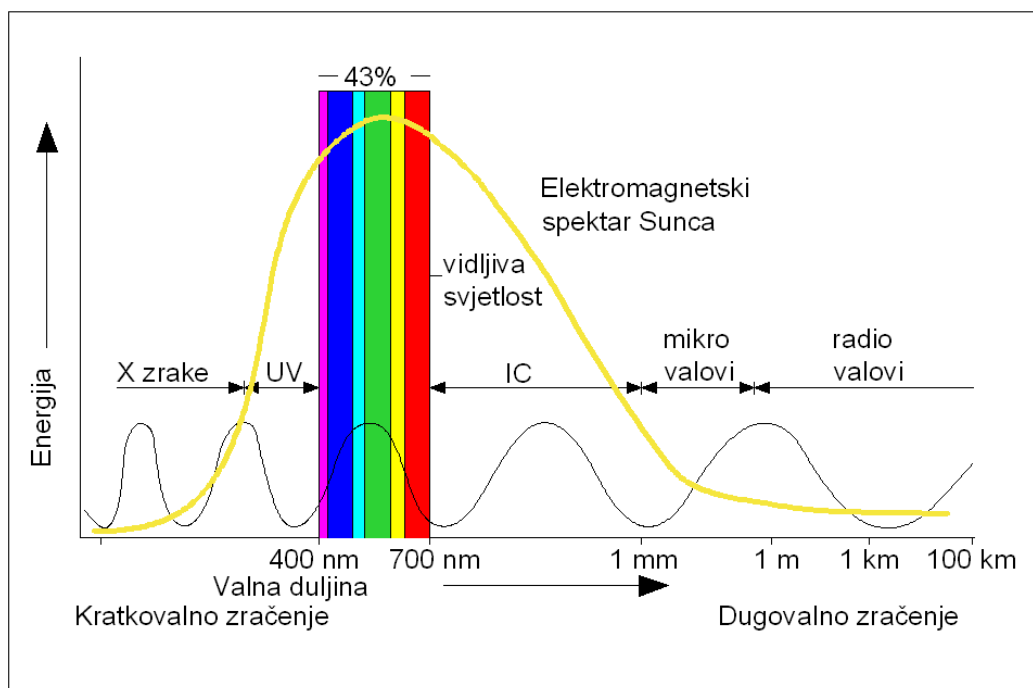
Svako tijelo s temperaturom većom od 0°K zrači toplinsku energiju u obliku elektromagnetskih valova, koji se pri dodiru s drugim tijelima ponovno djelomično ili potpuno pretvaraju u unutarnju energiju tijela. Pri prijenosu topline zračenjem, toplinska energija tijela pretvara se u elektromagnetsko zračenje koje tijelo emitira u okolni prostor. Vrijedi i obrnuto, kada elektromagnetski valovi dospiju do površine nekog tijela, jedan njihov dio tijelo apsorbira i pretvara ga u kinetičku energiju svojih molekula, a to znači toplinu (Kulišić 2005).

Sunce emitira elektromagnetske valove valnih duljina od 0,2 do 24 mikrometra odnosno emitira zračenje u području UV zračenja, vidljive svjetlosti i infracrvenog

zračenja. To zračenje naziva se kratkovalno zračenje (Slika 3.4 i Slika 3.5) (Incropera, i dr. 2006).



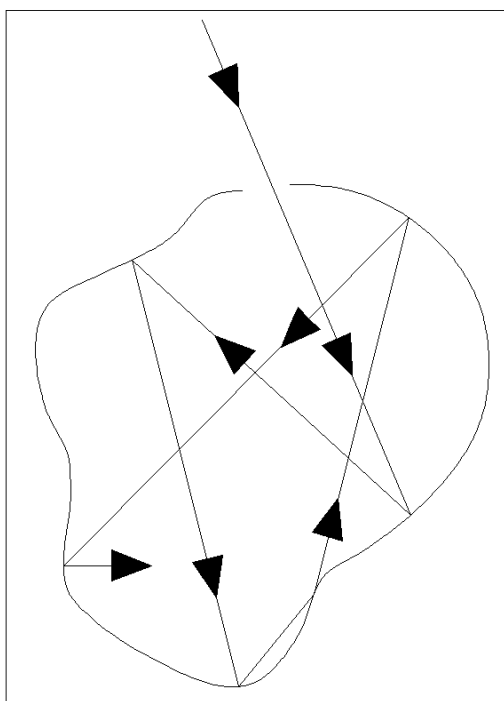
Slika 3.4: Spektar elektromagnetskih valova (Incropera, i dr. 2006)



Slika 3.5: Elektromagnetski spektar i Sunčevo zračenje

Veličina koja opisuje kapacitet tijela da emitira svjetlost određene frekvencije ν (ili točnije, u frekvencijskom intervalu od ν do $\nu + \Delta\nu$) na određenoj temperaturi T naziva se spektralna emisivna snaga tog tijela ($E_{\nu T}$). Ona daje mjeru svjetlosti frekvencije koju tijelo izrači u jedinici vremena po jedinici površine. Za zračenje na svim valnim duljinama, imamo totalnu emisijsku snagu tijela E_T (Incropera, i dr. 2006).

Veličina koja opisuje kapacitet tijela da apsorbira upadnu svjetlost određene frekvencije (ili valne duljine) naziva se sposobnost apsorpcije tijela ($A_{\nu T}$). Sposobnost apsorpcije je omjer zračenja frekvencije ν koju tijelo apsorbira prema zračenju koje je upalo na njegovu površinu. Idealno tijelo koje bi apsorbiralo sve zračenje, a ne bi ništa reflektiralo, naziva se crno tijelo. Njegova sposobnost apsorpcije bila bi jednaka jedan. Crno tijelo ne postoji; to je samo fizikalna apstrakcija. Materijali koji su najbliži crnom tijelu su crni baršun, crni papir, itd. Najsličnija crnom tijelu je sferna šupljina zacrnjena iznutra i gotovo potpuno zatvorena, s izuzetkom malog otvora na jednoj strani (Slika 3.6) (Incropera, i dr. 2006).



Slika 3.6: Fizikalna aproksimacija crnog tijela (Incropera, i dr. 2006)

Svjetlost koja uđe kroz otvor je mnogobrojnim refleksijama potpuno zarobljena unutar tijela (Incropera, i dr. 2006).

Prve rezultate o toplinskom zračenju dali su Joseph Stefan, Ludwig Boltzmann i Wilhelm Wien 1884. godine. Stefan-Boltzmannov zakon govori da svako tijelo na temperaturi T emitira energiju koja je proporcionalna četvrtoj potenciji temperature (Jednadžba 3.3) (Incropera, i dr. 2006).

$$E_b = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (\text{Jednadžba 3.3})$$

Gdje su:

E – gustoća toka zračenja ili emisivna snaga (eng. emmusive power) (W/m^2),

σ – Stefan-Boltzmannova konstanta ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$), i

ε – stupanj emisivnosti.

Stupanj emisivnosti, čija vrijednost se kreće u rasponu od 0 do 1, govori koliko učinkovito određena površina emitira energiju u usporedbi s crnim tijelom. Iz Stefann-Boltzmannovog zakona uočljivo je da je zračenje crnog tijela određeno samo temperaturom. (Incropera, i dr. 2006).

Kad Sunčeva energija dosegne Zemlju djelomično se apsorbira u različitim dijelovima klimatskog sustava. Apsorbirana energija pretvara se u toplinu, što uzrokuje zagrijavanje Zemlje i čini je prikladnom za život. Apsorpcija solarnog zračenja je neujednačena u prostoru i vremenu, što dovodi do sezonskih varijacija u našem podneblju (Golden i Kaloush 2006).

Ako se na površinu nekog tijela dozrači energija Φ (upadno zračenje), tada će se od površine tijela dio te energije reflektirati ($r\Phi$), dio apsorbirati ($a\Phi$), dok će se preostali dio ($d\Phi$) propustiti kroz promatrano tijelo (Slika 3.7) (Incropera, i dr. 2006).

U tom slučaju vrijedi energijska bilanca (Incropera, i dr. 2006):

$$\phi = a_\phi + r_\phi + d_\phi \quad (\text{Jednadžba 3.4})$$

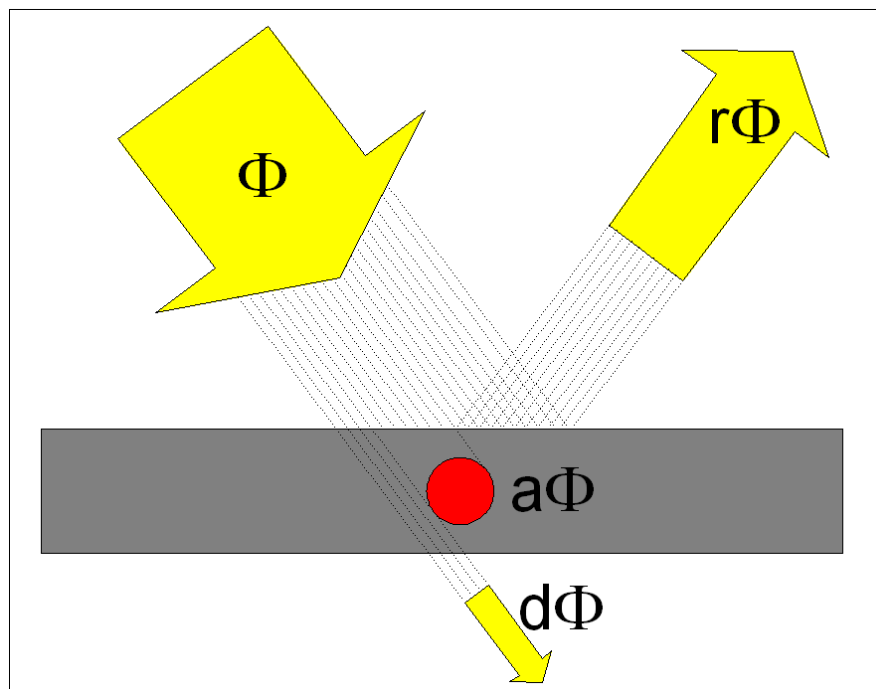
Gdje su:

Φ – dozračena energija,

$a\Phi$ – apsorpcijski faktor,

$r\Phi$ – refleksijski faktor, i

$d\Phi$ – faktor propusnosti ili dijatermije.



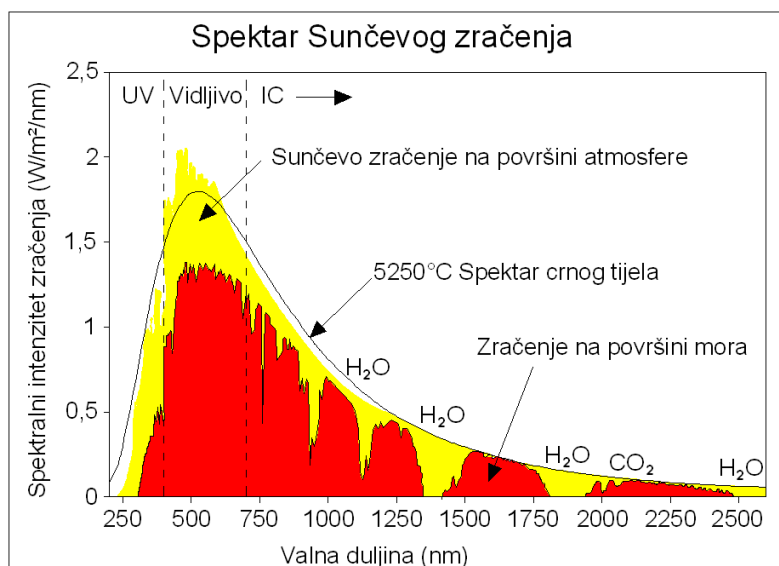
Slika 3.7: Apsorpcija, refleksija i propusnost zračenja (Incropera, i dr. 2006)

Omjer apsorbiranog i upadnog toka zove se faktor apsorpcije ($a\Phi$), a omjer reflektiranog i upadnog toka faktor refleksije ($r\Phi$). Najviše energije emitiralo bi tijelo koje svu njemu dozračenu energiju apsorbira ($a\Phi=1$), a ništa ne reflektira ($r\Phi=0$), niti ne propušta ($d\Phi=0$). Takvo idealno tijelo naziva se crno tijelo, a predstavlja samo teorijski model kakav ne postoji u prirodi. Sva realna tijela imaju $a\Phi < 1$, tj. ona će barem neki iznos dozračene energije reflektirati ($r\Phi \neq 0$) ili čak i propustiti ($d\Phi \neq 0$). Zračenje šupljine je vrlo blisko teorijskom modelu crnog tijela, jer se upadna zraka pri svakom sudaru s površinom šupljine postepeno apsorbira, tako da kroz mali otvor šupljine izlazi zanemarivo malen iznos reflektirane energije. Takva šupljina praktički apsorbira svu dozračenu energiju, tj. ona ima $a\Phi=1 = 100\%$. Zbog toga će i sama šupljina emitirati maksimalnu energiju, kako bi emitiralo i teorijsko crno tijelo iste temperature, tj. $e = 1$.

Svojstvo podloge da odbije zračenje možemo izraziti koeficijentom refleksije ili albedom. Albedo je odnos jačine reflektiranog zračenja prema ukupnom upadnom zračenju na promatrano tijelo. Potpuno bijelo tijelo imalo bi albedo 1,0 jer bi potpuno odbijalo zračenje, a potpuno crno tijelo imalo bi albedo nula. U Tablici 3.1 su prikazane prosječne vrijednosti albeda za neke karakteristične površine (Iqbal 1983), (Matić 2007).

Tablica 3.1: Prosječne vrijednosti albeda za neke karakteristične površine (Matić 2007)

POVRŠINA	ALBEDO
Snijeg, svjež	0,75
Vodene površine	0,07
Zemlja	0,14
Zemljani put	0,04
Crnogorična šuma zimi	0,07
Šuma u proljeće, obrađena polja	0,26
Istrošen asfalt	0,10
Istrošen beton	0,22
Suho lišće	0,30
Suha trava	0,20
Zelena trava	0,26
Bitumenizirani krov	0,13
Lomljeni kamen	0,20
Zgrade, tamne (crvena cigla, tamna fasadna boja)	0,27
Zgrade, svijetle (svijetla cigla, svijetla fasadna boja)	0,60

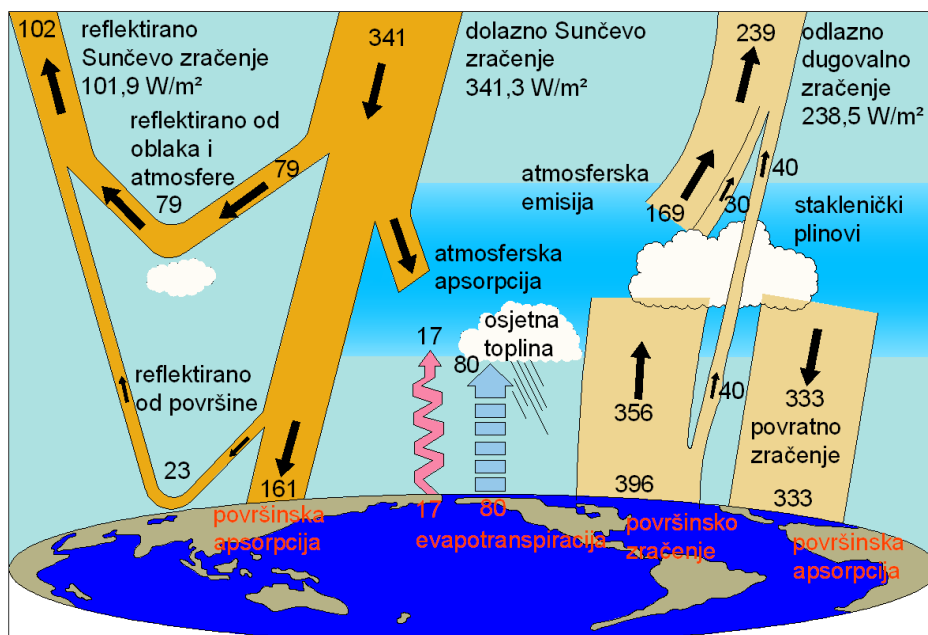


Slika 3.8: Sunčevo zračenje na vrhu atmosfere, zračenje crnog tijela i Sunčevo zračenje pri tlu (Iqbal 1983), (Cengel 1998)

Površina ispod crne linije na Slici 3.8 je količina energije (ovisno o valnoj duljini) koju bi emitiralo savršeno crno tijelo jednake temperature kao i površina Sunca.

Žuta površina je količina energije koja dolazi sa Sunca do vrha Zemljine -atmosfera. Pri prolazu kroz atmosferu mijenja se količina i smjer Sunčevog zračenja, ali najveći dio zračenja prolazi nesmetano kroz atmosferu i dolazi do tla. Kažemo da je atmosfera propusna za kratkovalno Sunčevo zračenje. Crvena površina prikazuje količinu zračenja ovisno o valnoj duljini koja dolazi do tla. Uočljivo je da atmosfera jako upija ultraljubičasti i infracrveni dio spektra, a uopće ne propušta ultraljubičasto zračenje valnih duljina manjih od 0,38 mikrometara. Također atmosfera ne propušta infracrveno zračenje valnih duljina većih od 7 mikrometara (Iqbal 1983), (Cengel 1998).

Energetska bilanca (Slika 3.9) (energy balance) objašnjava koliko energije se prenosi na Zemlju i sa Zemlje. Energetska bilanca temelji se na prvom zakonu termodinamike, koji polazi od toga da se energija ne može stvoriti ni iz čega niti se može uništiti, već se može samo prenijeti iz jednog oblika u drugi ili s jednog tijela na drugo. Za površine na Zemlji to znači da sva ona energija koju je neka površina apsorbirala, negdje odlazi. Ili zagrijava zrak iznad površine, ili isparava s vlažnošću, ili se pohranjuje u materijalu kao toplina (Trenberth, Fasullo i Kiehl 2009).



Slika 3.9: Radijacijska i energetska bilanca sustava Zemljina površina-atmosfera
(Trenberth, Fasullo i Kiehl 2009)

Energetska bilanca može se prikazati općim izrazom (Jednadžba 3.5) (Santamouris, Nasimakopoulos, i dr. 2001):

$$EG = EL + ES \quad (\text{Jednadžba 3.5})$$

Gdje su:

EG – prirast energije (eng. energy gains),

EL – energetske gubitke (eng. energy losses), i

ES – pohranjena energija (eng. energy storage).

Prirast energije (EG) uključuje zbroj neto zračenja (Q_r), u obliku Sunčevog zračenja i dugovalnog zračenja kojeg emitiraju neprozirni elementi (zgrade, ulice,...), kao i antropogene topline (Q_T) povezane s prometnim sustavima, električnom energijom i drugim izvorima topline. Antropogena toplina predstavlja umjetno stvorenu toplinu iz zgrada, strojeva ili ljudi. U mnogim područjima, posebno u ruralnim i prigradskim područjima, količina antropogene topline je mala u usporedbi s ostalim faktorima jednadžbe energetske bilance. U gusto izgrađenim urbanim područjima količina antropogene topline je veća i može imati veliki utjecaj na nastajanje toplinskih otoka (Santamouris, Nasimakopoulos, i dr. 2001).

Gubici energije (EL) javljaju se u obliku senzibilne (Q_E) (eng. sensible) ili latentne topline (Q_L), koja je rezultat konvektivnog prijenosa topline između neprozirnih površina i zraka ili evapotranspiracije. Gubici mogu također nastati uslijed prijenosa topline gibanjem mase fluida između urbanih i okolnih okoliša. Iz navedenog energetska bilanca može se napisati (Jednadžba 3.6) (Santamouris, Papanikolaou, i dr. 2001):

$$Q_r + Q_T = Q_E + Q_L + Q_s + Q_A \quad (\text{Jednadžba 3.6})$$

Gdje su:

Q_r – neto zračenje,

Q_T – antropogena toplina,

Q_E – senzibilna toplina (eng. sensible heat),

Q_L – latentna toplina (eng. latent heat),

Q_s – pohranjena toplina, i

Q_A – prijenos topline gibanjem mase fluida (eng. advection).

Antropogena toplina povezana je s prometnim sustavima, energetikom i ostalim izvorima topline. Antropogena toplina u urbanim područjima znatno utječe na ambijentalnu temperaturu i povećanje intenziteta urbanih toplinskih otoka. Taha 1997. godine daje pregled nivoa antropogenih izvora topline za američke, europske i azijske gradove. Iz podataka je uočljivo da antropogena toplina u centrima velikih gradova pridonosi povećanju temperature zraka od 2 do 3 K (Tablica 3.2) (Taha 1997), (Taha, Akbari, i dr. 1992).

Tablica 3.2: Antropogena toplina i neto zračenje u odabranim gradovima (Taha 1997)

Grad	Antropogena toplina [W/m ²]	Neto zračenje pri svim valnim duljinama [W/m ²]
Chicago	53	-
Cincinnati	26	-
Los Angeles	21	108
Fairbanks	19	18
St. Louis	16	-
Manhattan, New York City	117-159	93
Moskva	127	-
Montreal	99	52
Budimpešta	43	46
Osaka	26	-
Vancouver	19	-
Berlin	21	57

3.4. Toplinska svojstva materijala

Toplinska svojstva obuhvaćaju karakteristike materijala kojima se utvrđuje reakcija materijala kad je podvrgnut jakom izvoru topline ili fluktuacije topline tijekom vremena. Iz različitih studija uočeno je da kod kolničkih konstrukcija najveću ulogu ima albedo, toplinska provodljivost, emisivnost, toplinska difuzivnost i vodopropusnost. U više provedenih studija uočeno je da s porastom albeda smanjuje toplinska energija. Smanjena toplinska energija utječe na smanjenje efekta urbanih toplinskih otoka. Kod kolničkih konstrukcija toplinska provodljivost i emisivnost su blisko povezane s mehanizmom prijenosa topline. Materijali s

visokom toplinskom provodljivošću imaju mogućnost dublje prenijeti toplinu. S druge strane, volumetrijski toplinski kapacitet i toplinska difuzivnost su blisko povezane s termodinamičkim svojstvima materijala. Materijali s visokim toplinskim kapacitetom mogu pohraniti više topline po svojoj masi. S povećanjem količina pohranjene topline, povećava se temperatura materijala. Navedena svojstva materijala objašnjena su u nastavku (Gui, i dr. 2007).

3.4.1. Toplinska vodljivost (eng. thermal conductivity)

Toplinska vodljivost opisana je Fourierovim zakonom objašnjenim u poglavlju 3.1. Prijenos topline u zemlju podrazumijeva provođenje topline kroz polubeskonačno čvrsto tijelo što znači da nema velikih fluktuacija temperatura u odnosu na vrijeme zbog dovoljne dubine. Razlog je što s povećanjem dubine, povećana toplinska masa tla mijenja temperaturu na takvim dubinama neovisno o ciklusima zagrijavanja i hlađenja na površini kolnika. Međutim i dalje postoji toplinski tok u tlu do konačne dubine, budući da se temperatura smanjuje s dubinom. Iz navedenog ovakve vrijednosti unose se kao rubni uvjeti za model (Gui, i dr. 2007).

Uobičajene vrijednosti toplinske provodljivosti dobivene različitim istraživanjima prikazane su u Tablici 3.3 (Chadbourn, i dr. 1998)

Tablica 3.3: Koeficijenti toplinske provodljivosti asfaltbetona (Chadbourn, i dr. 1998)

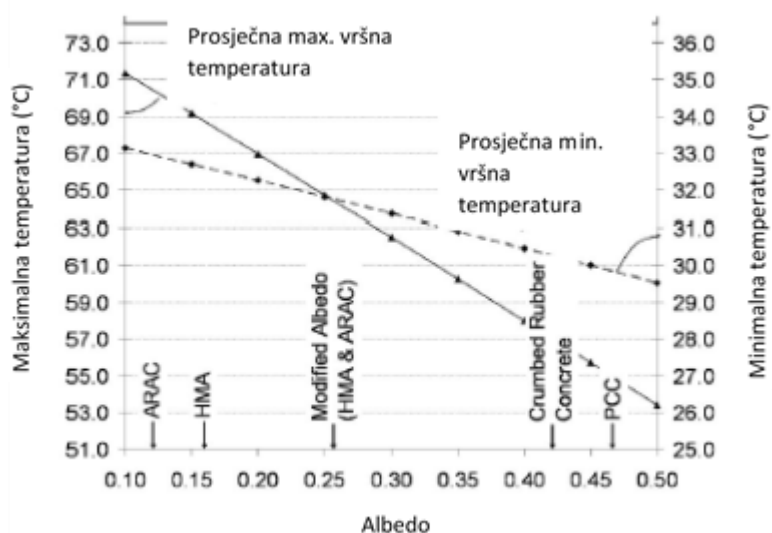
Koeficijent toplinske vodljivosti asfaltbetona [W/m K]	Autor
0,76	(Turner i Malloy 1981)
0,80 – 1,06	(Jordan i Thomas 1976)
1,21	(Corlew i Dickson 1968)
1,21 – 1,38	(Tegeler i B.J. 1973)
1,49	(Kersten 1949)
2,28 – 2,88	(Kavianiopour 1967)

Iz Tablice 3.3 uočljive su varijacije u vrijednostima koeficijenata toplinske provodljivosti. Rezultati istraživanja autora Turner i Malloy daju najnižu vrijednost koeficijenta toplinske provodljivosti. Rezultati istraživanja autora Kavianiopour daju

najveću vrijednost koeficijenta toplinske provodljivosti. Iz navedenog istraživanja zaključeno je da tako širok raspon vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti uzrokuju varijacije toplinskih svojstava korištenih agregata i veziva. Rezultati istraživanja pokazuju da koeficijent toplinske provodljivosti za vapnenac varira od 0,7 W/m K (Turner i Malloy 1981) do 4,2 W/m K (Raznjevica 1976). Rezultati istraživanja također pokazuju da različite vrste bitumenskih veziva utječu na vrijednost koeficijenta toplinske provodljivosti (Raznjevica 1976).

3.4.2. Albedo i indeks sunčeve refleksije

Albedo je važan parametar koji utječe na temperaturu kolnika. To je bezdimenzionalna veličina koja definira odnos veličine reflektiranom zračenju prema ukupnom upadnom zračenju. Veće vrijednosti albeda označavaju veću refleksiju površine materijala, što znači veću apsorpciju topline. Teško je predvidjeti utjecaj albeda na promjenu maksimalne i minimalne temperature površine kolnika. Međutim, istraživanja su pokazala da albedo više utječe na maksimalnu temperaturu površine nego na minimalnu temperaturu površine, budući da vrijednost albeda utječe prisustvo sunca. Smanjenje minimalne površinske temperature u noćnim satima rezultat je smanjenja apsorbirane energije tijekom dana. Na Slici 3.10 prikazan je utjecaj albeda (vrijednosti 0,5 – 1,0) na maksimalnu i minimalnu temperaturu površine kolnika (Gui, i dr. 2007).



Slika 3.10: Utjecaj albeda na maksimalnu i minimalnu temperaturu površine kolnika (Gui, i dr. 2007)

Indeks sunčeve refleksije (eng. Solar reflectance indeks – SRI) predstavlja prosječnu temperaturu površine u odnosu na standardno bijelo tijelo (SRI = 100) i standardno crno tijelo (SRI = 0) u standardnim sunčevim i ambijentalnim uvjetima (ASTME1980-11 2001).

Izračun indeksa sunčevog zračenja (SRI) računa se prema sljedećem izrazu (ASTME1980-11 2001):

$$SRI = 100 \cdot \frac{T_b - T_s}{T_b - T_w} \quad (\text{Jednadžba 3.7})$$

Gdje su:

SRI – indeks sunčevog zračenja,

T_b – temperatura površine crnog tijela,

T_w – temperatura površine bijelog tijela, i

T_s – temperatura površine promatranog tijela.

U standardnim sunčevim i okolišnim uvjetima Jednadžba 3.7 se može pojednostavniti pa se indeks sunčevog zračenja računa prema Jednadžbi 3.8 (ASTME1980-11 2001):

$$SRI = 123,97 - 141,35 \cdot \chi + 9,655 \cdot \chi^2 \quad (\text{Jednadžba 3.8})$$

$$\chi = \frac{(\alpha - 0,029\varepsilon) \cdot (8,797 + h_c)}{9,5205\varepsilon + h_c}$$

Gdje su:

α – sunčeva apsorpcija ($\alpha = 1 - \text{sunčeva refleksija}$),

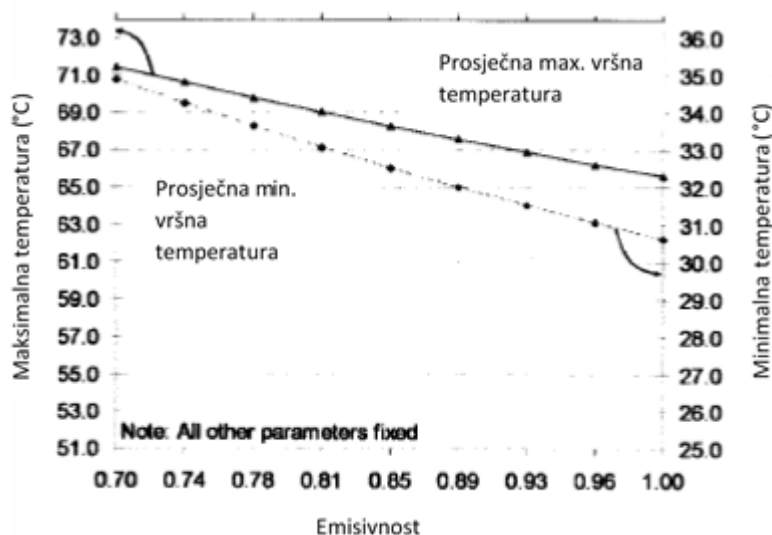
ε – emisivnost, i

h_c – konvekcijski koeficijent.

Određivanje sunčeve refleksije i toplinske emisivnosti površina, i naknadno računanje relativne temperature površine u odnosu na temperaturu crnog i bijelog tijela (definirano kao indeks sunčeve refleksije), utječe na odabir odgovarajućih materijala za energetske učinkovite konstrukcije, kako zgrada tako i kolnika (ASTME1980-11 2001).

3.4.3. Izračivost (emisivnost)

Izračivost (emisivnost) predstavlja omjer zračenja površine tijela na određenoj temperaturi u odnosu na zračenje crnog tijela pri istoj temperaturi (Cengel 1998). Na Slici 3.11 pokazan je trend opadanja i maksimalne i minimalne temperature površine s povećanjem vrijednosti izračivosti od 0,7 do 1,0. Uočljivo je da vrijednost izračivosti ima veći utjecaj na minimalnu temperaturu površine. To je iz razloga što se prijenos topline zračenjem površina vrši noću. Tijekom dana dolazno sunčevo zračenje poništava dio emitiranog zračenja površina. Iz navedenog izračivost ima veći utjecaj na minimalnu nego na maksimalnu temperaturu površine.



Slika 3.11: Utjecaj emisivnosti na maksimalnu i minimalnu temperaturu površine kolnika (Gui, i dr. 2007)

3.4.4. Specifični i volumetrijski toplinski kapacitet

Specifični toplinski kapacitet materijala definira se kao toplina koja je potrebna da se 1 kilogramu mase tvari povisi temperatura za 1°K (Jednadžba 3.9) (Dehdezi 2012):

$$\Delta Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (\text{Jednadžba 3.9})$$

Gdje su:

ΔQ – promjena topline [J],

m – masa tvari [kg],

c_p – specifični toplinski kapacitet [J/kg K], i

ΔT – promjena temperature [°K].

Volumetrijski toplinski kapacitet materijala definira se kao toplina koja je potrebna da se 1 m³ tvari povisi temperatura za 1°K (Jednadžba 3.10) (Dehdezi 2012):

$$VHC = \rho \cdot c_p \quad (\text{Jednadžba 3.10})$$

Gdje su:

VHC – volumetrijski toplinski kapacitet [J/m³ K],

ρ – gustoća [kg/m³], i

c_p – specifični toplinski kapacitet [J/kg K].

Uobičajene vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta dane su u Tablici 3.4 (Chadbourn, i dr. 1998).

Tablica 3.4: vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta asfaltbetona (Chadbourn, i dr. 1998)

Specifični toplinski kapacitet asfaltbetona [J/kg K]	Autor
850 – 870	(Jordan i Thomas 1976)
920	(Corlew i Dickson 1968)
840 - 1090	(Tegeler i B.J. 1973)

Istraživanja su pokazala da se s povećanjem volumetrijskog toplinskog kapaciteta smanjuje maksimalna temperatura površine i da se povećava minimalna temperatura površine (Gui, i dr. 2007).

3.4.5. Toplinska difuzivnost (eng. thermal diffusivity)

Toplinska difuzivnost označava brzinu promjene tijela ili tijekom širenja topline, koja je definirana omjerom toplinske provodljivosti i produkta gustoće i specifičnog toplinskog kapaciteta (Jednadžba 3.11) (Dehdezi 2012):

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (\text{Jednadžba 3.11})$$

Gdje su:

α – toplinska difuzivnost [m^2/s],

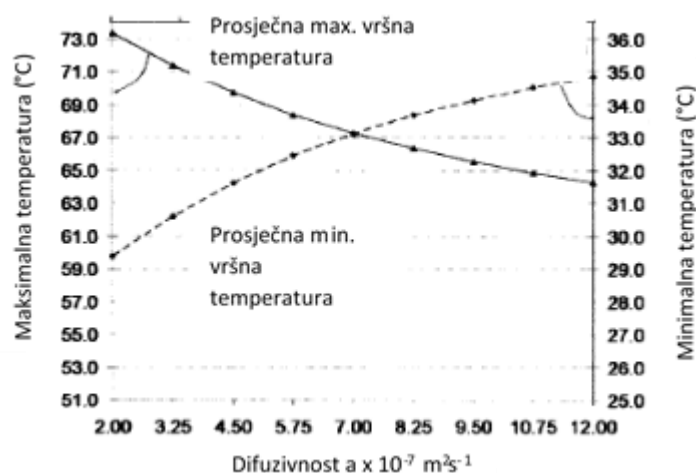
k – koeficijent toplinske vodljivosti [$\text{W}/\text{m K}$],

ρ – gustoća [kg/m^3], i

c_p – specifični toplinski kapacitet [$\text{J}/\text{kg K}$].

Veće vrijednosti toplinske difuzivnosti označavaju brži prijenos topline u medij. Male vrijednosti toplinske difuzivnosti označavaju da je većinu topline materijal apsorbirao i da će se kasnije prenijeti dalje (Dehdezi 2012).

Utjecaj toplinske difuzivnosti na maksimalnu i minimalnu temperaturu površine kolnika prikazan je na Slici 3.12. Iz slike je uočljivo da s porastom vrijednosti toplinske difuzivnosti prosječna maksimalna temperatura površine kolnika se smanjuje dok se minimalna temperatura površine kolnika povećava (Gui, i dr. 2007).



Slika 3.12: Utjecaj toplinske difuzivnosti na maksimalnu i minimalnu temperaturu površine kolnika (Gui, i dr. 2007)

Uobičajene vrijednosti toplinske difuzivnosti dobivene različitim istraživanjima prikazane su u Tablici 3.5 (Chadbourn, i dr. 1998).

Tablica 3.5: *Koeficijenti toplinske vodljivosti asfaltbetona* (Chadbourn, i dr. 1998)

Toplinska difuzivnost asfaltbetona [m²/s]	Autor
0,37 – 0,53	(Jordan i Thomas 1976)
0,59	(Corlew i Dickson 1968)
1,15 – 1,44	(Kavianiopour 1967)

4. MODELI ZA PRORAČUN TEMPERATURE KOLNIKA

Raspodjela temperature unutar slojeva kolničke konstrukcije jedan je od najutjecajnijih čimbenika koji utječu na mehanička svojstva i svojstva nosivosti asfaltnih kolnika (Arangi i Jain 2015). Bitumenizirani materijali i asfaltne mješavine su materijali osjetljivi na temperaturne promjene i njihova čvrstoća i moduli su promjenjivi s obzirom na promjenu temperature. Temperatura kolnika definirana je kao promjena površinske temperature tijekom vremena u međudjelovanju s meteorološkim parametrima. Naime, temperatura kolnika ovisi o meteorološkim parametrima, a na neke od njih opet utječe materijal kolnika, toplinska vodljivost, toplinska emisivnost, specifična toplota i površinska konvekcija. Na povećanu temperaturu kolnika najviše utječe temperatura zraka uslijed promjene sunčevog zračenja te brzina vjetra i relativna vlažnost zraka. Samim time, većina modela za predviđanje temperature kolnika uključuje upravo ove parametre (Nižetić i Papadopoulos 2018) (Van Dam, i dr. 2015). U više različitih klimatskih regija provedena su opsežna istraživanja na temu modela za predviđanje temperatura kolnika kako bi se utvrdila najviša razina točnosti rezultata (Nižetić i Papadopoulos 2018).

Modeli za predviđanje temperature kolnika mogu se podijeliti u tri kategorije (Chen, Wang i Xie 2019):

- analitičke modele
- numeričke modele
- empirijske modele.

Analitički i numerički modeli mogu se razviti rješavanjem parcijalnih diferencijalnih jednačbi za toplinsku vodljivost (kondukciju) za zadane rubne uvjete. Empirijski modeli najčešće se razvijaju na temelju statističke analize.

Najstariji analitički model iz 1957. godine koristio je meteorološke podatke, a izračun se temeljio na rješenju periodičke promjene temperature u polubeskonačnom mediju u kontaktu sa zrakom uz pretpostavku sinusoidne krivulje fluktuacije temperature (Barber 1957). Daljnja istraživanja u razvoju analitičkih modela usredotočila su se na distribuciju temperature na različitim dubinama kolnika pri čemu je usvojen teorijski okvir temeljen na jednodimenzionalnom modelu toplinske vodljivosti (Diefenderfer, Al-Qadi, i dr. 2003).

1987. godine u SAD-u je započeo projekt „Long term pavement performance - LTPP“ čime je, između ostalog, započelo kontinuirano mjerenje temperatura asfaltnih kolnika. Uz temperaturu kolnika, prikupljana je velika količina podataka o meteorološkim parametrima (temperatura zraka, sunčevo zračenje, itd.) što je omogućilo istraživanje povezanosti pojedinih meteoroloških parametara i temperature kolnika odnosno distribucije temperature po dubini. Ovakvi modeli koristili su najčešće regresijsku analizu za definiranje modela koji opisuju promjenu i distribuciju temperature kolnika (Diefenderfer, Al-Qadi, i dr. 2006).

Period od početka istraživanja na ovu temu do danas se može rezimirati u tri faze. U prvoj fazi (1950. – 1990. godine), istraživanja su bila usredotočena na varijacije u promjeni i distribuciji temperature. U drugoj fazi (1990. – 2000. godine) za razvoj modela najčešće se koristila regresijska analiza s fokusom na minimalnu i maksimalnu temperaturu asfaltnih kolnika. U trećoj fazi (od 2000. godine – danas) istraživanja uključuju statističke metode za razvoj regresijskih modela za predviđanje temperature kolnika. U ovom razvoju modeli se razvijaju za potrebe korekcije progiba kolničkih konstrukcija s obzirom na temperaturu asfaltnih slojeva i za simulaciju temperaturnih promjena u strukturi kolničke konstrukcije (Adwan, i dr. 2021).

Metode i modeli za predviđanje temperatura kolnika neprestano se razvijaju tijekom zadnjih pola stoljeća. Neka istraživanja obuhvaćaju razvoj matematičkih modela za predviđanje temperatura u slojevitom sustavu asfaltnih kolnika (Khan, Islam i Tarefder 2019), (Wang, Roesler i Guo 2009).

4.1. Analitički modeli

Rana istraživanja koja su koristila analitičke modele za predviđanje temperatura kolnika započela su 1950. - ih godina kada je Barber započeo s istraživanjem izračuna temperatura kolnika koristeći klimatske podatke (Barber 1957). *Tablica 4.1* prikazuje istraživanja koja su koristila analitičke modele za predviđanje temperature kolnika. Primarna karakteristika ovakvog načina izračuna temperatura kolnika je da se većina izmjerenih klimatskih parametara koriste kao ulazni parametri u numeričkim ili empirijskim temperaturnim modelima (Dong 2015). Analitički modeli ne zahtijevaju prostornu jednoznačnost stvarnog i modeliranog polja ili vremensku integraciju za razvoj temperaturnih modela ovisnih o vremenu i isključuju

proračunske probleme numeričkih metoda kao što je matematička stabilnost (Wang 2011). Unatoč prednostima ovakvih modela, analitička rješenja temperaturnih profila kroz višeslojni sustav kolnika su upitna, jer pojedini rezultati nisu mogući i gdje rješenja često i ne postoje u zatvorenom obliku zbog kompleksnosti u rješavanju zatvorenih oblika analitičkih rješenja (Asefzadeh, Hashemian i Bayat 2017), (Alavi, Pouranian i Hajj 2014).

Tablica 4.1: Pregled analitičkih modela

Autor	Godina /lokacija	Utjecajni parametri	Zaključci
(Barber 1957)	1957. SAD	Temperatura kolnika, vjetar, oborine, temperatura zraka, sunčevo zračenje, koeficijenti toplinskih svojstava	Stvarna temperatura je uspoređena s dobivenim podacima. Očekivana maksimalna temperaturna razlika (greška) je oko 3 °C. U pojedinim slučajevima temperaturna razlika iznosi i 5 °C. Model izračunava maksimalnu temperaturu i u mogućnosti je predvidjeti minimalnu temperaturu.
(Solaimanian i Kennedy 1993)	1993. SAD	Maksimalna temperatura zraka, satno sunčevo zračenje	Model nije uzimao u obzir zimske uvjete, budući da se istraživanje odnosi isključivo na maksimalne temperature.
Hightner i Wall (Hightner i Douglas 1984)	1984. SAD	Toplinska vodljivost asfaltnih kolnika pri različitim specifičnim gustoćama	Uočena je značajna razlika u prijenosu topline kod kolnika s vapnenačkim agregatom što je povezano s granulometrijom i veličinom agregata.
(Liang i Niu 1998)	1998. SAD	Temperatura zraka, temperatura površine kolnika	Rezultati ukazuju na mogućnost nelinearne distribucije temperature s dubinom, pogotovo u slučaju razmatranja dnevne promjene temperature.
(Liu i Yuan 2000)	2000. SAD	Temperatura zraka, temperatura površine kolnika, dubina, vrijeme	Analitičko rješenje može se proširiti za predviđanje distribucije temperature kroz asfaltni kolnik tijekom mjeseci.

4.2. Numerički modeli

Numeričke metode su primjenjive na široki raspon problema i različitih uvjeta, ali su zahtjevnije za implementaciju. Točnost rješenja u ovim metodama postiže se aproksimacijom. Numeričke metode, među kojima je najraširenija metoda konačnih elemenata, temelje se na četiri koraka (Tablica 4.2). U prvom koraku koristi se parcijalna diferencijalna jednadžba ovisna o vremenu za određivanje toplinske vodljivosti u slojevitom sustavu kolnika. Ova jednadžba se uobičajeno primjenjuje na jednodimenzionalnu i dvodimenzionalnu prostornu domenu prijenosa topline (Khan, Islam i Tarefder 2019). U drugom koraku definira se Dirichletov rubni uvjet (prijelaz površinske temperature) (Quin i Hiller 2011). Rubni uvjet povezuje

klimatske parametre s temperaturnim gradijentom po dubini slojeva kolnika. Ova veza se postiže analizom energetske ravnoteže na površini kolnika (Hamed i Maryam 2011), (Crevier i Delage 2001). U trećem koraku potrebno je diskretizirati prostornu domenu koristeći neku od numeričkih metoda (metoda konačnih elemenata ili metoda konačnih razlika) što rezultira velikim sustavom običnih diferencijalnih jednadžbi u vremenu (Quin i Hiller 2011), (Ksaibati, Yavuzturk i Chiasson 2005). U četvrtom koraku potreban je odgovarajući vremenski korak za rješavanje ovih običnih diferencijalnih jednadžbi. U numeričkim analizama uzima se kompleksni proces prijenosa topline kao osiguranje široke primjenjivosti modela i predviđanja temperature kolnika u različitim uvjetima. Na temperaturu kolnika utječe toplinska vodljivost i početna vrijednost rubnih uvjeta. Analitičke metode često koriste površinsku temperaturu kao početni rubni uvjet, koji je konstantan u vremenu (Wang 2013). Međutim, koristeći ovo pojednostavljenje, utjecaj klimatskih parametara na temperaturu površine (brzina vjetra, sunčevo zračenje, temperatura zraka) se ne može uvrstiti u izračun (Wang, Roesler i Guo 2009), (Wang i Roesler 2014), (Chong, Tramonstini i Pivoto Specht 2009). Numeričke metode, za razliku od regresijskih jednadžbi, mogu uključiti i stvarne (promjenjive u vremenu) klimatske parametre u rubne uvjete (Chen, Li, i dr. 2014). U ovom radu je korištena metoda konačnih elemenata.

Tablica 4.2: Pregled numeričkih modela

Autor	Godina /lokacija	Utjecajni parametri	Zaključci
(Straub, Schenck i Przbycien 1968)	1968. SAD	Temperatura kolnika, sunčevo zračenje, temperatura zraka	Utjecaj sunčevog zračenja na temperaturu površine je veće od utjecaja temperature zraka. Očekivana maksimalna temperatura površine nije osjetljiva na primarne ulazne vrijednosti. Utjecaj ulazne temperature je značajan s povećanjem dubine za dobivanje preciznih predviđanja.
(Dempsey i Thompson 1970)	1970. SAD	Kratkovalno i dugovalno zračenje, toplinska svojstva, temperatura zraka, klasifikacija materijala, udio vlažnosti, toplinski kapacitet i toplinska vodljivost.	Napredne jednadžbe mogu biti komplicirane i potreban je veliki broj ulaznih parametara za predviđanje temperature kolnika.
(Rumney i Jimenez 1970)	1970. SAD	Temperatura kolnika, temperatura zraka, sunčevo zračenje	Modeli nomograma ne daju precizne rezultate. Nomogrami su razvijeni za dubine od 50 do 80 mm.

			Korelacija nomograma za predviđanje temperature kolnika razvijena je za specifičnu temperaturu zraka i intenzitet sunčevog zračenja. Istraživanje je usmjereno na vruće pustinjske klime za utvrđivanje maksimalne temperature asfalta.
(Williamson 1972)	1972. Južna Afrika	Sunčevo zračenje, temperatura zraka, toplinska svojstva	Validacija modela je napravljena korištenjem podataka iz asfaltnog kolnika debljine 20 cm. Model nije uključivao utjecaj vlažnosti i oborina.
(Anderson i Christison 1972)	1972. Kanada	Sunčevo zračenje, temperatura zraka, brzina vjetra, fizikalna svojstva	Istražene su performanse kolnika u klimatskim uvjetima niskih temperatura. Model nije uključivao utjecaj vlažnosti i oborina. Istraživane su razlike u temperaturama različitih vrsta kolnika (obični, bijelo bojani, kolnici u sjeni)
(Kondo i Miura 1976)	1976. Japan	Temperatura zraka, temperatura kolnika	Istraživanje nije uključivalo niske temperature koje se smatraju jednim od glavnih uzroka propadanja kolnika u Japanu.
(Lytton, i dr. 1990)	1990. SAD	Struktura kolnika, svojstva materijala	Model nije prikladno objasnio dinamiku prijenosa topline i nedostaci su mogući zbog velikog broja utjecajnih faktora. Sunčevo zračenje, kao ulazni parametar, dobiva se koristeći regresijsku jednadžbu iako se može dobiti iz pouzdanih izvora. Klimatski model nije uključivao utjecaj sezonske razlike u svojstvima sunčevog zračenja na površinu kolnika
(De Picado Santos 2000)	2000. Portugal	Mjesečna maksimalna temperatura zraka, mjesečna minimalna temperatura zraka, satna temperatura slojeva asfaltnog kolnika	Utvrđena su satna oštećenja koristeći satne meteorološke podatke koji omogućuju točna predviđanja distribucije temperature kolnika kroz prethodno validirane modele. Struktura modela je široko primjenjiva.
(Mammeri, i dr. 2015)	2015. Francuska	Temperatura kolnika, temperatura zraka, dubina, vlažnost, sunčevo zračenje	Usporedna studija eksperimentalnih i numeričkih rezultata ukazuje da je efekt noćnog hlađenja važan parametar u modelima (pogotovo u sušnim područjima).

4.3. Empirijski modeli

Empirijski modeli mogu se podijeliti u tri kategorije (Chen, Wang i Xie 2019):

- linearne regresijske modele
- nelinearne regresijske modele
- modele neuralnih mreža

Najjednostavnija metoda za razvoj empirijskih modela je linearna regresija, koja predviđa maksimalnu ili minimalnu temperaturu na određenoj dubini (Asefzadeh, Hashemian i Bayat 2017), (Ramadhan i Al-Abdul Wahhab 1997), (Lutfi, i dr. 1998), (Bosscher, i dr. 1998). Linearni regresijski modeli obično obuhvaćaju nekoliko

parametara, a koriste se za predviđanje temperature u stvarnom vremenu (Kršmanc, Slak and Demšar 2013). Nedostatak ovih modela je što ne uzimaju stvarno ponašanje promjene temperature koje kroz dnevne cikluse pokazuje nelinearnu promjenu s dubinom. Zato se metoda linearne regresije u predviđanju temperatura kolnika ne smatra pogodnom.

Budući da je promjena temperature promjenjiva u vremenu, razvijeni su napredni empirijski modeli koji uključuju sinusne funkcije (Ovik, Birgisson and Newcomb 1999), (Park, Buch and Chatti 2001). Regresijske metode uspostavljaju kvantitativnu vezu između temperaturnih podataka i asfaltnog kolnika (Li, Liu and Sun 2018). Nadalje, jednadžbe su primjenjive za dobivanje matematičkih rješenja za stvarne probleme i iskazuju vezu između različitih veličina u svrhu predviđanja temperatura kolnika na određenoj lokaciji (Daba 2018). Empirijski modeli mogu dati pouzdana predviđanja temperatura što omogućuje njihovu široku primjenu (Chen, Wang and Xie 2019). *Tablica 4.3* prikazuje istraživanja koja koriste empirijske modele za predviđanje temperatura kolnika.

Tablica 4.3: Pregled empirijskih modela

Autor	Godina /lokacija	Utjecajni parametri	Zaključci
(Robertson 1997)	1997. SAD	$1331\alpha\tau a \frac{1}{\cos Z} \cos Z + \epsilon\sigma T_a^4 - h_c(T_s - T_a) - 164k - \epsilon\sigma T_s^4 = 0$ α – apsorpcija kolničke površine, τa – koeficijent konduktivnosti za zrak, Z – 20° zemljopisne širine, ϵ – emisivnost kolničke površine, σ – Stefan – Boltzmanova konstanta $\left(5,7 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2}\right)$, h_c – koeficijent prijenosa topline površine $\left(\frac{W}{m^2^\circ C}\right)$, k – koeficijent toplinske vodljivosti $\left(\frac{W}{m^2^\circ C}\right)$, T_a – temperatura zraka (K), T_s – temperatura površine (K)	Model se temelji na pretpostavci energetske ravnoteže tijekom najviših temperatura, što je netočna pretpostavka. Energetska ravnoteža nije uspostavljen a bez obzira na stabilnost sunčevog zračenja, brzine vjetra i atmosferskih prilika.
(Wahhab, Asi and	2001. Saudijska Arabija	$T_d = 3,714 + 1,006T_a - 0,146d$ T_d – temperatura kolnika na dubini d (°C),	Model predviđa maksimalne i

Ramadhan 2001)		T_a – temperatura zraka (°C), d – dubina ispod površine kolnika (cm)	minimalne temperature. Saudijska Arabija je u pustinjskom području gdje je razlika ambijantne temperature minimalna tijekom godine.
(Park, Buch and Chatti 2001)	2001 SAD	$T_d = T_s + (-0,3451d - 0,0432d_2 + 0,00196d_3) \cdot \sin(0,325\tau + 5,0967)$ T_d – temperatura kolnika (°C), T_s – temperatura površine (°C), d – dubina (mm), τ – koeficijent povezan s vremenom	Ovaj model je validiran za temeprature površine u rasponu od -28,4 do 53,7 °C i dubini od 14 do 27,7 cm.
(Diefenderfer, Al-Qadi, et al. 2003)	2003. SAD	$T_{pmax} = 3,2935 + 0,6356T_{max} + 0,1061\gamma - 27,7975P_d$ $T_{pmin} = 1,6472 + 0,6504T_{min} + 0,0861\gamma + 7,2385d_b$ T_{pmax} – predviđena maksimalna temperatura (°C), T_{max} – maksimalna dnevna temperatura (°C), T_{pmin} – predviđena minimalna temperatura (°C), T_{min} – minimalna dnevna temperatura (°C), γ – dan u godini (1 – 365), d_b – dubina ispod površine (m)	Ovaj model može se koristiti tijekom sve četiri sezone i u različitim klimatskim uvjetima.
(Hassan, et al. 2008)	2004. Oman	$T_{surf} = -1,437 + 1,121T_{air}$ $T_{20mm} = 3,160 + 1,319T_{airx}$ T_{surf} – minimalna temperatura kolnika (°C), T_{air} – minimalna temperatura zraka (°C), T_{20mm} – temperatura kolnika na dubini 20 mm (°C), T_{airx} – maksimalna temperatura zraka (°C).	Eksperimentalna primjena ove jednadžbe koristi se za predviđanje temperatura kolnika na različitim dubinama.
(Jia, Lijun and Yu 2008)	2008. Kina	$T_p = P_1 + (P_2T_{a5} + P_3(Q_5)^2) + H(P_4T_a + P_5Q) + (P_6H + P_7H^2 + P_8H^3) + P_9T_m$ T_p – temperatura kolnika na dubini "H" cm, T_a – temperatura zraka, Q – sunčevo zračenje $\left(\frac{kW}{m^2}\right)$, T_{a5} – prosječna temperatura zraka u prethodnih 5 sati, Q_5 – prosječno sunčevo zračenje u prethodnih 5 sati $\left(\frac{kW}{m^2}\right)$, H – dubina na kojoj se predviđa temperatura (cm), $P_1 - P_8$ – neodređeni koeficijenti regresije za model predviđanja,	Model uključuje mnoge parametre što ga čini nepraktičnim za rad.

		T_m – prosječna mjesečna temperatura zraka (proteklih 20 godina)	
(Tabatabaie, Ziari and Khalili 2008)	2008. Iran	$T = 0,94S_{ur} + 0,94\sin\left(\frac{2\pi t}{24}\right) - 2,99\log(d) - 0,02\text{ comp} + 0,02A_{ir} + 0,32B_P + 0,17B_T - 0,34$ T – temperatura asfalta (°C), A_{ir} – temperatura zraka (°C), S – temperatura površine (°C), t – vrijeme u danu, d – dubina (cm), comp – nivo zbijanja (broj udaraca), B_P – udio bitumena, B_T – tip bitumena (1 za BIT 40/50 i 2 za BIT 60/70),	Veza između temperature asfalta i klimatskih parametara je linearna.
(Zheng, Cai and Zhang 2011)	2011. Kina	$T_{pave-rising} = 1,170T_{air-rising} - 0,50h + 3,55$ $T_{pave-falling} = 1,085T_{air-falling} - 0,07h + 4,3$ $T_{pave} = 1,118T_{air} - 0,23h + 4,1$ $T_{pave-rising}$ – temperatura asfalta na dubini h tijekom perioda porasta temperature (°C), $T_{air-rising}$ – period porasta temperature zraka, h – dubina (cm), $T_{pave-falling}$ – temperatura asfalta na dubini h tijekom perioda pada temperature (°C), $T_{air-falling}$ – period pada temperature zraka,	Rezultati modela su praktični. usporedba mjerenih i predviđenih rezultata pokazuje vrlo precizno predviđanje. Model se ne može koristiti u svim područjima.
(Hamed and Maryam 2011)	2011. Irak	$T_{pave} = 3,175 + 0,04866Z + 0,946T_{air}$ T_{pave} – temperatura kolnika (°C), Z – dubina ispod površine kolnika (cm), T_{air} – temperatura zraka (°C)	Ovaj linearni regresijski model je vrlo jednostavan, ali nije validiran.
(Matić, et al. 2013)	2013. Srbija	$y_{max} = 0,963288x_{max} - 0,151137xd + 4,452996$ $y_{min} = 1,004801x_{min} - 0,1992731xd + 0,051532$ y_{max} – maksimalna temperatura kolnika (°C), x_{max} – maksimalna temperatura zraka (°C), y_{min} – minimalna temperatura kolnika (°C), x_{min} – minimalna temperatura zraka (°C), xd – dubina (cm)	Jednadžba je linearna. Model se može koristiti u sličnim klimatskim područjima.

4.4. Utjecajni činitelji

Kolnici su konstrukcije koje su izložene okolišnim uvjetima koji značajno utječu na njihovu unutarnju distribuciju temperature (Ksaibati and Yavuzturk 2006), (Kai, et al. 2010). Na prijenos topline između površine kolnika i okoliša utječe dolazno sunčevo zračenje, dugovalno zračenje između površine kolnika i okoliša (isijavanje / reradijacija), konvekcija između površine kolnika i fluida (vjetar i / ili voda) i

kondukcija unutar slojeva kolnika (Arangi and Jain 2015). Raspršeno i direktno sunčevo zračenje uobičajeno je kratkovalno (Solaimanian and Kennedy 1993). Kada kratkovalno zračenje dođe do površine kolnika, slojevi kolničke konstrukcije počinju apsorbirati veliku količinu energije, koja se u obliku topline prenosi kroz strukturu kolnika, dok površina reflektira preostalu toplinu natrag u atmosferu (Arangi and Jain 2015). Mora se uzeti u obzir da na asfaltne kolničke konstrukcije ne utječu samo klimatski (meteorološki) parametri, već da i asfaltni kolnici povratno utječu na meteorološke parametre (Solaimanian and Kennedy 1993). Razlozi su dvostruki. Kao prvo, kolničke konstrukcije i promet otpuštaju veliki udio stakleničkih plinova u različitim fazama životnog vijeka kolnika. Kao drugo, asfaltni kolnici zauzimaju značajni udio urbanih površina. Nadalje, kolnici pohranjuju i otpuštaju više topline nego tlo čime pojačavaju efekt urbanih toplinskih otoka (Asaeda, Ca and Wake 1996). Na količinu reflektirane i apsorbirane energije utječe naoblaka, oborine i temperatura površine kolnika (Resler, et al. 2017). Površina kolnika istovremeno isijava dugovalno zračenje kao crno tijelo (Hermansson 2004). Udio energije dugovalnog zračenja (dolazno dugovalno zračenje umanjeno za dugovalno zračenje od površine kolnika) poznato je kao efektivno dugovalno zračenje (Sakakibara 1996). Iz navedenog, na defektivno dugovalno zračenje utječe naoblaka, temperatura površine kolnika, temperatura zraka i relativna vlažnost zraka (Chao and Zhang 2018).

Iz navedenog utjecajni činitelji mogu se podijeliti na:

- meteorološke (okolišne) parametre, i
- parametre kolnika.

4.4.1. Meteorološki parametri

Meteorološki parametri utječu na temperaturu kolnika kroz izmjenu energije kroz površinu kolnika. Točna ocjena prijenosa topline uslijed meteoroloških parametara je vrlo važna za preciznost predviđanja temperature kolnika.

Meteorološki parametri koji imaju najveći utjecaj na distribuciju temperature kolnika su:

- kratkovalno zračenje,
- dugovalno zračenje, i
- konvekcija.

Kratkovalno zračenje:

Sunčevo zračenje utječe na promjenu temperature asfaltnih materijala te na taj način uzrokuje indirektnu i raspršenu toplinu na kolniku zbog apsorpcije sunčevog zračenja (Wang 2013).

Kratkovalno zračenje odnosno sunčevo zračenje izračunava se prema Jednadžbi 4.1

$$q_{ns} = (1 - \tilde{\alpha})q_{sol} \quad (\text{Jednadžba 4.1})$$

gdje je:

$\tilde{\alpha}$ – albedo

q_{sol} – intenzitet sunčevog zračenja na površini kolnika

U nekim modelima, mjereno sunčevo zračenje (q_{sol}), koristi se kao rubni uvjet (Wang, Roesler and Guo 2009), (Wang and Roesler 2014), (Alavi, Pouranian and Hajj 2014), (Hermansson 2004), (Chen, Wang and Zhu 2017), (Wang and Roesler 2012), (Han, Jin and Glover 2011), (Gui, et al. 2007). U drugim modelima, sunčevo zračenje izračunava se empirijskim jednadžbama prikazanim u Tablici 4.4

Tablica 4.4: Pregled jednadžbi za izračun kratkovalnog zračenja

Jednadžba	Opis parametara	Autor
$q_{sol} = R \left[A_1 + B_1 \left(\frac{S_1}{100} \right) \right]$	R – dolazno zračenje A ₁ i B ₁ – konstante difuznog raspršenja i adsorpcije u atmosferi S ₁ – postotak osunčanosti	(Dempsey and Thompson 1970)
$q_{sol} = q_0 \cos m_1 \omega (t - t_{s0})$	q ₀ – vršno sunčevo zračenje u podne	(Li, Harvey and Jones 2014)

$za\ t_{s0} - 0,5c \leq t \leq t_{s0} + 0,5c$	m_1 – koeficijent distribucije sunčevog zračenja (iznosi 12/c) c – osunčanost (efektivni sati u danu) t_{s0} – vršna pozicija (iznosi 13) ω – kutna frekvencija	
$q_{sol} = q_{sw}a^m(1 - 0,0065C^2)$	q_{sw} – zračenje vedrog neba (ovisi o sunčevoj konstanti i položaju sunca) a^m – faktor „izolacije“ atmosfere C – naoblaka (u desetinama)	(Nuijten 2016)
$q_{sol} = \eta s_c f_e \cos \theta_z$	η – faktor gubitka za raspršenje i apsorpciju kratkovalnog zračenja (uzrokovan naoblakom) s_c – sunčeva konstanta f_e – faktor ekscentričnosti sunčeve orbite (raspon od 0,97 do 1,03) θ_z – zenitni kut	(Mrawira and Luca 2002)
$q_{sol} = s_c \tau^{\frac{1}{\cos \beta}} \cos \theta_z$	s_c – sunčeva konstanta τ – konstanta ovisna o naoblaci (raspon 0,62 – 0,81; 0,81 – oblačan dan) β – sunčev azimut θ_z – zenitni kut	(Qin 2015)
$q_{sol} = I_d \sin \theta_z + \frac{I_i(1 + \cos \gamma)}{2}$	I_d – direktno sunčevo zračenje θ_z – zenitni kut I_i – indirektno sunčevo zračenje (10-100%) γ – kut nagiba	(Huang, et al. 2017)

Iako su jednadžbe prikazane u Tablici 4.4 različite, većina ih izračun sunčevog zračenja temelji na sunčevim konstantama i poziciji sunca. U određenim modelima simulacija dnevnog sunčevog zračenja vrši se trigonometrijskim funkcijama. U pojedinim modelima, kroz određene parametre, u obzir se uzima utjecaj naoblake. Istraživanja pokazuju da intenzitet sunčevog zračenja bez utjecaja naoblake iznosi oko 1000 W / m². Bez obzira na vrstu jednadžbe (linearna ili nelinearna) utvrđeno

je značajno smanjenje intenziteta sunčevog zračenja s povećanjem naoblake (Dempsey and Thompson 1970), (Nuijten 2016). Istraživanja ukazuju da se utjecaj naoblake ne može zanemariti u modelima za predviđanje temperature kolnika.

U ovom radu, za povećanje točnosti izračuna temperature kolnika, vršena su mjerenja kratkovalnog sunčevog zračenja te su podaci uvršteni u model kao rubni uvjet.

Dugovalno zračenje:

Valna duljina toplinskog zračenja kojeg emitira kolnik je znatno veća od valne duljine sunčevog zračenja. Teoretski, ovaj toplinski tok između površine i okolnog medija (zraka) izračunava se prema Jednadžbi 4.2.

$$q_{nl} = \varepsilon \sigma (T_{sk}^4 - T_{\infty}^4) \quad \text{Jednadžba 4.2}$$

gdje je:

ε – emisivnost površine,

σ – Stefan – Boltzmanova konstanta ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$),

T_{sk} – temperatura površine kolnika [K], i

T_{∞} - temperatura okolnog medija (zraka) [K]

Jednadžba 4.2 se temelji na pretpostavci da je okolina izotermna s puno većom površinom, takozvani idealni prostor. Međutim, nije jednostavno utvrditi točnu vrijednost temperature okolnog medija (T_{∞}) budući da zrak oko kolnika nije izoterman medij. Navedeno ukazuje na potrebu točnijeg definiranja temperature zraka budući da ista ovisi o visini iznad površine kolnika.

U svrhu dobivanja točnijih vrijednosti dugovalnog zračenja (q_{nl}), u pojedinim modelima Jednadžba 4.2 se modificira što je prikazano u Tablici 4.5.

Tablica 4.5: Pregled jednadžbi za izračun dugovalnog zračenja

Jednadžba	Opis parametara	Autor
$q_{nl} = \varepsilon \sigma (T_{sk}^4 - T_{air}^4)$	T_{sk} – temperatura površine kolnika [K] T_{air} – temperatura zraka [K] ε – emisivnost površine σ – Stefan – Boltzmanova konstanta	(Li, Harvey and Jones 2014)
$q_{nl} = \left(1 - \frac{NW}{100}\right) (\varepsilon \sigma T_{sk}^4 - \varepsilon_a \sigma T_{air}^4)$ $\varepsilon_a = G - J(10^{-\rho P})$ $G = 0,77$ $J = 0,28$ $P = 0,074$	N – faktor ovisan o naoblaci W – postotak naoblake ε – emisivnost površine ε_a – faktor koji opisuje površinsku apsorpciju kolnika T_{sk} – temperatura površine kolnika [K] T_{air} – temperatura zraka [K] σ – Stefan – Boltzmanova konstanta ρ – tlak vodene pare P -	(Dempsey and Thompson 1970)
$q_{nl} = \varepsilon \sigma T_{sk}^4 - \varepsilon_a \sigma T_{air}^4$	ε – emisivnost površine ε_a – faktor koji opisuje površinsku apsorpciju kolnika T_{sk} – temperatura površine kolnika [K] T_{air} – temperatura zraka [K] σ – Stefan – Boltzmanova konstanta	(Solaimanian and Kennedy 1993)
$q_{nl} = \varepsilon_a \sigma T_{sk}^4 - \varepsilon_a \varepsilon_{eff} \sigma T_{air}^4$	ε_a – faktor koji opisuje površinsku apsorpciju kolnika ε_{eff} – efektivna emisivnost površine T_{sk} – temperatura površine kolnika [K] T_{air} – temperatura zraka [K]	(Nuijten 2016)

	σ – Stefan – Boltzmanova konstanta	
$q_{nl} = \psi_{sky} \varepsilon \sigma (T_{sk}^4 - T_{air}^4)$ $T_{sky} = T_{air} (a_1 + b_1 T_{dp})^{0,25}$ $a_1 = 0,754$ $b_1 = 0,0044$	Ψ_{sky} – temperatura neba [K] ε – emisivnost površine T_{sk} – temperatura površine kolnika [K] T_{air} – temperatura zraka [K] σ – Stefan – Boltzmanova konstanta a_1 i b_1 – konstante T_{dp} – temperatura rosišta [K]	(Qin and Hiller 2014)

Iako se prikazane jednadžbe iz Tablice 4.5 međusobno razlikuju, mogu se podijeliti u tri skupine. U prvoj skupini temperatura zraka je jednostavno prikazana kao T_{∞} dok se u drugoj skupini koriste različiti faktori ε_a koji opisuju površinsku apsorpciju kolnika (umjesto emisivnosti kolnika). U trećoj skupini, kao temperatura zraka T_{∞} koristi se temperatura neba T_{sky} koja predstavlja temperaturu zračenja crnog tijela koje ima jednak toplinski tok kao i atmosfersko zračenje i može se odrediti iz podataka o temperaturi zraka i temperaturi rosišta. Istraživanja ukazuju da modeli koji koriste temperaturu neba T_{sky} kao temperaturu zraka i koriste faktor ε_a koji opisuje površinsku apsorpciju kolnika umjesto emisivnosti kolnika ε , daju točnije rezultate dugovalnog zračenja q_{nl} . Modeli koji uzimaju temperaturu zraka T_{∞} daju značajno manje vrijednosti dugovalnog zračenja (Qin and Hiller 2011).

Iz navedenog je jasno da temperatura zraka, odnosno oblik njenog korištenja u jednadžbama, ima značajan utjecaj na iznos dugovalnog zračenja što može dovesti do netočne procjene temperature kolnika.

Konvekcija

Konvekcija je prijenos topline između zraka i površine kolnika uzrokovan strujanjem zraka. Prijenos topline uslijed konvekcije može se izračunati izrazom prikazanim u Jednadžbi 4.3 (Y. Qin 2016).

$$q_c = h_c(T_s - T_a) \quad (\text{Jednadžba 4.3})$$

gdje je:

h_c – koeficijent konvekcije

T_s – temperatura površine kolnika, i

T_a – temperatura zraka.

Jednadžba 4.3 ukazuje da konvektivni prijenos topline uvelike ovisi o koeficijentu konvekcije. Na koeficijent konvekcije utječe brzina vjetra, a uobičajeno se izračunava empirijskim jednadžbama prikazanim u Tablici 4.6.

Tablica 4.6: Pregled jednadžbi za izračun konvektivnog koeficijenta

Kategorija modela	Empirijski izraz	Autor
Vehrencampov model	$h_c = 698,24a_c [0,00144T_{mK}^{0,3}U^{d_c} + 0,00097(T_s - T_a)^{0,3}]$ $a_c = 1$ $d_c = 0,7$ U – brzina vjetra[m/s] T_{mK} – prosječna temperatura površine i zraka [K] T_s – temperatura površine [K] T_a – temperatura zraka [K] $h_c = 122,93 [0,00144T_{mK}^{0,3}U^{d_c} + 0,00097(T_s - T_a)^{0,3}]$	(Solaimanian and Kennedy 1993) (Hermansson 2000) (Dempsey and Thompson 1970) (Mrawira and Luca 2002) (Hermansson 2004) (Hermansson 2001) (Teltayev and Aitbayev 2015) (Minhoto, et al. 2005) (Ho and Romero 2009)
	$h_c = 698,24a_c [0,00144T_{mK}^{0,3}U^{d_c} + 0,00097(T_s - T_a)^{0,3}]$ $a_c = 1,4$ $d_c = 0,5$ U – brzina vjetra[m/s] T_{mK} – prosječna temperatura površine i zraka [K] T_s – temperatura površine [K] T_a – temperatura zraka [K]	(Han, Jin and Glover 2011) (Alavi, Pouranian and Hajj 2014) (Hall, et al. 2012)

	$h_c = 698,24a_c [0,00144T_{mK}^{0,3}U^{d_c} + 0,00097(T_s - T_a)^{0,3}]$ $a_c = 1,1$ $d_c = 0,5$ <i>U – brzina vjetra[m/s]</i> <i>T_{mK} – prosječna temperatura površine i zraka [K]</i> <i>T_s – temperatura površine [K]</i> <i>T_a – temperatura zraka [K]</i>	(Hermansson 2001)
Modeli brzine vjetra	$h_c = 5,678(1,3 + 1,135U^{0,75})$ <i>U – brzina vjetra[m/s]</i>	(Barber 1957)
	$h_c = 5,6 + 4,0 U \quad \text{za } U \leq 5\text{m/s}$ $h_c = 7,2U^{0,78} \quad \text{za } U > 5\text{m/s}$ <i>U – brzina vjetra[m/s]</i>	(Qin and Hiller 2014) (Y. Qin 2016) (Bentz 2000) (Dan, Tan and Chen 2019)
	$h_c = 6 + 3,7U$ ili $h_c = 6,1 + 3,7U_{0,2}$ <i>U – brzina vjetra[m/s]</i> <i>U_{0,2} – brzina vjetra 0,2 m iznad površine [m/s]</i>	(Wang, Roesler and Guo 2009) (Huang, et al. 2017) (Jeong and Zollinger 2006) (Li, Harvey and Jones 2014)
Modeli horizontalne ravne plohe	$h_c = 0,664(k_\infty Pr_\infty^{0,3} \vartheta_\infty^{-0,5} L^{-0,5} U^{0,5})$ <i>k_∞ – toplinska vodljivost</i> <i>Pr_∞ – Prandtlov broj</i> <i>ϑ_∞ – kinematička viskoznost</i> <i>L – karakteristična duljina kolnika (omjer duljine kolnika u smjeru strujanja vjetra i opsega</i> <i>U – brzina vjetra[m/s]</i>	(Gui, et al. 2007)
	$h_c = 5,6 + 0,332(k_\infty Pr_\infty^{0,3} \vartheta_\infty^{-0,5} L^{-0,5} U^{0,5})k_\infty$ – toplinska vodljivost <i>Pr_∞ – Prandtlov broj</i> <i>ϑ_∞ – kinematička viskoznost</i> <i>L – karakteristična duljina kolnika (omjer duljine kolnika u smjeru strujanja vjetra i opsega</i> <i>U – brzina vjetra[m/s]</i>	(Quin and Hiller 2011) (Qin and Hiller 2011) (Qin and Hiller 2013)

Denby-jev model	$h_c = \rho_a C_p / r_T$ ρ_a – atmosferska gustoća [$kg\ m^{-3}$] C_p – toplinski kapacitet suhog zraka [$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$] r_T – aerodinamički otpor na temperaturu [$s\ m^{-1}$]	(Nuijten 2016) (Denby, et al. 2013)
-----------------	---	--

Magnituda koeficijenta konvekcije je funkcija Reynoldsovog broja Re , toplinske vodljivosti zraka, Prandtlovog broja i karakteristične duljine (koja se koristi za izračun Reynoldsovog broja). Prema teoriji prijenosa topline, koeficijent konvekcije sastoji se od slobodne (prirodne) konvekcije i prisilne konvekcije. Koeficijent konvekcije zraka pri slobodnoj konvekciji iznosi oko $5,6\ W/m^2\ K^{-1}$ (Cengel 1998). Prema rješenju Blasiusa koeficijent konvekcije pri prisilnoj konvekciji je:

$$h_c = 0,332 R_e^{0,5} P_r^{1/3} \frac{K_{air}}{L} \quad \text{ako je brzina vjetra mala (< 6 m/s).}$$

Odnosno prema modificiranom Blasiusovom rješenju :

$$h_c = 5,6 + 0,332 R_e^{0,5} P_r^{1/3} \frac{K_{air}}{L}$$

gdje je:

K_{air} – konduktivnost zraka (0,027),

P_r – Prandtlov broj (0,7), i

R_e – Reynoldsov broj.

Za strujanje zraka uz beskonačnu ravnu plohu, karakteristična duljina L iznosi 0,15 m (Cengel 1998). Reynoldsov broj iznosi:

$$R_e = \frac{UL}{\mu}$$

gdje je:

U – brzina vjetra

L – karakteristična duljina

μ - kinematička viskoznost zraka (obično $16,01 \times 10^{-6}\ m^2\ s^{-1}$)

Uobičajeni modeli mogu se podijeliti u četiri kategorije:

- Vehrencampov model,
- Modeli brzine vjetra,
- Modeli horizontalne ravne plohe, i
- Denbyjev model

Vehrencampov model se temelji na istraživanjima vršenim na suhom jezeru (Hall, et al. 2012). Ovaj model se koristi pri dimenzioniranju kolničkih konstrukcija u pojedinim zemljama. Određena istraživanja koriste modificiranu verziju Verhencampovog modela budući da izvorni regresijski parametri ne daju najbolja predviđanja za pojedine lokacije.

Modeli brzine vjetra odnose se na modele koji koriste brzinu vjetra kao jedini klimatski parametar u jednadžbama.

Modeli horizontalne ravne plohe izračunavaju koeficijent konvekcije na temelju Nusseltova broja koji predstavlja bezdimenzionalni koeficijent konvekcije (Cengel 1998).

Denbyjev model izračunava koeficijent konvekcije na temelju atmosferske gustoće, toplinskog kapaciteta suhog zraka i aerodinamičke otpornosti na temperaturu.

Prema Tablici 4.6, pri određivanju koeficijenata konvekcije, brzina vjetra se ili uključuje kao varijabla u jednadžbi ili se uključuje kroz druge parametre kao npr. aerodinamički otpor. Podaci o brzini vjetra su vrlo važni za određivanje koeficijenta konvekcije. Iz Tablice 4.6 je vidljivo da postoje razlike u određivanju koeficijenata konvekcije čak i u modelima iste kategorije. Navedeno ukazuje da korištenje jednadžbi za izračun koeficijenata konvekcije može dovesti do neočekivanih pogrešaka u rezultatima predviđanja. Istraživanja ukazuju da Vehrencampov model može podcijeniti vrijednost koeficijenata konvekcije budući da model predviđa vrijednost 0 u slučaju slobodne konvekcije (Qin and Hiller 2011). Ovaj problem se također pojavljuje u modelima horizontalne ravne plohe. Iako se vjeruje da je Vehrencampov model prikladan za predviđanje koeficijenta konvekcije za kolnik, ovaj model je izvorno razvijen na temelju ispitivanja vršenih na suhom jezeru. Nema čvrstih znanstvenih dokaza da je površina suhog jezera jednaka kao i površina kolnika kada se govori o konvektivnom prijenosu topline. Zato je preporučljivo provesti kalibraciju jednadžbi na lokalne uvjete kako bi se utvrdili točniji izrazi za izračun koeficijenata konvekcije.

U ovom radu, za povećanje točnosti izračuna temperature kolnika, vršena su mjerenja brzine vjetra te su podaci uvršteni u model kao rubni uvjet.

Osvrt na meteorološke parametre:

Iako je utjecaj različitih parametara istraživao, još uvijek postoje ograničenja koja se mogu poboljšati. Prijenos topline uslijed meteoroloških parametara se netočno prikazuje. Na ovaj problem utječe zanemarivanje pojedinih važnih parametara. Na sunčevo zračenje utječe naoblaka. Istraživanja ukazuju da promjena vremena (iz sunčanog u oblačan dan) može utjecati na promjenu temperature kolnika za 5-6 °C (Qin and Hiller 2011). Druga istraživanja ukazuju da povećanje intenziteta sunčevog zračenja od 45-90 % utječe na povećanje temperature kolnika za 5-6 °C (Solaimanian and Bolzan 1993). Pojedini modeli za izračun prijenosa topline uslijed meteoroloških parametara koriste određene empirijske parametre koji mogu imati različite vrijednosti u različitim lokacijskim uvjetima. Međutim, kalibracija parametara često izostaje (Solaimanian and Bolzan 1993).

Na temelju analize senzitivnosti, određena istraživanja ukazuju da je temperatura zraka jedan od najvažnijih parametara koji ima utjecaj na temperaturu kolnika (Solaimanian and Bolzan 1993). Druga istraživanja ukazuju da na temperaturu kolnika najveći utjecaj ima sunčevo zračenje (Al-Abdul Wahhab and Balghunaim 1994). Također je objavljeno da promjena brzine vjetra ima veći utjecaj na promjenu temperature kolnika nego promjena postotka osunčanosti (Zaghloul, et al. 2006). Navedeno ukazuje da još uvijek ne postoji jasan stav koji od ovih meteoroloških parametara ima najveći utjecaj na temperaturu kolnika. Razlog je međusobna ovisnost meteoroloških parametara. Kroz istraživanja je utvrđena ovisnost sunčevog zračenja i temperature zraka (Prieto, Martinez-Garcia and Garcia 2009). Iz navedenog nije moguće kvantificirati utjecaj meteoroloških parametara na temperaturu kolnika bez uzimanja njihove međuovisnosti.

Kako bi se obuhvatili svi utjecajni parametri, u ovom radu vršena su mjerenja meteoroloških parametara (temperature zraka, sunčevog zračenja i brzine vjetra) koji predstavljaju rubne uvjete u modelu predikcije temperature. Također, kako bi se povećala točnost izračuna temperature, u model se uvodi nelinearan koeficijent konvektivnog prijenosa topline koji u sebi sadrži sve utjecajne činitelje.

4.4.2. Parametri kolnika

Parametri kolnika koji imaju najveći utjecaj na distribuciju temperature kolnika su:

- albedo i emisivnost, i
- toplinska svojstva materijala.

Albedo i emisivnost:

Na prijenos topline na površini kolnika utječe i albedo i emisivnost (Kolditz 2002), (Li, Harvey and Kendall 2013), (Guntor, et al. 2014), (Y. Qin 2015), (Villena Del Carpio, et al. 2016), (Chen and Ma 2012). Albedo ili sunčeva refleksija je mjera sposobnosti površine kolnika za odbijanje sunčevog zračenja. Albedo predstavlja omjer reflektiranog i dolaznog zračenja. Drugi, često korišteni parametar je apsorpcija (upojnost) što predstavlja omjer apsorbiranog i dolaznog zračenja. Emisivnost površine kolnika je fizikalni parametar koji predstavlja omjer emitiranog zračenja površine pri određenoj temperaturi i emitiranog zračenja crnog tijela pri istoj temperaturi. Iako se vrijednost albeda i emisivnosti kreću u rasponu 0 do 1, imaju različito značenje. Prema Kirchhoffovom zakonu toplinskog zračenja, emisivnost površine pri specifičnoj valnoj duljini, smjeru i temperaturi uvijek je jednaka apsorpciji pri istoj valnoj duljini, smjeru i temperaturi (Santamouris, Synnefa and Karlessi 2011). Međutim, u modelima za predviđanje temperature kolnika, albedo se koristi za izračun kratkovalnog sunčevog zračenja (Jednadžba 4.1), dok se emisivnost koristi za izračun dugovalnog zračenja (Jednadžba 4.2). Zbog razlike u valnoj duljini, apsorpcija nije uvijek jednaka emisivnosti i zbroj emisivnosti i albeda ne mora nužno biti jednak 1. Vrijednosti albeda i emisivnosti ovise o površini kolnika. Točno predviđanje ovih parametara je važno za pouzdanost modela za predviđanje temperature kolnika. *Tablica 4.7* i *Tablica 4.8* prikazuju uobičajene vrijednosti albeda i emisivnosti.

Tablica 4.7: Pregled uobičajenih vrijednosti albeda kolnika

Tip kolnika	Albedo	Autor
Novi asfaltni kolnik	0,08 – 0,09	(Li, Harvey and Kendall 2013)
	0,04 – 0,06	(Santamouris, Synnefa and Karlessi 2011)

	0,04 – 0,05	(Pomerantz, Akbari and Chang 2000) (Pomerantz, Akbari, et al. 2003)
	0,15	(AASHTO 2001)
	0,05 – 0,10	(ACPA 2002)
	0,05	(Carnielo and Zinzi 2002)
	0,04	(Syneffa, et al. 2011)
	0,07	(Solaimanian and Kennedy 1993)
Stari asfaltni kolnik	0,14	(Li, Harvey and Kendall 2013)
	0,12 – 0,15	(Pomerantz, Akbari and Chang 2000) (Pomerantz, Akbari, et al. 2003)
	0,09 – 0,18	(Santamouris, Synneffa and Karlessi 2011)
	0,10 – 0,15	(ACPA 2002)
	0,16	(Carnielo and Zinzi 2002)
Novi betonski kolnik	0,18 – 0,29	(Li, Harvey and Kendall 2013)
	0,36	(Pomerantz, Akbari and Chang 2000)
	0,41 – 0,77	(Levinson and Akbari 2002)
	0,30	(AASHTO 2001)
	0,12 – 0,20 (sivi)	(Santamouris, Synneffa and Karlessi 2011)
	0,60 – 0,77 (bijeli)	(Santamouris, Synneffa and Karlessi 2011)
	0,35 – 0,40 (sivi)	(ACPA 2002)
	0,70 – 0,80 (bijeli)	(ACPA 2002)
	0,341	(Boriboonsomsin and Reza 2007)
	0,23 – 0,26	(Chen, Zhou, et al. 2019)
Stari betonski kolnik	0,18 – 0,35	(Pomerantz, Akbari and Chang 2000) (Pomerantz, Akbari, et al. 2003)
	0,20 – 0,30 (sivi)	(ACPA 2002)

	0,40 – 0,60 (bijeli)	(ACPA 2002)
Porozni betonski kolnik	0,25 – 0,35	(Zhang, Jiang and Liang 2015)
Polimerom modificirani asfalni kolnik	0,12	(Li, Harvey and Kendall 2013)
Asfalt s dodatkom gume	0,08	(Li, Harvey and Kendall 2013)
Asfalti s diskontinuiranom granulometrijskom krivuljom	0,12	(Li, Harvey and Kendall 2013)

Tablica 4.8: Pregled uobičajenih vrijednosti emisivnosti kolnika

Tip kolnika	Emisivnost	Autor
Novi asfaltni kolnik	0,95 – 0,97	(Golden and Kaloush 2006)
	0,93	(Solaimanian and Kennedy 1993)
	0,81	(Yavuzturk, Ksaibati and Chiasson 2005)
	0,95	(Fujimoto, Watanabe and Fukuhara 2008)
	0,80	(Li, Harvey and Jones 2014)
	0,85-0,90	(Nuijten 2016)
	0,85	(Gui, et al. 2007)
Novi betonski kolnik	0,80	(Li, Harvey and Jones 2014)
	0,88	(Huang, et al. 2017)
	0,90-0,98	(Golden and Kaloush 2006)

Rezultati istraživanja ukazuju da je albedo površine asfaltnog kolnika obično manji od albeda betonske površine, dok je emisivnost površine asfaltnog kolnika obično veća od emisivnosti betonske površine. Albedo površine mijenja se tijekom vremena. Kod asfaltnih kolnika, albedo se s vremenom povećava budući da boja asfaltnog kolnika s vremenom postaje svjetlija (Li, Harvey and Kendall 2013),

(Santamouris, Synnefa and Karlessi 2011), (Pomerantz, Akbari and Chang 2000), (Pomerantz, Akbari, et al. 2003), (ACPA 2002), (Carnielo and Zinzi 2002), (H. Li, J. Harvey and Y. He, et al. 2002). Kod betonskih kolnika, uslijed trošenja betona, albedo se s vremenom smanjuje (Pomerantz, Akbari and Chang 2000), (Pomerantz, Akbari, et al. 2003), (ACPA 2002), (M. Pomerantz, et al. 1997), (Roesler and Sen 2016).

Toplinska svojstva materijala:

Osim toplinske vodljivosti, na rezultate predviđanja temperature utječe i specifični toplinski kapacitet i toplinska difuzivnost. Istraživanja ukazuju da se s povećanjem toplinskog kapaciteta vršna temperatura površine kolnika smanjuje, a vršni sat se odgađa (Zhang, Wang and Ren 2017), dok se dnevna minimalna temperatura povećava (Gui, et al. 2007).

Na temperaturu površine kolnika utječu i toplinska svojstva materijala kao što su (Chen, Wang and Zhu 2017), (Gui, et al. 2007), (Wu, et al. 2018), (Feng, Yi and Wang 2013), (Wang, et al. 2014), (Yang, et al. 2016), (Dehdezi, Hall and Dawson 2011):

- (i) toplinska vodljivost,
- (ii) specifični toplinski kapacitet i
- (iii) toplinska difuzivnost.

Toplinska vodljivost opisuje sposobnost materijala da provodi toplinu. Veća toplinska vodljivost uzrokuje učinkovitiji prijenos topline u niže slojeve kolnika. Specifični toplinski kapacitet predstavlja potrebnu energiju za povećanje temperature za 1°C po jedinici mase. To znači da niži specifični toplinski kapacitet može povisiti temperaturu kolnika s istom količinom dolazne topline.

Toplinska difuzivnost može se opisati kao omjer topline provedene kroz materijal i topline pohranjene po jedinici volumena. S povećanjem toplinske difuzivnosti ubrzava se propagacija topline kroz medij (Wang, et al. 2014). Hall i dr. sumirali su raspon toplinskih svojstava materijala (u suhim uvjetima) za uobičajene materijale kolnika što je prikazano u Tablici 4.9 (Zhang, Wang and Ren 2017).

Tablica 4.9: Pregled uobičajenih vrijednosti toplinskih svojstava materijala kolnika
(Zhang, Wang and Ren 2017)

Materijal	Toplinska vodljivost ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Specifični toplinski kapacitet ($\text{J m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Toplinska difuzivnost ($10^{-7} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
Asfalt beton	0,5 – 2,5	900 – 21000	1,2 – 16,8
Beton	0,5 – 4,0	800 – 1200	1,4 – 20,8
Tlo (podloga)	0,3 – 2,0	800 - 1100	1,4 – 17,8

Toplinska svojstva materijala kolnika nisu stalna jer su korišteni materijali kompozitni ili zrnati, toplinska svojstva materijala kolnika ovise o toplinskim svojstvima svakog materijala mješavine (masi, udjelu šupljina i granulaciji). Svojstva se utvrđuju eksperimentalnim ispitivanjima te su vrijednosti svojstava iskazane u različitoj literaturi (Mrawira and Luca 2002), (Zhang, Wang and Ren 2017), (Li, Harvey and Jones 2013), (Cote, Grosjean and Konrad 2013), (Chen, Zhang, et al. 2015), (Chen, Chu, et al. 2018), (Chen, Wang and Li 2015), (Ren, et al. 2018). Neprikladno određivanje ovih vrijednosti može dovesti do neočekivanih grešaka u rezultatima predviđanja temperature kolnika.

U ovom radu uzete su vrijednosti utvrđene prethodnim laboratorijskim ispitivanjem za korištenu vrstu materijala. Postoji mogućnost odstupanja u vrijednostima laboratorijskih ispitivanja i stvarno ugrađenog materijala zbog ručne ugradnje asfalta u ispitna polja.

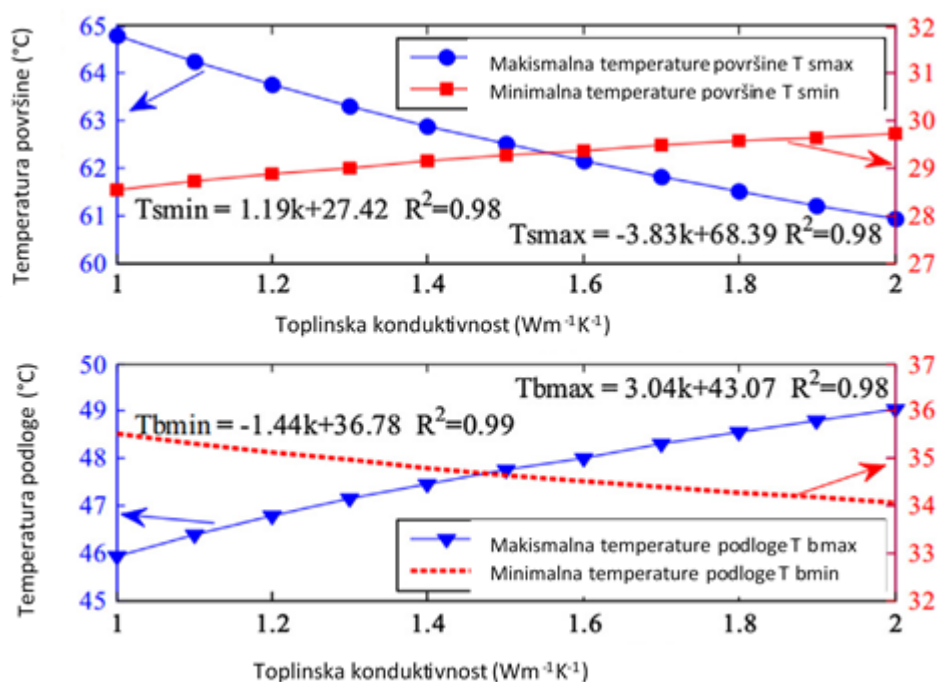
Osvrt na parametre kolnika:

Albedo i emisivnost utječu na prijenos topline zračenjem između kolnika i okoliša, dok toplinska svojstva materijala utječu na prijenos topline kondukcijom unutar strukture kolnika. Za razliku od meteoroloških parametara koji se mogu utvrditi ili iz baze podataka meteoroloških parametara ili izračunom putem jednadžbi, vrijednost parametara toplinskih svojstava kolnika, iako se mogu izmjeriti, obično se utvrđuju u uobičajenom rasponu iz dostupne literature. Ovaj odabir je subjektivan i može utjecati na stvarne vrijednosti, a time i konačne rezultate. I albedo i emisivnost su važni parametri pri predviđanju temperature kolnika, pogotovo ukoliko ne postoji sloj koji umanjuje intenzitet sunčevog zračenja (Kolditz 2002). Istraživanja ukazuju da albedo ima veliki utjecaj na visoke temperature površine kolnika tijekom dana,

ali da nema veliki utjecaj na niske temperature tijekom noći (Li, Harvey and Kendall 2013). Rezultati ukazuju da se maksimalna temperatura površine može smanjiti za 3-4°C kada se vrijednost albeda poveća za 0,1 (Chong, Tramontini and Specht 2009). Preporuka je da se albedo i emisivnost utvrđuju s obzirom na tip i stanje kolnika. Albedo kolnika u uporabi može se također predvidjeti nekim od empirijskih modela (Boriboonsomsin and Reza 2007).

U usporedbi s albedom i emisivnošću, utjecaj toplinskih svojstava materijala kolnika na temperaturu kolnika je kompleksniji. Razlog je što albedo i emisivnost utječu na ukupni toplinski tok u kolniku, dok toplinska svojstva materijala utječu na distribuciju topline unutar slojeva kolnika. Istraživanja ukazuju da temperatura površine kolnika i temperatura na polovici dubine kolnika su inverzno povezane i sigurno ovise o toplinskoj vodljivosti površinskog sloja kolnika (Zhang, Wang and Ren 2017). To znači da niže vrijednosti toplinske vodljivosti obično dovode do većih temperatura površine kolnika tijekom noći (Stempihar, et al. 2012), (Kevern, Schaefer and Wang 2015), (Hu, et al. 2017).

U ovom radu, za izračun distribucije temperature u obzir su uzeta toplinska svojstva materijala kolnika (za svaki sloj kolničke konstrukcije).



Slika 4.1: Utjecaj toplinske vodljivosti na temperaturu kolnika (Chen, Wang and Zhu 2017)

Na Slici 4.1 prikazan je utjecaj toplinske vodljivosti na temperaturu kolnika. Vidljivo je da se s povećanjem toplinske vodljivosti maksimalna temperatura površine i minimalna temperatura donjeg sloja smanjuju, dok se minimalna temperatura površine i maksimalna temperatura donjeg sloja povećavaju. Povećanje toplinske vodljivosti materijala kolnika utječe na smanjenje toplinskog gradijenta po dubini slojeva kolnika (Denby, et al. 2013).

5. ISTRAŽIVAČKI PRISTUP I METODOLOGIJA IN SITU MJERENJA

U cilju utvrđivanja ponašanja standardno korištenih materijala kolničkih površina s obzirom na utjecaj temperature zraka i sunčevo zračenje, tijekom 2011., 2012. 2013., 2014. i 2015. godine provedena su različita preliminarna istraživanja.

5.1. Istraživanja provedena 2011. godine

Tijekom ljetnih mjeseci 2011. godine izvršena su preliminarna istraživanja u svrhu utvrđivanja ponašanja standardno korištenih materijala kolničkih površina pri maksimalnim temperaturama zraka i najjačem sunčevom zračenju. U periodu od 16. lipnja do 15. rujna 2011. godine provedeno je sustavno mjerenje temperature kolničkih površina u gradu Rijeci, na lokacijama koje su podijeljene po sljedećim zonama:

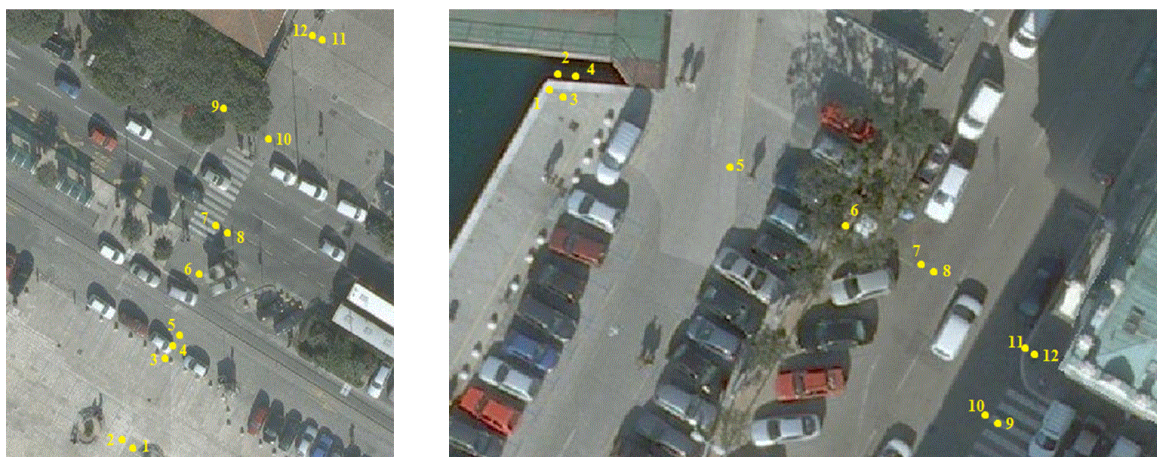
- Zona A - dvije gradske prometnice u blizini morske obale – Ulica Riva i Ulica Riva Boduli,
- Zona B - unutar prostora pješačke površine – Korzo
- Zona C - izvan neposrednog kontakta s morem – Jelačićev trg i Klobučarićev trg

Mjerenja su izvršena na 40 mjernih točaka na različitim površinama (asfalt, kamen, beton) i površinama različite namjene (pješačke površine, kolne površine i parkirališta). Mjerenja su vršena kontinuirano tijekom cijelog dana i u periodu za koji su utvrđene maksimalne dnevne temperature. Ukupno je tijekom navedenog perioda provedeno 80 mjerenja temperature od kojih najveći dio (60 % pojedinačnih mjerenja) u prethodno utvrđenom terminu u kojem su zabilježene najviše temperature. Provedena su i dva cjelodnevna mjerenja 12. srpnja 2011. i 15. rujna 2011. godine.

Za mjerenje temperature korištena su tri različita ručna mjerača („Veleman“, beskontaktni džepni infracrveni termometar). Prije početka mjerenja temperature izvršena su dva kontrolna mjerenja istom opremom s ciljem utvrđivanja pouzdanosti korištenja različitih mjernih uređaja. Srednja vrijednost odstupanja pojedinog uređaja iznosila je svega 0.1 do 0.3 °C što je ocijenjeno kao dovoljno pouzdano. Pored temperature prethodno je utvrđeno i stanje osunčanosti podatkom H-točka u

hladu i S – osunčana kako bi se utvrdila važnost položaja samih točaka izmjere s obzirom na duljinu izloženosti sunčevom zračenju. Mjerenja su vršena isključivo za vrijeme vedrih dana.

Opis mjernih lokacija u Zoni A prikazan je na Slici 5.1 i Tablici 5.1.

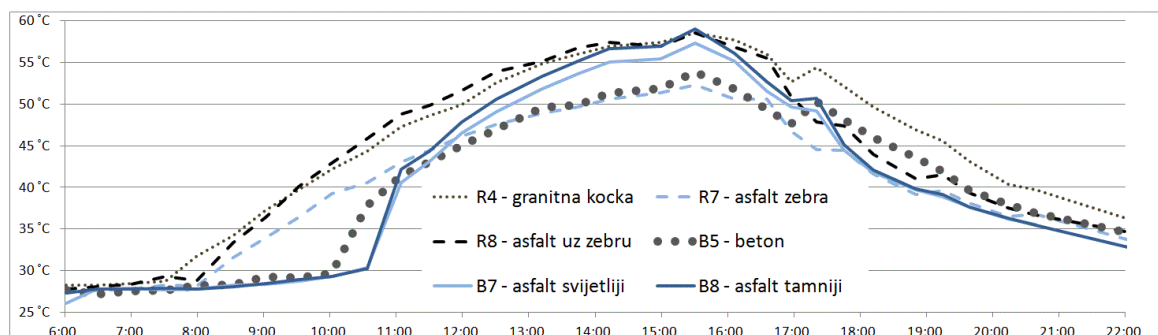


Slika 5.1: Mjerne točke u Ulici Riva (R) i Ulici Riva Boduli (RB) (Babić, et al. 2012)

Tablica 5.1: Opis mjernih mjesta Zona A – lokacija Ulica Riva i Ulica Riva Boduli (Babić, et al. 2012)

Oznaka mjernog mjesta	Tip kolničke površine	Namjena prometne površine
Lokacija	Ulica Riva (R)	
Točka 4. (R4)	Granitne kocke	parkiralište
Točka 5. (R5)	Asfalt-beton	parkiralište
Točka 7. (R7)	Bojani asfalt-beton (bijela boja)	Pješački prijelaz, vozna traka
Točka 8. (R8)	Asfalt-beton	Vozna traka
Lokacija	Ulica Riva Boduli (B)	
Točka 5. (B5)	beton	Vozna traka na parkiralištu
Točka 7. (B7)	Asfalt-beton	Vozna traka, svjetlija boja asfalta
Točka 8. (B8)	Asfalt-beton	Vozna traka, tamnija boja asfalta
Točka 9. (B9)	Bojani asfalt-beton (bijela boja)	Pješački prijelaz, vozna traka
Točka 10. (B10)	Asfalt-beton	Vozna traka

Temperature i stanje osunčanosti u istim mjernim točkama tijekom cjelodnevnog mjerenja 12.07.2011. na odabranim točkama kolnih površina prikazani su na Slici 5.2 i Tablici 5.2. U Tablici 5.2 posebnim sjenčanjem vrijednosti, prikazana je osunčanost pojedine lokacije (gore) te dinamika promjene temperature (grijanje/hlađenje) pojedinog mjernog mjesta (dolje) (Babić, et al. 2012).



Slika 5.2: Izmjerena temperatura tijekom dana 12.07.2011. na odabranim lokacijama (Babić, et al. 2012)

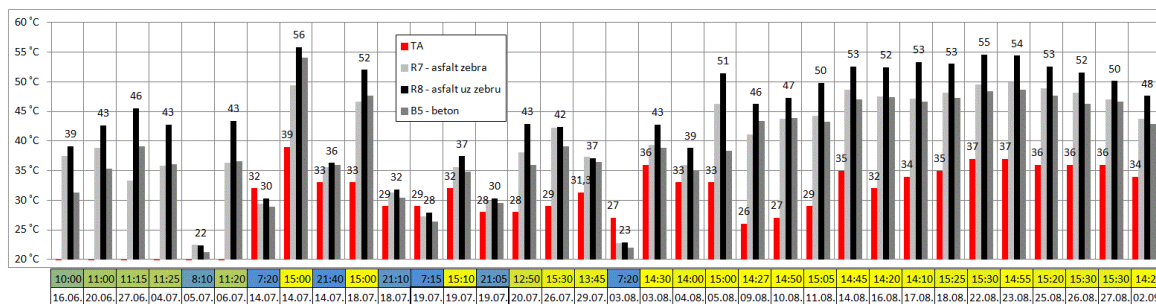
Tablica 5.2: Rezultati cjelodnevnog mjerenja temperature i osunčanosti prema mjernim točkama na dan 12.07.2011. (Babić, et al. 2012)

		VRIJEME MJERENJA																															
		6:02	6:30	7:00	7:32	8:00	8:33	9:02	9:32	10:02	10:34	11:05	11:31	12:00	12:31	13:13	13:45	14:13	15:00	15:31	16:07	16:36	16:58	17:21	17:46	18:12	18:51	19:15	19:39	20:14	20:39	22:12	
točka		TEMPERATURE PODLOGE																															
		TOČKA NA SUNCU																															
		TOČKA U HLADU																															
R5.	28.4	28.6	28.9	29.5	31.8	34.9	37.7	40.5	43.7	45.6	48.6	49.3	51.1	53.6	55.8	57.1	57.7	58.4	58.9	57.9	56.4	53.4	54.3	52.6	50.2	47.2	45.6	43.1	40.8	39.4	36.5		
R4.	28.3	28.3	28.5	28.7	31.8	34.2	37.3	39.7	42.2	44.3	47.3	48.6	49.9	52.6	54.8	56.0	56.7	57.4	58.5	57.7	56.0	52.7	54.4	52.1	49.6	46.9	45.6	43.1	40.4	39.7	35.8		
R7.	27.7	27.6	27.8	28.3	28.2	31.6	33.9	36.4	39.2	40.6	43.0	44.4	46.1	47.6	48.9	49.6	50.6	51.3	52.3	50.6	50.6	46.7	44.5	44.4	41.6	39.1	39.6	38.1	36.5	36.8	33.4		
R8.	27.8	28.1	28.4	29.3	28.8	33.4	36.4	40.1	42.9	45.9	48.8	49.8	51.6	53.9	55.1	56.7	57.4	56.9	58.5	56.8	55.5	50.9	47.8	47.4	44.0	41.0	41.5	39.3	37.5	36.7	34.4		
B5.	27.7	27.2	27.6	27.7	28.2	28.3	29.3	29.2	29.6	37.8	41.4	43.1	45.1	46.9	49.6	49.9	51.3	51.9	53.8	51.8	49.3	47.6	50.3	48.1	46.0	43.5	41.9	39.7	38.0	36.9	34.3		
B7.	26.1	27.8	27.9	27.7	27.8	28.3	28.4	28.7	29.3	30.4	40.6	43.1	46.5	49.1	51.8	53.6	55.0	55.4	57.3	55.1	51.5	49.6	49.2	44.4	41.9	39.7	38.9	37.6	36.2	35.6	33.0		
B8.	27.3	27.8	27.8	27.9	27.8	28.1	28.5	28.9	29.3	30.3	42.2	44.3	47.8	50.6	53.3	55.1	56.6	56.9	59.0	56.1	52.7	50.4	50.7	45.1	42.1	39.8	39.1	37.6	36.3	35.5	32.5		
B9.	27.9	28.2	28.2	28.5	28.5	28.3	28.4	29.8	32.8	39.4	40.5	43.0	46.3	46.4	48.5	50.6	51.6	52.3	54.0	52.2	49.8	47.6	50.1	48.1	46.0	43.0	43.1	39.6	37.9	37.1	34.8		
B10.	27.4	28.4	28.4	28.9	28.4	28.1	28.7	29.6	31.5	40.1	40.1	40.8	44.1	48.6	48.2	49.7	52.1	53.3	53.5	55.9	53.9	51.4	49.1	51.3	49.2	47.0	44.0	42.1	40.1	38.0	37.4	34.8	
točka		GRADIRANI PRIKAZ PROMJENE TEMPERATURE PODLOGE																															
		60 °C																															
		25 °C																															
R5.	28.4	28.6	28.9	29.5	31.8	34.9	37.7	40.5	43.7	45.6	48.6	49.3	51.1	53.6	55.8	57.1	57.7	58.4	58.9	57.9	56.4	53.4	54.3	52.6	50.2	47.2	45.6	43.1	40.8	39.4	36.5		
R4.	28.3	28.3	28.5	28.7	31.8	34.2	37.3	39.7	42.2	44.3	47.3	48.6	49.9	52.6	54.8	56.0	56.7	57.4	58.5	57.7	56.0	52.7	54.4	52.1	49.6	46.9	45.6	43.1	40.4	39.7	35.8		
R7.	27.7	27.6	27.8	28.3	28.2	31.6	33.9	36.4	39.2	40.6	43.0	44.4	46.1	47.6	48.9	49.6	50.6	51.3	52.3	50.6	50.6	46.7	44.5	44.4	41.6	39.1	39.6	38.1	36.5	36.8	33.4		
R8.	27.8	28.1	28.4	29.3	28.8	33.4	36.4	40.1	42.9	45.9	48.8	49.8	51.6	53.9	55.1	56.7	57.4	56.9	58.5	56.8	55.5	50.9	47.8	47.4	44.0	41.0	41.5	39.3	37.5	36.7	34.4		
B5.	27.7	27.2	27.6	27.7	28.2	28.3	29.3	29.2	29.6	37.8	41.4	43.1	45.1	46.9	49.6	49.9	51.3	51.9	53.8	51.8	49.3	47.6	50.3	48.1	46.0	43.5	41.9	39.7	38.0	36.9	34.3		
B7.	26.1	27.8	27.9	27.7	27.8	28.3	28.4	28.7	29.3	30.4	40.6	43.1	46.5	49.1	51.8	53.6	55.0	55.4	57.3	55.1	51.5	49.6	49.2	44.4	41.9	39.7	38.9	37.6	36.2	35.6	33.0		
B8.	27.3	27.8	27.8	27.9	27.8	28.1	28.5	28.9	29.3	30.3	42.2	44.3	47.8	50.6	53.3	55.1	56.6	56.9	59.0	56.1	52.7	50.4	50.7	45.1	42.1	39.8	39.1	37.6	36.3	35.5	32.5		
B9.	27.9	28.2	28.2	28.5	28.5	28.3	28.4	29.8	32.8	39.4	40.5	43.0	46.3	46.4	48.5	50.6	51.6	52.3	54.0	52.2	49.8	47.6	50.1	48.1	46.0	43.0	43.1	39.6	37.9	37.1	34.8		
B10.	27.4	28.4	28.4	28.9	28.4	28.1	28.7	29.6	31.5	40.1	40.1	40.8	44.1	48.6	48.2	49.7	52.1	53.3	53.5	55.9	53.9	51.4	49.1	51.3	49.2	47.0	44.0	42.1	40.1	38.0	37.4	34.8	

Istraživanje je pokazalo da osunčanost pojedine mjerne lokacije ima značajan utjecaj na temperaturu površine. Pri istim uvjetima osunčanosti (vrijeme izloženosti sunčevom zračenju) različiti materijali pokazuju slično ponašanje u smislu temperature koju postižu. Površine svih analiziranih materijala najvišu izmjerenu temperaturu dostigle su u približno isto vrijeme kada je izmjerena i najviša temperatura zraka (između 15:00 i 16:00 sati) (*Babić, et al. 2012*).

Istraživanja su pokazala da u istim uvjetima osunčanosti (primjerice točke B5 i B8) betonska površina postiže 5°C nižu temperaturu od asfaltne. Rezultati ukazuju da asfaltne površine sličnih svojstava (prvenstveno se ovdje misli boje) bez obzira na vrijeme osunčanja postižu vrlo bliske vrijednosti maksimalnih dnevnih temperatura. Tako je primjerice razlika temperature između mjernih mjesta na asfaltu R5 koje je osunčano od 8.00 sati i B8 koje je osunčano od 11.00 sati u trenutku maksimalne dnevne temperature svega 1°C. One točke na asfaltnoj površini koje su obojane (pješački prijelaz) u istim uvjetima osunčanosti imaju do gotovo 6°C manju maksimalnu dnevnu temperaturu površine. Utjecaj boje površine vidljiv je i usporedbom točaka B7 (svjetliji asfalt) i B8 (tamniji asfalt) koje se nalaze u neposrednoj blizini na asfaltu različite recepture. Na tamnijem materijalu izmjerene su temperature više od onih na svjetlom asfaltu za približno 1°C -1,5°C. Temperature podloge od granitne kocke (R4) vrlo su bliske onima od asfalta (R5) u istim uvjetima osunčanosti (Babić, et al. 2012).

Daljnje istraživanje obuhvaćalo je mjerenja tijekom mjeseca kolovoza u približno isto doba dana, kada je prethodnim mjerenjem utvrđeno vrijeme maksimalnih temperatura površine i zraka (Slika 5.3).



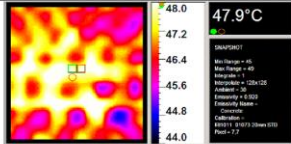
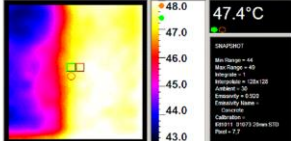
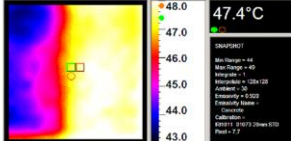
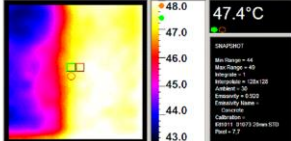
Slika 5.3: Prikaz temperatura zraka i različitih vrsta površina u periodu lipanj – kolovoz 2011. godine (Babić, et al. 2012)

Na Slici 5.3 prikazane su, između ostalog i temperature izmjerene na karakterističnim površinama (asfalt, bojeni asfalt i beton) u periodu od 3. kolovoza do 2. rujna kada je obavljeno ukupno 16 mjerenja na navedenim mjernim mjestima. Temperatura zraka (na slici označeno TA) je u navedenom periodu varirala u rasponu od 26°C do maksimalnih 37°C ($\Delta t = 11^\circ\text{C}$), a kolnika s asfaltnom površinom

od 39°C do 55°C ($\Delta t=16^{\circ}\text{C}$) te je prosječno iznosila 50°C odnosno 45,6°C za bojani asfalt.

Prosječna razlika temperature između temperature zraka i materijala površine kolnika s najvišom temperaturom – asfalta je u navedenom periodu bila 16,4°C. Temperatura betonskog kolnika u promatranom je periodu bila 5,4 °C niža od one asfaltne površine, a u pravilu jednaka ili niža od temperature asfalta obojanog bijelom bojom.

Unutar rezultata dugotrajnog mjerenja temperature uočeno je i nekoliko atipičnih rezultata mjerenja. Analizirajući, primjerice, izmjerene vrijednosti 18.07. i 19.07. u isto doba dana uočava se da je dnevni maksimum 19.07. niži za oko 5 °C od onog 18.07. Temperatura površine u vrijeme najveće zagrijanosti je međutim niža za 12-15°C (ovisno o materijalu površine), dok je večernja temperatura gotovo identična. U tom istom danu (i jedino tada) je izmjerena jutarnja temperatura površine bila viša od maksimalne dnevne temperature zraka. Detaljnim uvidom u vremenske prilike uočava se da su tih dana nakon dužeg vremenskog perioda zabilježene oborine u količini koja je mogla utjecati na vlažnost podloge pa onda i njezino sporije zagrijavanje zbog efekta evaporacije (Babić, et al. 2012).

Opis točke:	Foto snimak:	IC snimak
Točka 4. (R4) Granitne kocke na parkiralištu		
Točka 5. (R5) Asfalt neposredno uz granitne kocke na parkiralištu		
Točka 7. (R7) Asfalt - bijela pruga pješačkog prijelaza		
Točka 8. (R8) Asfalt – vozna traka		

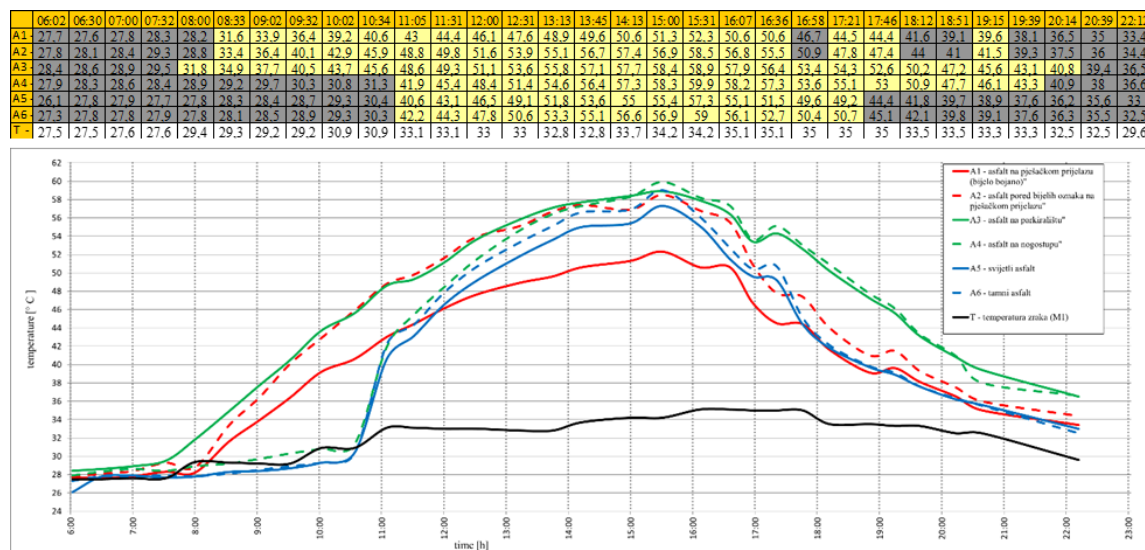
Slika 5.4: Prikaz mjernih točaka na mikrolokaciji Ulice Riva sa IC snimkom lokacije (Babić, et al. 2012)

Na Slici 5.4 prikazan je infracrveni (IC) snimak mjernih lokacija na mikrolokaciji Ulice Riva. Snimak jasno pokazuje razliku u temperaturi same označene točke i okolne površine. Pokazuje se da na istoj mikrolokaciji čak i isti materijal različite boje, u ovom slučaju asfalt i bijelom bojom obojeni asfalt (točke R5 i R7) mogu imati i nekoliko stupnjeva (oko 4°C) različitu temperaturu. Snimak mjernog mjesta R4 koji

prikazuje granitne kocke koje su povezane bitumenom jasno pokazuje razliku u temperaturi granita i bitumena koja nije zanemariva (Babić, et al. 2012).

Analizirane su i asfaltne površine na različitim mjestima u prometnoj mreži (Zona A) (Slika 5.5):

- prometni trakovi,
- trakovi za javni gradski prijevoz,
- parkirališne površine – lokacija A1, A2 i A3,
- površine različite istrošenosti – lokacija A5 i A6,
- površine s obojenim asfaltom – lokacija A1.



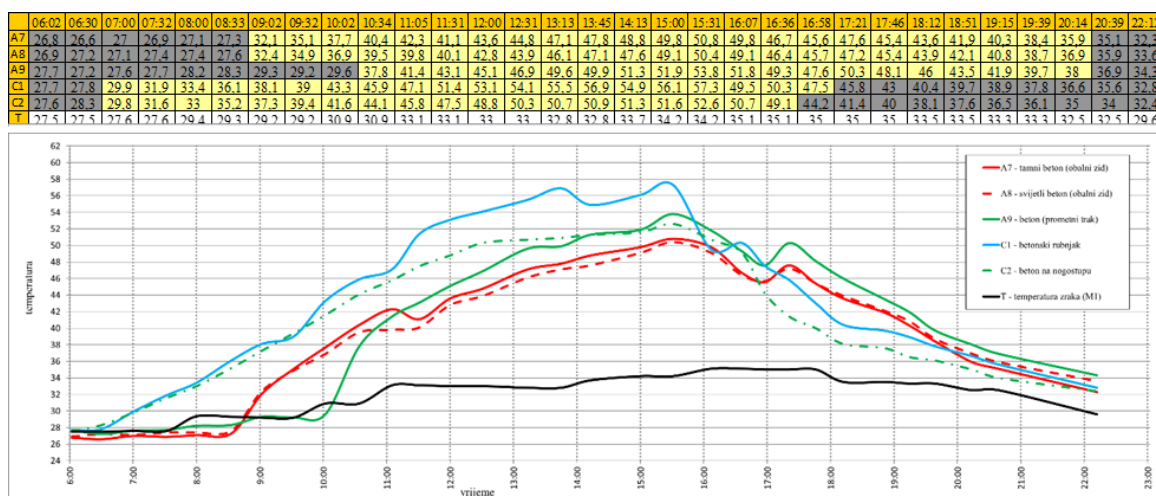
Slika 5.5: Prikaz temperatura asfaltnih površina 12.07.2011. (Deluka-Tibljaš, et al. 2015)

Utjecaj razlike u boji asfaltne mješavine koja je posljedica istrošenosti samog završnog sloja asfalta izmjerenih na lokacijama A5 i A6 na kolniku sporedne gradske ceste s manje intenzivnim prometom pokazuje da svjetlija površina postiže maksimalne temperature tijekom dana niže do 1,7°C odnosno prosječno 0,6°C niže (Deluka-Tibljaš, et al. 2015).

Lokacije A1 i A2 su sa istom asfaltnom površinom i nalaze se na kolniku prometnog traka namijenjenog autobusima javnog gradskog prijevoza na mjestu pješačkog prijelaza. Temperatura je mjerena na površini obojenoj bijelom bojom (A1) i neposredno uz nju (A2). Podaci pokazuju značajne razlike (do 7,1°C) u temperaturi

površine što treba pripisati svježe obojenoj površini iako su slične razlike očitane i na drugim pješačkim prijelazima. Temperatura bijelo obojene površine asfalta je prosječno niža za 3,4°C (Deluka-Tibljaš, et al. 2015).

Prema analiziranim podacima ne uočava se, osim iznimno kada se radi o različitom tipu mjerodavnog vozila, utjecaj namjene površine na temperaturu površine. Očekivana su očitavanja viših temperatura na lokacijama s jačim prometnim opterećenjem što je i evidentirano na lokaciji A2 (prometni trak javnog prijevoza) u odnosu na A6 (kolnik sporedne ceste) međutim više temperature očitane su na kolniku parkirališta (A3) i pješačkom nogostupu (A4). Najviša temperatura asfaltne površine zabilježena je na autobusnom stajalištu $T = 60^{\circ}\text{C}$ što se može pripisati dodatnom zagrijavanju kolne površine nisko postavljenim motorom autobusa i upućivati na potrebu (ne samo zbog zagrijavanja) korištenja alternativnih materijala na takvim lokacijama ili primjenu vozila na alternativni pogon (Deluka-Tibljaš, et al. 2015).



Slika 5.6: Prikaz temperatura betonskih površina 12.07.2011. (Deluka-Tibljaš, et al. 2015)

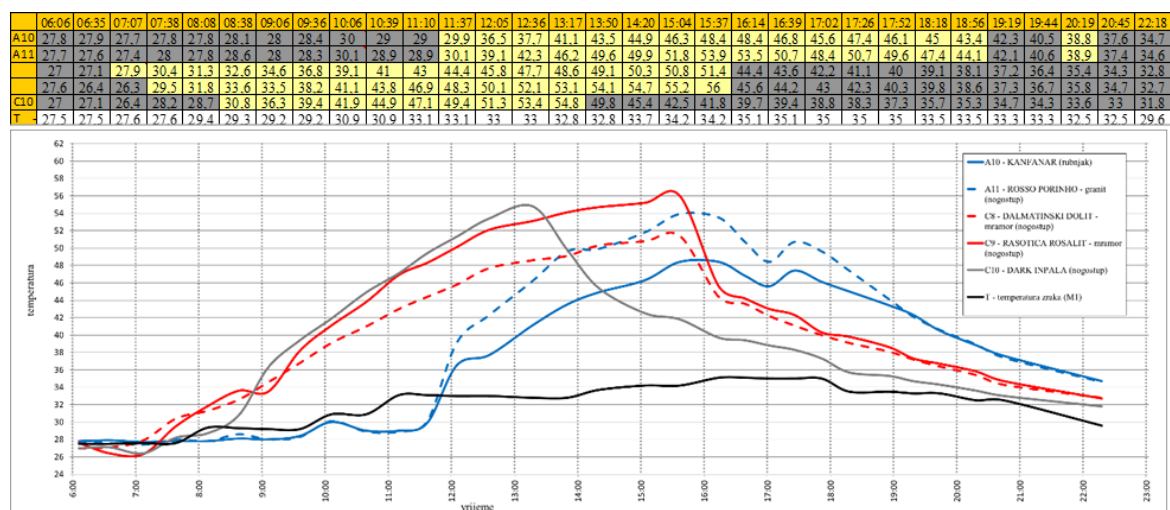
Na Slici 5.6 prikazane su dnevne promjene temperature betonske površine na različitim lokacijama u centru grada (3 lokacije su u zoni A i 2 u zoni C). Treba napomenuti da zbog malog udjela ove vrste materijala u ukupnim kolničkim površinama centra grada studija nije mogla analizirati utjecaje položaja betonskih površina na zagrijavanje ove vrste površina. Najniže temperature postignute su kod betonskih površina operativne obale obalnog zida (A7 i A8) gdje kao i kod drugih

materijala svjetlija površina pokazuje niže temperature (do 1,3 °C, prosječno 0,2 °C). U odnosu na lokacije udaljenije od vodenih površina (C1 i C3) evidentirane temperature betonske površine niže su i do 11,3 °C (prosječno 3,8 °C). Ova razlika se vjerojatno u velikoj mjeri može pripisati utjecaju vodene površine, ali je utjecaj evidentan i prema temperaturama na lokaciji A9 (betonski kolnik parkirališta) udaljenoj svega 10-tak metara od obalnog zida (prosječna razlika 1,1 °C).

Analiziran je i utjecaj zagrijavanja prirodnog kamena koji se najčešće koristi na pješačkim površinama. Fizikalna svojstva kamena na kojem su vršena mjerenja prikazana su u Tablici 5.3 (Deluka-Tibljaš, et al. 2015).

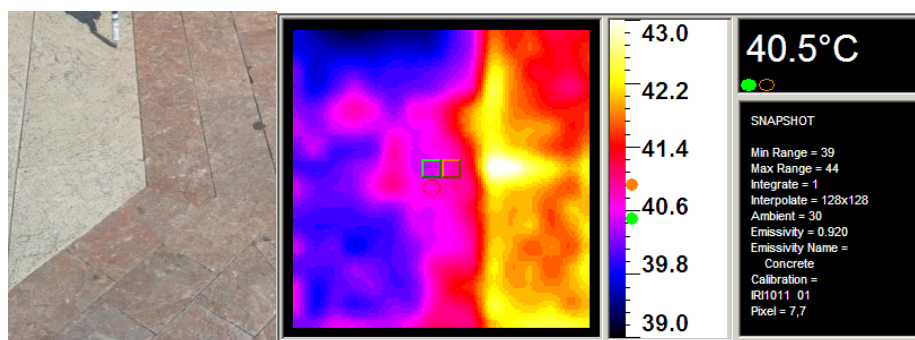
Tablica 5.3: Osnovne karakteristike kamena (Deluka-Tibljaš, et al. 2015)

Vrsta kamena	Tip	Poroznost [%]	Apsorpcija vode [%]	Volumenska masa ρ [kg/m ³]	Toplinska vodljivost λ [W/mK]
Mramor	Kanfanar	< 1%	0,1% - 0,3%	2600 - 2900	2,0 - 2,6
	Dalmatinski dolit				
	Rasotica				
	Rozalit				
Granit	Rosso porinho	0,4% - 1,5%	0,1% - 0,9%	2600 - 2800	1,6 - 3,4
	Dark impala				



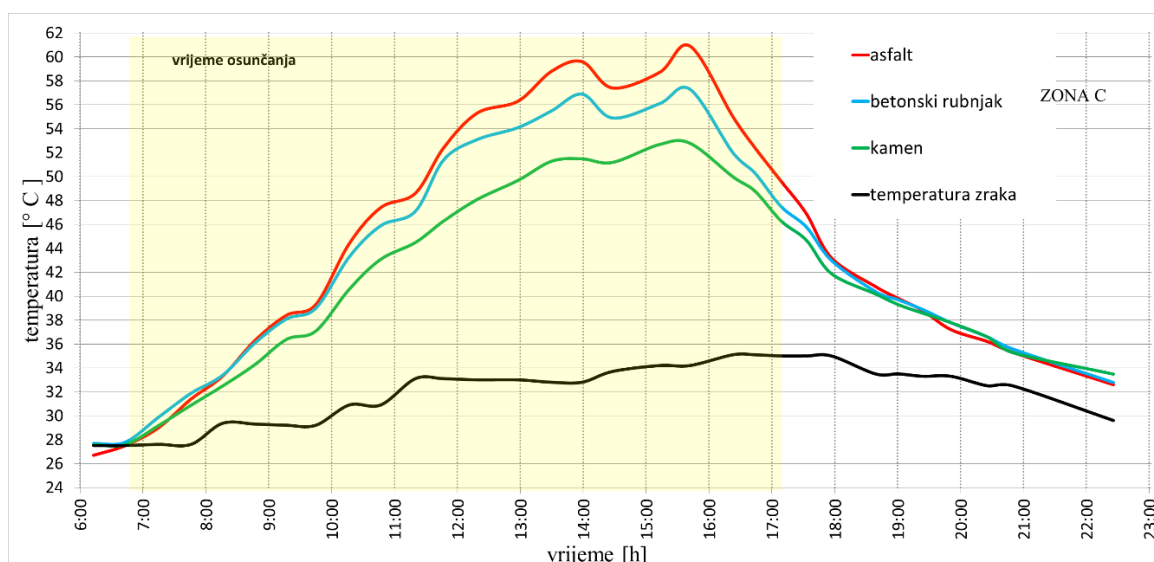
Slika 5.7: Prikaz temperatura kamenih površina 12.07.2011. (Deluka-Tibljaš, et al. 2015)

Na Slici 5.7 prikazane su dnevne promjene temperature kamenih površina na različitim lokacijama u centru grada (2 lokacije su u zoni A i 2 u zoni C). Analiza pokazuje da je mramor (A10) u pogledu zagrijavanja pokazuje bolja svojstva od granita (A11). Tijekom najtoplijeg perioda (12:00 do 15:00 sati) mramor ima prosječno 6 °C nižu temperaturu od granita. Granit se brže zagrijava i brže hladi što se povezuje s većom vrijednosti toplinske vodljivosti (Deluka-Tibljaš, et al. 2015).



Slika 5.8: IC snimak različitih tipova kamenih površina (C8 i C9) (Deluka-Tibljaš, et al. 2015)

Na Slici 5.8 je prikazan infracrveni snimak mramornih površina (lokacije C8 i C9) na istoj mikrolokaciji i u istim uvjetima osunčanosti. Na snimku je vidljiva značajna razlika u temperaturi površine unutar iste vrste kamenih površina. U ovom slučaju, na razliku temperature ima utjecaj boja kamene površine. Temperatura površine tamnije boja kamena (lokacija C9) prosječno je viša za 1,6 °C od temperature površine svjetlijeg kamena iako se radi o istoj vrsti materijala u istim mikrolokacijskim uvjetima (Deluka-Tibljaš, et al. 2015).



Slika 5.9: Prikaz temperatura površina različitih materijala na dan 12.07.2011.

(Deluka-Tibljaš, et al. 2015)

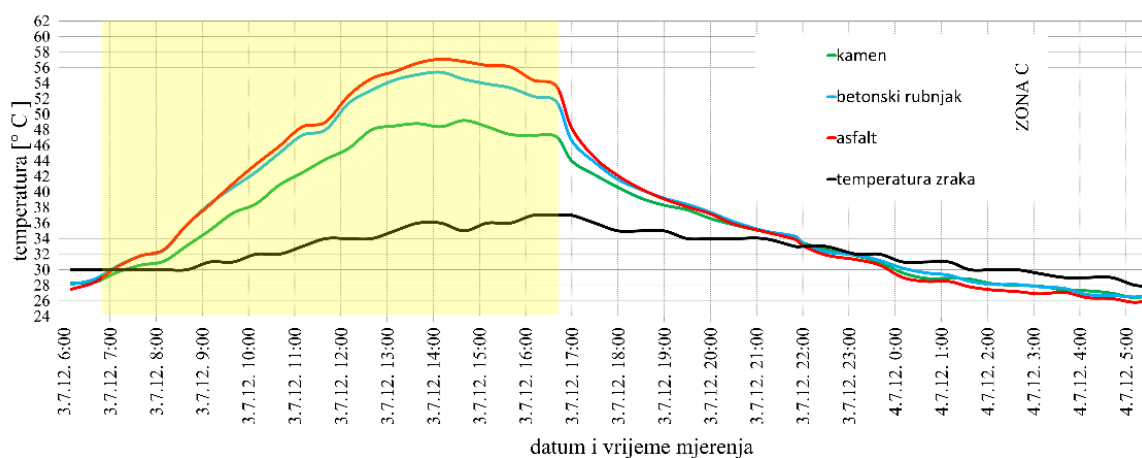
Na Slici 5.9 prikazane su temperature površina asfalta, betona (betonski rubnjak) i kamena. Navedene mjerne točke nalaze se na istoj mikrolokaciji (Jelačićev trg – Zona C) na presjeku autobusnog stajališta (asfaltna površina) i početka pješačke zone (kamena površina) koje su međusobno odijeljene betonskim rubnjakom. Maksimalna zabilježena temperatura asfalta u vršnom satu iznosi 60,9 °C, betona 57,3 °C i kamena 52,8 °C. U periodu izloženosti površina sunčevom zračenju (7:00 – 17:00 sati), asfaltna površine prosječno imaju 16,2 °C višu temperaturu od temperature zraka, dok betonske i kamene površine imaju 14,7 °C odnosno 11,9 °C prosječno višu temperaturu površine od temperature zraka. Iz slike je vidljivo da prije perioda osunčanja površine imaju približno jednaku (beton i kamen) ili nižu (asfalt) temperaturu površine od temperature zraka. S početkom perioda osunčanja temperature površina počinju rasti do vršnog perioda (cca 15:30 sati). Iako period osunčanja traje do 17:10, nakon vršnog sata temperature svih površina počinju se smanjivati i do jutarnjeg perioda ostaju više od temperature zraka. Navedeno ukazuje da nakon vršnog sata temperatura materijala prenosi se na temperaturu zraka (temperatura zraka se djelomično još povećava) te se vjerojatno pojačava utjecaj kondukcije odnosno prijenos topline u donje slojeve kolnika (Deluka-Tibljaš, et al. 2015).

Preliminarnim istraživanjima provedenim 2011. godine utvrđeno je da:

- (i) osunčanost pojedine lokacije ima značajan utjecaj na temperaturu površine materijala (Slika 5.2 i Tablica 5.2)
- (ii) boja površine materijala utječe na vrijednost maksimalnih temperatura površine (Slika 5.2 i Tablica 5.2)
- (iii) za istu vrstu materijala nema većih razlika u maksimalnim temperaturama površine bez obzira na vrijeme izloženosti sunčevom zračenju (Slika 5.2 i Tablica 5.2)
- (iv) na maksimalne vrijednosti temperatura istih površina u istim uvjetima temperatura zraka i izloženosti sunčevom zračenju utječe vlažnost podloge (Slika 5.3 – dan 18. i 19.07.2011.)
- (v) veća toplinska vodljivost materijala utječe na brže zagrijavanje i hlađenje materijala (Slika 5.7 i Tablica 5.3)

5.2. Istraživanja provedena 2012. godine

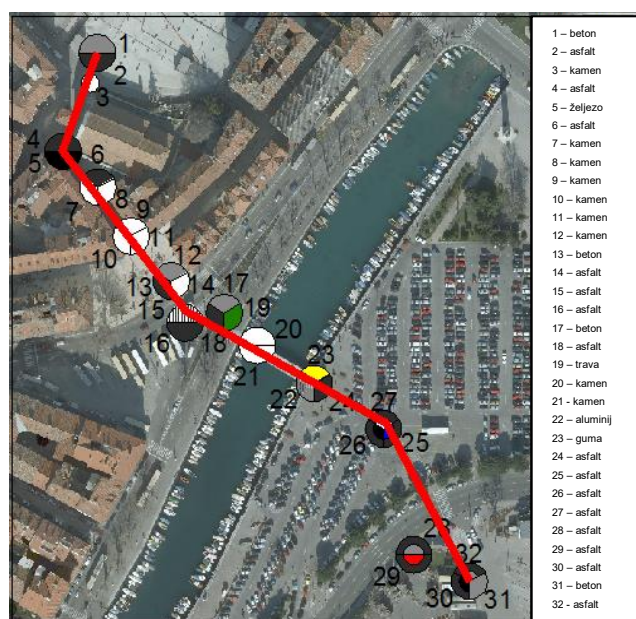
Tijekom ljetnih mjeseci 2012. godine izvršena su istraživanja na području užeg centra grada Rijeke. Mjerena je temperatura površine na ukupno 32 točke, od čega je 11 točaka obuhvaćeno i mjerenjem provedenim 2011. godine. Korišteni uređaji, kao i način mjerenja istovjetan je onome iz 2011. godine. Svrha ispitivanja bila je obuhvatiti prethodno mjerene lokacije radi potvrđivanja rezultata mjerenja.



Slika 5.10: Prikaz temperatura površina različitih materijala na dan 03.07.2012. (Deluka-Tibljaš, et al. 2015)

Na Slici 5.10 prikazane su temperature površina asfalta, betona (betonski rubnjak) i kamena. Navedene mjerne točke obuhvaćene su mjerenjem 2011. godine i za navedenu godinu prikazane na Slici 5.9. Iz slike je vidljivo da asfaltna površina postiže veće temperature od betonskih i kamenih površina u istim mikro lokacijskim uvjetima. Maksimalna zabilježena temperatura asfalta u vršnom satu iznosi 57,1 °C, betona 55,4 °C i kamena 49,2 °C. U periodu izloženosti površina sunčevom zračenju (7:00 – 17:00 sati), asfaltne površine prosječno imaju 14,1 °C višu temperaturu od temperature zraka, dok betonske i kamene površine imaju 12,9 °C odnosno 8,6 °C prosječno višu temperaturu površine od temperature zraka. Trend zagrijavanja i hlađenja materijala istovjetan je onom iz 2011. godine bez obzira što se pri višim temperaturama zraka postižu niže vrijednosti temperatura površina. Navedeno može biti rezultat vlažnosti zraka koja je prema podacima Državnog hidrometeorološkog zavoda za grad Rijeku iznosila prosječno 4% manje danu koji je prethodio cjelodnevnom mjerenju 03.07.2012. (Deluka-Tibljaš, et al. 2015)

Osim navedene usporedbe, tijekom 2012. godine analiza mjerenja obuhvaćala je utjecaj različitih parametara na temperaturu površina različitih materijala koji se koriste u urbanim područjima. Za potrebe istraživanja mjerne točke su određene u centru grada Rijeke na potezu od parkirališta Delta do Osnovne škole Nikola Tesla (Slika 5.11) (Cuculić, Deluka-Tibljaš and Babić 2014).



Slika 5.11: Linija položaja mjernih lokacija s prikazom točaka i materijala
(Cuculić, Deluka-Tibljaš and Babić 2014)

Presjek mjernih lokacija obuhvatio je autobusni terminal i parkirališnu površinu Delta, ulice sa većim intenzitetom prometa i pješačku zonu. Na Slici 5.12 prikazani su rezultati mjerenja 03.07.2012. u 7:00 i 13:00 sati. Na slici je uočljivo da je razlika temperature površina i temperature zraka u jutarnjem periodu značajno manja od razlike u popodnevnom periodu kada na pojedinim lokacijama razlika doseže do 10°C. Također je uočljivo da je temperatura zraka kao i temperature površina na mjernim lokacijama uz Mrtvi kanal manje što se može pripisati utjecaju vlažnosti i isparavanja te prirodnog hlađenja. Također su uočljive manje temperature na mjernim lokacijama 17 i 18 (betonska i asfaltna površina) u odnosu na okolne mjerne točke s istom vrstom materijala što može biti utjecaj manjeg udjela urbanog zelenila i smanjenog direktnog sunčevog zračenja. Temperature površina na mjernim lokacijama izgrađenog područja (pješačka zona, trg okružen objektima) su nešto niže od temperatura površina mjerenih na otvorenim područjima (parkiralište). Navedeno može biti utjecaj, osim korištenja različite vrste materijala, i vrijeme izloženosti direktnom sunčevom zračenju. Nešto veće temperature površina zabilježene su i na mjernim lokacijama prometnih traka (mjerne točke 15 i 16 te mjerne točke 28 i 29). Navedeno ukazuje na negativan učinak povećanog intenziteta prometa u vidu zagrijavanja površina (Cuculić, Deluka-Tibljaš and Babić 2014).



Slika 5.12: Prikaz temperatura različitih tipova površina na presjeku 03.07.2012. (Cuculić, Deluka-Tibljaš and Babić 2014)

Preliminarnim istraživanjima provedenim 2012. godine utvrđeno je da:

- (i) vlažnost zraka utječe na vrijednosti maksimalnih temperatura površina i zraka (Slika 5.9 i Slika 5.10)
- (ii) urbano zelenilo utječe na vrijednosti maksimalnih temperatura površina (Slika 5.12)
- (iii) vlažnost zraka i isparavanje vodenih površina utječe na vrijednosti maksimalnih temperatura površina i zraka (Slika 5.12)
- (iv) intenzitet prometa utječe na povećanje temperatura površina (Slika 5.12)

5.3. Istraživanja provedena u periodu od 2013. – 2015. godine

Preliminarnim mjerenjima 2011. i 2012. godine utvrđeni su pojedini nepovoljni utjecaji koje je neophodno izuzeti kako bi se jednostavnije i točnije analizirao utjecaj zagrijavanja površina.

Iz navedenog, utvrđeno je da je za daljnja istraživanja neophodno:

- (i) Obuhvatiti ispitivanja materijala koja pokazuju najnepovoljniji utjecaj u smislu zagrijavanja,
- (ii) Obuhvatiti ispitivanja različitih tipova iste vrste materijala,
- (iii) Provesti mjerenja klimatskih parametara (temperature zraka, brzine vjetra, sunčevog zračenja)
- (iv) Provesti mjerenja temperatura površine i dna kolničke konstrukcije
- (v) Provesti ispitivanja materijala u izoliranim uvjetima (bez utjecaja prometa i vodnih površina)
- (vi) Mjerenja provesti u uvjetima potpune izloženosti sunčevom zračenju (bez utjecaja urbanog zelenila)
- (vii) U analizi obuhvatiti toplinska svojstva materijala

Tijekom ljetnih mjeseci 2013., 2014. i 2015. godine provedena su terenska ispitivanja na ispitnom polju na „Kampus“. Ispitno polje smješteno je izvan centra grada (lat. 45.329410, long. 14.467244), izolirano od utjecaja prometa (Slika 5.13).



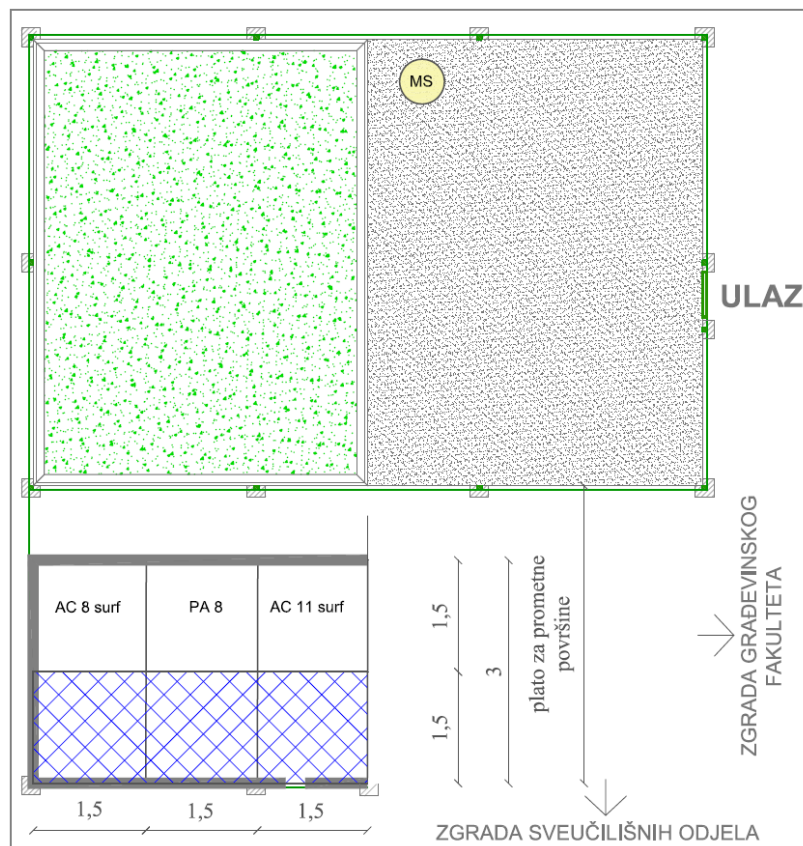
Slika 5.13: Orto foto lokacije (google maps 2015)

5.3.1. Opis polja

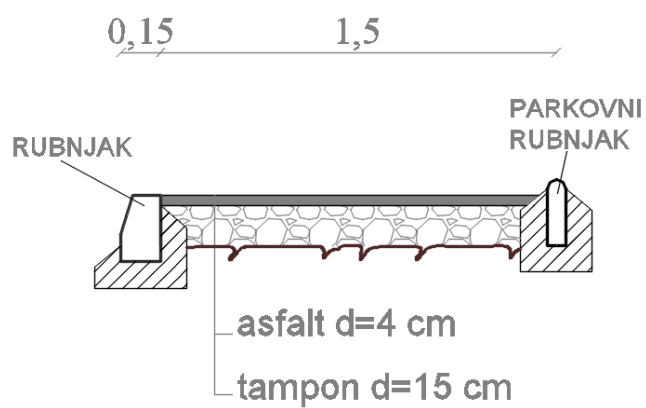
Izgrađeno je ispitno polje ukupnih dimenzija 3,0 x 4,5 m. Ispitno polje sastoji se od tri potpolja različitih vrsta asfalta (Slika 5.14 i Slika 5.15). Polja su izgrađena u svrhu prikupljanja podataka o temperaturi i sunčevom zračenju, koji će služiti za analizu toplinskog ponašanja različitih tipova ugrađenih kolničkih materijala. Mjerenja su provedena u ljetnim mjesecima kada je utjecaj temperature najveći. Ispitno polje je potpuno izolirano od prometa i smješteno na način da susjedni objekti ne ometaju njegovo osunčanje. Unutar ispitnog polja smještena je i meteorološka stanica prikazana na Slici 5.14 oznakom MS.

Ispitna polja uključuju tri različita tipa materijala završnog sloja AC 8 surf, PA 8 i AC 11 surf, na čijoj površini se vrši mjerenje temperature.

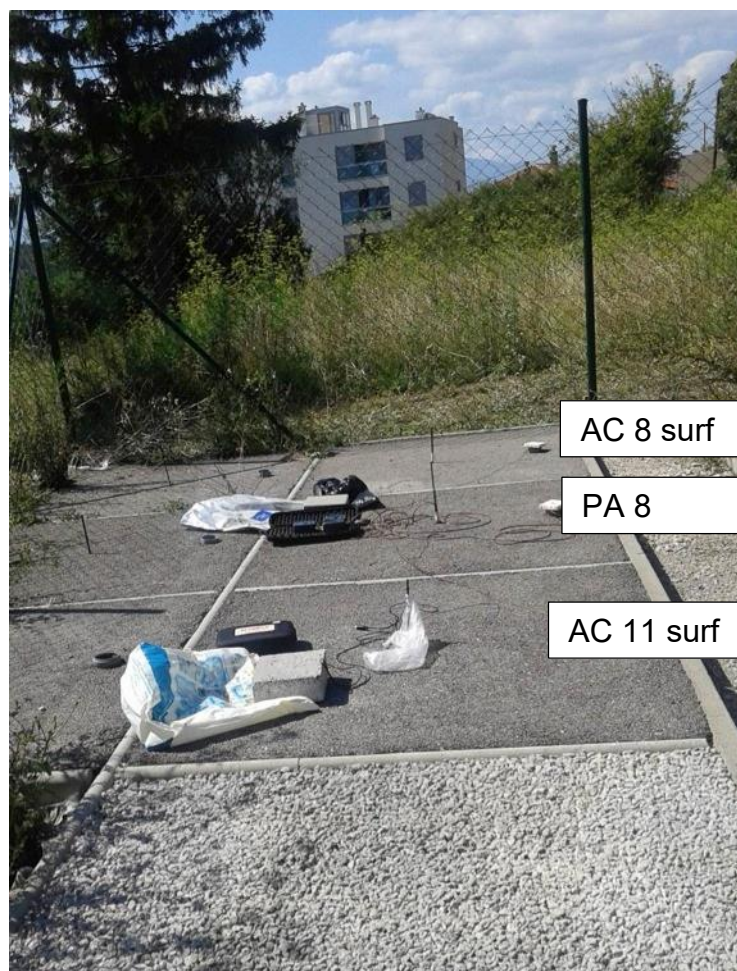
Poprečni presjek konstrukcije svih potpolja je jednak i sastoji se od asfalta debljine 4 cm (različitog sastava) postavljenog na 15 cm nevezanog mehanički zbijenog sloja (Slika 5.16).



Slika 5.14: Situacija ispitnog polja



Slika 5.15: Poprečni presjek ispitnog polja



Slika 5.16 Fotografija ispitnog polja

Osnovne karakteristike polja prikazane su u Tablici 5.4.

Tablica 5.4: Karakteristike ispitnog polja

	Polje AC 8 surf	Polje PA 8 surf	Polje AC 11 surf
Oznaka mješavine	AC 8 surf B50/70	PA 8 B50/70	AC 11 surf B50/70
Najveće zrno agregata	8	8	11
Vrsta bitumena	Cestograđevni bitumen 50/70	Cestograđevni bitumen 50/70	Cestograđevni bitumen 50/70
Udio šupljina	5%	20%	5%

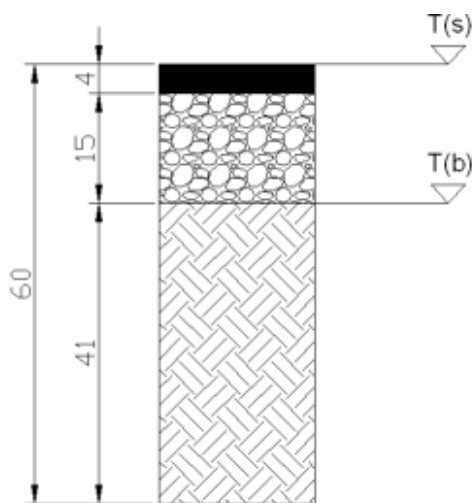
5.3.2. Uređaji i postupak mjerenja

Mjerenja su obuhvaćala:

- mjerenja temperatura površine kolnika,
- mjerenja temperatura na dnu nevezanog mehanički zbijenog sloja,
- mjerenja sunčevog zračenja,
- mjerenja toplinskog toka (eng. heat flux),
- mjerenja indeksa sunčeve refleksije (SRI), i
- mjerenja meteoroloških uvjeta:
 - temperatura zraka,
 - smjer i jačina vjetra,
 - vlažnost.

Mjerenja temperature zraka i brzine vjetra vršena su svakih 5 minuta, sunčevog zračenja 1 minutu, a temperatura površine i podloge svakih 1/60 minuta. Za potrebe daljnje analize, mjerenja su svedena na jednak vremenski inkrement od 1 minute.

Cilj mjerenja temperature je istražiti međusobni odnos između temperature površine kolnika i temperature zraka, ali isto tako dobiti i temperaturni profil po dubini kolničke konstrukcije. Na Slici 5.17 prikazani su položaji mjerenja temperatura.



Slika 5.17: Presjek kolničke konstrukcije s prikazom mjernih pozicija

Mjerenje temperature vršeno je uređajem za bilježenje i spremanje mjerenja (eng. data logger) „Kimo Kistock KTT 310“ s priključenim termoparsondama tipa T. Podaci su snimani u vremenskim intervalima od 10 sekundi.

Mjerenje sunčevog zračenja i toplinskog fluksa vršeno je digitalnim ručnim solarimetrima „Kimo SL200“ mjernog opsega sunčevog zračenja 1 W/m^2 do 1300 W/m^2 sa sondom spektralne osjetljivosti 400 do 110 nm. Uređaj mjeri sunčevo zračenje u intervalu od 2 sekunde, a ispisuje podatke za svaku minutu kao prosječnu vrijednost mjerenja.

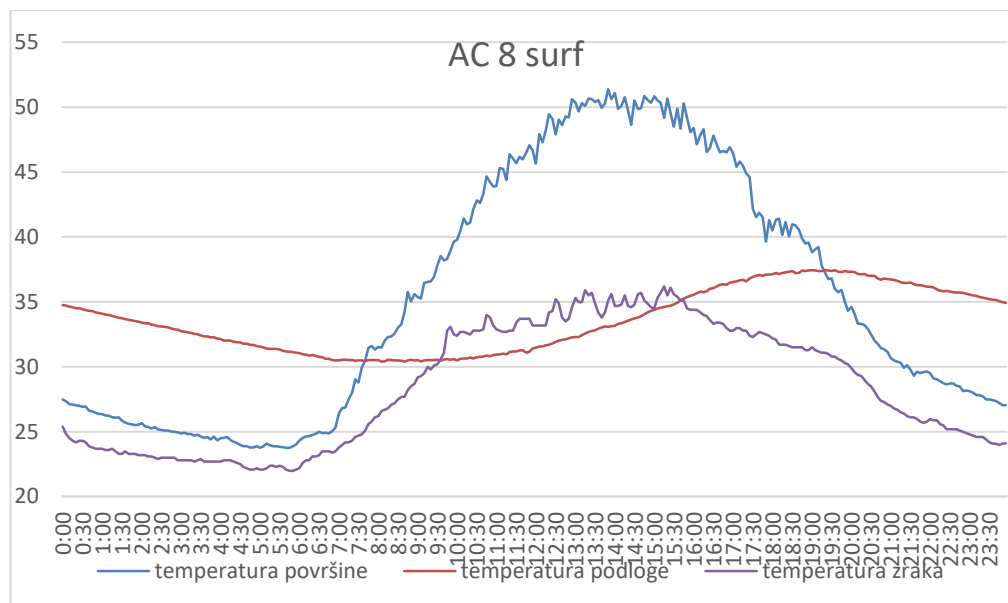
Mjerenje indeksa sunčeve refleksije vršeno je ručnim reflektometrom „Surface Optics 410 – Solar Visible/NIR Portable Reflectometer“. Uređaj mjeri totalnu refleksiju u sedam pojaseva (300 do 2500 nm). Uređaj je, između ostalog, namijenjen za karakterizaciju toplinskih svojstava materijala.

Meteorološki parametri mjereni su meteorološkom postajom „Rijeka, GF“.

5.3.3. Preliminarni rezultati provedenih mjerenja

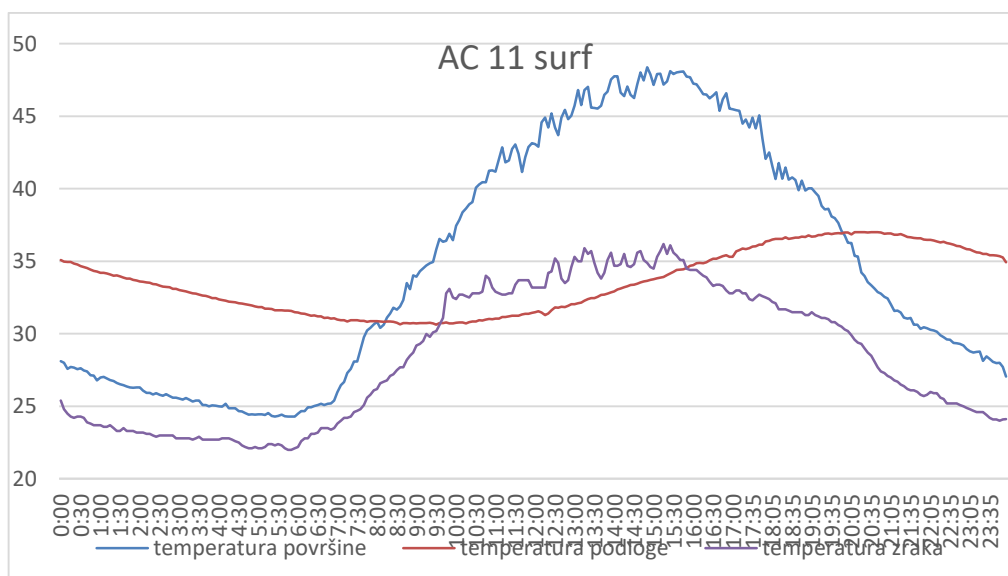
Tijekom ljetnih mjeseci izvršena su preliminarna istraživanja na ispitnom polju izvan centra grada u svrhu utvrđivanja ponašanja asfaltnih materijala kolničkih površina pri maksimalnim temperaturama zraka i najjačem sunčevom zračenju u izoliranim uvjetima (bez utjecaja prometa, isparavanja vodnih površina i sl.). Provedeno je sustavno mjerenje temperature kolničkih površina na ispitnim poljima različitog sastava površinskog sloja asfalta.

Iako su mjerenja provedena u periodu od 2013. – 2015. godine, u ovom radu bit će prikazani reprezentativni podaci mjerenja iz srpnja i kolovoza 2013. i 2015. godine.



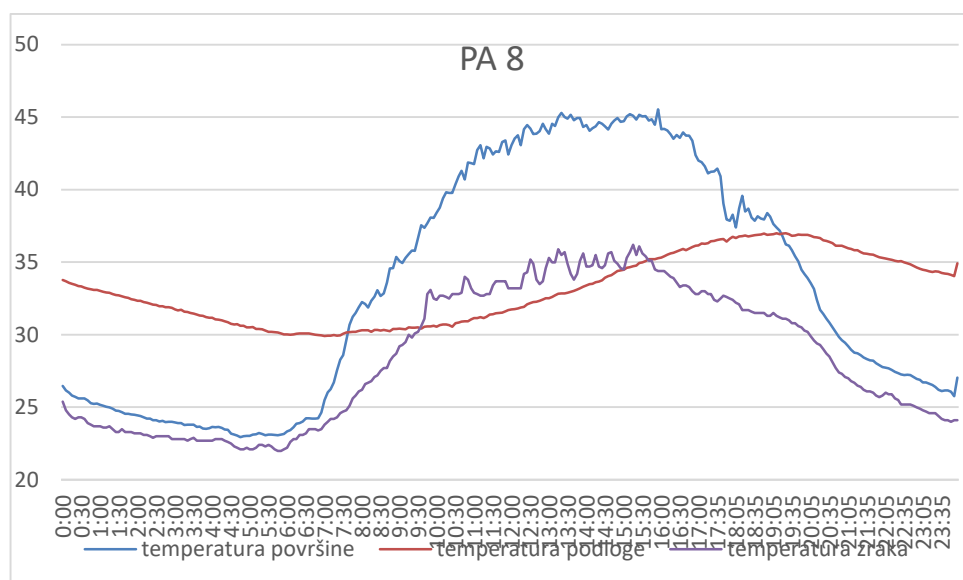
Slika 5.18: Prikaz kretanja temperatura površine i podloge za tip površine AC 8 surf 06.07.2013. godine

Na Slici 5.18 prikazan je dnevni hod temperature površine i podloge za tip površine AC 8 surf. Kretanje temperatura pokazuje rast vrijednosti u periodu od 5:30 sati kada započinje i period osunčanja ispitnog polja. Maksimalna temperatura površine iznosi 51,3 °C (izmjereno u 13:50) čime površina ima 16,2 °C višu temperaturu od temperature zraka. Podloga maksimalnu temperaturu postiže kasnije (mjereno u 19:00) i iznosi 38,8 °C.



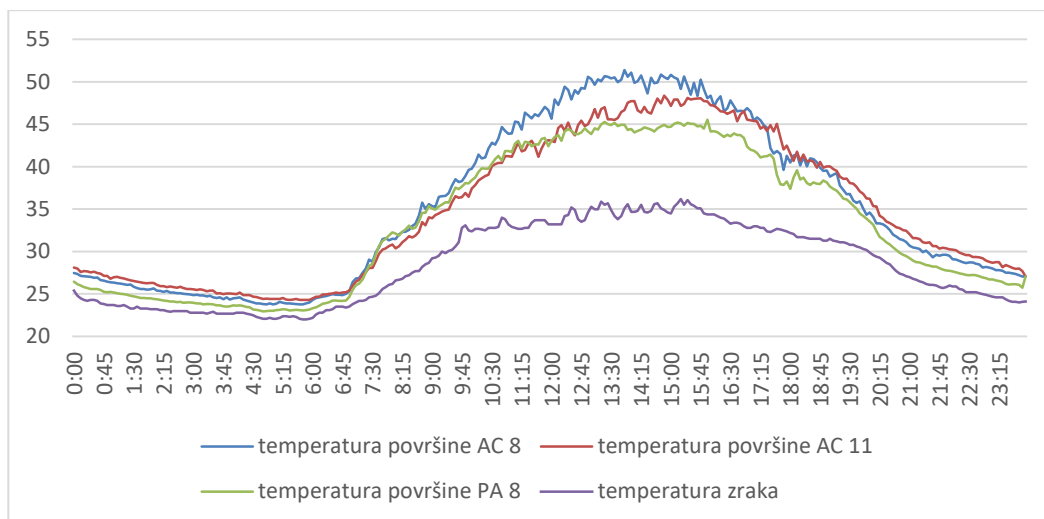
Slika 5.19: Prikaz kretanja temperatura površine i podloge za tip površine AC 11 surf 06.07.2013. godine

Na Slici 5.19 prikazan je dnevni hod temperature površine i podloge za tip površine AC 11 surf. Kretanje temperatura pokazuje rast vrijednosti u periodu od 5:30 sati kada započinje i period osunčanja ispitnog polja. Maksimalna temperatura površine iznosi 48,4 °C (izmjereno u 14:50) čime površina ima 13,5 °C višu temperaturu od temperature zraka. Podloga maksimalnu temperaturu postiže kasnije (mjereno u 20:00) i iznosi 37,1 °C.



Slika 5.20: Prikaz kretanja temperatura površine i podloge za tip površine PA 8
06.07.2013. godine

Na Slici 5.20 prikazan je dnevni hod temperature površine i podloge za tip površine PA 8. Kretanje temperatura pokazuje rast vrijednosti u periodu od 5:30 sati kada započinje i period osunčanja ispitnog polja. Maksimalna temperatura površine iznosi 45,2 °C (izmjereno u 15:10) čime površina ima 9,5 °C višu temperaturu od temperature zraka. Podloga maksimalnu temperaturu postiže kasnije (mjereno u 19:25) i iznosi 37,1 °C.



Slika 5.21: Prikaz kretanja temperatura površine različitih tipova materijala
06.07.2013. godine

U razmatranom vršnom periodu (14:00 – 16:00 sati) asfaltna mješavina AC 8 surf ima prosječnu temperaturu površine 49,8 °C, asfaltna mješavina AC 11 surf 47,5 °C, a asfaltna mješavina PA 8 44,7 °C. U istom vremenskom periodu asfaltna mješavina AC 8 surf postiže 14,7 °C višu temperaturu površine od temperature zraka, dok asfaltna mješavina AC 11 surf i PA 8 postižu 12,4 °C odnosno 9,6 °C višu temperaturu. Također je uočljivo da asfaltna mješavina AC 11 surf u noćnom periodu ima višu temperaturu površine od ostalih asfaltnih mješavina. Na Slici 5.21 je uočljivo da u istim mikrolokacijskim uvjetima površina tipa AC 8 surf postiže više temperature površine. Asfaltna mješavina AC 8 surf zbog manjeg najvećeg nominalnog zrna ima tamniju boju od mješavina s većim nominalnim zrnom. Navedeno je i razlog viših maksimalnih temperatura površine kod asfaltnih mješavina manjeg najvećeg nominalnog zrna. Također se zaključuje da u istim mikrolokacijskim uvjetima površina tipa PA 8 postiže najniže maksimalne temperature. Navedeno je razlog većeg udjela šupljina u mješavini.

Preliminarnim istraživanjima provedenim 2013. godine potvrđeni su zaključci istraživanja prethodnih godina čime je utvrđena opravdanost za daljnja mjerenja i istraživanja.

6. NUMERIČKI MODEL PRIJENOSA TOPLINE U KOLNIČKIM KONSTRUKCIJAMA

Jedan od ciljeva ovog rada je razviti odgovarajući način izračuna temperaturnih profila u kolničkim konstrukcijama. U ovom poglavlju biti će pojašnjen 1D model temeljen na nestacionarnoj diferencijalnoj jednačbi diskretiziranoj metodom konačnih elemenata.

Model je kalibriran mjerenjima sunčevog zračenja na terenu i validiran usporedbom s temperaturama u kolniku.

6.1. Model prijenosa topline

Energetska ravnoteža na površini kolnika podrazumijeva da zbroj svih prijenosa topline kroz površinu kolnika mora biti jednak toplini provedenoj u kolnik. Zbog debljine kolničke konstrukcije može se smatrati da nema prijenosa topline, odnosno da je isti zanemariv, na granici kolničke konstrukcije (nevezani sloj) i podloge. Također se smatra da na rubovima kolnika nema prijenosa topline, odnosno da je isti zanemariv, zbog dovoljno velike horizontalne širine. Promjene temperature u vertikalnom smjeru su višestruko veće od promjena u horizontalnom smjeru te se iz navedenog prijenos topline u horizontalnom smjeru kolničke konstrukcije može zanemariti.

Razvijeni model temelji se na 1D metodi konačnih elemenata i uključuje prijenos topline uslijed kondukcije, konvekcije i zračenja.

Matematička formulacija koja opisuje izmjenu topline između kolnika i okolnog zraka i tla temelji se na nestacionarnoj diferencijalnoj jednačbi:

$$\rho c \frac{\partial T_{pav}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(k(z) \frac{\partial T_{pav}}{\partial z} \right) = Q \quad (\text{Jednačba 6.1})$$

gdje je:

T_{pav} – temperatura kolnika

$k(z)$ – koeficijent difuzivnosti

z – debljina kolnika

Q – udio topline (dolazna ili odlazna)

ρc – jedinična masa i toplinski kapacitet kolnika

U ovom numeričkom modelu udio topline Q sastoji se od dolaznog sunčevog zračenja (kao toplinskog izvora) i konvektivnog dijela kao rubnog uvjeta.

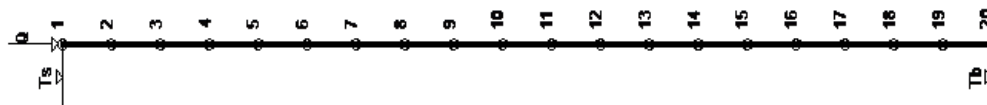
U radu (Kožar and Lozzi-Kožar 2017), koji se temelji na radu (Lewis 2004), pokazano je da matrica toplinskog kapaciteta je ovisna o dubini i glasi:

$$C(c_p) = \int_0^{l_e} c_p N(z) \frac{dN(z)}{dz} dz \quad (\text{Jednadžba 6.2})$$

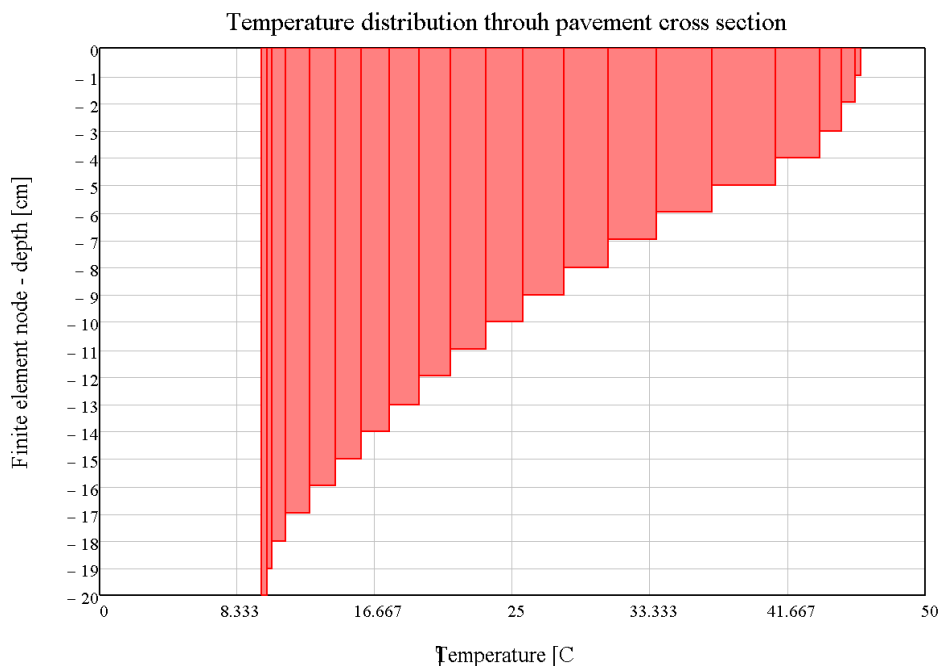
Također, matrica toplinske vodljivosti može se iskazati:

$$K(k) = \int_0^{l_e} N(z) \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(k(z) \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] dz \quad (\text{Jednadžba 6.3})$$

Prostorna domena u ovom modelu je jednodimenzionalni okomiti profil koji počinje od točke uz gornju površinu kolnika, prolazi kroz kolnik i završava na donjoj površini kolnika (Slika 6.1). Smatra se da je dubina 19 cm, jer se pretpostavlja da je ispod te točke temperatura konstantna i ne utječe na temperaturu površine i okolnog zraka što se potvrđuje distribucijom temperature po dubini što je prikazano i na Slici 6.2. Iz slike je vidljivo da je promjena temperature na granici kolničke konstrukcije (nevezani sloj) i podloge mala što potvrđuje činjenicu o adijabatskoj granici na takvoj dubini.



Slika 6.1: Prikaz konačnog elementa



Slika 6.2: Prikaz distribucije temperature kroz presjek kolnika (vršni sat)

Provedena je 1D analiza prijenosa topline isključivo u vertikalnom smjeru budući da su horizontalne dimenzije kolničkih konstrukcija značajno veće od vertikalnih pa je gubitak topline u horizontalnom smjeru zanemariv.

Za prostornu diskretizaciju koristi se dvadeset konačnih elemenata i vremenski korak od 60 s pomoću Eulerova implicitne metode.

Pri rješavanju koristi se Eulerova implicitna metoda (eng. backward Euler). Vremenska derivacija se aproksimira formulom za diferenciranje unatrag:

$$y_{n+1} := y_n + h \cdot f(y_{n+1} \cdot t_{n+1}) \quad (\text{Jednadžba 6.4})$$

Iz Jednadžbe 6.4 je vidljivo da se vrijednosti u sljedećem vremenskom koraku računaju iz vrijednosti koje se dobivaju u tom istom vremenskom koraku.

Matematički model temelji se na nestacionarnoj diferencijalnoj jednadžbi diskretiziranoj metodom konačnih elemenata sa posebnim konačnim elementom toplinskog toka prema tlu.

Jednadžba diskretiziranog modela u matričnom zapisu glasi:

$$C \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} + KT = Q \quad (\text{Jednadžba 6.5})$$

gdje su:

C – matrica toplinskog kapaciteta,

K – matrica toplinske provodljivosti, i

Δt – vremenski korak korišten u simulaciji.

Matrica toplinske vodljivosti sastoji se od dva dijela: standardnog dijela i dijela s toplinskim tokom:

$$K = K_{CD} + K_{CV}$$
$$K_{CV} = \frac{hPl}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{Jednadžba 6.6})$$

gdje je:

K_{CD} - standardna matrica krutosti konačnih elemenata

K_{CV} – loklana matrica koja uključuje konvektivni dio

Desnu stranu čine toplinski tok i utjecaj konvekcije:

$$Q = (q + hPT)l \begin{Bmatrix} 1/2 \\ 1/2 \end{Bmatrix} \quad (\text{Jednadžba 6.7})$$

Diskretizacija se vrši metodom konačnih elemenata. Posebni konačni element za toplinski tok prema tlu koristi se kako bi se izbjeglo mjerenje temperature na određenoj dubini ispod kolnika. Ovdje se koriste posebni beskonačni elementi kako bi se izbjeglo mjerenje temperature na određenoj dubini ispod kolnika. Ti bi elementi mogli imati rubne uvjete izražene u smislu toplinskog toka, koji se obično ne mjeri na dnu, pa se ovdje koristi srednje mjerenje temperature za određivanje toplinskog toka na dnu i u svrhu validacije.

Jednadžba 6.1 je riješena primjenom Eulerove metode iteracijama u vremenskoj domeni s vremenskim prirastom $\Delta t = 60$ sekundi u 1440 ponavljanja. Analize su provedene za jedan dan.

Rubni uvjeti dobiveni su iz podataka s meteorološke postaje postavljene na ispitnom polju, tako da se mjere ulazne vrijednosti temperature zraka i kolnika. Toplinski tok prema tlu dan je kao Dirichletov rubni uvjet, a rubni uvjet prema okolnom zraku uzima u obzir sunčevo zračenje. Konvekcija je prisutna samo u prvom elementu i uvodi se kroz konvektivni rubni uvjet (Couchyjev rubni uvjet) koji se dobiva iz toplinske ravnoteže koja dovodi do nelinearne jednadžbe:

$$\alpha_{solar} q_{solar} = \bar{h}(T_{pav} - T_{air}) \quad (\text{Jednadžba 6.8})$$

gdje je:

$\bar{h}$ - konvektivni koeficijent

T_{pav} – temperatura kolnika

T_{air} – temperatura zraka

Svi ugrađeni materijali su heterogeni i izloženi su velikom broju unutarnjih mehanizama prijenosa topline. Zbog toga, neophodno je pojednostavniti način opisa toplinskih svojstava. U ovom slučaju se pretpostavlja da su materijali kolnika homogeni s izotropnim toplinskim svojstvima. Toplinska svojstva ugrađenih materijala uspoređena su s podacima dobivenim iz laboratorijskih ispitivanja i preuzeta iz literature kao referentne vrijednosti, a vrijednosti su prikazane u Tablici 6.1.

Tablica 6-1: Svojstva materijala

Materijal	Koeficijent kondukcije [W/mK]	Specifični toplinski kapacitet [J/kg K]
Asfalt	0,75	920
Nevezani sloj	0,25	800
Tlo	2,00	1400

6.2. Koeficijent konvektivnog prijenosa topline

Odnos između temperature površine kolnika i topline sunčevog zračenja dobiva se uvođenjem koeficijenta prijenosa konvektivne topline između kolnika i okolnog zraka. Pokazano je da ovaj koeficijent mora biti nelinearan kako bi obuhvatio sve

pojave koje utječu na izmjenu temperature, tijekom zagrijavanja, a posebno hlađenja kolnika. Nije linearan jer ovisi o promjeni temperature ili brzini vjetra.

Koeficijent može biti povezan s temperaturnom razlikom pa u tom slučaju se pretpostavlja da

- (i) temperatura ovisi o brzini vjetra ili
- (ii) brzine vjetra su toliko male da se njihov utjecaj može zanemariti.

Druga pretpostavka je prihvatljiva i točna, budući da su mjerenja vršena u urbanim područjima i vrlo blizu površine kolnika, gdje je brzina vjetra ispod 5 m/s.

Koeficijent se dobiva iz toplinske ravnoteže koja dovodi do nelinearne jednadžbe:

$$\alpha_{\text{solar}} q_{\text{solar}} + \epsilon_{\text{IR}} \sigma T_{\text{sky}}^4 = \bar{h} (T_{\text{pav}} - T_{\text{air}}) + \epsilon_{\text{IR}} \sigma T_{\text{pav}}^4 \quad (\text{Jednadžba 6.9})$$

gdje je:

α_{solar} – sunčeva apsorpcija

ϵ_{IR} – infracrveno zračenje

q_{solar} – sunčevo zračenje [W/m²]

$\bar{h}$ - koeficijent konvektivnog prijenosa topline

Temperatura neba (eng. sky temperature) dobiva se empirijski iz jednadžbi prikazanih u (Berdhal 1984).

Koeficijent konvektivnog prijenosa topline povezan je s tzv. „eddy diffusivity“ načelom (Lozzi-Kožar and Kožar 2017) i načelom tankog sloja (Jiji 2006). Koeficijent iz Jednadžbe 6.9 može se zamijeniti s funkcijskom vrijednošću koja uključuje utjecaj ostalih parametara koji se ne pojavljuju u jednadžbi.

Jednadžba 6.9 može se korigirati u svrhu dobivanja prijenosa topline zračenjem (slično kao Newtonov zakon izmjene topline):

$$q = h(\Delta T) \Delta T \quad (\text{Jednadžba 6.10})$$

gdje je:

$h(\Delta T)$ – koeficijent konvektivnog prijenosa topline kao funkcija temperature

$\Delta T = (T_{\text{pav}} - T_{\text{air}})$

Koeficijenti konvektivnog prijenosa topline koji su razmatrani u ovom radu mogu se podijeliti u tri kategorije:

- (i) koeficijente ovisne o brzini vjetra,
- (ii) koeficijente ovisne o temperaturnoj razlici površine kolnika i zraka
- (iii) koeficijente ovisne o brzini vjetra i temperaturnoj razlici površine kolnika i zraka

Osim prikazanih, koeficijent konvektivnog prijenosa topline može biti stalan, što je dokazano kao neadekvatno rješenje za ovakvu vrstu problema.

Modeli ovisni o brzini vjetra su (Qin i Hiller 2014), (Y. Qin 2016), (Bentz 2000), (Dan, Tan i Chen 2019):

$$\begin{aligned} h_c &= 5,6 + 4,0 U & \text{za } U \leq \frac{5m}{s} \\ h_c &= 7,2U^{0,78} & \text{za } U > 5m/s \end{aligned} \quad (\text{Jednadžba 6.11})$$

gdje je:

U – brzina vjetra [m/s]

Prilagođeni model (za lokalne uvjete) za brzine vjetra niže od 5 m/s (Wang, Roesler and Guo 2009):

$$h_c = 6 + 3,7U \quad (\text{Jednadžba 6.12})$$

Skupina nelinearnih modela koji se temelje na meteorološkim uvjetima, a koji se koriste u EICM modelu za projektiranje kolnika, tzv. Vehrecampovi modeli, najprikladniji su za predviđanje temperature, budući da takvi modeli uzimaju u obzir stvaran prijenos topline konvekcijom uzrokovanom temperaturnom razlikom i brzinom vjetra blizu površine.

$$\begin{aligned} h_c &= 122,93[0,00144T_{mK}^{0,3}U^{d_c} + 0,00097(T_s - T_a)^{0,3}] \\ d_c &= 0,7 \end{aligned} \quad (\text{Jednadžba 6.13})$$

gdje su:

U – brzina vjetra [m/s]

T_{mk} – prosječna temperatura površine i zraka [K]

T_s – temperatura površine kolnika [K]

T_a – temperatura zraka [K]

Ovi nelinearni modeli umanjuju utjecaj temperature na koeficijent konvektivnog prijenosa topline (uslijed množenja konstante i vrijednosti potencije) pa su usporedivi s modelima prikazanim u Jednadžbi 6.1.

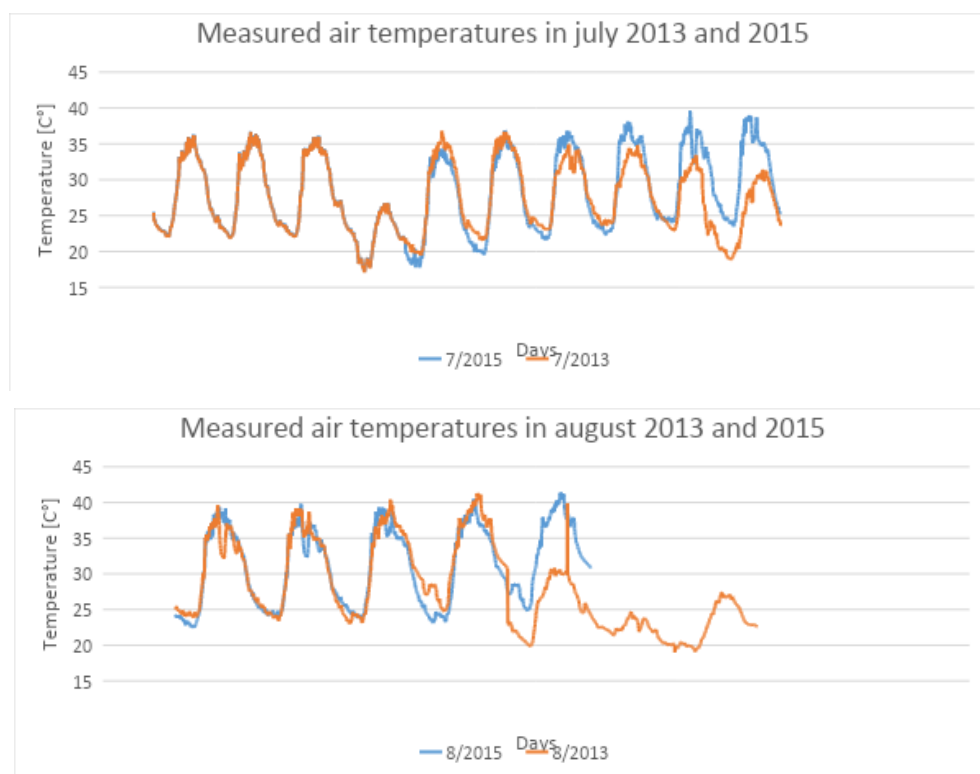
6.3. Analiza rezultata

Analizom rezultata utvrditi će se sljedeće činjenice:

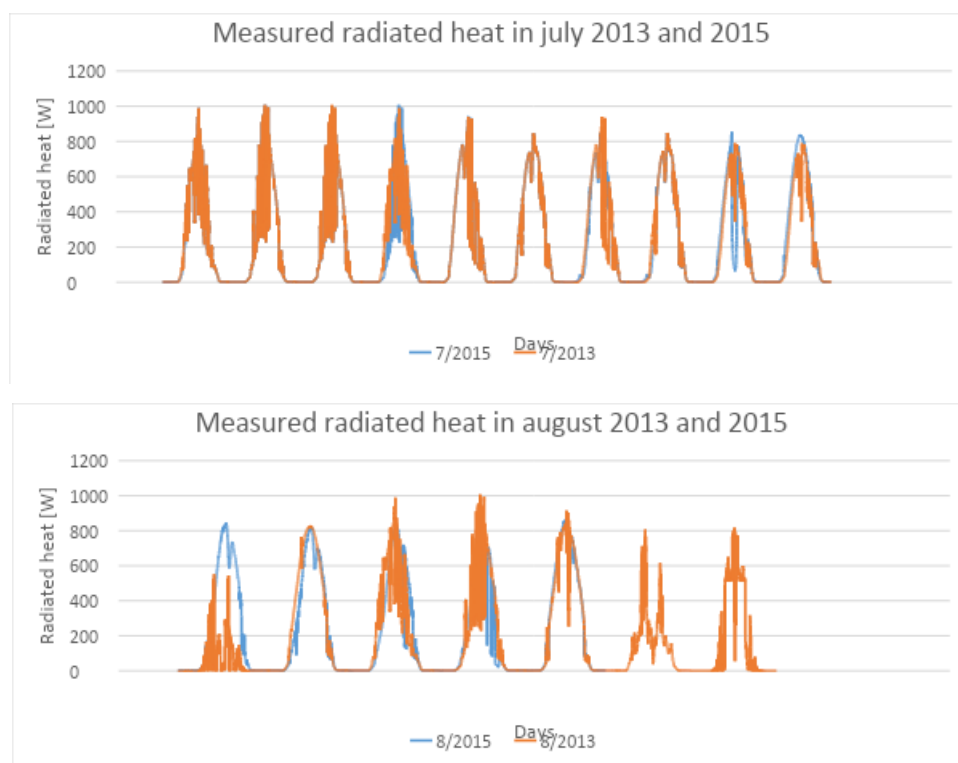
- (i) Koji od meteoroloških parametara ima najveći utjecaj na temperaturu površine kolnika
- (ii) Koji model konvektivnog prijenosa topline daje najpreciznije vrijednosti računatih temperatura
- (iii) Postoji li potreba za kalibracijom modela
- (iv) Pokazuju li svi materijali jednaki trend ponašanja

6.3.1. Utjecaj meteoroloških parametara na temperaturu površine kolnika

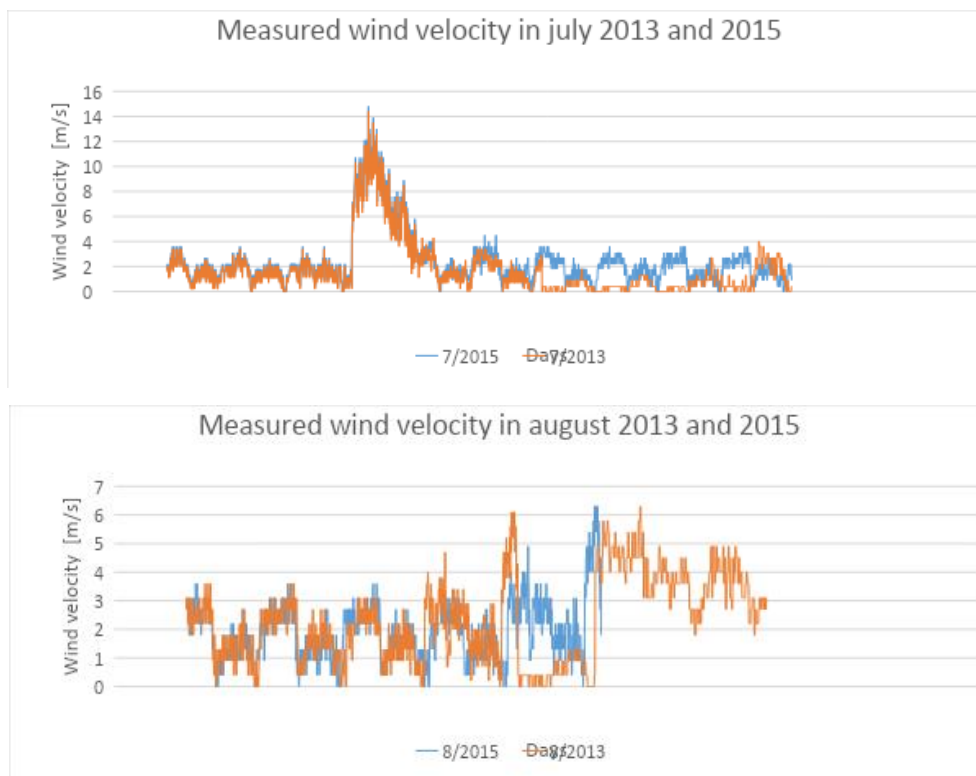
Prethodnim istraživanjima temperatura površine kolnika utvrđeno je da na Preliminarnim istraživanjima temperatura površine kolnika utvrđeno je da na temperature površina, uz svojstva materijala, utječu različiti parametri kao što su temperatura zraka, sunčevo zračenje i brzina vjetra. Prijenos topline koji uključuje sunčevo zračenje dovodi do nelinearne formulacije problema koja se može pojednostavniti pažljivim odabirom parametara (Kožar, Cuculić i Torić Malić 2019). Prikaz mjerenih parametara za 2013. i 2015. godinu prikazan je na Slici 6.3, Slici 6.4, Slici 6.5, Slici 6.6 i Slici 6.7.



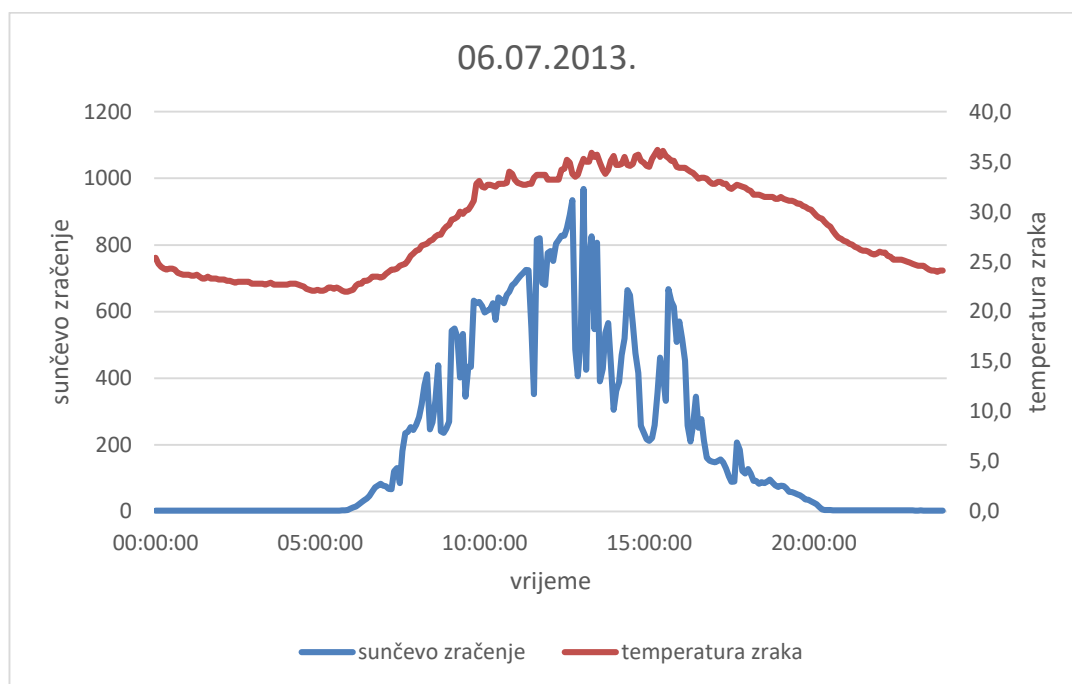
Slika 6.3: Provedena mjerenja - temperature zraka za srpanj i kolovoz 2013. i 2015. godine



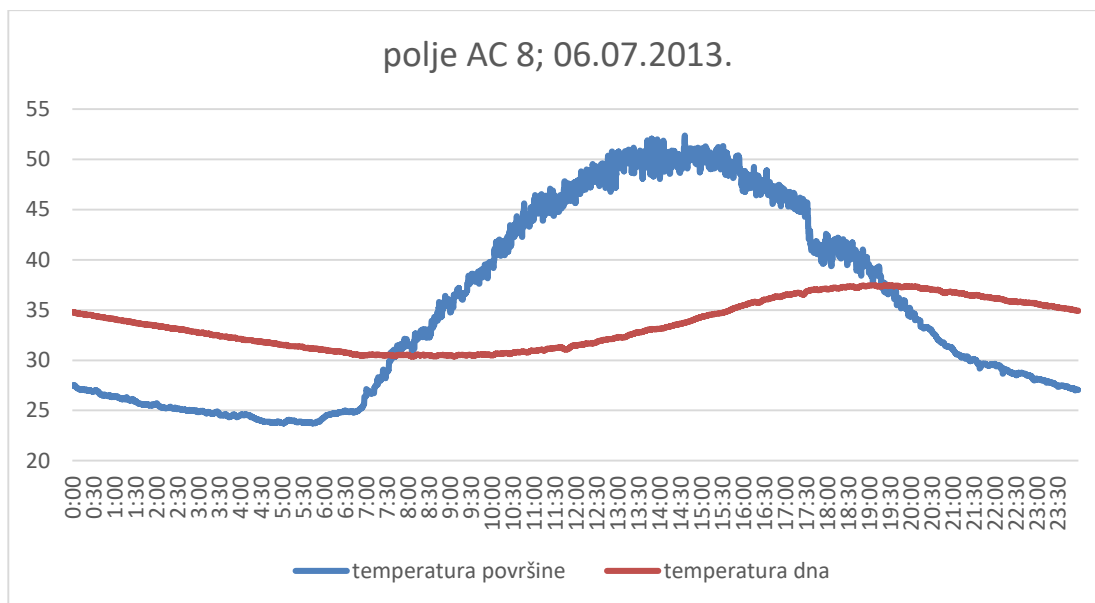
Slika 6.4: Provedena mjerenja – sunčevo zračenje za srpanj i kolovoz 2013. i 2015. godine



Slika 6.5: Provedena mjerenja – brzina vjetra za srpanj i kolovoz 2013. i 2015. godine



Slika 6.6: Prikaz mjerenih vrijednosti sunčevog zračenja i temperature zraka za dan 06.07.2013.



Slika 6.7: Prikaz mjerenih vrijednosti temperature površine i temperature dna polja AC 8 za dan 06.07.2013.

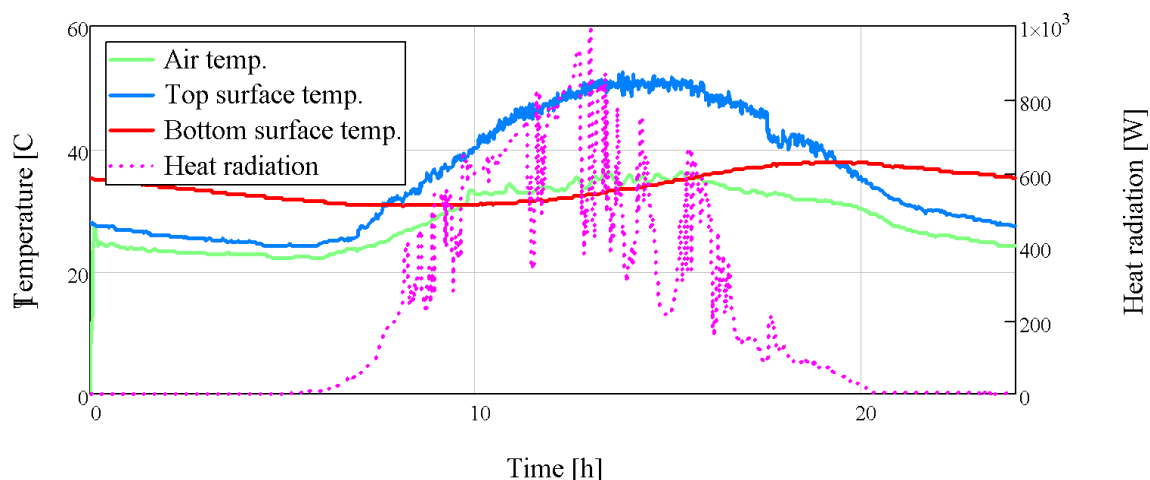
Iz slika se zaključuje da:

- (i) Temperature zraka maksimalne vrijednosti postižu u periodu 15:00 – 15:45
- (ii) Temperature zraka minimalne vrijednosti postižu u periodu 06:00 – 06:30
- (iii) Sunčevo zračenje maksimalne vrijednosti postiže u periodu 12:30 – 14:00 sati
- (iv) Brzine vjetra kreću se do 5 m/s (osim jednog dana)
- (v) Temperature zraka rastu nakon postizanja maksimalnih vrijednosti sunčevog zračenja
- (vi) Minimalne vrijednosti temperatura dna se javljaju se nakon početka perioda zagrijavanja i nakon početka zagrijavanja površine kolnika

Iako se u različitoj literaturi utjecaj sunčevog zračenja izračunava, u ovom radu vrijednosti su mjerene in situ što daje mogućnost preciznijeg definiranja utjecajnih parametara. U ovom radu vrijednosti mjerenja sunčevog zračenja služe za kalibraciju modela (Kožar, i dr. 2020)

Slika 6.8 prikazuje odnos temperatura kolnika (površine i podloge) i parametara okoline (sunčevo zračenje i temperatura zraka). Vidljivo je da s povećanjem sunčevog zračenja naglo raste temperatura površine. Temperatura podloge, bez

obzira na porast sunčevog zračenja i porast temperature zraka, ima trend blagog porasta, a maksimalne temperature podloge zabilježene su nakon smanjenja temperature zraka i utjecaja sunčevog zračenja.



Slika 6.8: Prikaz mjerenih vrijednosti za jedan dan u srpnju 2015. godine

Slika 6.3, Slika 6.4 i Slika 6.5 ukazuju na jednak trend ponašanja što dovodi do zaključka:

- (i) da su mjerenja pouzdana za promatranu klimatsku zonu i materijal
- (ii) da su mjerenja dobro provedena i da su mjereni podaci pouzdani za daljnju analizu.

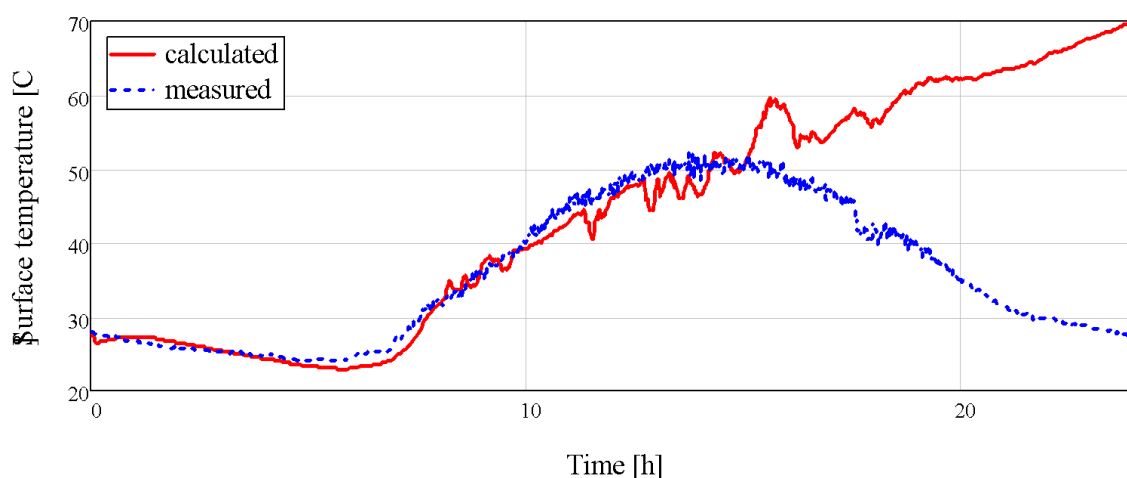
Na temelju Slike 6.6 i Slike 6.7 određene su kritične točke za daljnji prikaz rezultata:

- (i) vrijeme maksimalnih temperatura površine kolnika
- (ii) vrijeme minimalnih temperatura površine kolnika
- (iii) vrijeme maksimalnih temperatura zraka

6.3.2. Odabir modela konvektivnog prijenosa topline

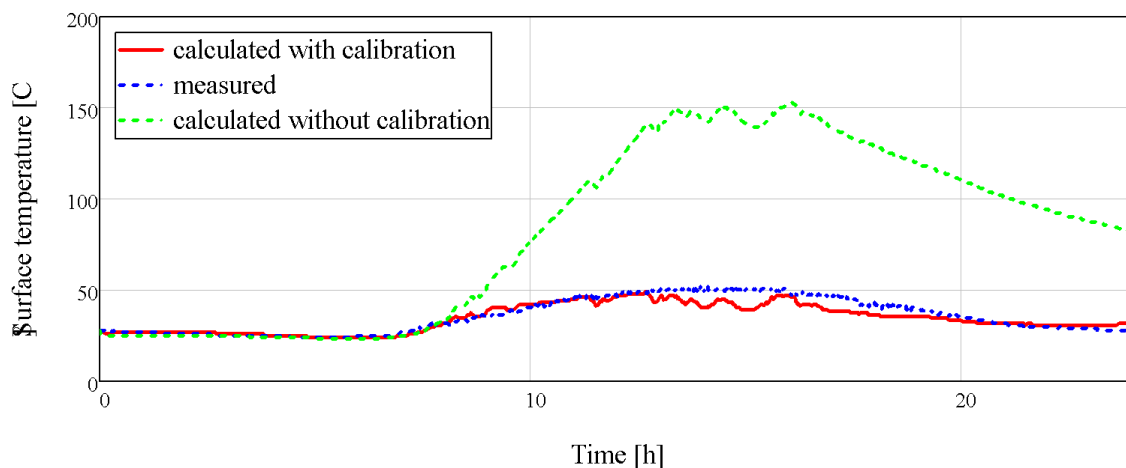
Usporedba mjerenih i modeliranih podataka vrši se za različite koeficijente konvektivnog prijenosa topline. U radu su analizirani koeficijenti temeljeni na modelima ovisnim o brzini vjetra i koeficijenti temeljeni na modelima ovisnim o meteorološkim parametrima tzv. Vehrecampovim modelima.

Slika 6.9 prikazuje odnos mjerene i izračunate temperature površine kolnika uz primijenjeni koeficijent konvektivnog prijenosa topline prema (Qin i Hiller 2014), (Y. Qin 2016), (Bentz 2000) i (Dan, Tan i Chen 2019) za brzine vjetra manje od 5 m/s. Iz prikaza rezultata je vidljivo dobro predviđanje temperature površine kolnika u periodu zagrijavanja, dok u periodu hlađenja model predviđa daljnji porast temperature. Primijenjeni koeficijent konvektivnog prijenosa topline ovisi isključivo o brzini vjetra. Iz rezultata se zaključuje potreba uvođenja dodatnih meteoroloških parametara pri izračunu temperatura površine.



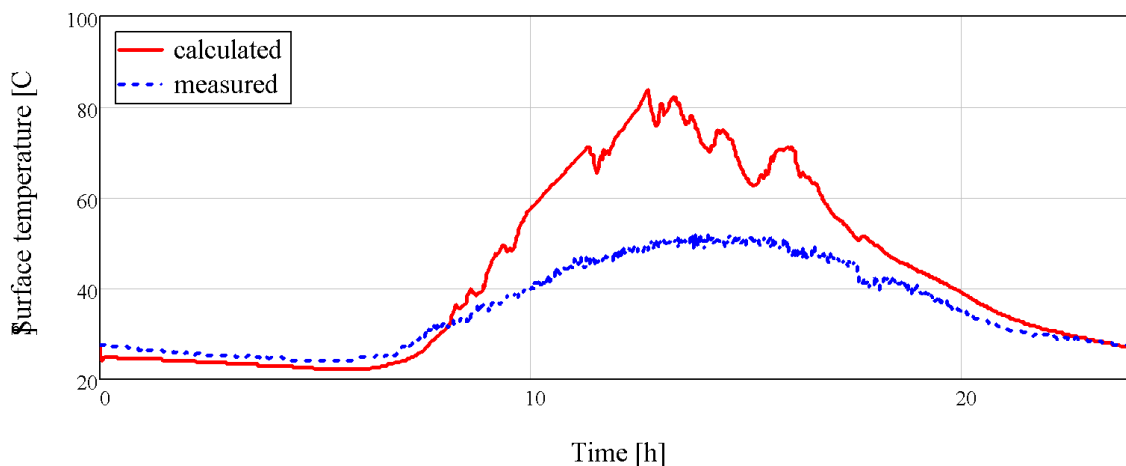
Slika 6.9: Prikaz rezultata za $hc = 5,6 + 4,0 U$ za $U \leq 5 \text{ m/s}$

Slika 6.10 prikazuje odnos mjerene i izračunate temperature površine kolnika uz primijenjeni koeficijent konvektivnog prijenosa topline ovisnom o meteorološkim parametrima (Vehrencampov model). Iz prikaza rezultata je vidljivo je da za primijenjeni koeficijent konvektivnog prijenosa topline za stvarne vremenske uvjete (mjereni ulazni podaci), dolazi do velikih odstupanja u odnosu na mjerene temperature površina kolnika, pogotovo u periodu zagrijavanja. Navedeno ukazuje na potrebu kalibracije koeficijenta konvektivnog prijenosa topline za stvarne vremenske uvjete.

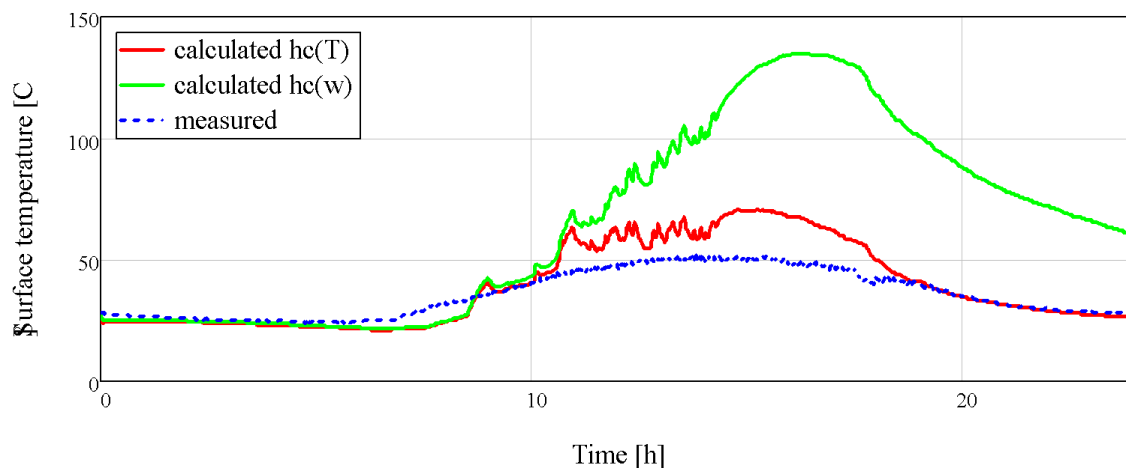


Slika 6.10: Prikaz rezultata za primijenjeni model koeficijent konvektivnog prijenosa topline $h_c = 122,93 \left[0,00144T_{mK}^{0,3}U^{d_c} + 0,00097(T_s - T_a)^{0,3} \right]$

Slika 6.11 prikazuje odnos mjerene i izračunate temperature površine kolnika uz primijenjenu konstantnu vrijednost koeficijenta konvektivnog prijenosa topline. Iz rezultata je vidljivo da u periodu zagrijavanja, izračunate vrijednosti temperatura površine su veće od mjerenih iako trend rasta prati mjerene podatke. Navedeno ukazuje potrebu uvođenja koeficijenta konvektivnog prijenosa topline promjenjivog u vremenu.



Slika 6.11: Prikaz rezultata za konstantnu vrijednost h_c bez ovisnosti o promjeni temperature ili vjetra



Slika 6.12: Prikaz rezultata koeficijenta konvektivnog prijenosa topline ovisnog o temperaturnoj razlici i vjetru

Na Slici 6.12 su prikazani rezultati analize za vrijednosti koeficijenta konvektivnog prijenosa topline, i to ovisnog o vjetru i promjeni temperature (Jednadžba 6.11 i Jednadžba 6.13. Uz primjenu Jednadžbe 6.13 vidljivo je da primjena ovakvog modela smanjuje utjecaj koeficijenta konvektivnog prijenosa topline na temperaturu, pa ovakav model može biti usporediv s onim iskazanim kroz Jednadžbu 6.11.

Usporedbom različitih modela konvektivnog prijenosa topline, vidljivo je da koeficijent primijenjen u Vehrecampovim modelima (crvena krivulja) daje bolje rezultate od koeficijenata koji u obzir uzima isključivo brzinu vjetra (zelena krivulja). Analiza je izvršena za datum 9.7.2015. kada su brzine vjetra dostizale vrijednosti i do 15 m/s, te je primijenjen model za h_c za brzine vjetra veće od 5 m/s. Može se zaključiti da i kod većih brzina vjetra razlika u temperaturi između zraka i kolnika i dalje ima dominantan utjecaj na zagrijavanje kolnika i distribuciju temperature.

Koeficijent prijenosa topline koji je funkcija temperature prikazuje se u obliku:

$$h_c(T) = \bar{h}(T_{pav} - T_{air})^n \quad (\text{Jednadžba 6.14})$$

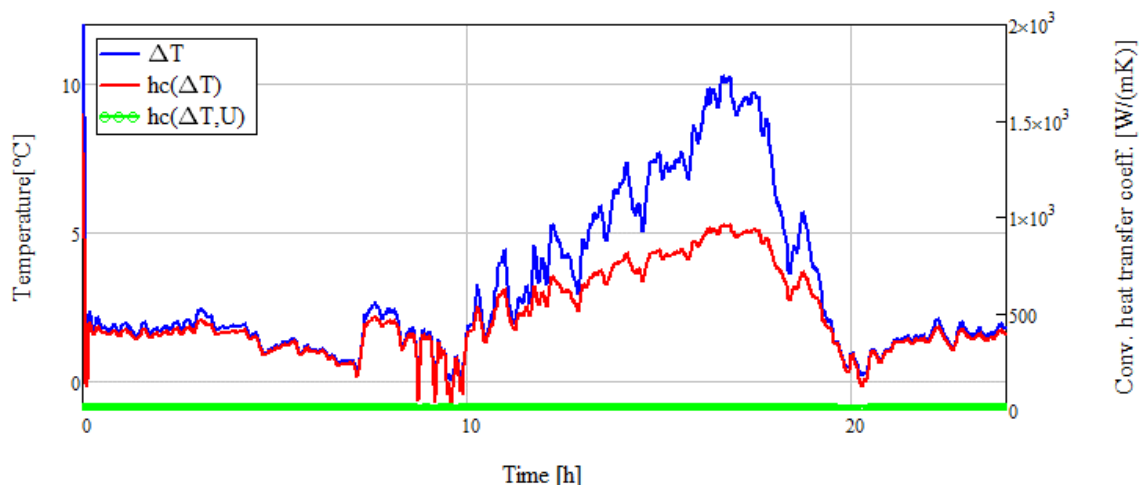
gdje je:

$$n=1/2$$

$$\bar{h} = 300W/(mK)$$

Analiza pokazuje da Jednadžba 6.14 daje najbolje rezultate izračuna temperatura površina u odnosu na mjerene vrijednosti (crvena krivulja na Slici 6.12).

Na Slici 6.13 prikazani su koeficijenti konvektivnog prijenosa topline izračunatih iz Jednadžbe 6.11 i Jednadžbe 6.13.



Slika 6.13: Prikaz nelinearnog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline h_c u usporedbi s mjenim temperaturnim razlikama

Iz Slika 6.12 i Slika 6.13 se zaključuje da temperaturna razlika (kao funkcija vremena) ima veći utjecaj na izračun temperatura površina kolnika, čak i u slučaju većih brzina vjetra (većih od 5 m/s).

Iz rezultata analiza potvrđuje se činjenica da:

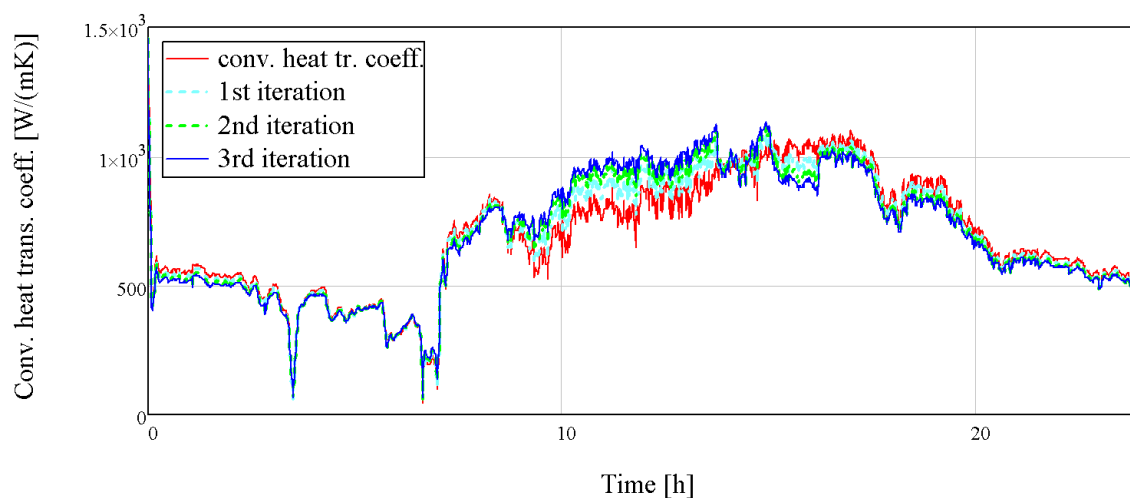
- (i) koeficijent konvektivnog prijenosa topline koji ovisi isključivo o brzini vjetra ne daje dobre rezultate izračuna što ukazuje na potrebu uvođenja dodatnih meteoroloških parametara pri izračunu temperatura površine (Slika 6.9)
- (ii) koeficijent konvektivnog prijenosa topline koji ovisi o meteorološkim parametrima (Vehrencampov model) potrebno je kalibrirati za stvarne vremenske uvjete (Slika 6.10)
- (iii) koeficijent konvektivnog prijenosa topline mora biti nelinearan, ali isto tako da mora biti funkcija temperaturnih razlika (Slika 6.11, Slika 6.12 i Slika 6.13)

6.3.3. Kalibracija modela

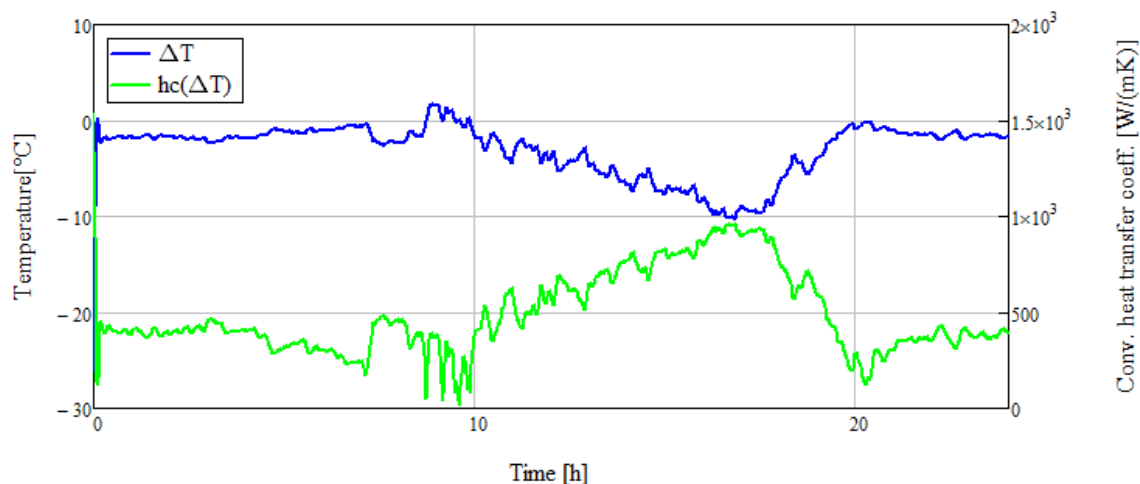
Iako koeficijent konvektivnog prijenosa topline ovisnog o temperaturnoj razlici $h_c(\Delta T)$ daje najbolje rezultate, točnost rješenja nije zadovoljavajuća. Navedeno

ukazuje da nedostatak pojedinih utjecajnih parametara u modelu. Identifikacija i razdvajanje utjecaja različitih parametara može dovesti do netočnih rješenja. Iz navedenog, ovim radom se predlaže uvođenje jednog parametra kroz kalibracijski postupak modela. Kalibracija se temelji na iterativnom inverznom postupku za izračun koeficijenta konvektivnog prijenosa topline koji u sebi sadrži sve utjecajne parametre. Kroz iterativni postupak, koristeći mjerene podatke temperatura, korigira se i kalibrira koeficijent konvektivnog prijenosa topline u svrhu simuliranja stvarnih uvjeta kako bi se povećala točnost rezultata. Postupak je validiran kroz usporedbu s mjerenim vrijednostima. Kroz validaciju je pokazano da ukoliko se iterativni postupak započne i sa konstantnom vrijednošću h_c , nakon kalibracijskog postupka dobiva se vrijednost h_c koja daje rješenje u skladu s mjerenim podacima (Slika 6.18, Slika 6.19, Slika 6.20).

Na

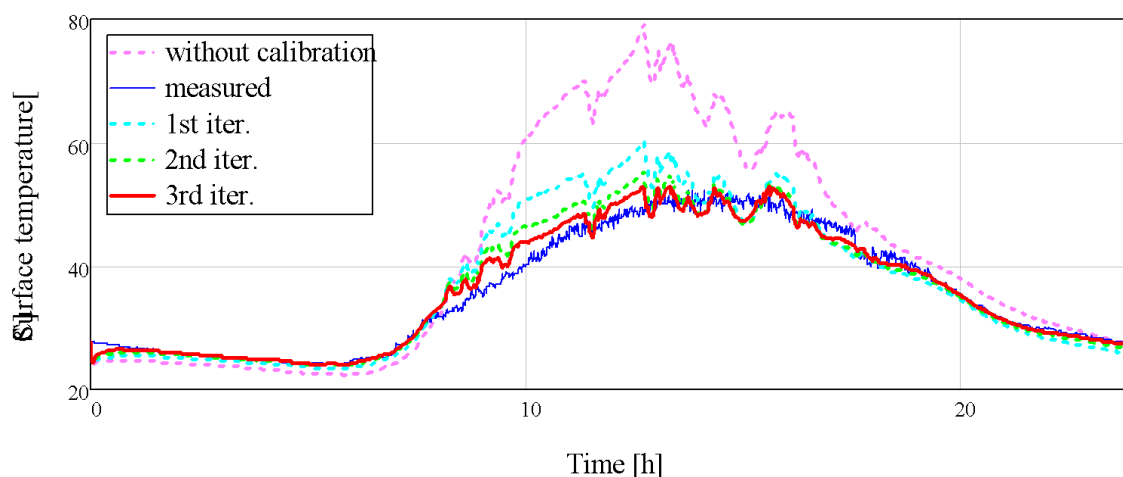


Slika 6.14: Prikaz rezultata kalibracije vrijednost h_c



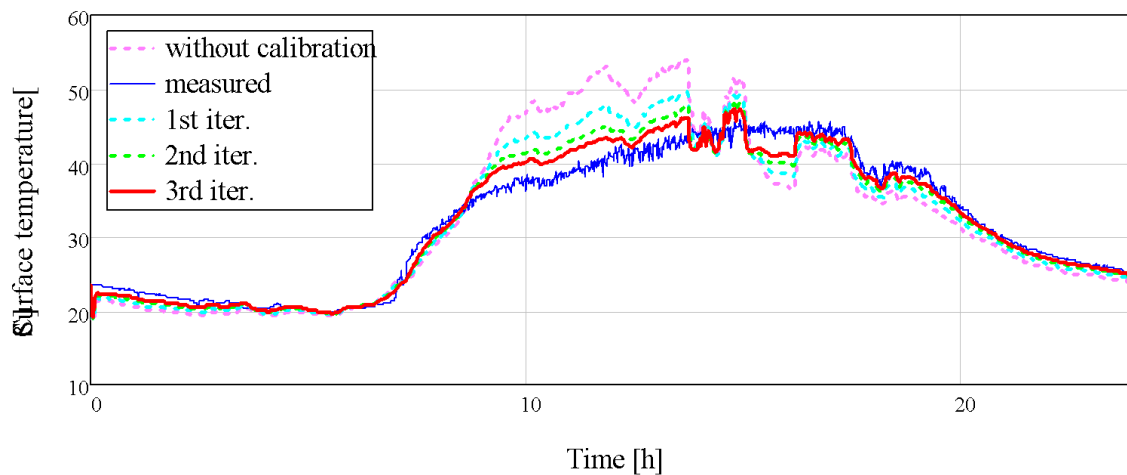
Slika 6.15: Prikaz rezultata ovisnosti temperaturne razlike i koeficijenta konvektivnog prijenosa topline h_c

Slika 6.16 prikazuje odnos mjerene i izračunate temperature površine kolnika uz primijenjenu nekalibriranu i kalibriranu vrijednost koeficijenta konvektivnog prijenosa topline. Iz rezultata je vidljivo da nekalibrirana vrijednost koeficijenta konvektivnog prijenosa topline u periodu vršnih sati rezultira višim temperaturama površina. Kalibracijom koeficijenta mjereni i izračunati podaci pokazuju slične vrijednosti.

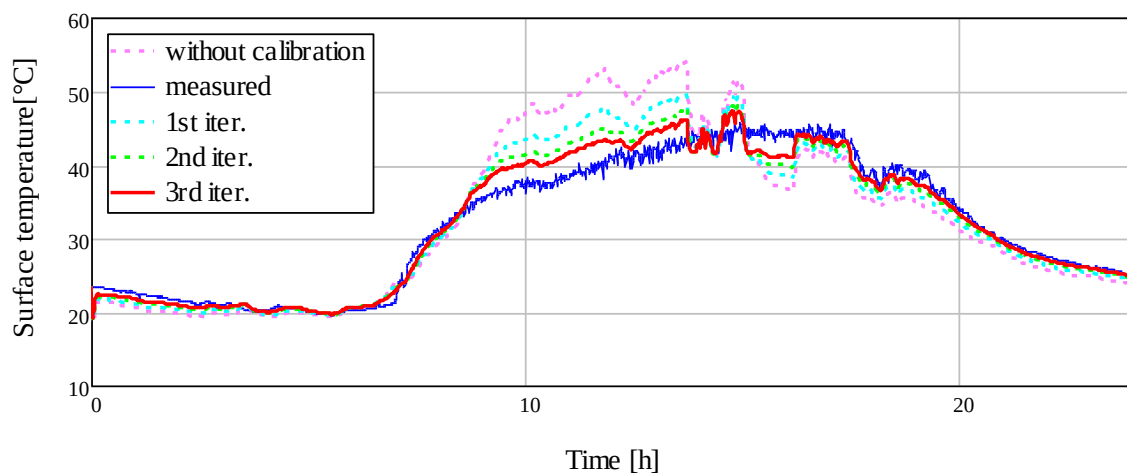


Slika 6.16: Prikaz rezultata za nekalibriranu vrijednost h_c i kalibriranu vrijednost h_c kroz tri iteracije

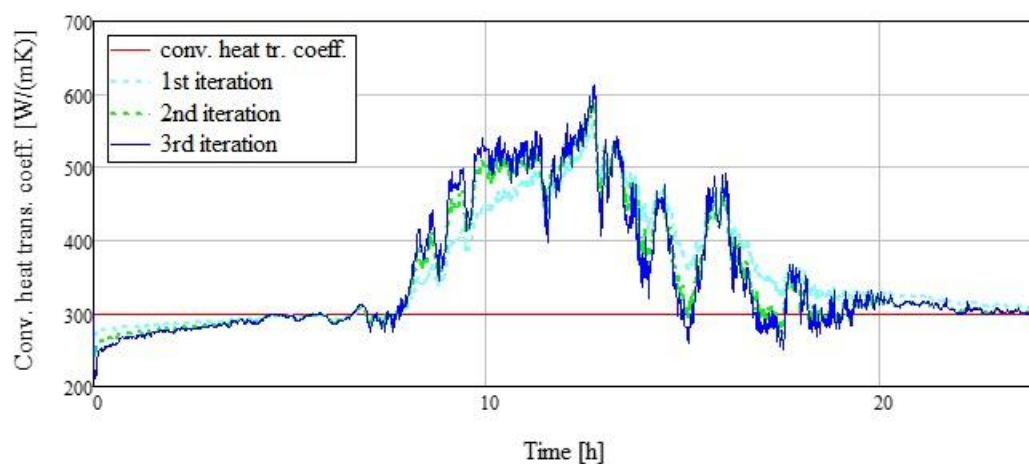
Do



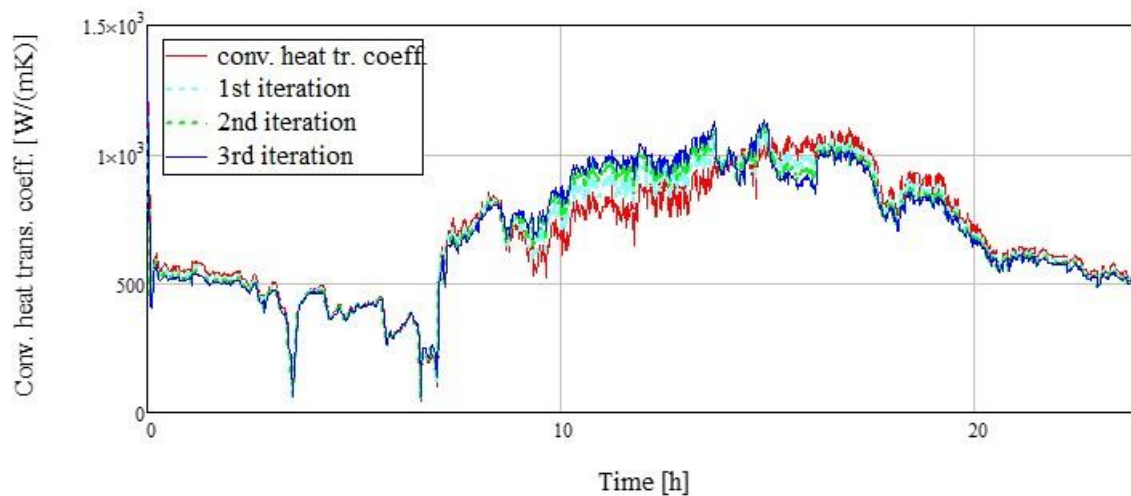
Slika 6.17: Prikaz rezultata za nekalibriranu i kalibriranu vrijednost h_c dobivene



Slika 6.18: Prikaz rezultata izračuna temperatura površina (za jedan dan) i vrijednost h_c dobivene iz $q_{\text{solar}} + \epsilon_{\text{IR}} \sigma T_{\text{sky}}^4 = \bar{h} (T_{\text{pav}} - T_{\text{air}}) + \epsilon_{\text{IR}} \sigma T_{\text{pav}}^4$ (Jednadžba 6.9)



Slika 6.19: Koeficijent konvektivnog prijenosa topline dobiven kroz inverzni iterativni postupak za konstantnu vrijednost h_c



Slika 6.20: Koeficijent konvektivnog prijenosa topline dobiven kroz inverzni iterativni postupak za nelinearnu vrijednost $h_c(\Delta T)$

Postupkom iteracije, koji započinje s pretpostavkom početnog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline dobivenim iz jednadžbi koje se koriste u EICM modelima, poboljšavaju se prethodno dobiveni rezultati. Kroz samo tri iteracijska koraka kalibrira se koeficijent konvektivnog prijenosa topline prema sljedećim koracima:

$$\bar{h}_c(i) = \bar{h}_c(i-1) + \Delta T(i-1)C$$

$$\bar{h}_c(1) = \bar{h}(T_{pav} - T_{air})^n$$

$$\Delta T(i) = T_{pav}(i) - T_{air}$$

gdje je :

C – kalibracijski parametar

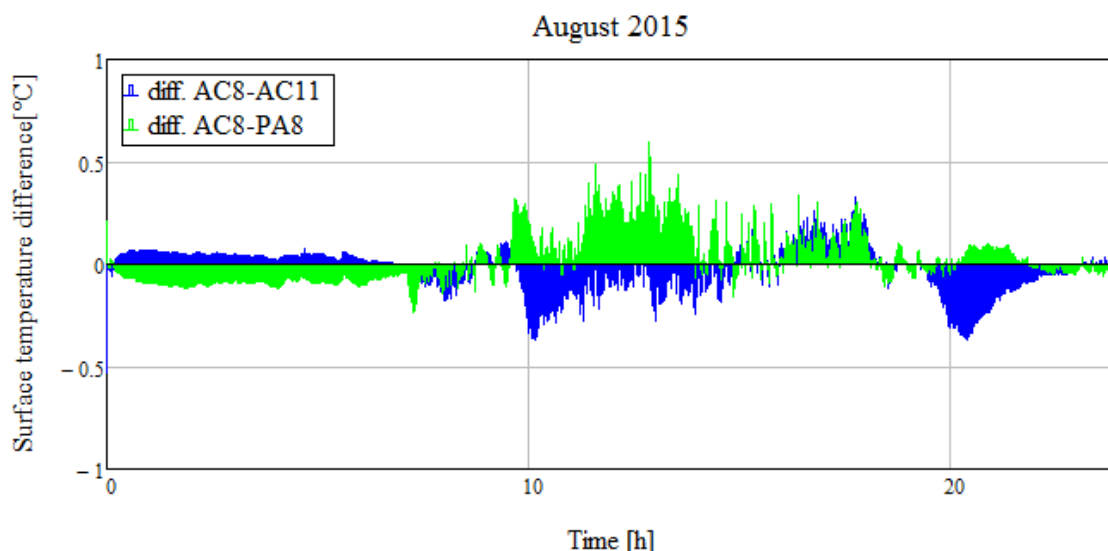
Na temelju provedenih analiza zaključuje se:

- (i) Za povećanje točnosti rješenja koeficijent konvektivnog prijenosa topline mora u sebi sadržavati sve utjecajne parametre što ukazuje na potrebu kalibracije koeficijenta

- (ii) Kalibraciju je potrebno provesti inverznim iterativnim postupkom
- (iii) Validaciju provesti usporedbom s mjerenim podacima

6.3.4. Toplinsko ponašanje materijala kolnika

Nakon utvrđivanja kalibriranog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline izvršena je provjera modela za različite vrste materijala. Izračunate temperature površina različitih tipova kolnika uspoređene su s mjerenim podacima te su izračunate temperaturne razlike. Na Slici 6.23 prikazane su temperaturne razlike asfaltbetona AC8 surf i AC11 surf te AC8 surf i PA8. Iz podataka je jasan jednak trend ponašanja u smislu površinskog zagrijavanja. Navedeno ukazuje da nema veće razlike u načinu ponašanju s obzirom na vrstu površinskog materijala što je rezultat boje površine kolnika odnosno jednake vrste upotrijebljenog bitumena (Slika 6.21).



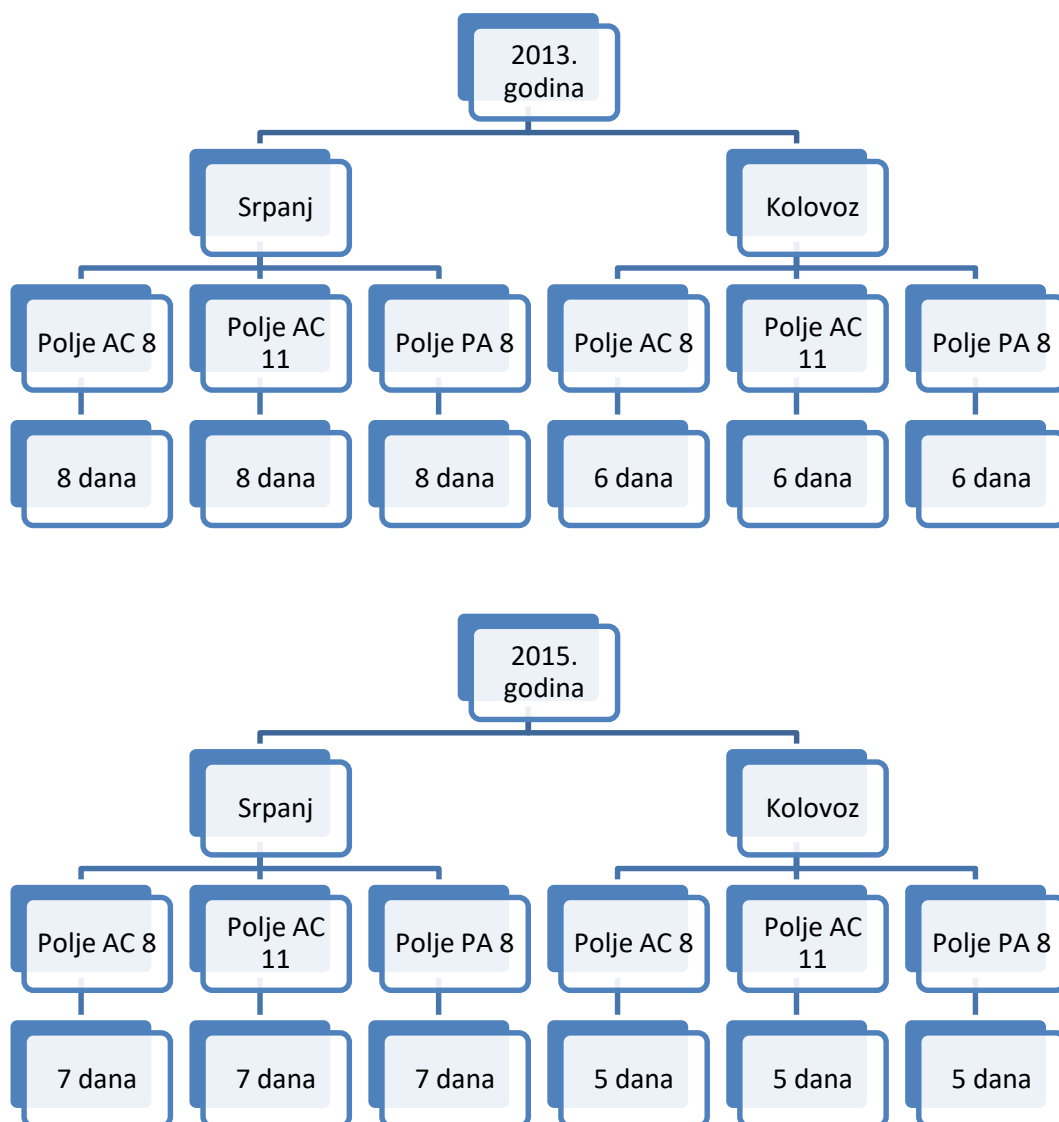
Slika 6.21: Prikaz rezultata temperaturnih razlika različitih tipova kolnika

6.4. Numerički primjeri

Numerički primjeri koriste nelinearni koeficijent konvektivnog prijenosa topline dobivenog kalibracijskim postupkom polazeći od relacije $h_c(\Delta T)$ iz Jednadžbe 6.14. Iz provedenih mjerenja odabrani su podaci koji zadovoljavaju sljedeće kriterije:

- (i) Mjerenja provedena u suhim uvjetima (3 dana koja prethode mjerenjima su bez oborina)
- (ii) Mjerenja provedena pri brzinama vjetra nižim od 5 m/s

Analiza rezultata provedena je prema sljedećoj shemi:

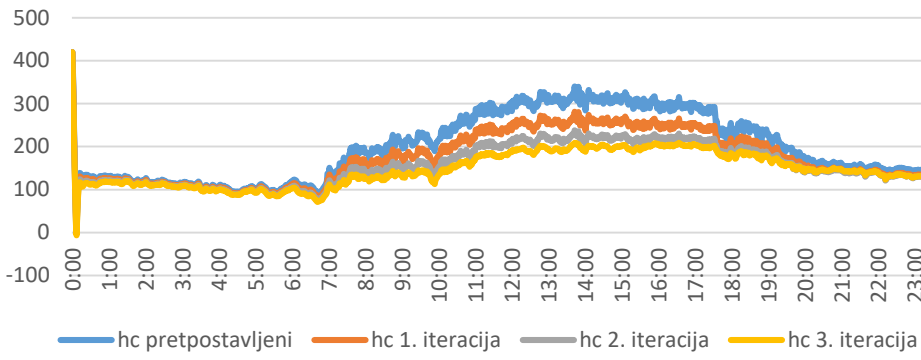
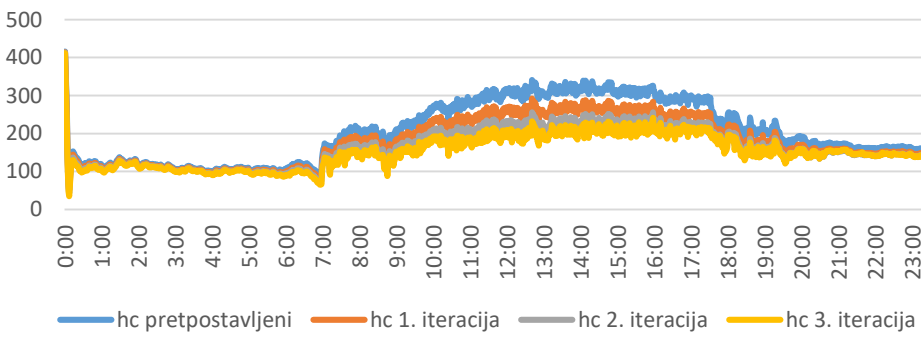
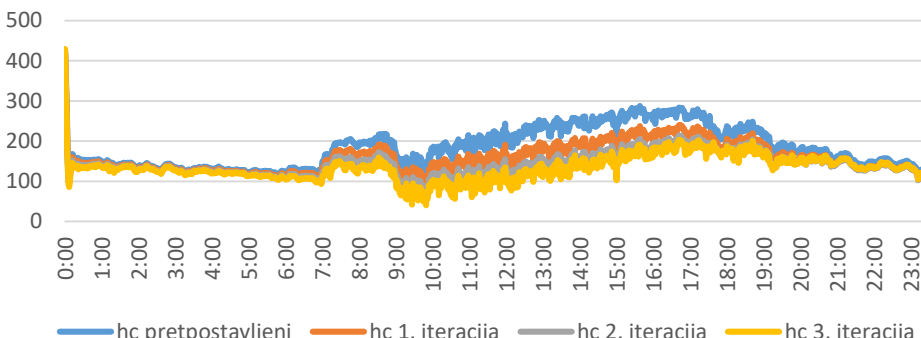


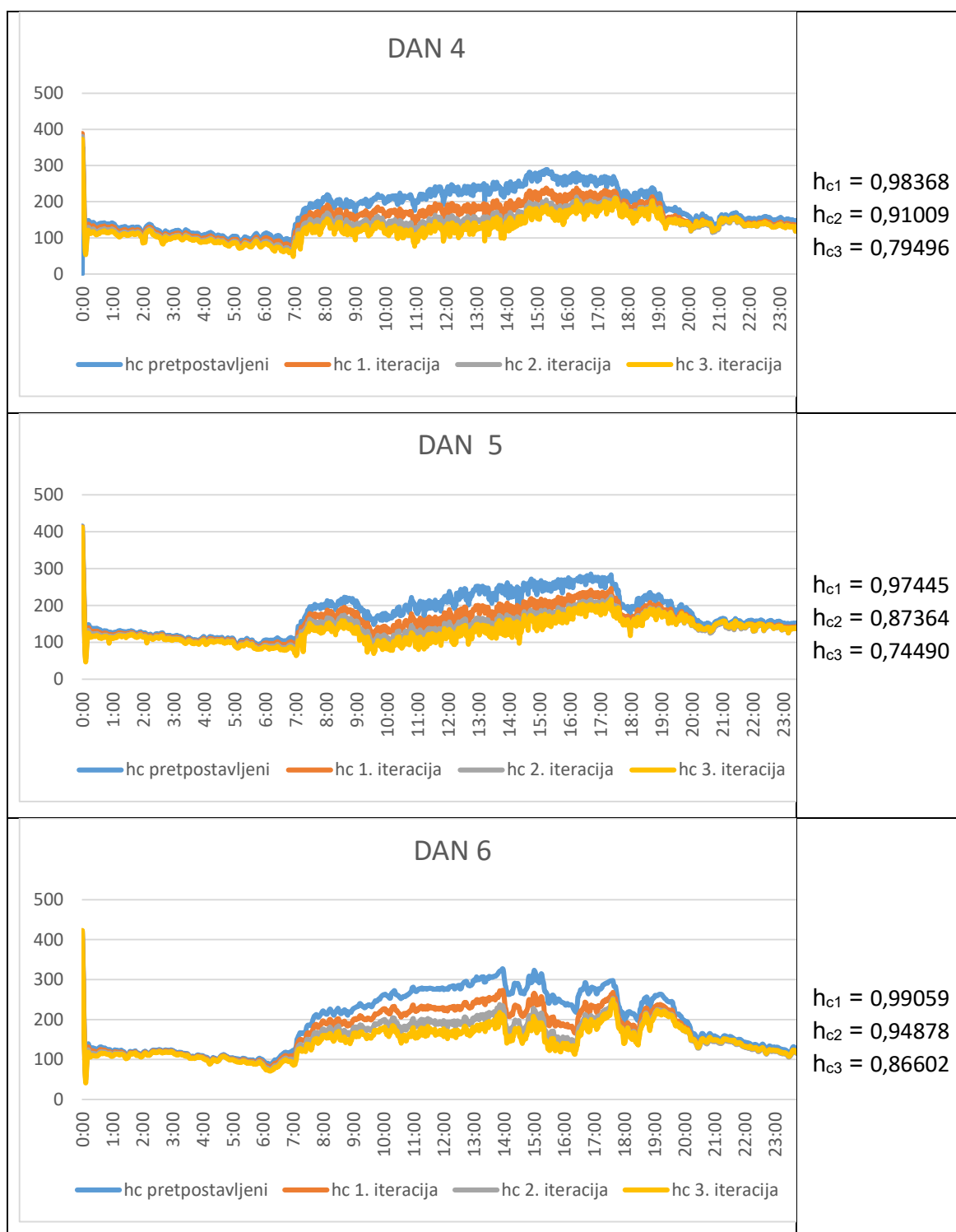
6.4.1. Mjerenja provedena u srpnju 2013. godine

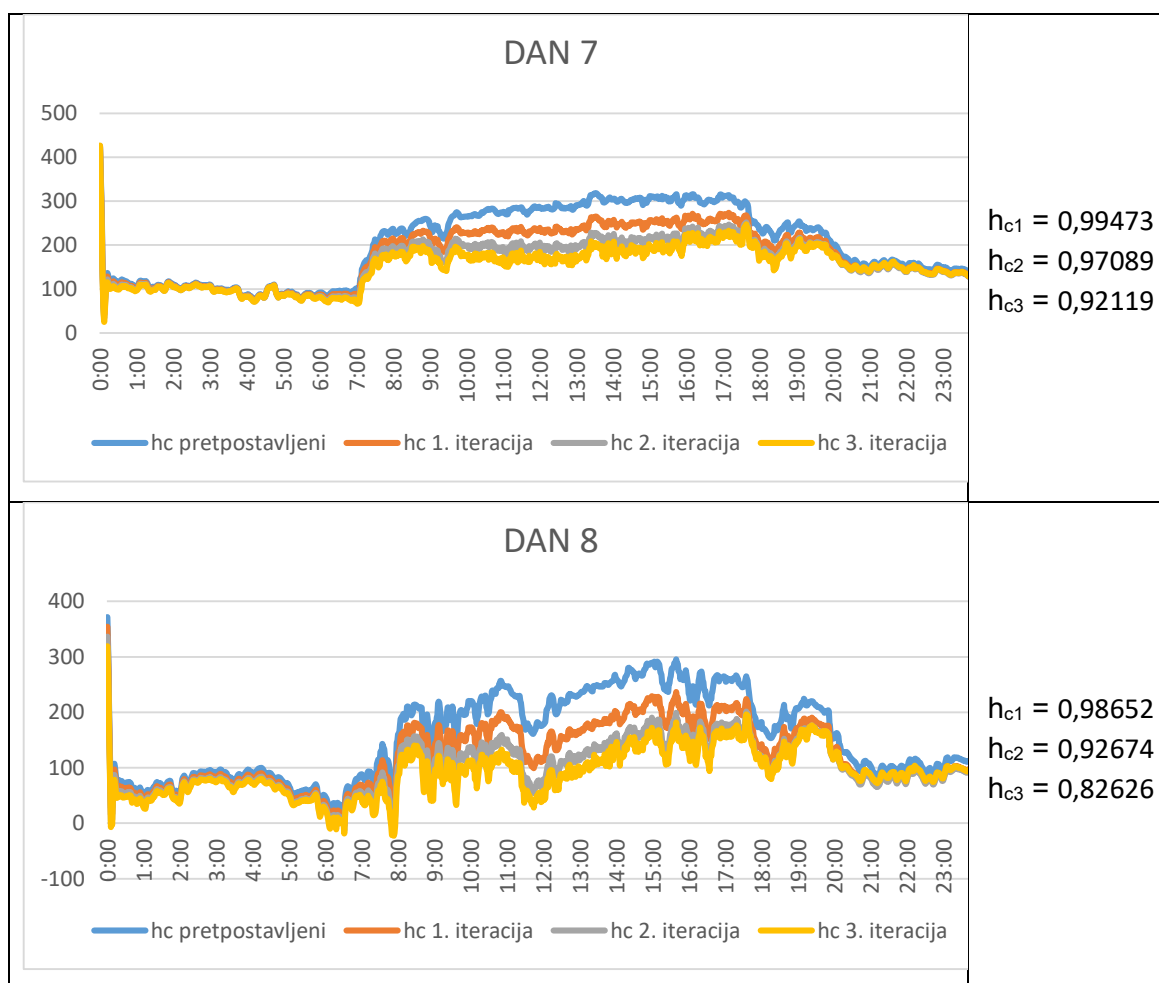
U Tablici 6.2, Tablici 6.4 i Tablici 6.6 prikazan je iterativni postupak kalibracije koeficijenta konvektivnog prijenosa topline za mjesec srpanj 2013 godine za polje AC 8 surf, AC 11 surf i PA 8 surf. Iz grafova je vidljiva promjena koeficijenta konvektivnog prijenosa topline svakom iteracijom što je prikazano koeficijentima korelacije za svaki iterativni korak. Smanjenje koeficijenta korelacije pojavljuje se u svim provedenim analizama, a rezultat je odstupanja vrijednosti izračunatog koeficijenta u pojedinoj iteraciji od početne vrijednosti dobivene izračunom prema Jednadžbi 6.13. Navedeno smanjenje koeficijenta korelacije je očekivano i

potvrđuje potrebu kalibracije koeficijenta konvektivnog prijenosa topline za specifične lokalne uvjete.

Tablica 6-2: Prikaz kalibracije nelinearnog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline iterativnim postupkom za polje AC8 surf

GRAFIČKI PRIKAZ – KOEFICIJENTI AC 8 surf, SRPANJ 2013. godina	KORELACIJA
DAN 1  $h_{c1} = 0,99745$ $h_{c2} = 0,98322$ $h_{c3} = 0,94429$	
DAN 2  $h_{c1} = 0,99756$ $h_{c2} = 0,98682$ $h_{c3} = 0,96016$	
DAN 3  $h_{c1} = 0,95556$ $h_{c2} = 0,79069$ $h_{c3} = 0,61561$	

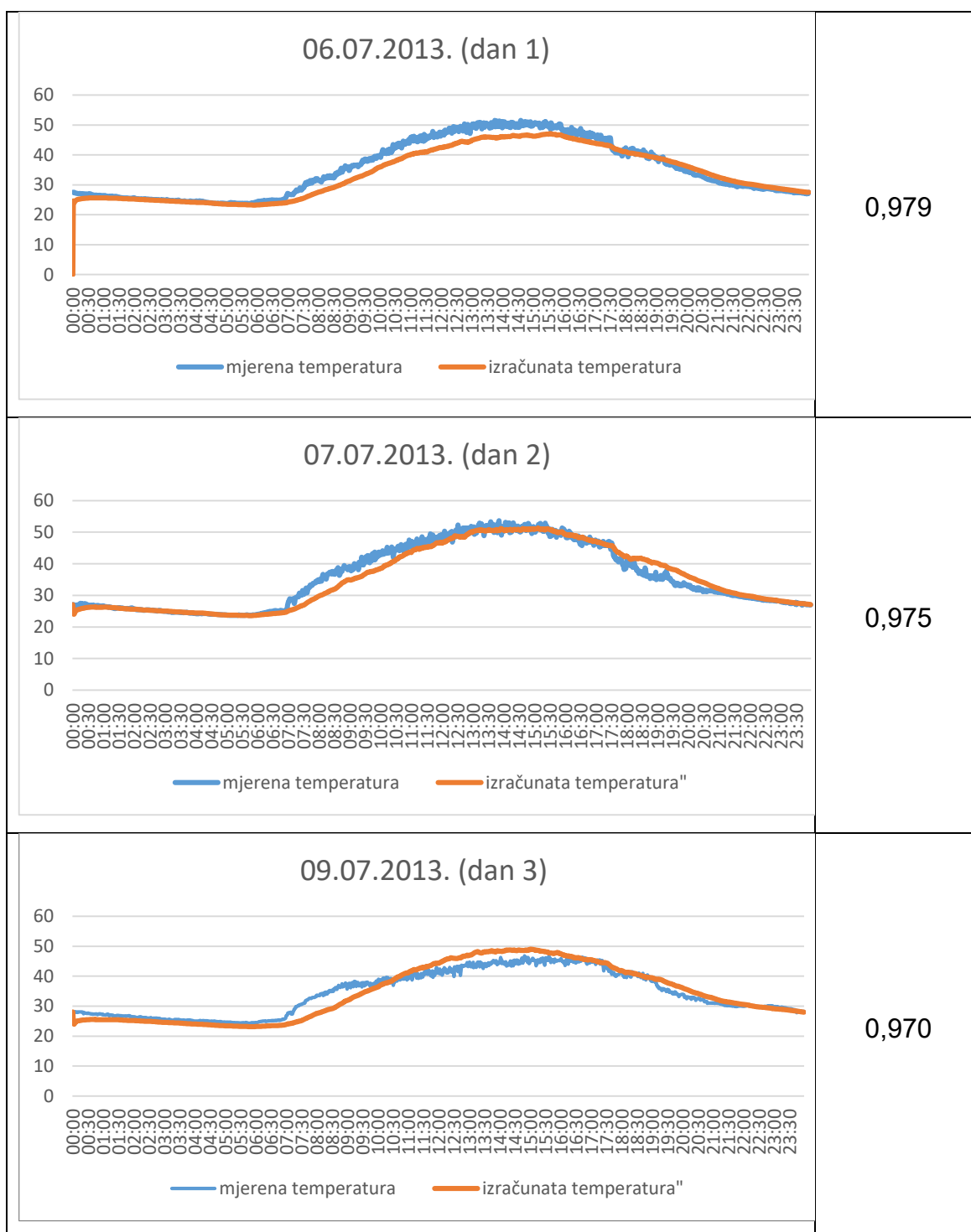


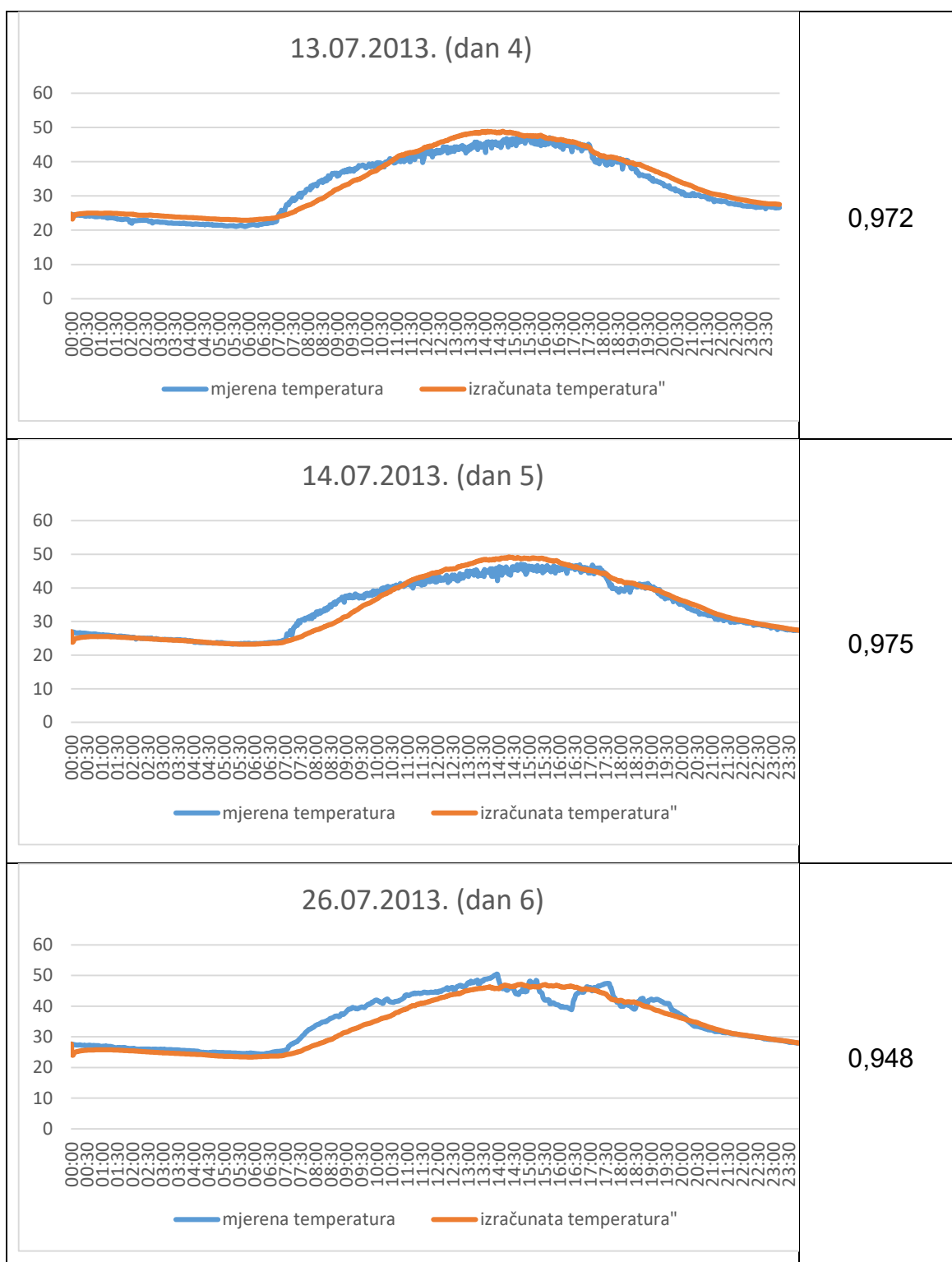


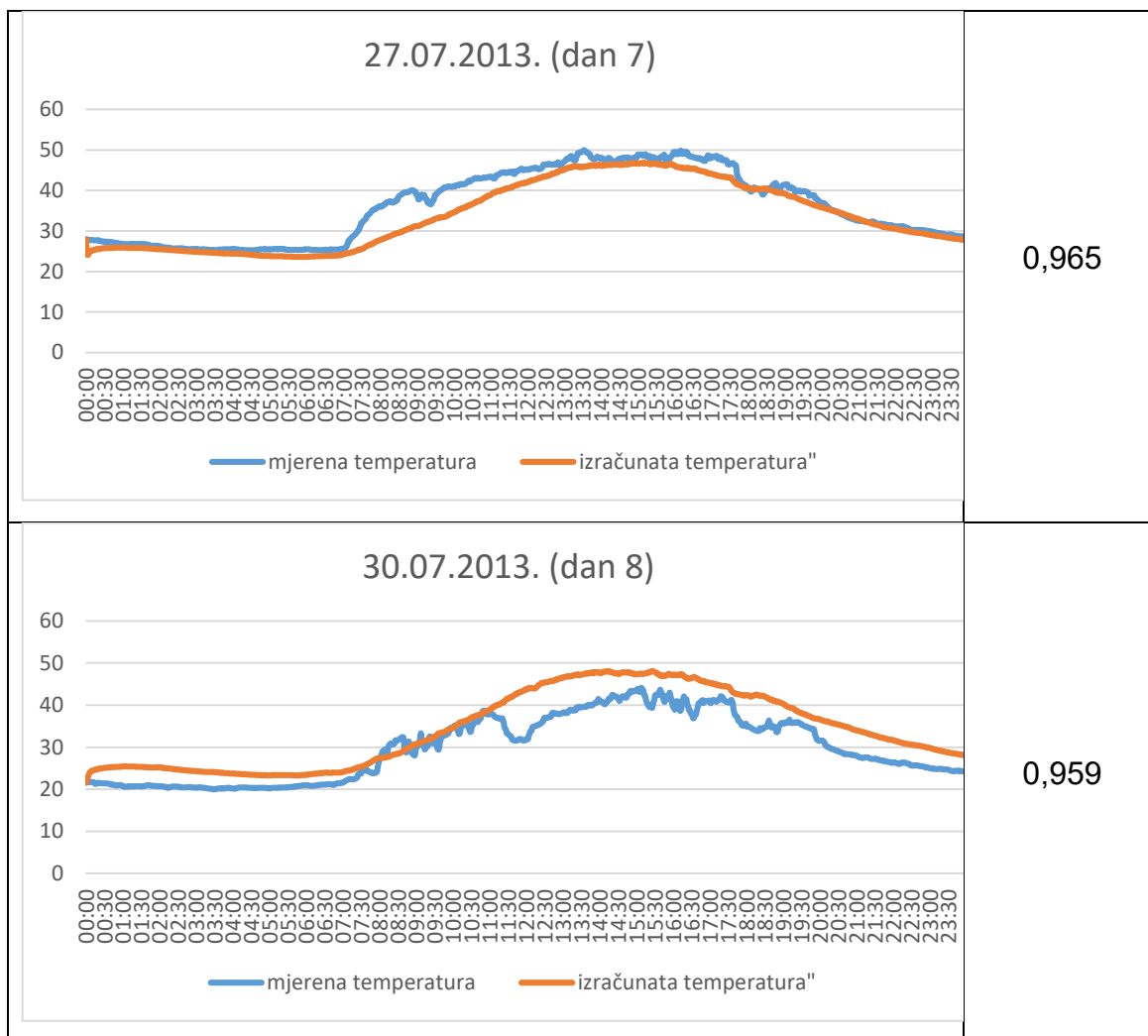
U Tablici 6.3, Tablici 6.5 i Tablici 6.7 prikazani su grafovi mjerene i izračunate temperature sa uključenim kalibriranim koeficijentima konvektivnog prijenosa topline u 3. iteraciji prikazanim u Tablici 6.2, Tablici 6.4 i Tablici 6.6. Iz prikaza dnevnog kretanja temperature te usporedbom izračunatih vrijednosti temperatura površine s mjerenim podacima vidljivo je da izrađeni model slijedi zadovoljavajući izračun temperature što je opisano koeficijentima korelacije prikazanim u tablicama.

Tablica 6-3: *Prikaz izračunatih i mjerenih temperatura površine kolnika uz primjenu nelinearnog kalibriranog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline za polje AC 8 surf*

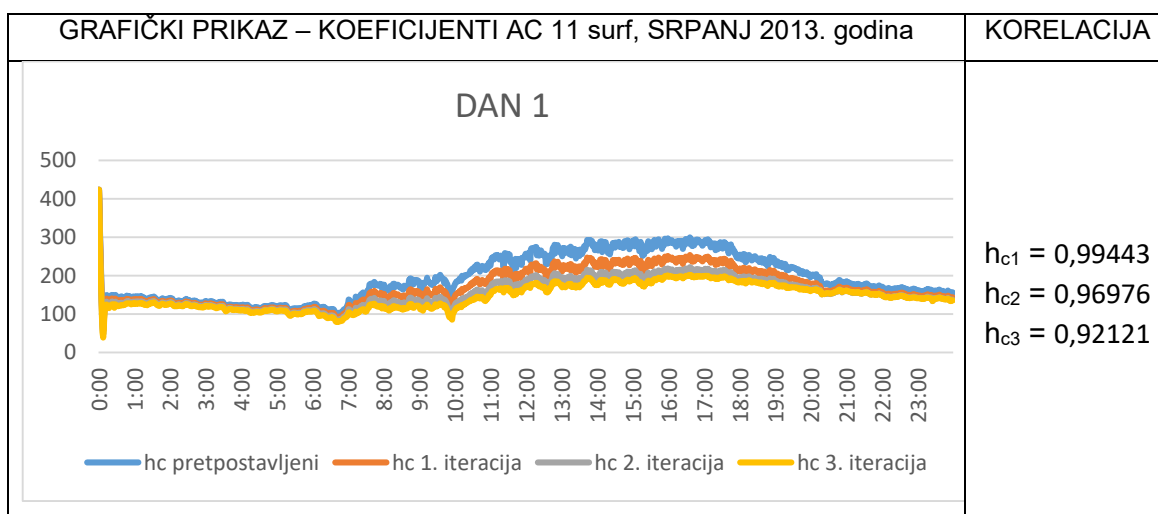
GRAFIČKI PRIKAZ – TEMPERATURE AC 8 surf, SRPANJ 2013. godina	KORELACIJA
--	------------

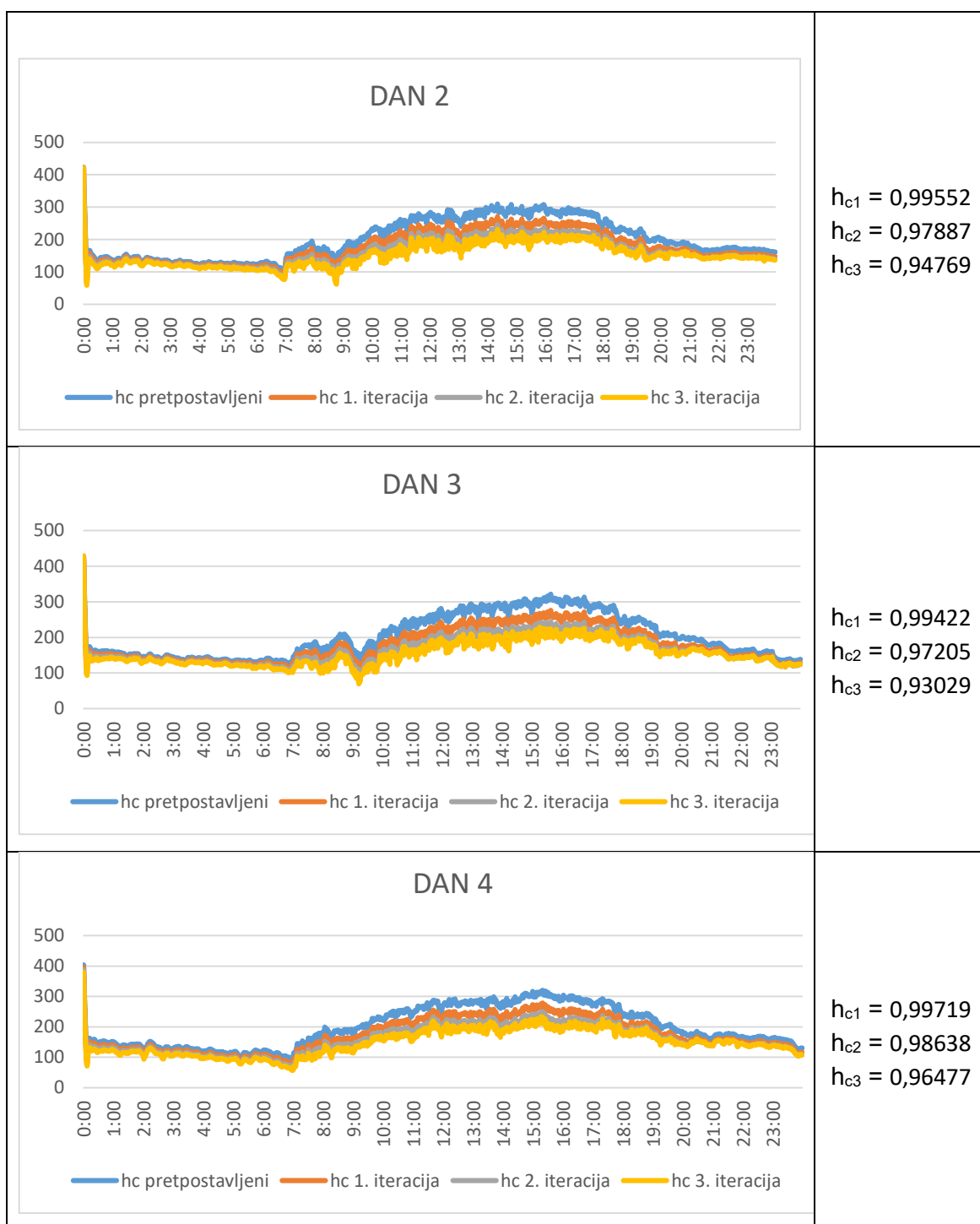


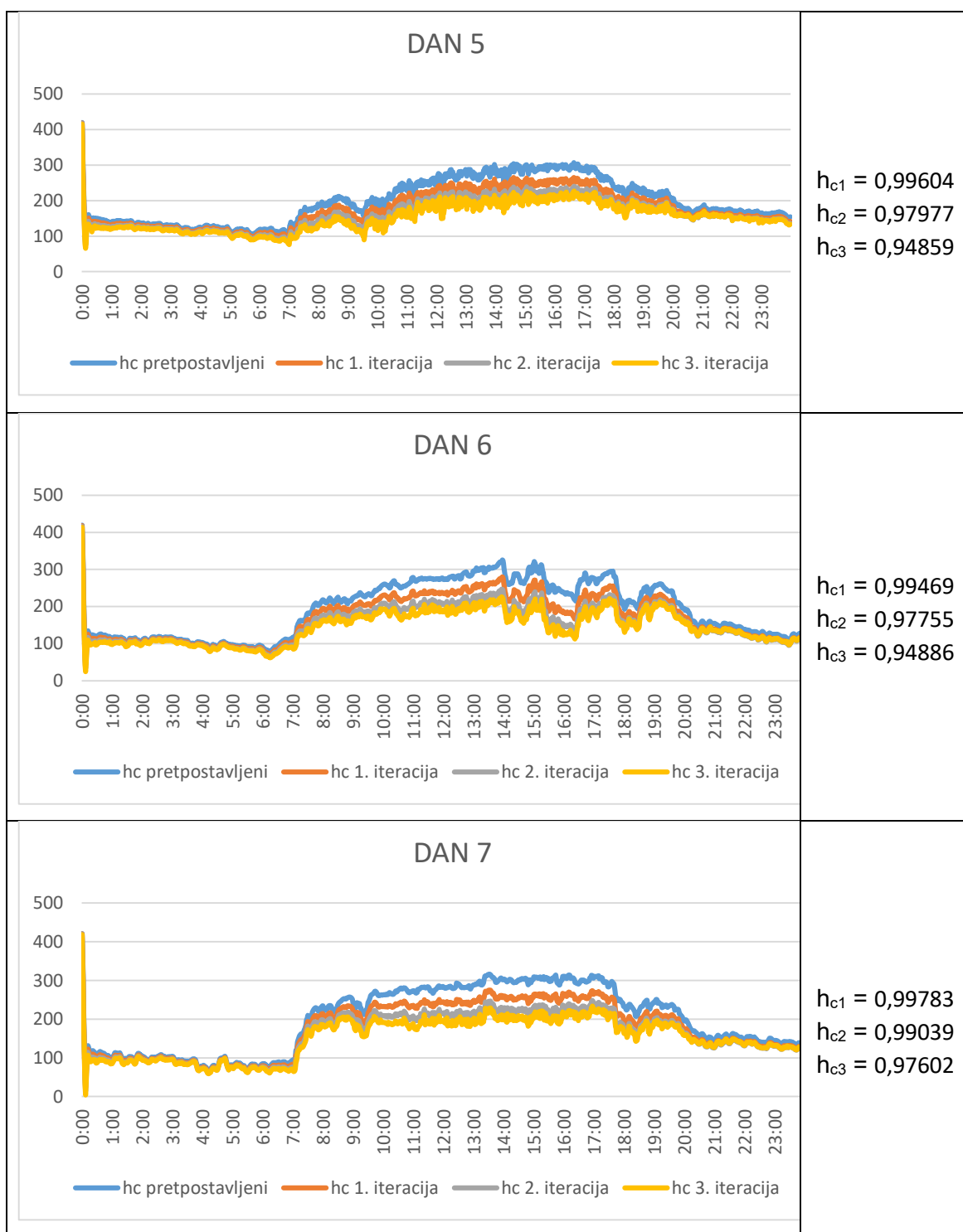


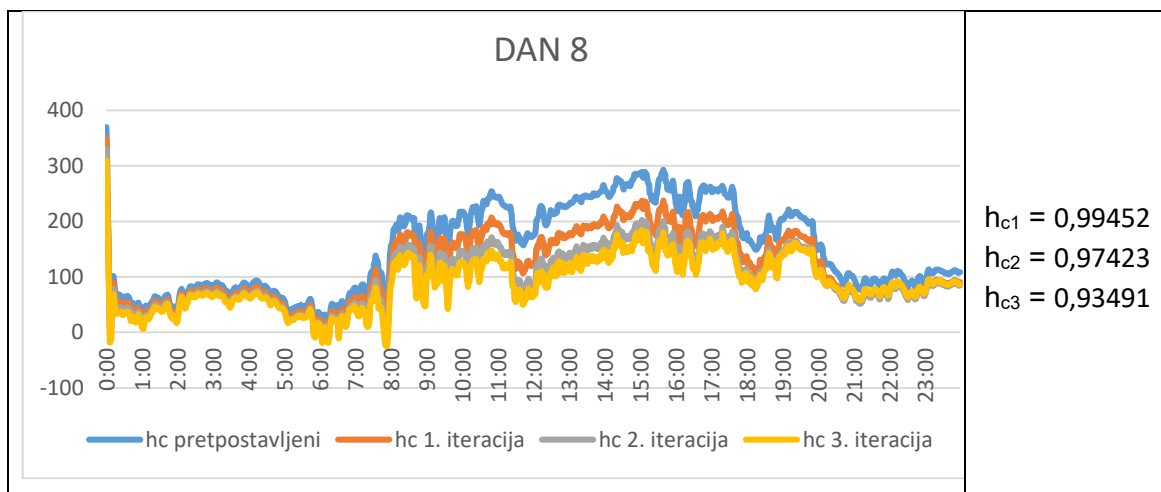


Tablica 6-4: Prikaz kalibracije nelinearnog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline iterativnim postupkom za polje AC 11 surf

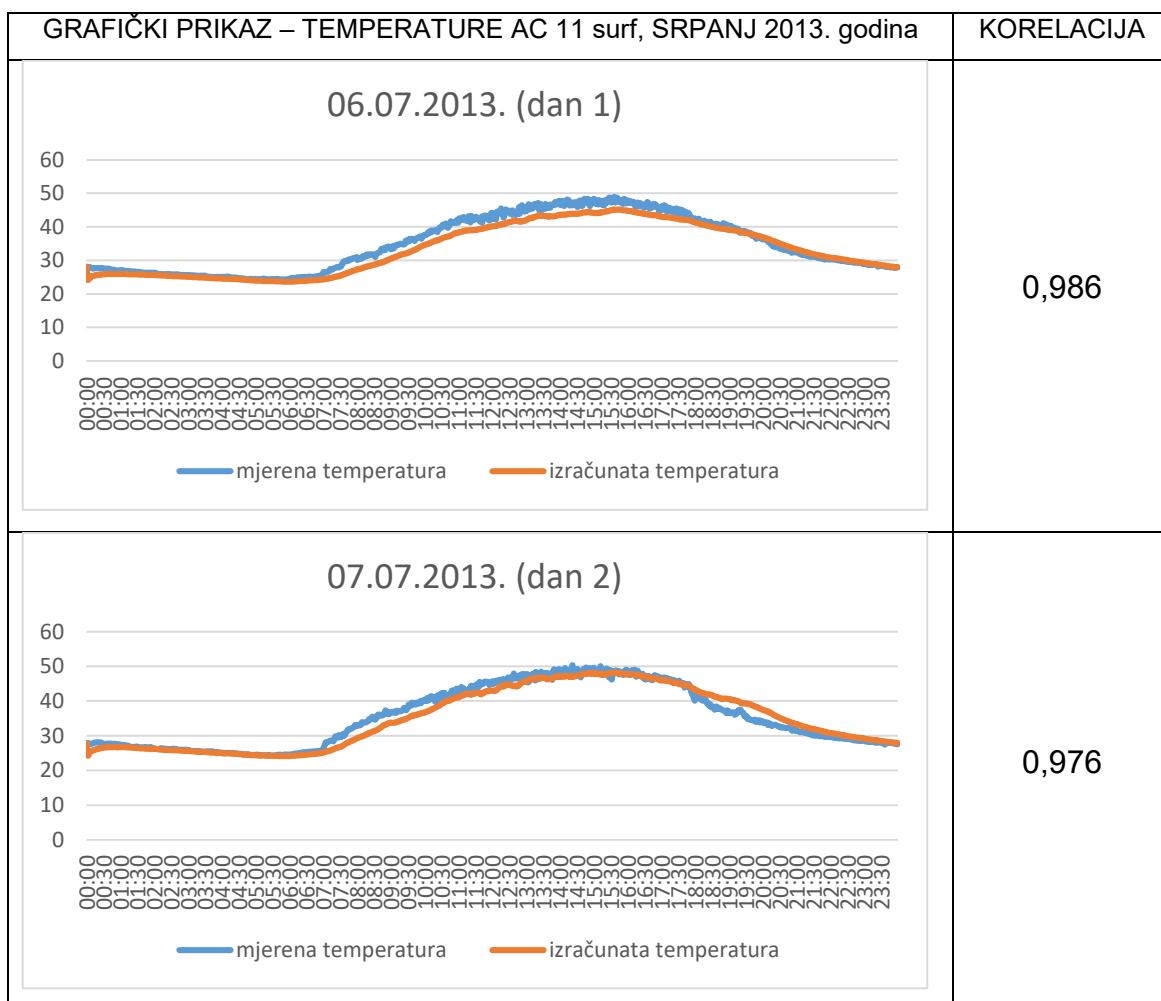


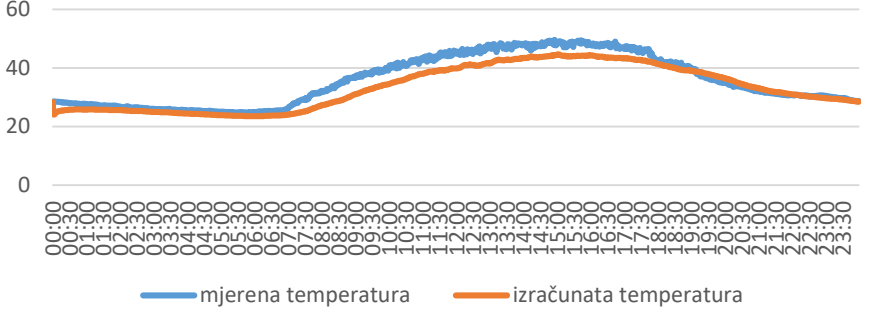
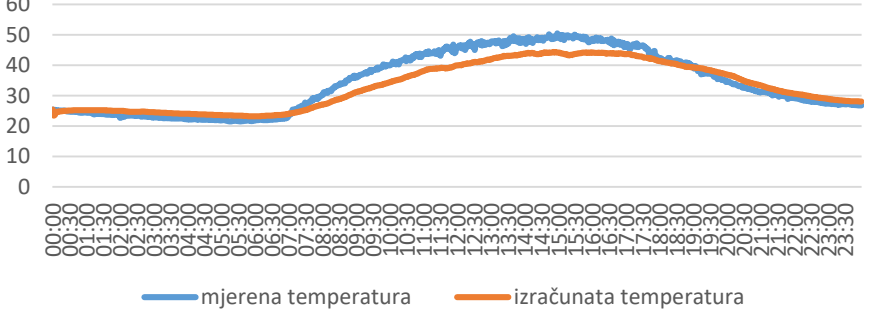
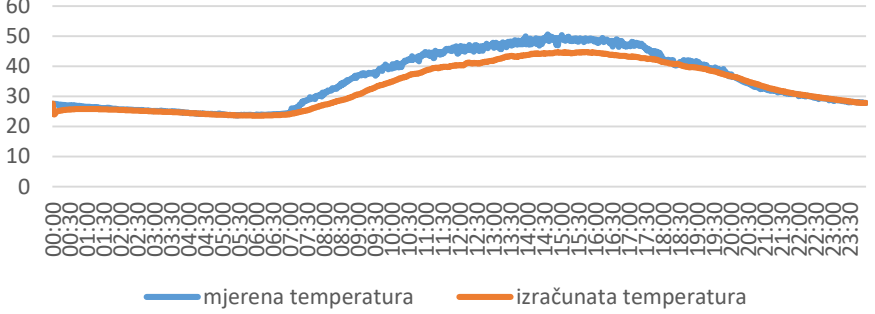
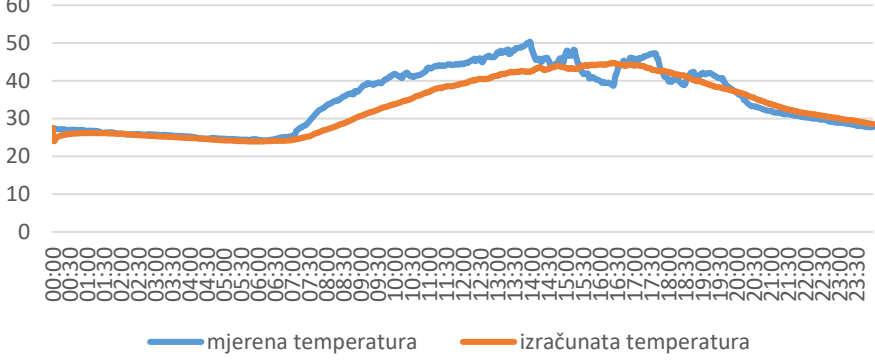


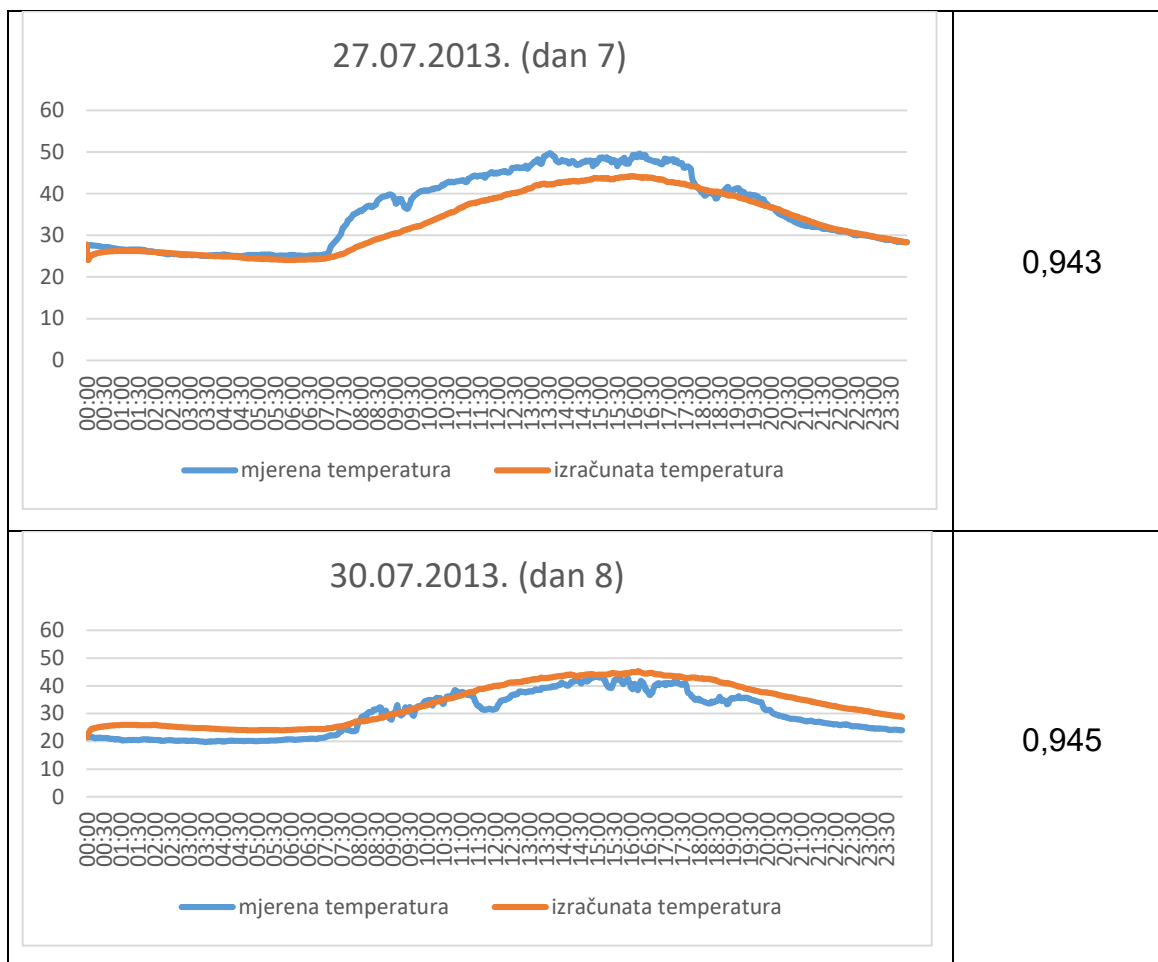




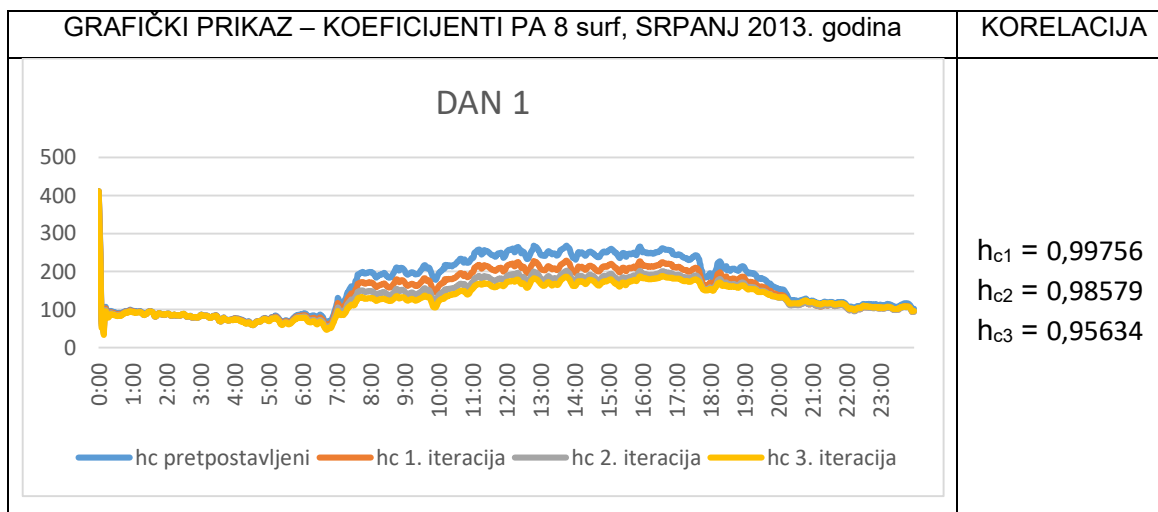
Tablica 6-5: Prikaz izračunatih i mjerenih temperatura površine kolnika uz primjenu nelinearnog kalibriranog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline za polje AC 11 surf

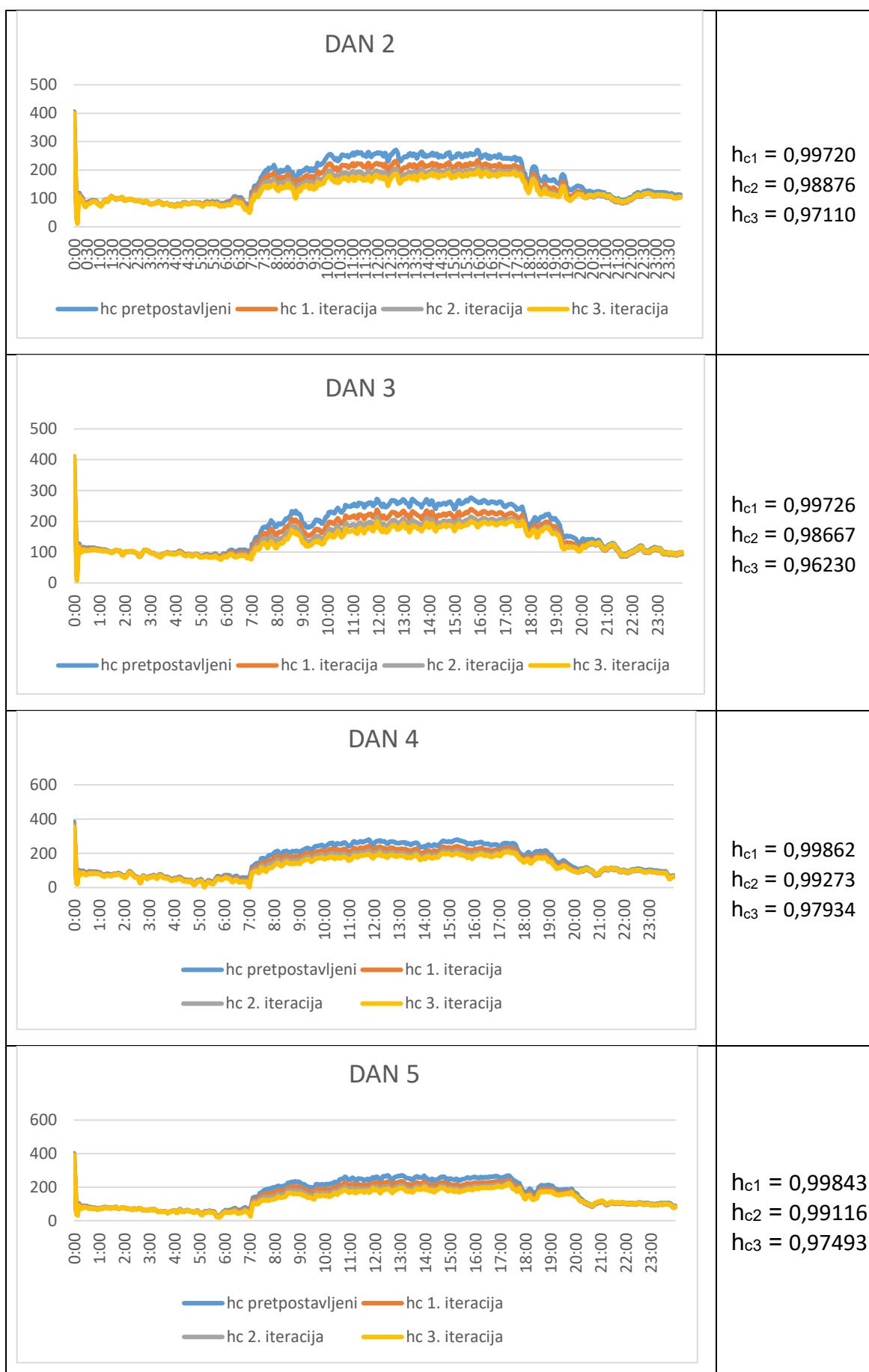


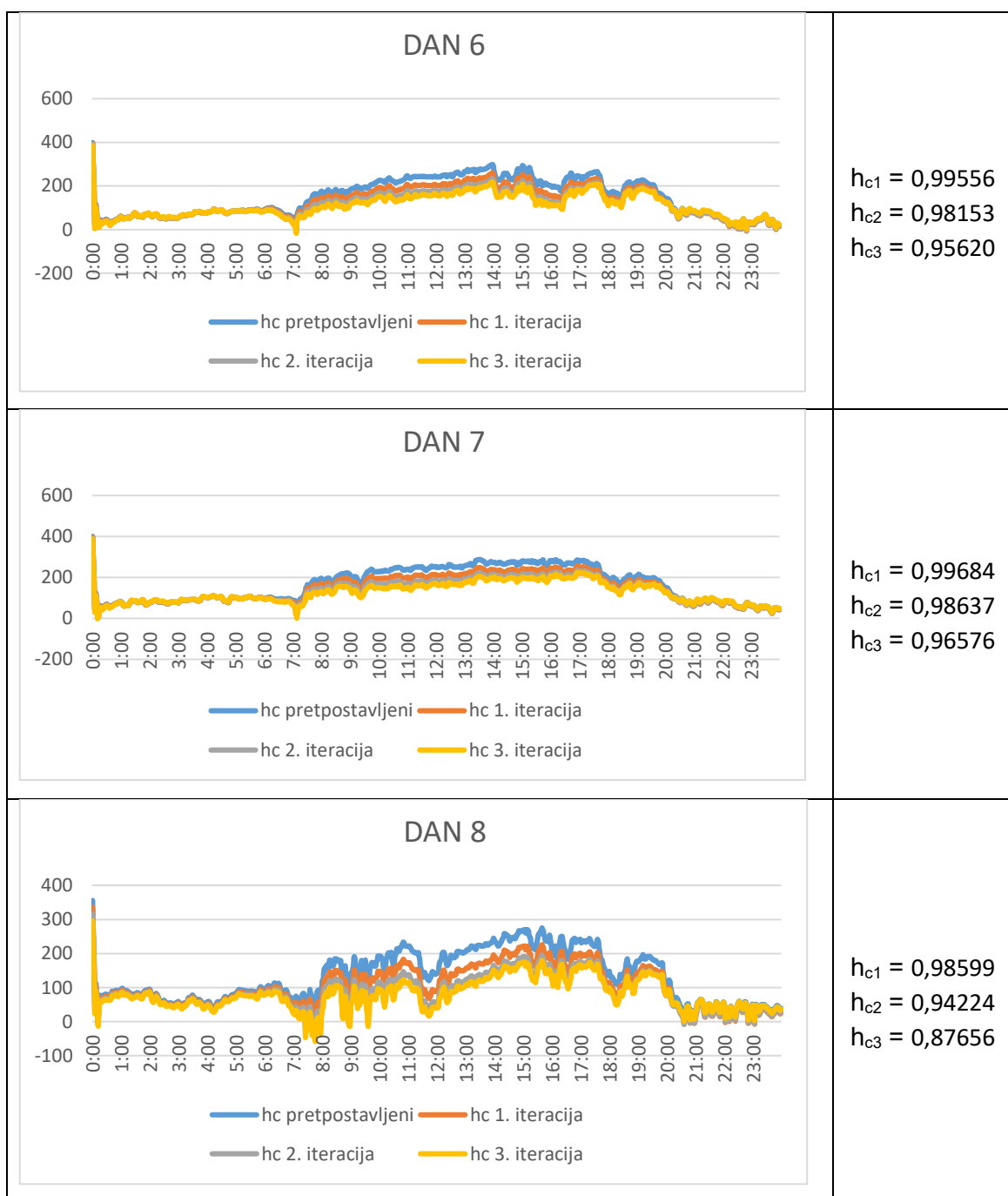
09.07.2013. (dan 3)  — mjerena temperatura — izračunata temperatura	0,970
13.07.2013. (dan 4)  — mjerena temperatura — izračunata temperatura	0,971
14.07.2013. (dan 5)  — mjerena temperatura — izračunata temperatura	0,980
26.07.2013. (dan 6)  — mjerena temperatura — izračunata temperatura	0,924



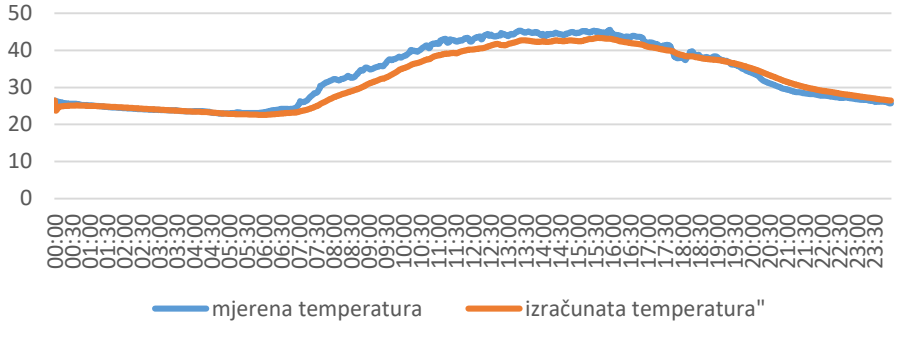
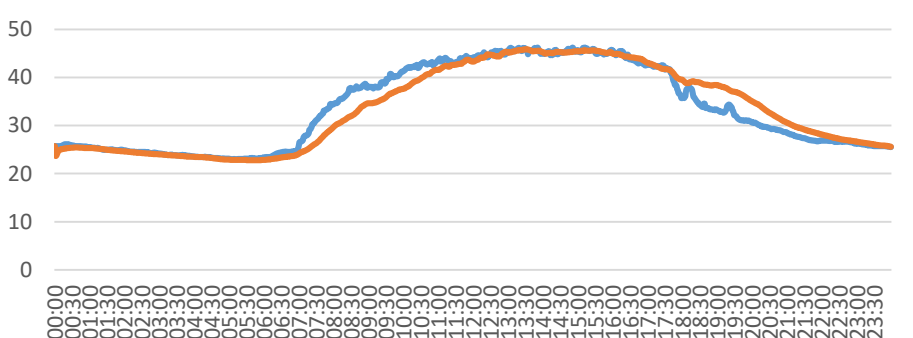
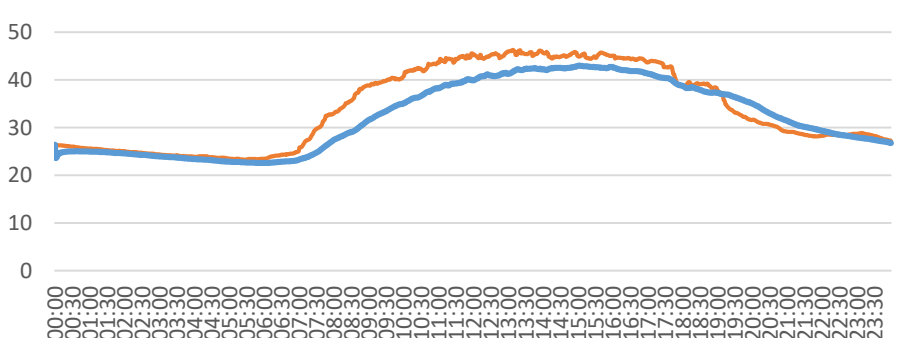
Tablica 6-6: Prikaz kalibracije nelinearnog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline iterativnim postupkom za polje PA 8 surf

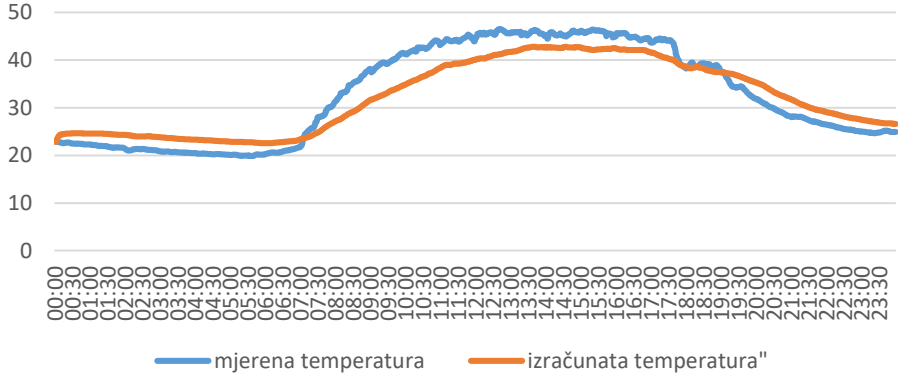
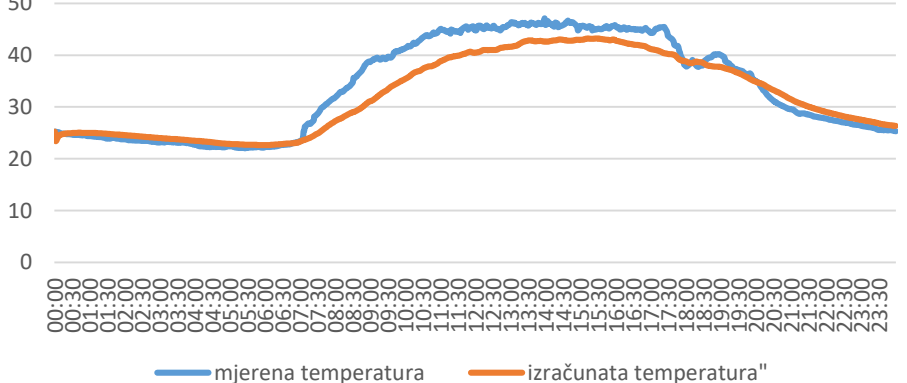
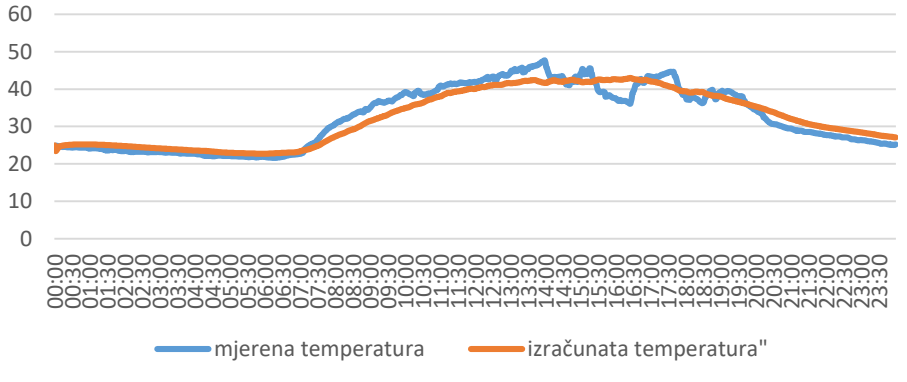


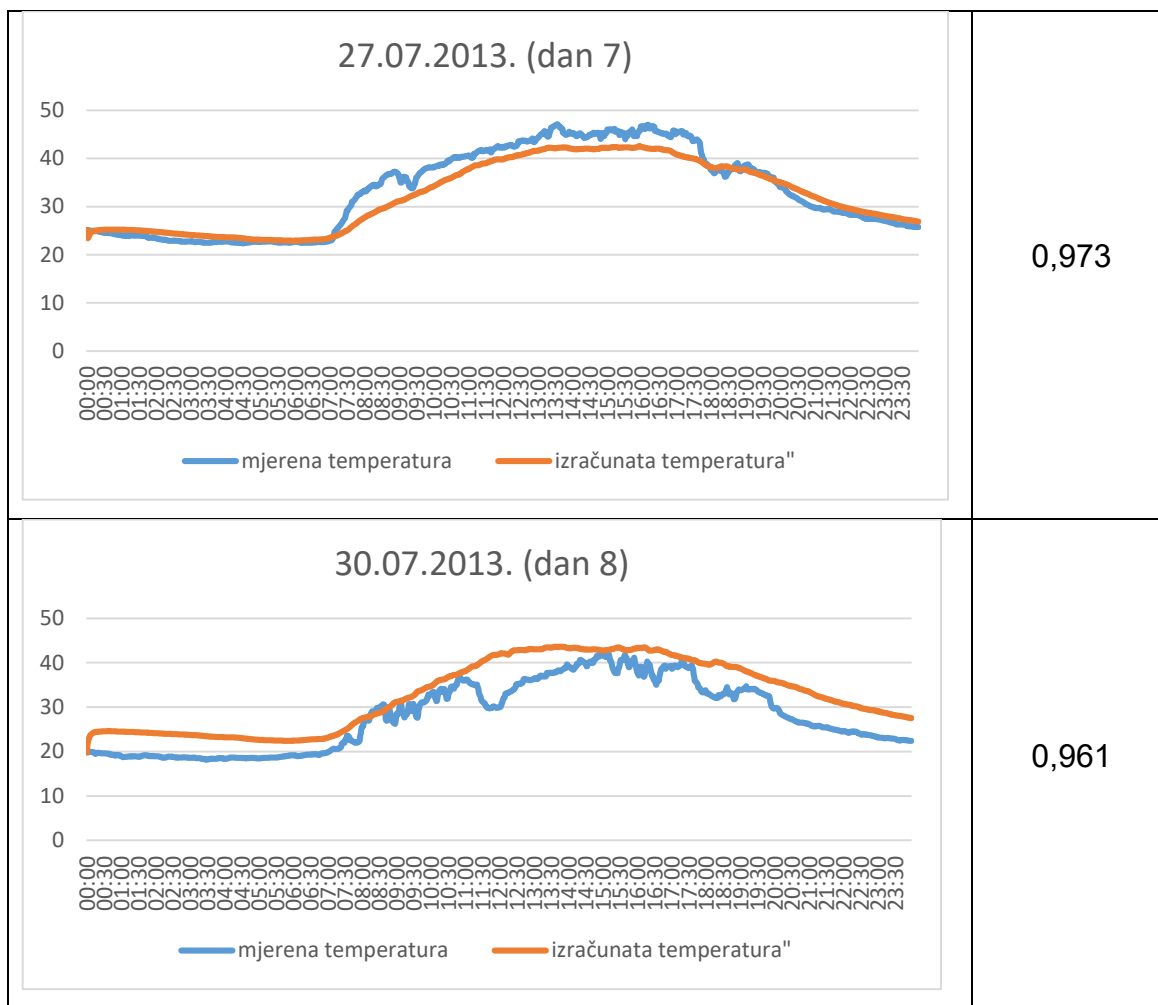




Tablica 6-7: Prikaz izračunatih i mjerenih temperatura površine kolnika uz primjenu nelinearnog kalibriranog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline za polje PA 8 surf

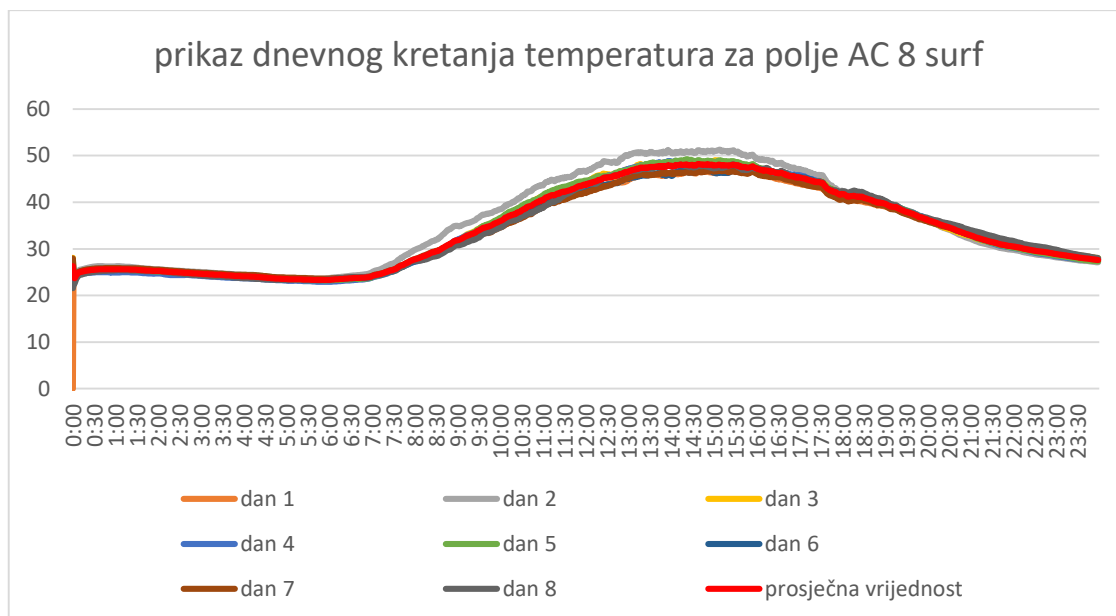
GRAFIČKI PRIKAZ – TEMPERATURE PA 8 surf, SRPANJ 2013. godina	KORELACIJA
06.07.2013. (dan 1)  — mjerena temperatura — izračunata temperatura"	0,978
07.07.2013. (dan 2)  — mjerena temperatura — izračunata temperatura"	0,966
09.07.2013. (dan 3)  — mjerena temperatura — izračunata temperatura"	0,956

13.07.2013. (dan 4)  — mjerena temperatura — izračunata temperatura"	0,964
14.07.2013. (dan 5)  — mjerena temperatura — izračunata temperatura"	0,970
26.07.2013. (dan 6)  — mjerena temperatura — izračunata temperatura"	0,961

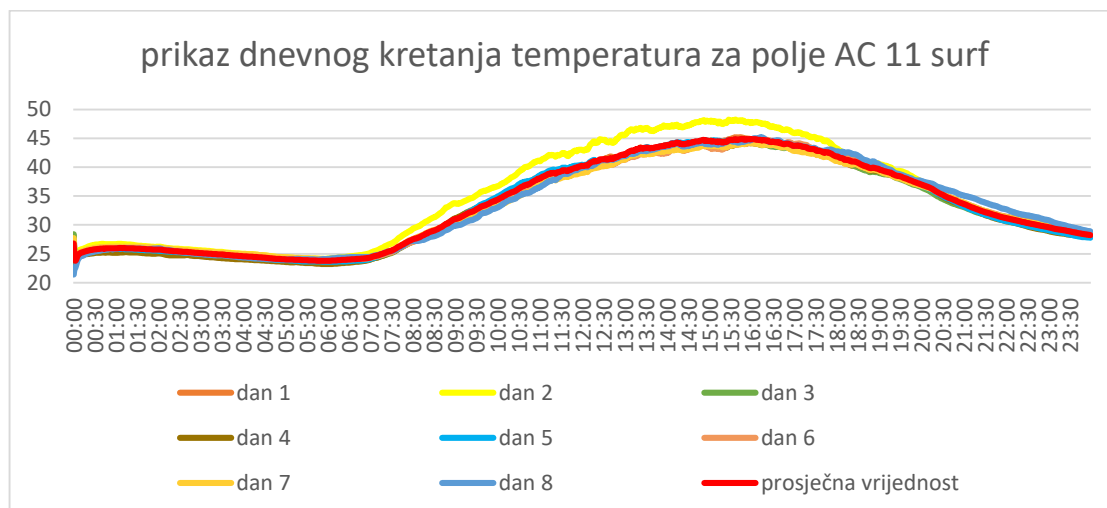


Na Slici 6.24, Slici 6.25 i Slici 6.26 prikazano je dnevno kretanje izračunatih temperatura površina kolnika (dan 1 – dan 8) za polje AC 8 surf, AC 11 surf i PA 8 surf u odnosu na krivulju prosječnih vrijednosti temperature (označena crvenom bojom). Iz rezultata je vidljivo da nema većeg odstupanja izračunatih temperatura od prosječnih vrijednosti što je računski pokazano izračunom statističkih parametara. Izračun statističkih parametara (standardne devijacije i varijance napravljen je za svaki presjek mjerenih podataka (1440 točaka), a rezultati su prikazani za presjek u kritičnim točkama (vrijeme) koje su utvrđene u poglavlju 6.3.1.:

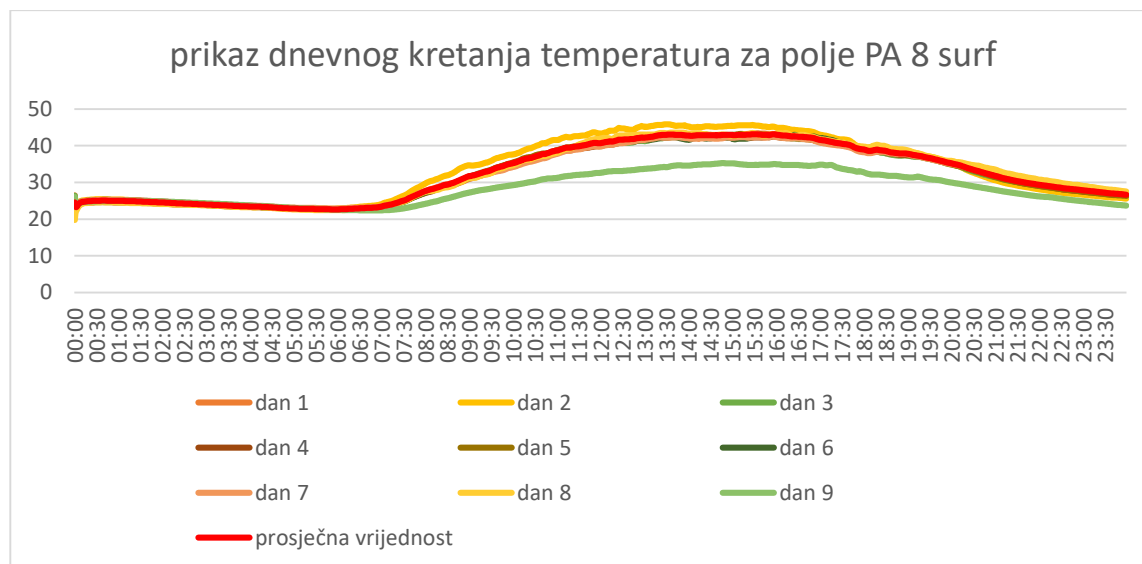
- (i) 5:50 – minimalne temperature površine kolnika
- (ii) 15:00 maksimalne temperature zraka
- (iii) 15:45 – maksimalne temperature površina kolnika



Slika 6.22: Prikaz dnevnog kretanja temperatura u odnosu na krivulju prosječne temperature za srpanj 2013. godine i polje AC 8 surf



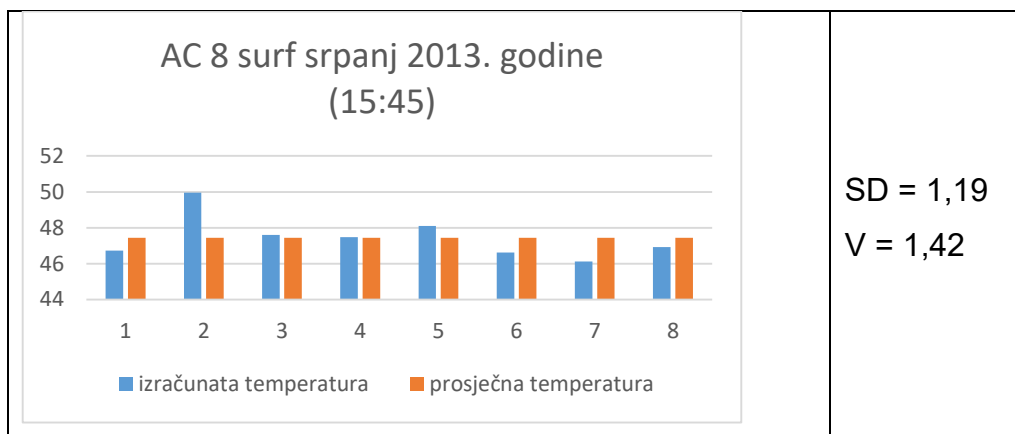
Slika 6.23: Prikaz dnevnog kretanja temperatura u odnosu na krivulju prosječne temperature za srpanj 2013. godine i polje AC 11 surf



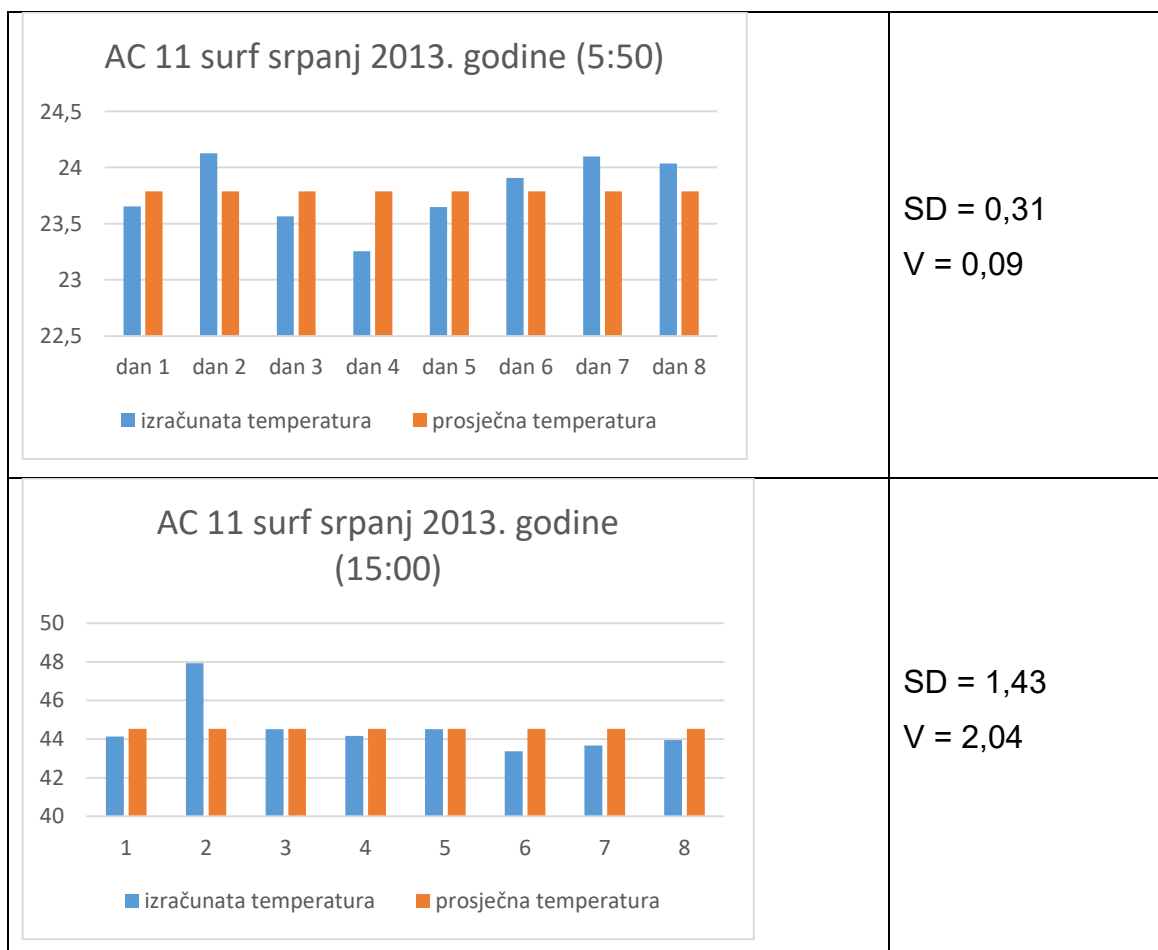
Slika 6.24: Prikaz dnevnog kretanja temperatura u odnosu na krivulju prosječne temperature za srpanj 2013. godine i polje PA 8 surf

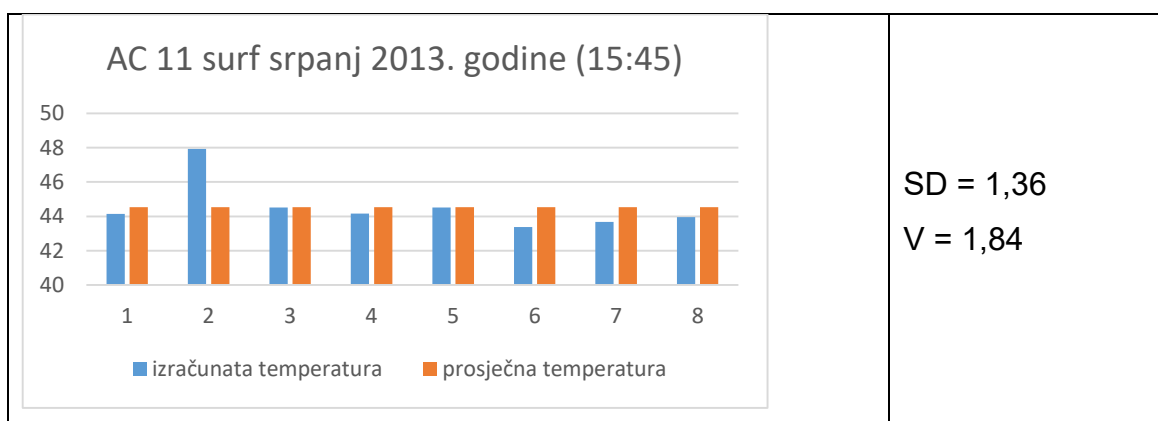
Tablica 6-8: Prikaz odstupanja izračunatih temperatura površine kolnika od prosječnih vrijednosti temperatura za kritične točke (polje AC 8 surf)

AC 8 surf, srpanj 2013. godine (5:50) dan 1 dan 2 dan 3 dan 4 dan 5 dan 6 dan 7 dan 8 izračunata temperatura prosječna temperatura	SD = 0,23 V = 0,05
AC 8 surf, srpanj 2013. godine (15:00) dan 1 dan 2 dan 3 dan 4 dan 5 dan 6 dan 7 dan 8 izračunata temperatura prosječna temperatura	SD = 1,61 V = 2,6

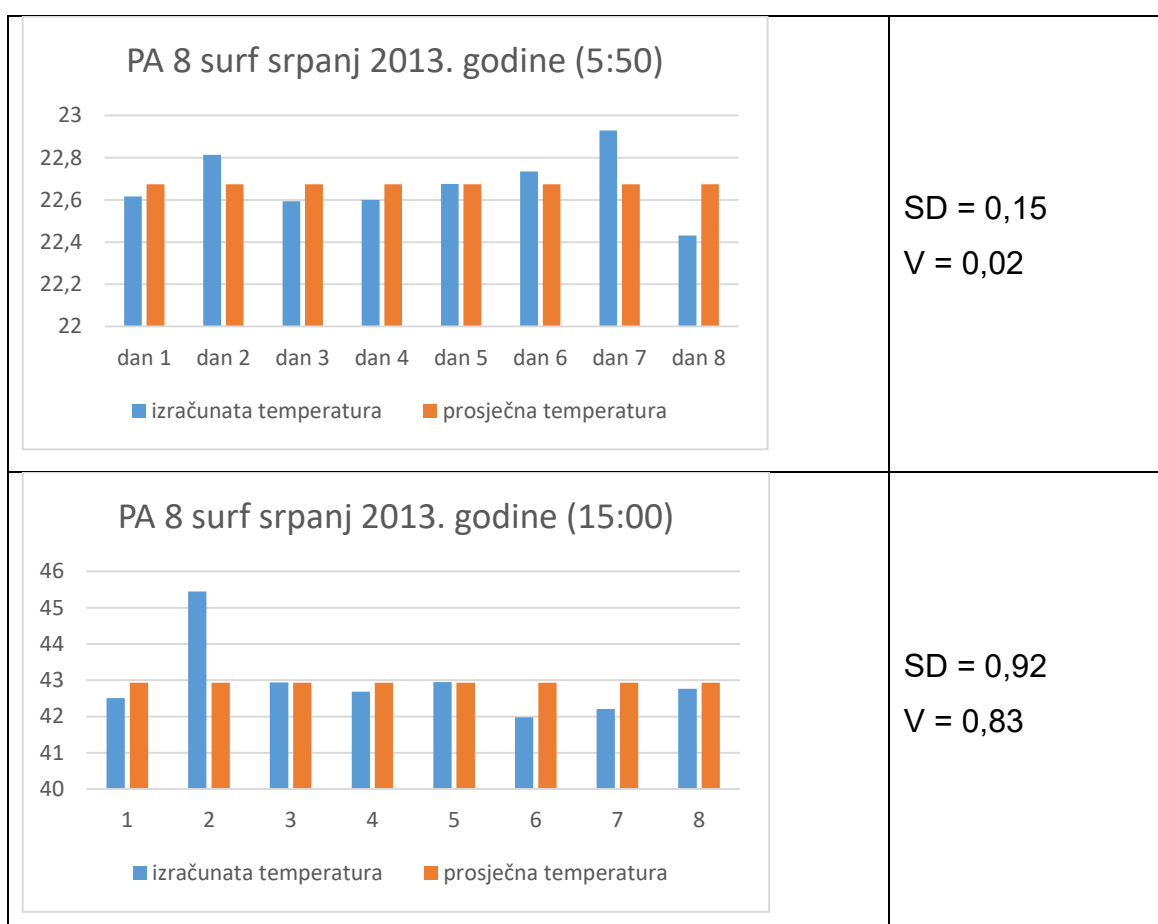


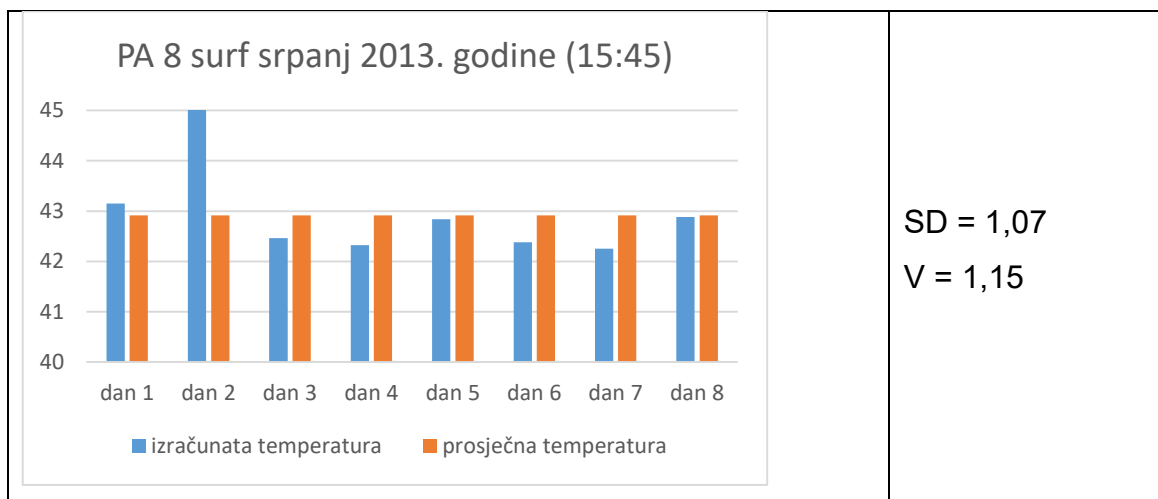
Tablica 6-9: Prikaz odstupanja izračunatih temperatura površine kolnika od prosječnih vrijednosti temperatura za kritične točke (polje AC 11 surf)



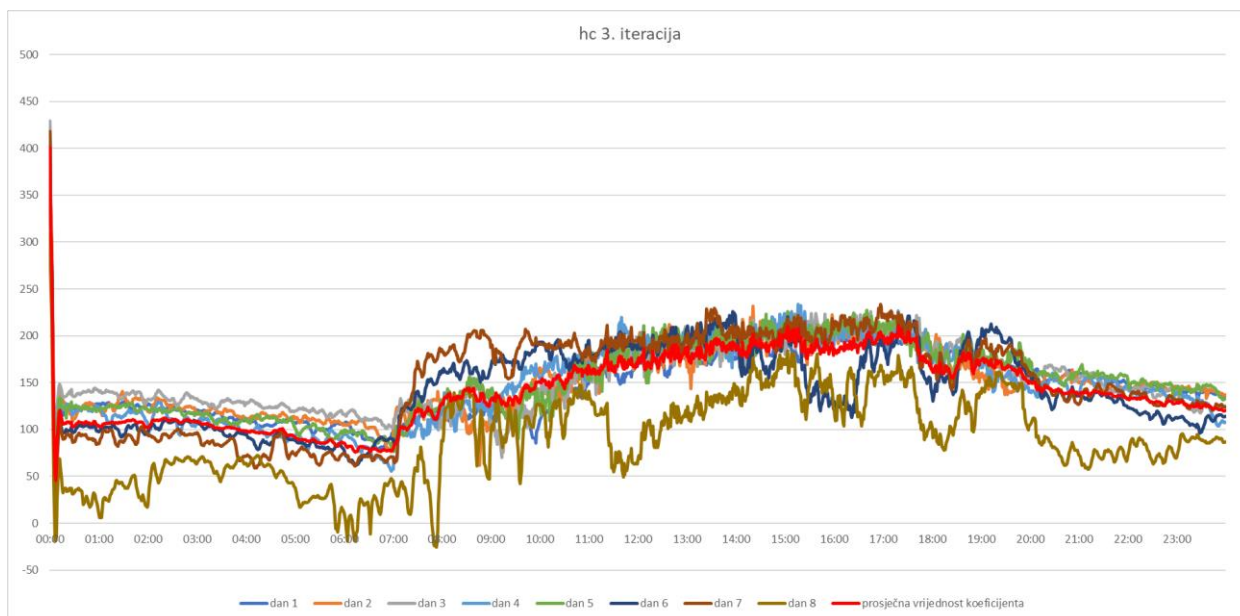


Tablica 6-10: Prikaz odstupanja izračunatih temperatura površine kolnika od prosječnih vrijednosti temperatura za kritične točke (polje PA 8 surf)



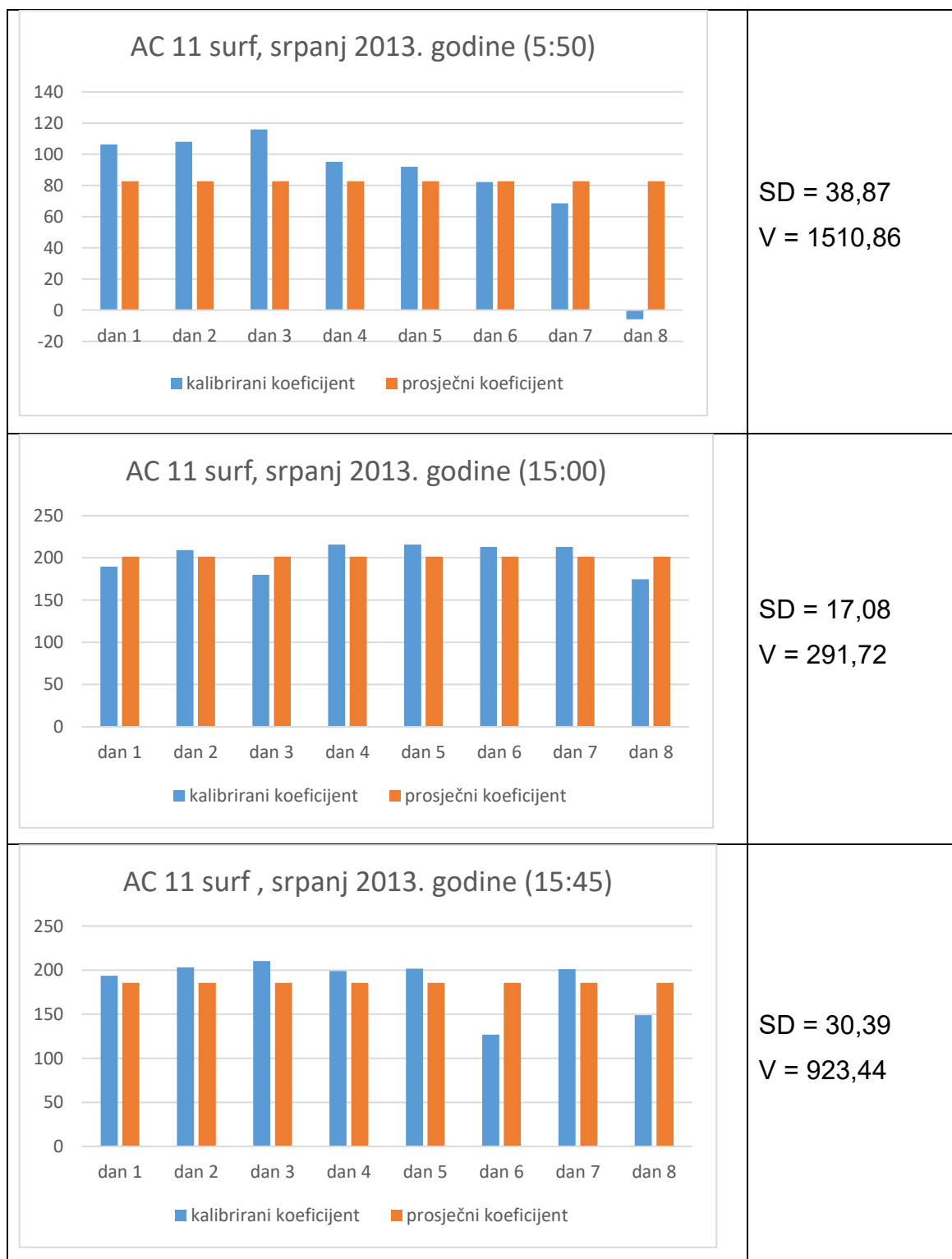


Na Slici 6.27 prikazano je dnevno kretanje izračunatih koeficijenata konvektivnog prijenosa topline u 3. iteraciji (dan 1 – dan 8) u odnosu na krivulju prosječnih vrijednosti koeficijenata konvektivnog prijenosa topline (označena crvenom bojom). Iz rezultata je vidljivo da postoje odstupanja izračunatih koeficijenta konvektivnog prijenosa topline od prosječnih vrijednosti što je računski pokazano izračunom statističkih parametara što je prikazano u Tablici 6.11. Navedena odstupanja su očekivana i rezultat su što koeficijent u svojoj vrijednosti sadrži sve utjecajne parametre.



Slika 6.25: Prikaz dnevnog kretanja koeficijenta konvektivnog prijenosa topline u odnosu na krivulju prosječnog koeficijenta za srpanj 2013. godine i polje AC 11 surf

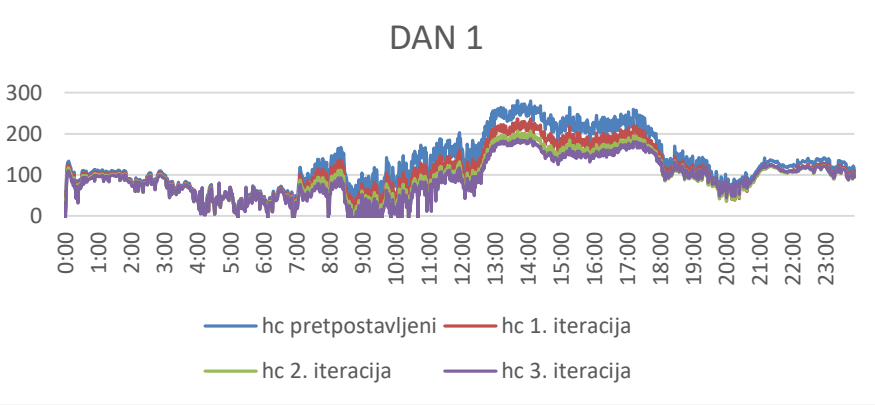
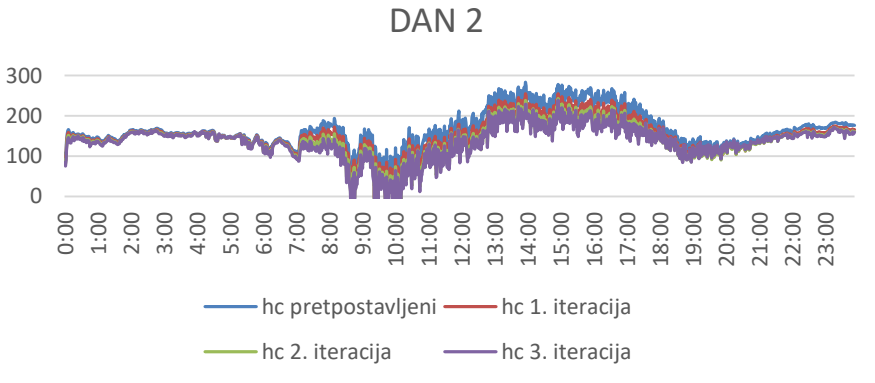
Tablica 6-11: Prikaz odstupanja izračunatih koeficijentata konvektivnog prijenosa topline od prosječnih vrijednosti za kritične točke

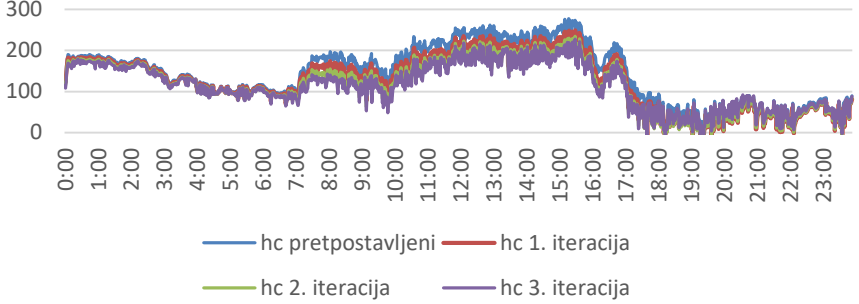
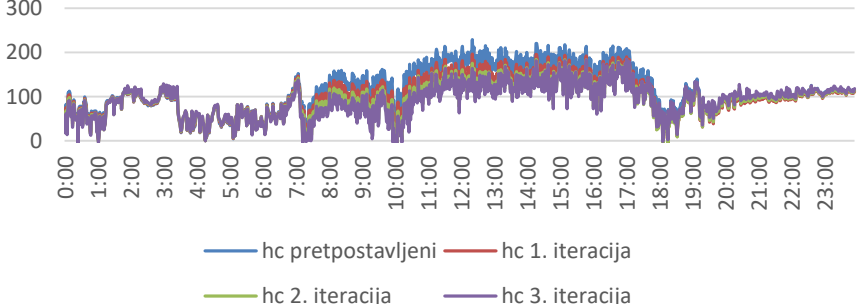
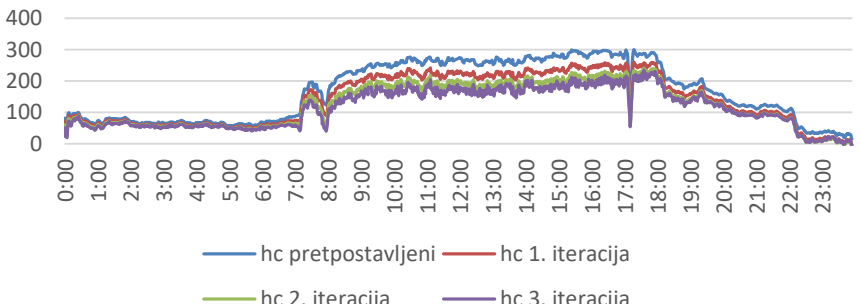
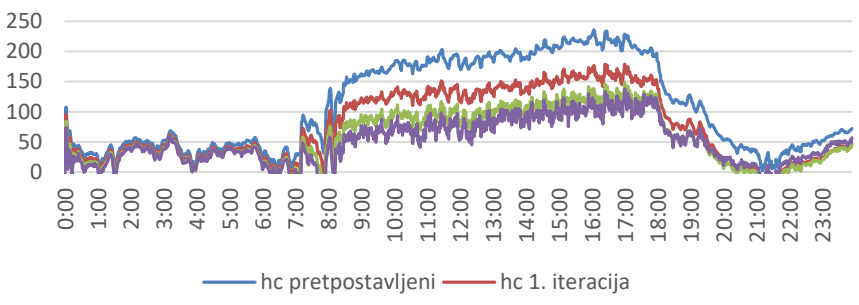


6.4.2. Mjerenja provedena u kolovozu 2013. godine

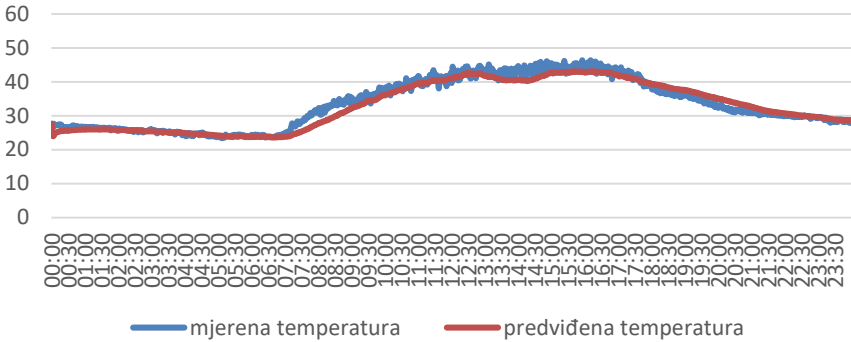
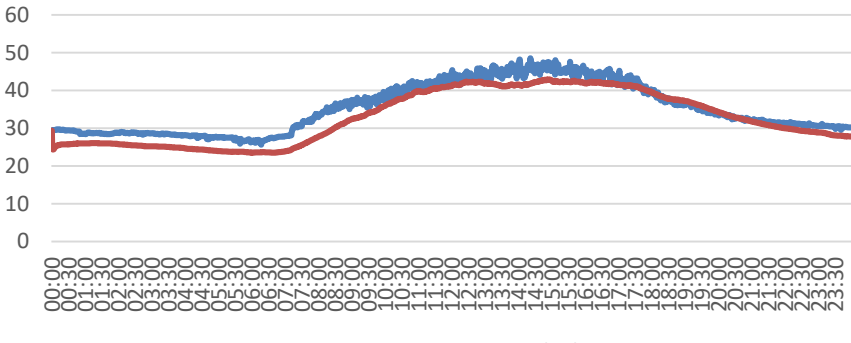
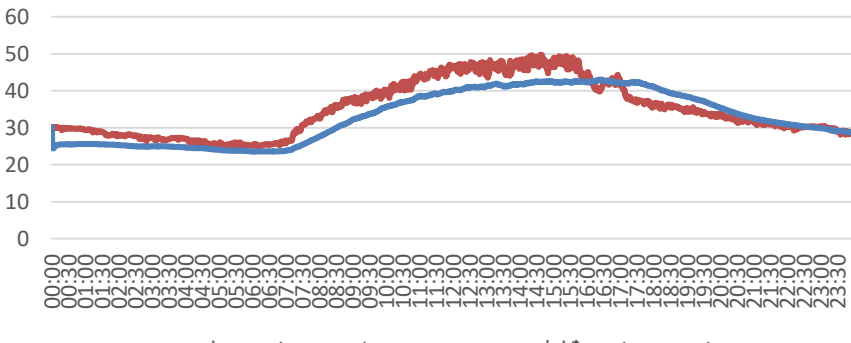
U Tablici 6.12, Tablici 6.14 i Tablici 6.16 prikazan je iterativni postupak kalibracije koeficijenta konvektivnog prijenosa topline za mjesec kolovoz 2013 godine za polje AC 8 surf, AC 11 surf i PA 8 surf. Iz grafova je vidljiva promjena koeficijenta konvektivnog prijenosa topline svakom iteracijom što je prikazano koeficijentima korelacije za svaki iterativni korak.

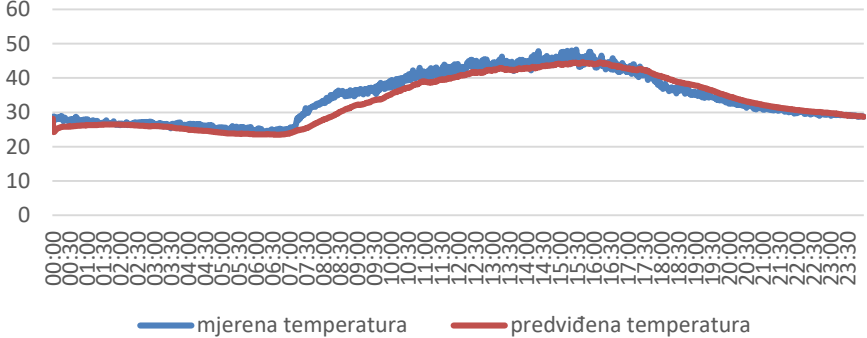
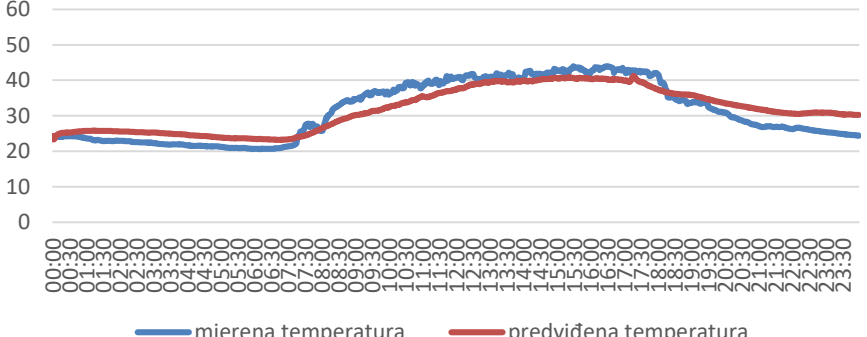
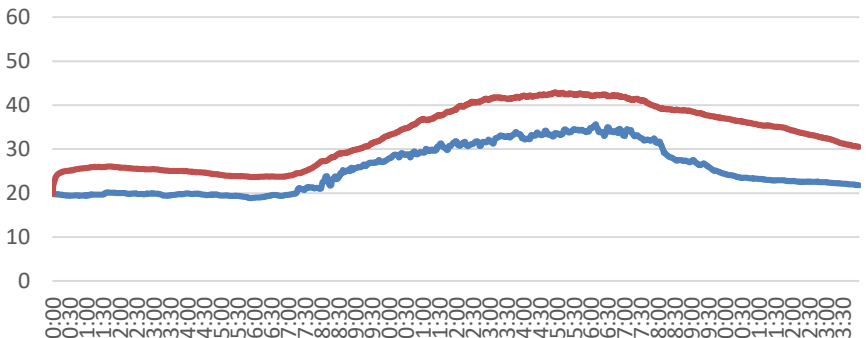
Tablica 6-12: Prikaz kalibracije nelinearnog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline iterativnim postupkom za polje AC8 surf

GRAFIČKI PRIKAZ – KOEFICIJENTI AC 8 surf KOLOVOZ 2013. godina		KORELACIJA
DAN 1  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija		$h_{c1} = 0,98515$ $h_{c2} = 0,94805$ $h_{c3} = 0,90912$
DAN 2  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija		$h_{c1} = 0,97282$ $h_{c2} = 0,92132$ $h_{c3} = 0,87641$

DAN 3  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,99199$ $h_{c2} = 0,97659$ $h_{c3} = 0,959$
DAN 4  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,9806$ $h_{c2} = 0,92603$ $h_{c3} = 0,86272$
DAN 5  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,99739$ $h_{c2} = 0,99082$ $h_{c3} = 0,98022$
DAN 6  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,98913$ $h_{c2} = 0,96509$ $h_{c3} = 0,9212$

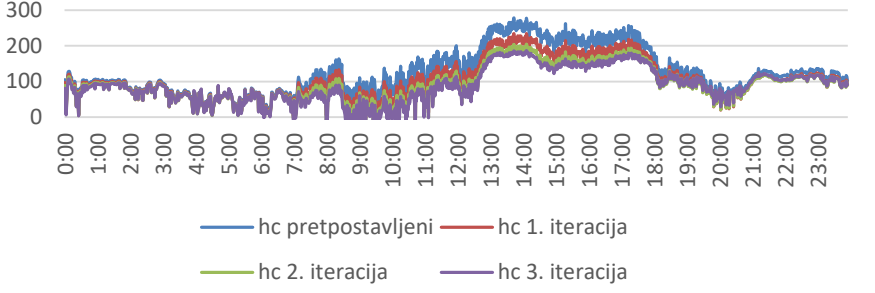
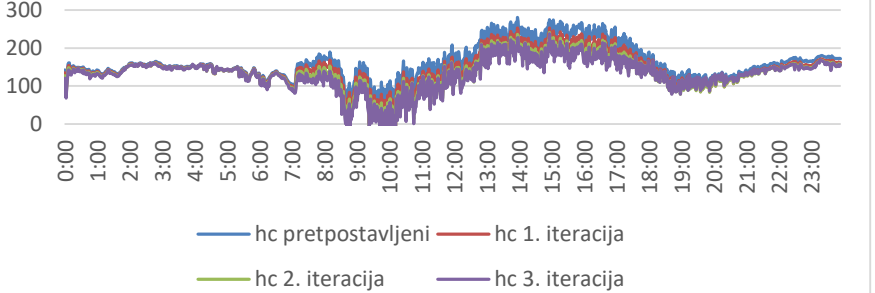
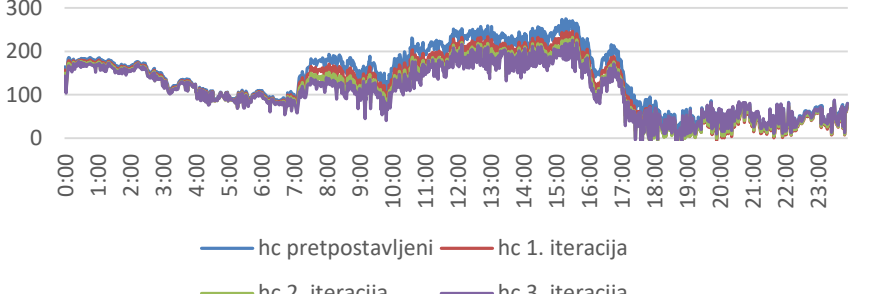
Tablica 6-13: Prikaz izračunatih i mjerenih temperatura površine kolnika uz primjenu nelinearnog kalibriranog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline za polje AC 8 surf

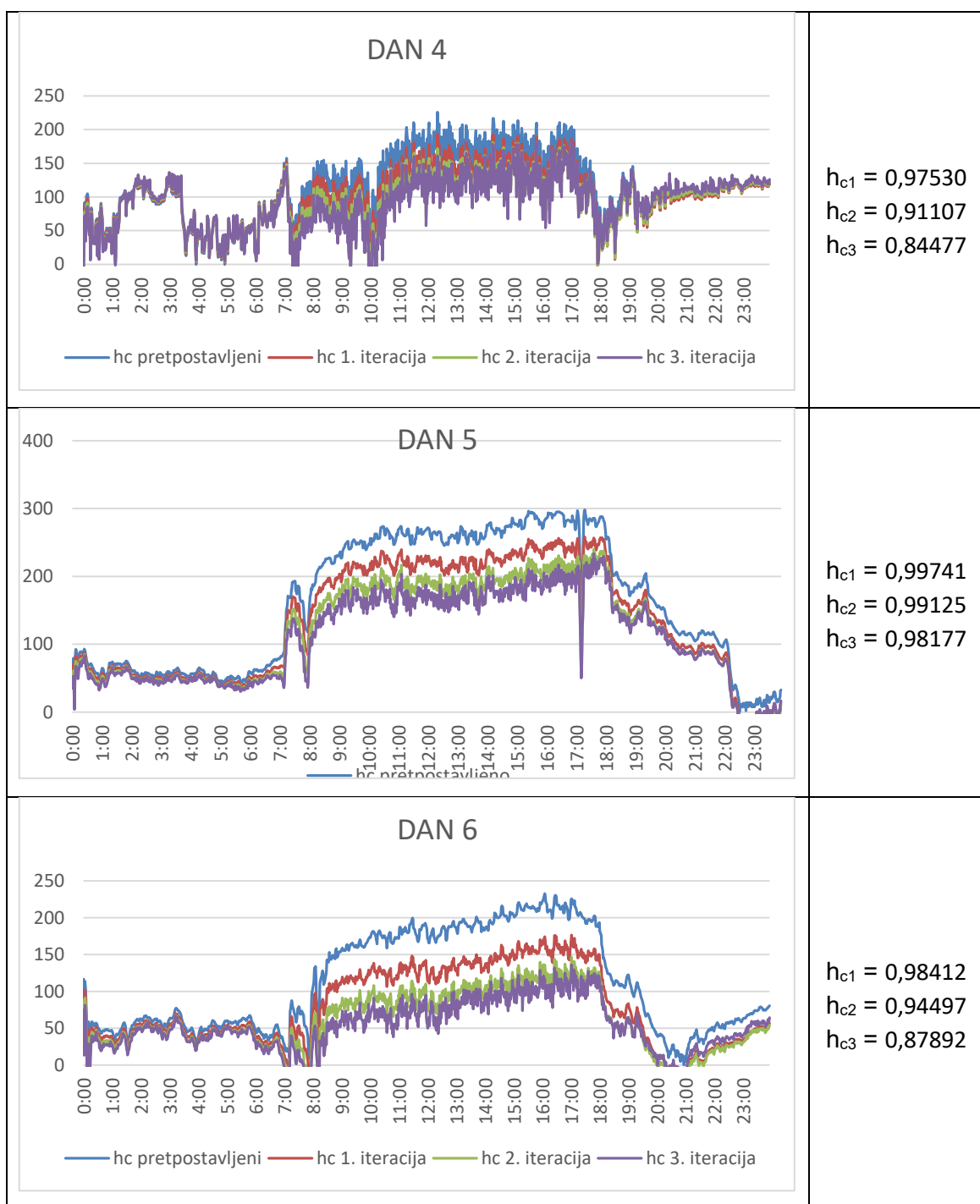
GRAFIČKI PRIKAZ – TEMPERATURE AC 8 surf, KOLOVOZ 2013. godina	KORELACIJA
06.08.2013. (dan 1)  — mjerena temperatura — predviđena temperatura	0,978
07.08.2013. (dan 2)  — mjerena temperatura — predviđena temperatura	0,970
09.08.2013. (dan 3)  — mjerena temperatura — predviđena temperatura	0,905

10.08.2013. (dan 4)  — mjerena temperatura — predviđena temperatura	0,963
13.08.2013. (dan 5)  — mjerena temperatura — predviđena temperatura	0,941
15.08.2013. (dan 6)  — mjerena temperatura — predviđena temperatura	0,930

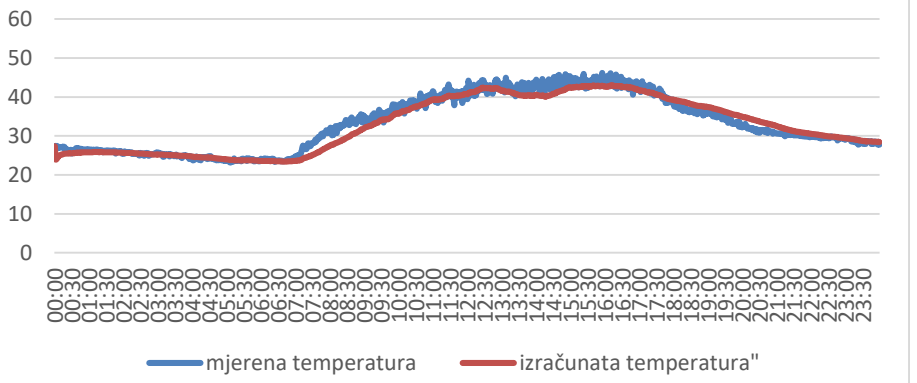
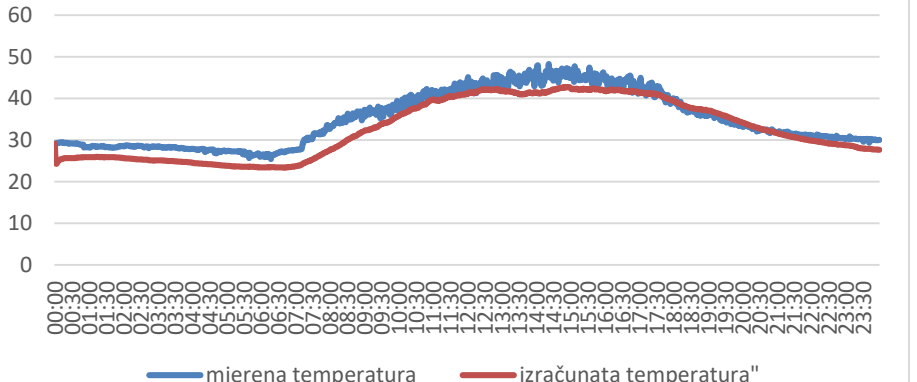
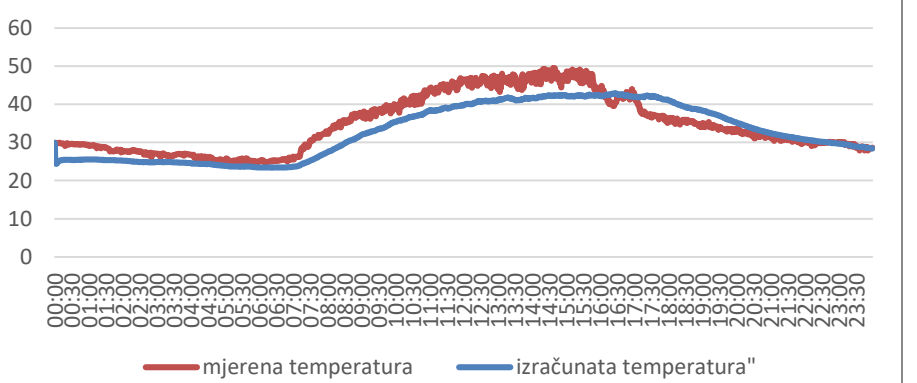
U Tablici 6.13, Tablici 6.15 i Tablici 6.17 prikazani su grafovi mjerene i izračunate temperature sa uključenim kalibriranim koeficijentima konvektivnog prijenosa topline u 3. iteraciji prikazanim u Tablici 6.12, Tablici 6.14 i Tablici 6.16. Iz prikaza dnevnog kretanja temperature te usporedbom izračunatih vrijednosti temperatura površine s mjenim podacima vidljivo je da izrađeni model slijedi zadovoljavajući izračun temperature što je opisano koeficijentima korelacije prikazanim u tablicama.

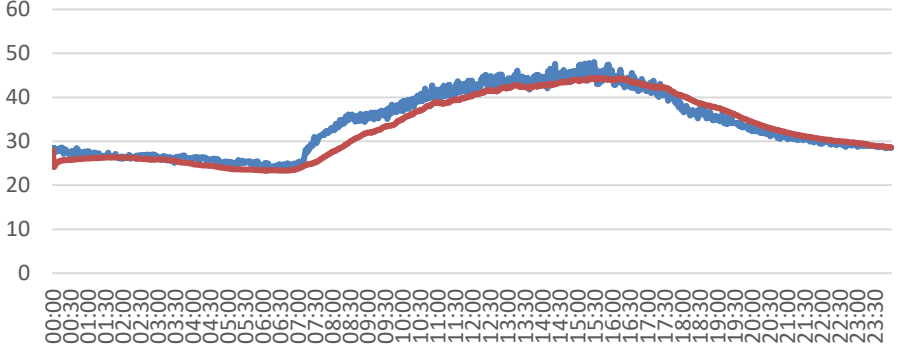
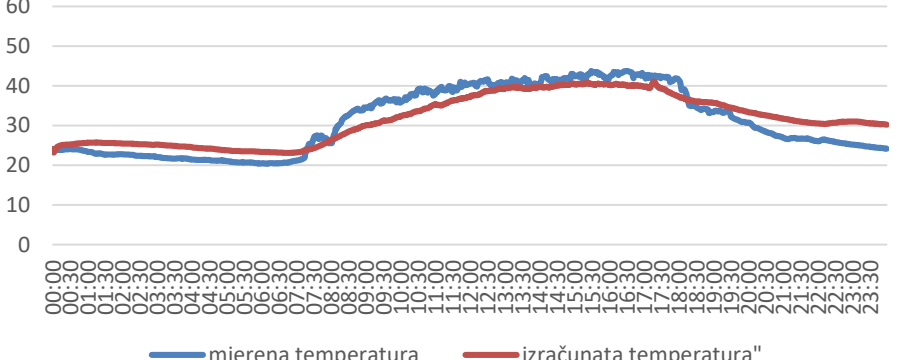
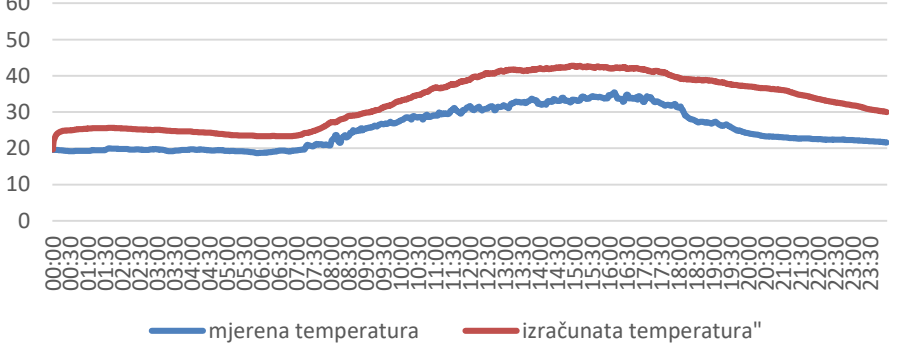
Tablica 6-14: Prikaz kalibracije nelinearnog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline iterativnim postupkom za polje AC11 surf

GRAFIČKI PRIKAZ – KOEFICIJENTI AC 11 surf KOLOVOZ 2013. godina	KORELACIJA
DAN 1  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,98467$ $h_{c2} = 0,94603$ $h_{c3} = 0,90505$
DAN 2  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,97333$ $h_{c2} = 0,92319$ $h_{c3} = 0,87980$
DAN 3  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,99213$ $h_{c2} = 0,97714$ $h_{c3} = 0,96002$

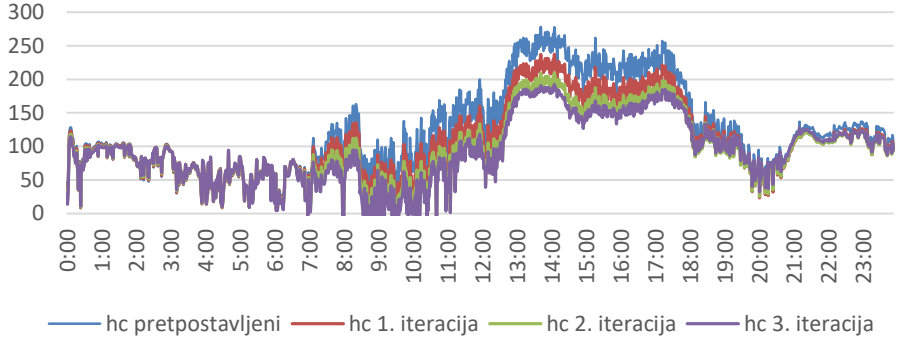
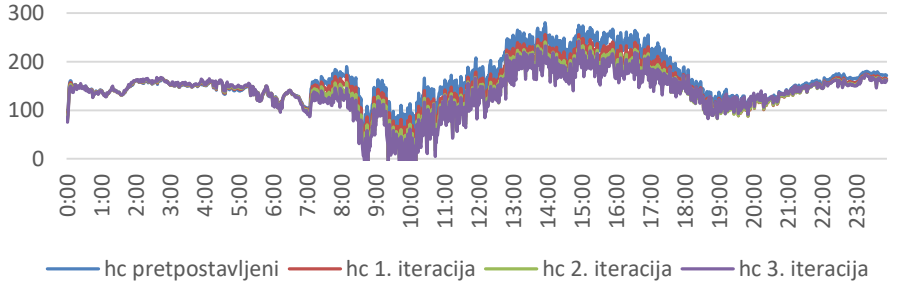
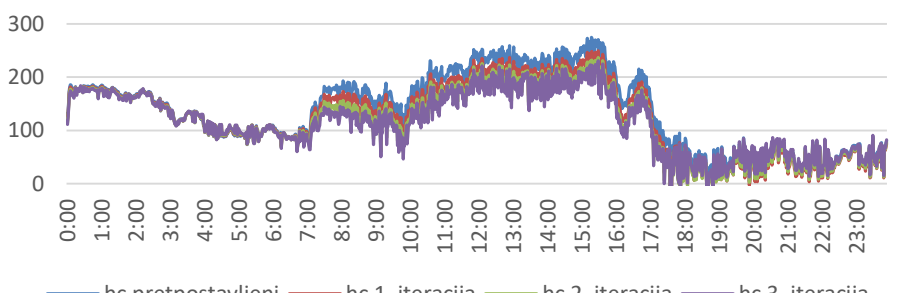


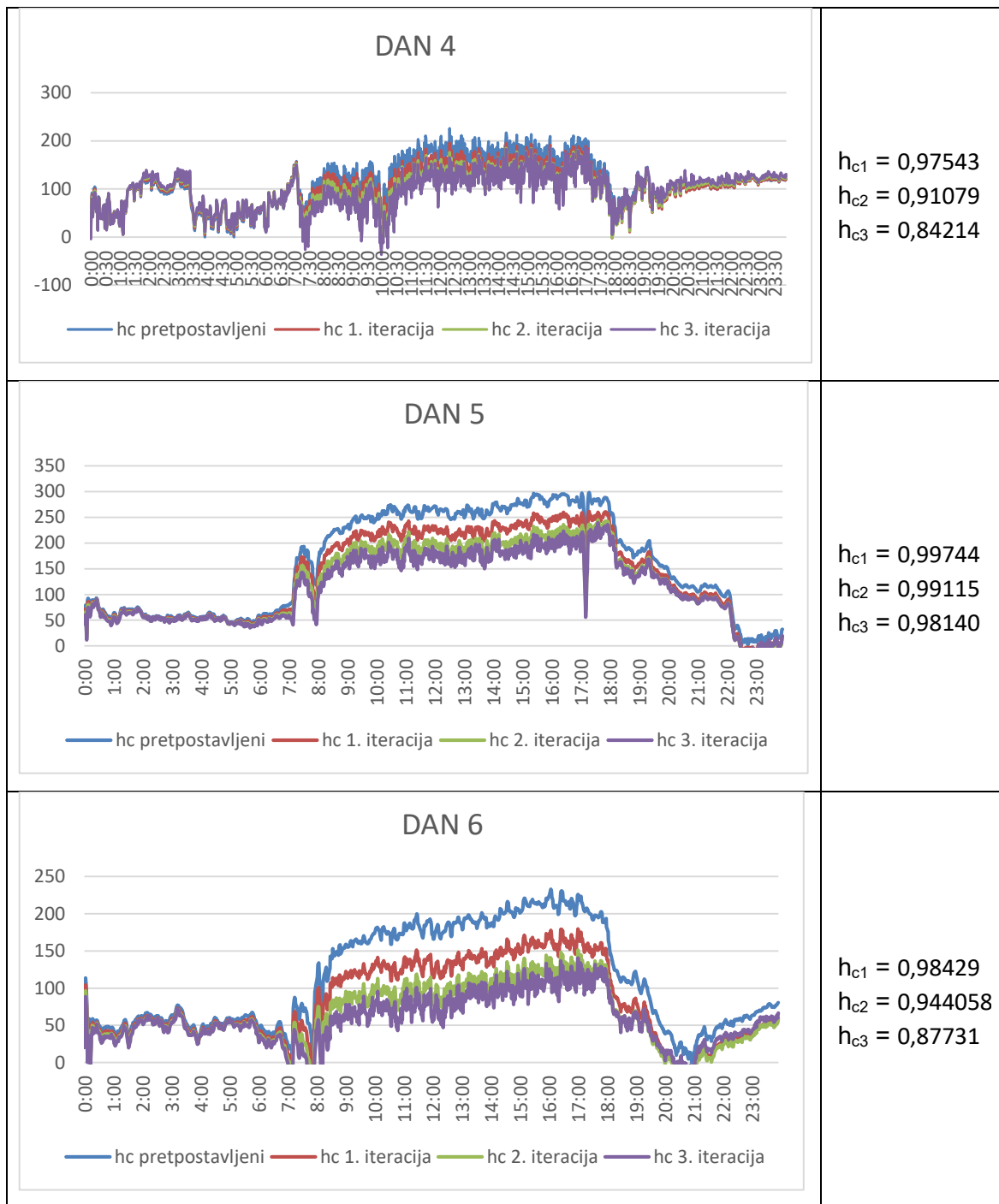
Tablica 6-15: Prikaz izračunatih i mjerenih temperatura površine kolnika uz primjenu nelinearnog kalibriranog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline za polje AC 11 surf

GRAFIČKI PRIKAZ – TEMPERATURE AC 11 surf, KOLOVOZ 2013. godina	KORELACIJA
06.08.2013. (dan 1)  — mjerena temperatura — izračunata temperatura"	0,977
07.08.2013. (dan 2)  — mjerena temperatura — izračunata temperatura"	0,969
09.08.2013. (dan 3)  — mjerena temperatura — izračunata temperatura"	0,906

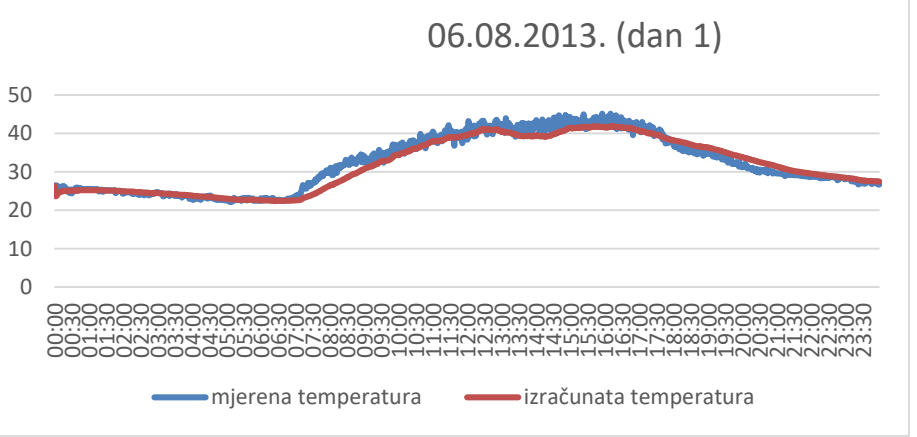
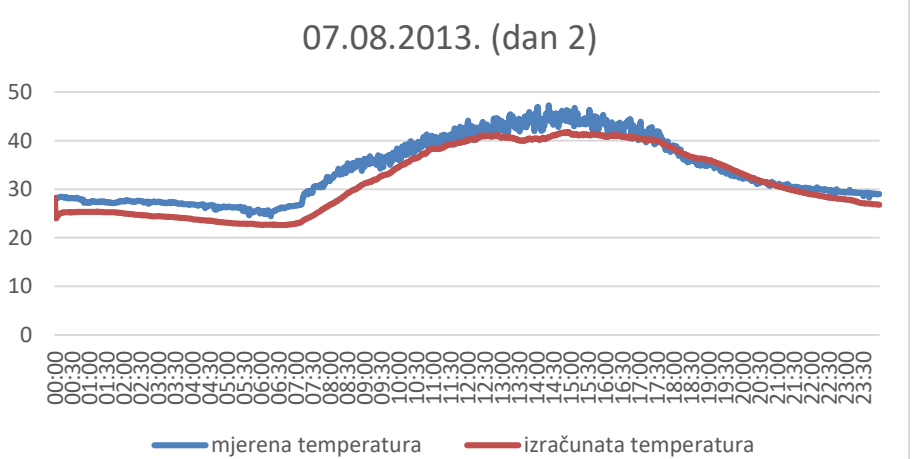
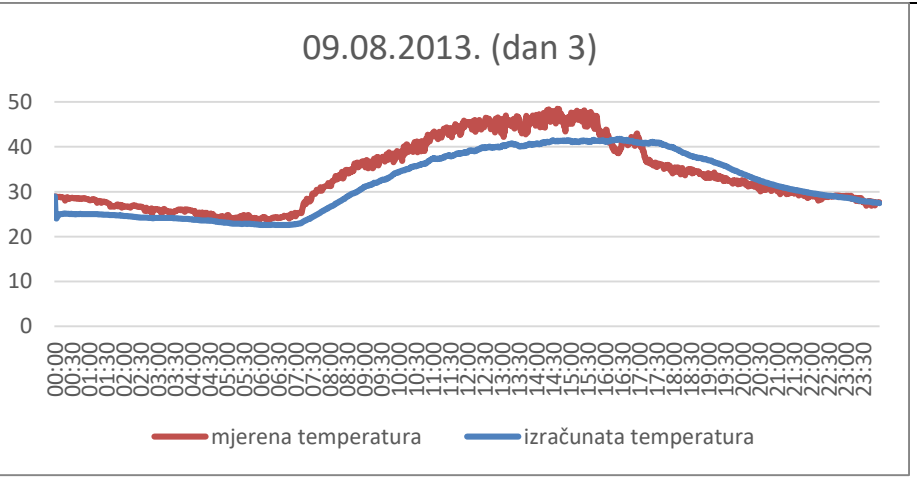
10.08.2013. (dan 4)  — mjerena temperatura — izračunata temperatura"	0,963
13.08.2013. (dan 5)  — mjerena temperatura — izračunata temperatura"	0,939
15.08.2013. (dan 6)  — mjerena temperatura — izračunata temperatura"	0,931

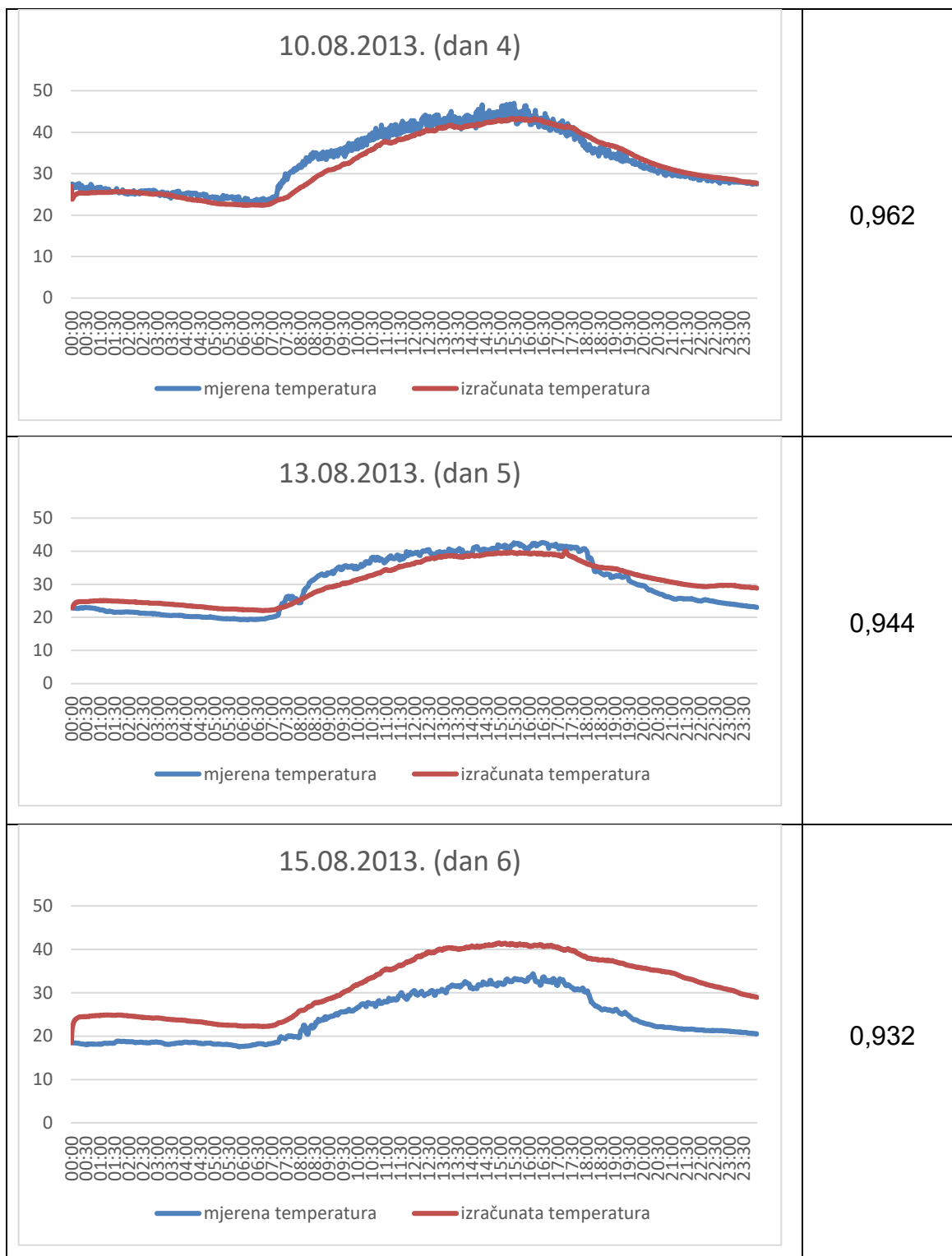
Tablica 6-16: Prikaz kalibracije nelinearnog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline iterativnim postupkom za polje PA 8 surf

GRAFIČKI PRIKAZ – KOEFICIJENTI PA 8 surf KOLOVOZ 2013. godina	KORELACIJA
DAN 1  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,98477$ $h_{c2} = 0,94514$ $h_{c3} = 0,90149$
DAN 2  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,97343$ $h_{c2} = 0,92172$ $h_{c3} = 0,87506$
DAN 3  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,99218$ $h_{c2} = 0,97684$ $h_{c3} = 0,95928$



Tablica 6-17: Prikaz izračunatih i mjerenih temperatura površine kolnika uz primjenu nelinearnog kalibriranog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline za polje PA 8 surf

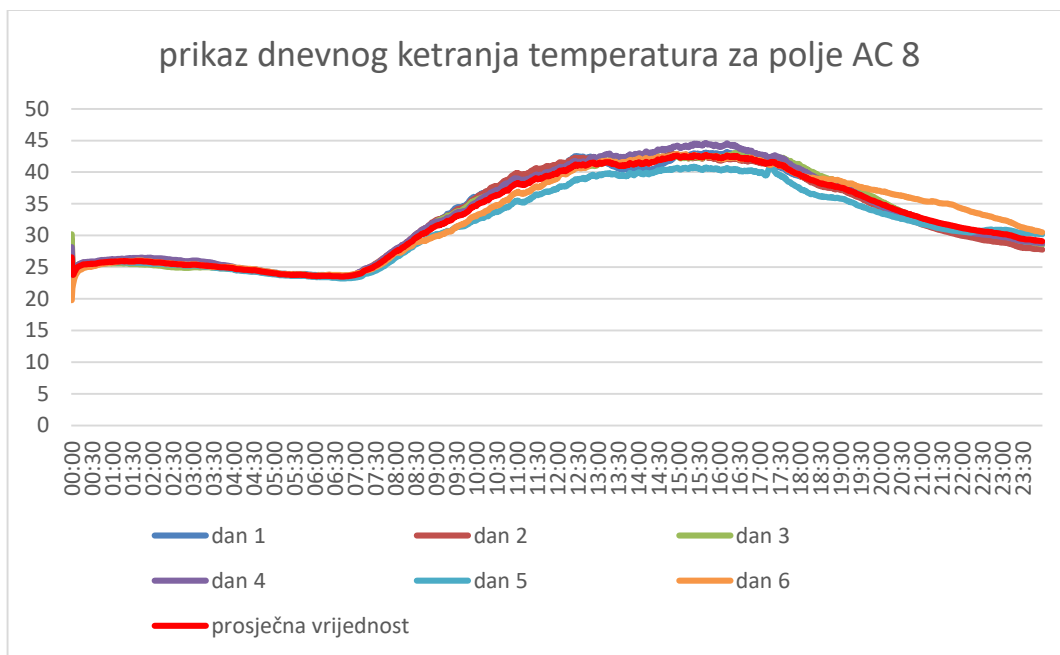
GRAFIČKI PRIKAZ – TEMPERATURE PA 8 surf, KOLOVOZ 2013. godina	KORELACIJA
06.08.2013. (dan 1)  — mjerena temperatura — izračunata temperatura	0,977
07.08.2013. (dan 2)  — mjerena temperatura — izračunata temperatura	0,970
09.08.2013. (dan 3)  — mjerena temperatura — izračunata temperatura	0,912



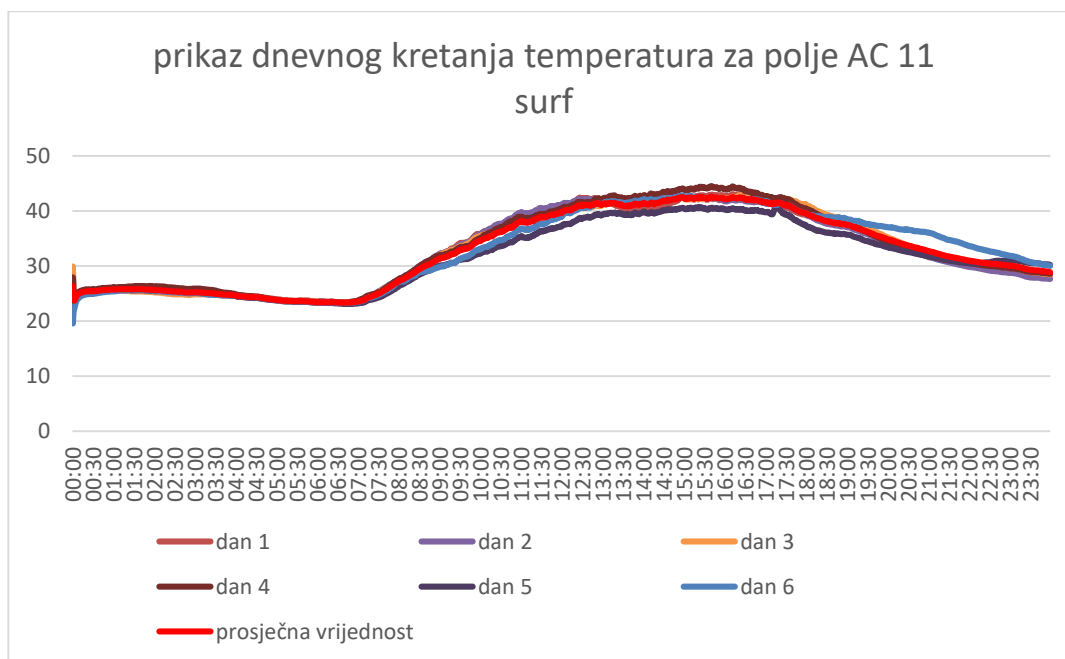
Na Slici 6.26, Slici 6.27 i Slici 6.28 prikazano je dnevno kretanje izračunatih temperatura površina kolnika (dan 1 – dan 8) za polje AC 8 surf, AC 11 surf i PA 8 surf u odnosu na krivulju prosječnih vrijednosti temperature (označena crvenom bojom). Iz rezultata je vidljivo da nema većeg odstupanja izračunatih temperatura od prosječnih vrijednosti što je računski pokazano izračunom statističkih

parametara (standardne devijacije i varijance) za svaki presjek mjerenih podataka (1440 točaka), a rezultati su prikazani za presjek u kritičnim točkama (vrijeme) koje su utvrđene u poglavlju 6.3.1 (Tablica 6-18, Tablica 6-19 i

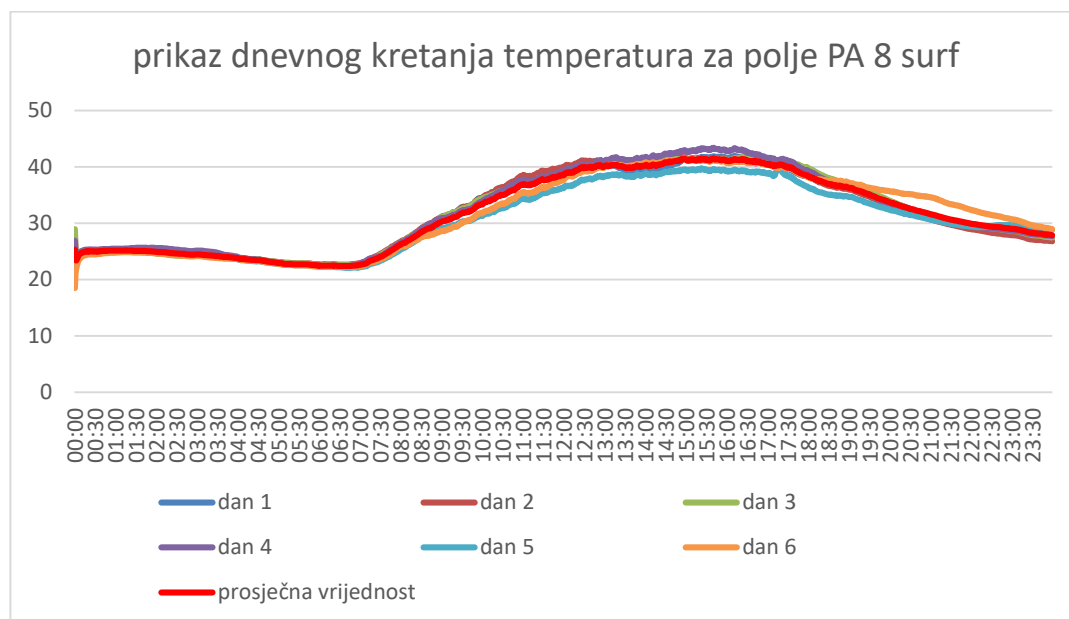
Tablica 6-20).



Slika 6.26: Prikaz dnevnog kretanja temperatura u odnosu na krivulju prosječne temperature za kolovoz 2013. godine i polje AC 8 surf

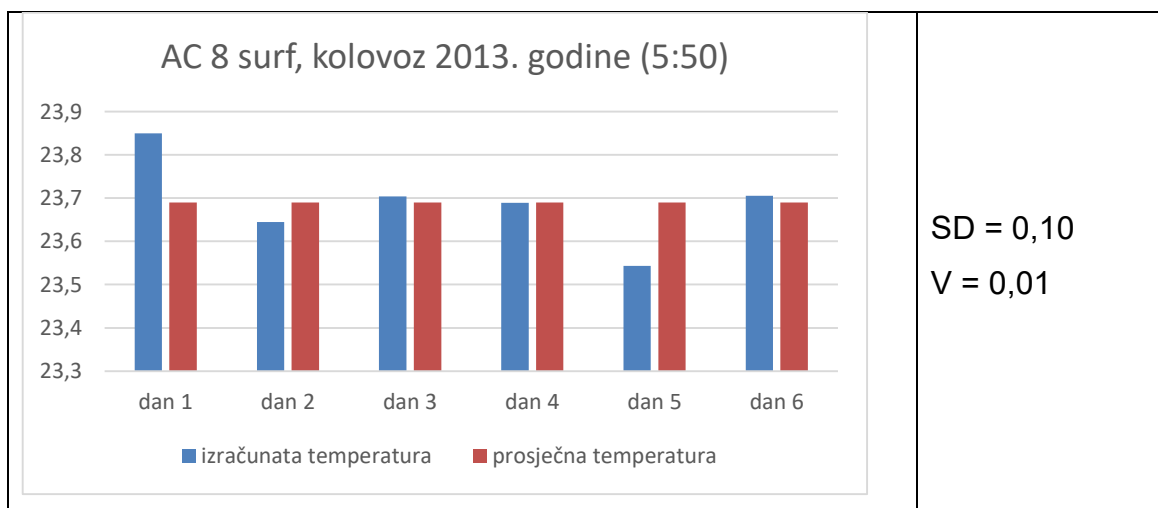


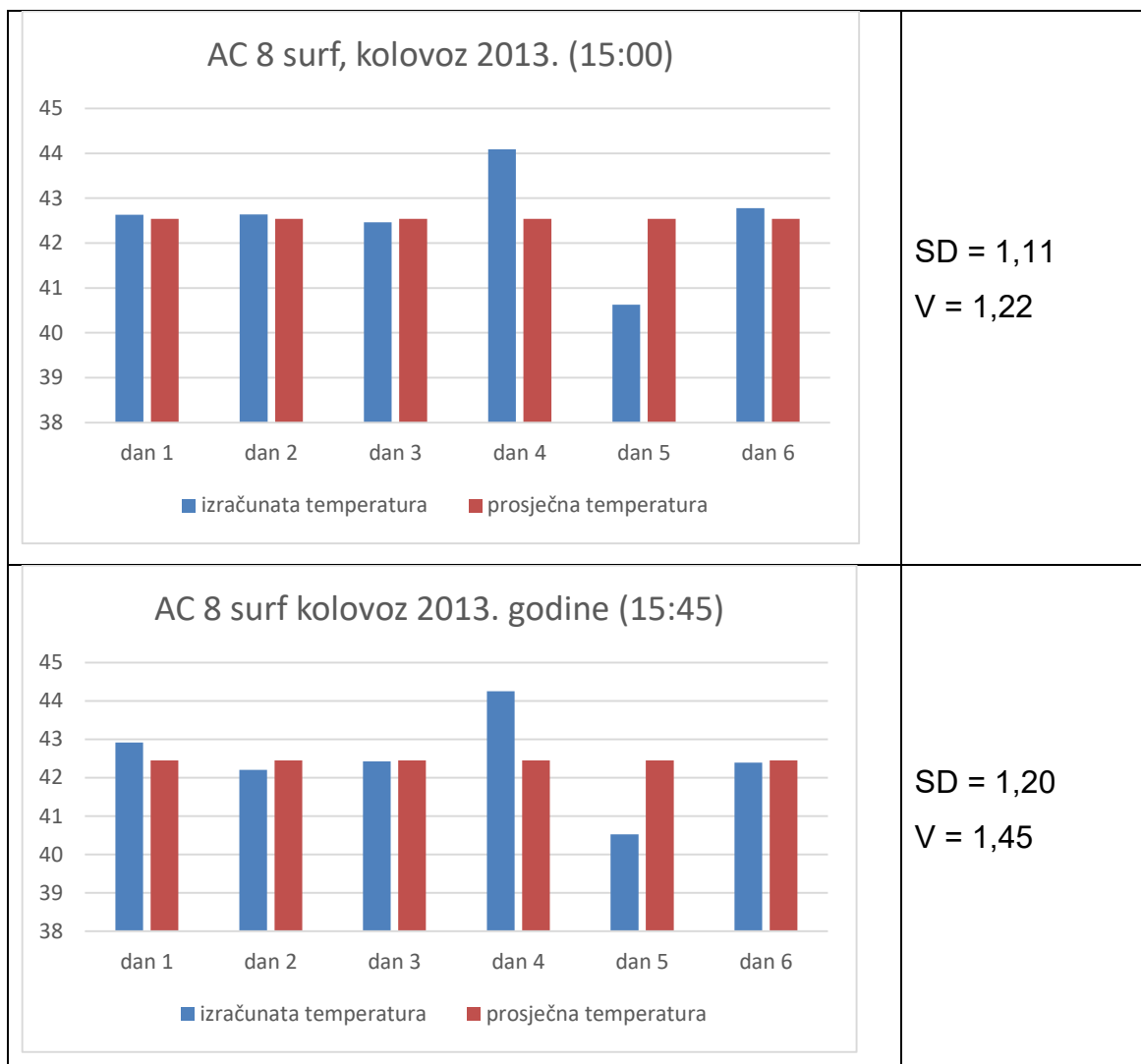
Slika 6.27: Prikaz dnevnog kretanja temperatura u odnosu na krivulju prosječne temperature za kolovoz 2013. godine i polje AC 11 surf



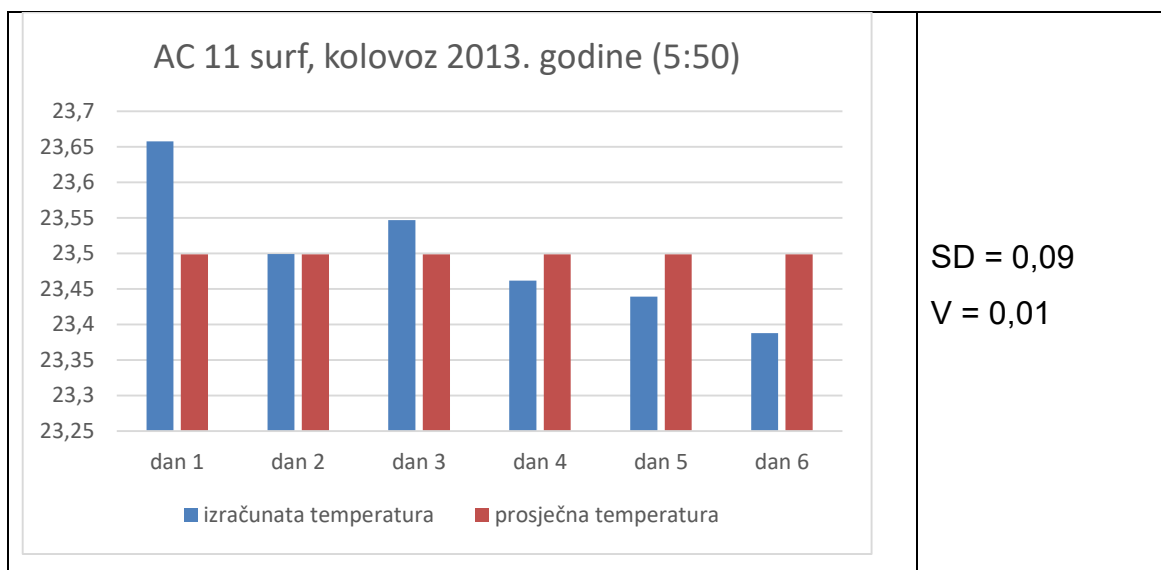
Slika 6.28: Prikaz dnevnog kretanja temperatura u odnosu na krivulju prosječne temperature za kolovoz 2013. godine i polje PA 8 surf

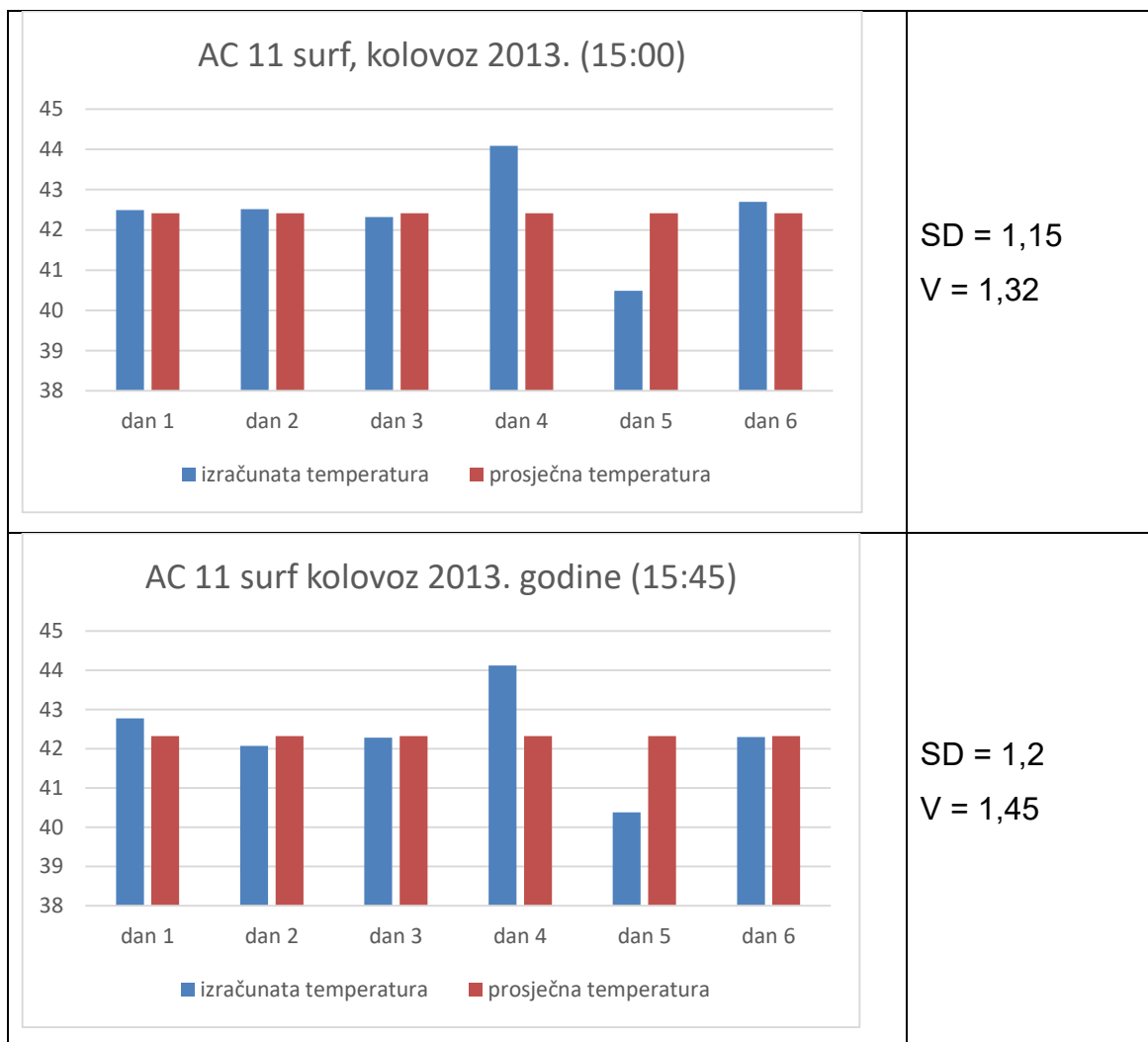
Tablica 6-18: Prikaz odstupanja izračunatih temperatura površine kolnika od prosječnih vrijednosti temperatura za kritične točke



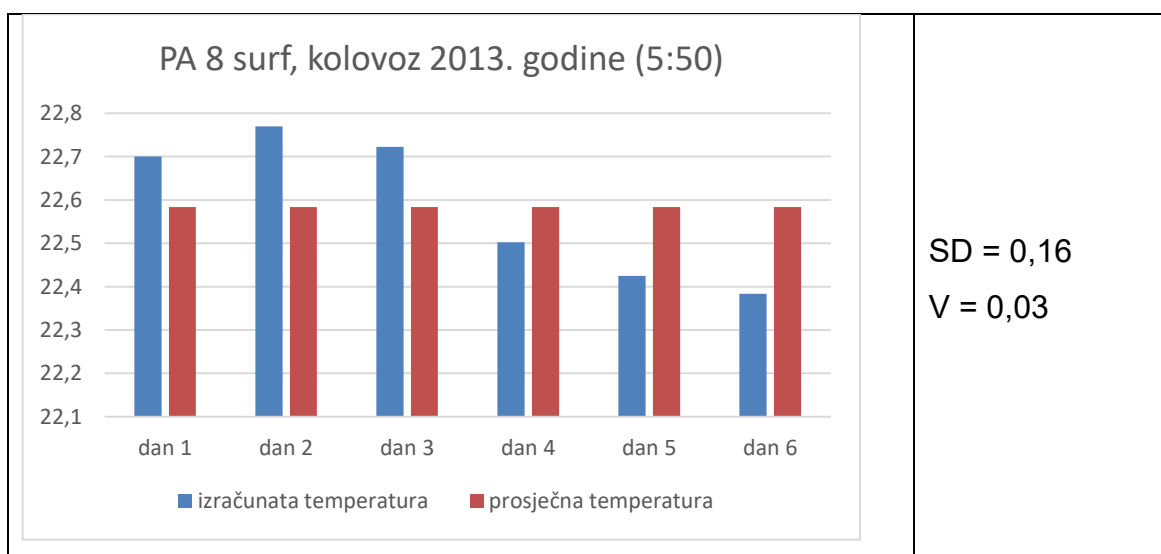


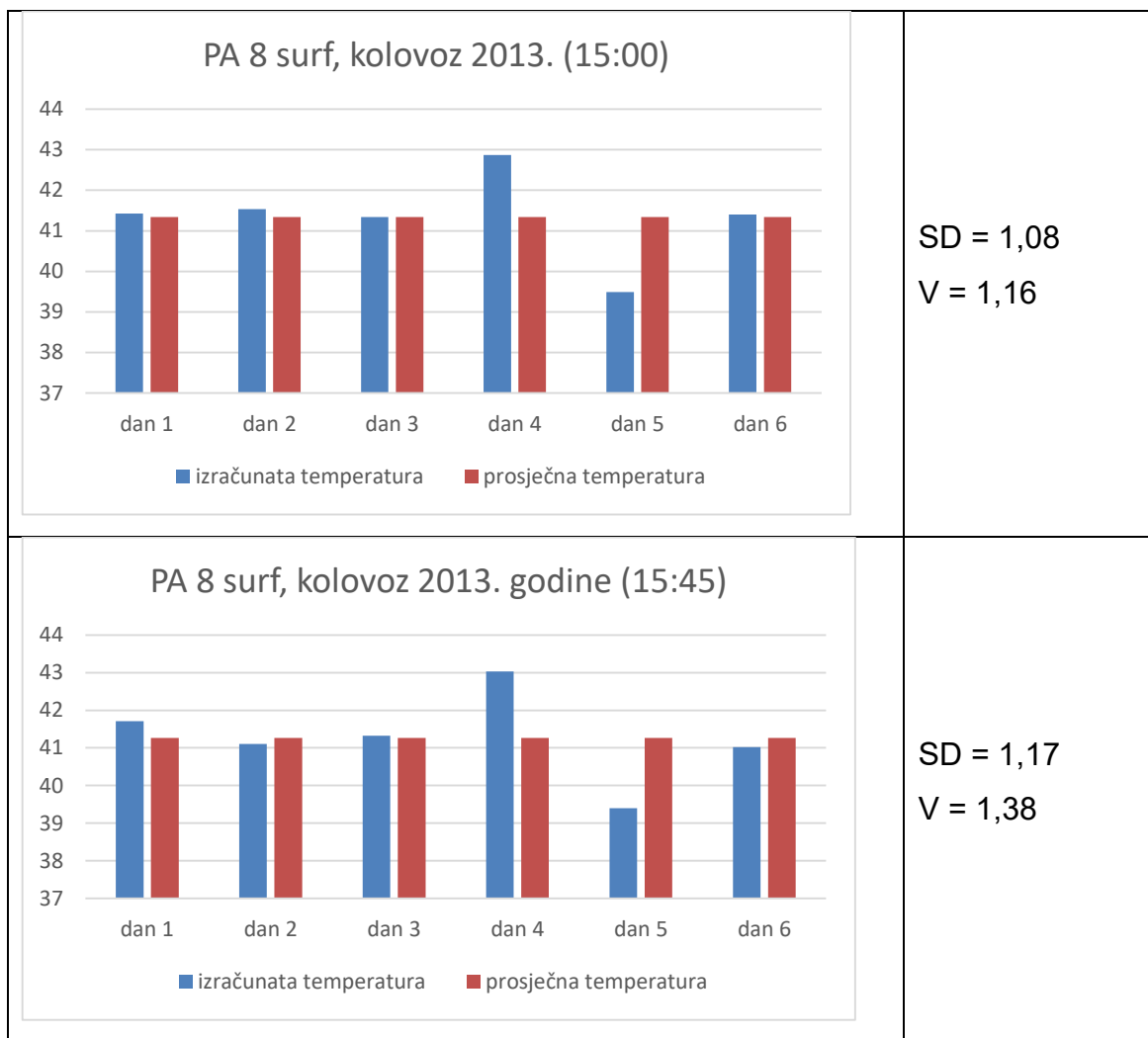
Tablica 6-19: Prikaz odstupanja izračunatih temperatura površine kolnika od prosječnih vrijednosti temperatura za kritične točke





Tablica 6-20: Prikaz odstupanja izračunatih temperatura površine kolnika od prosječnih vrijednosti temperatura za kritične točke

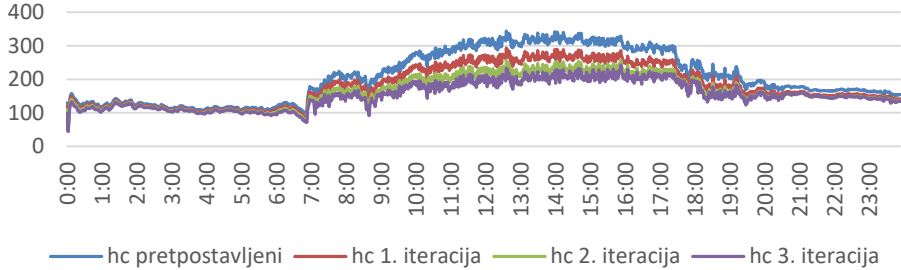
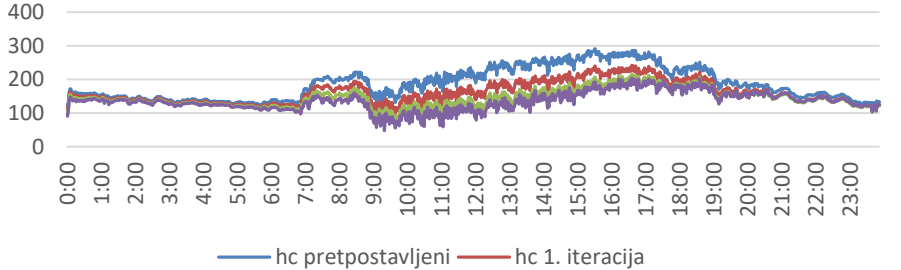
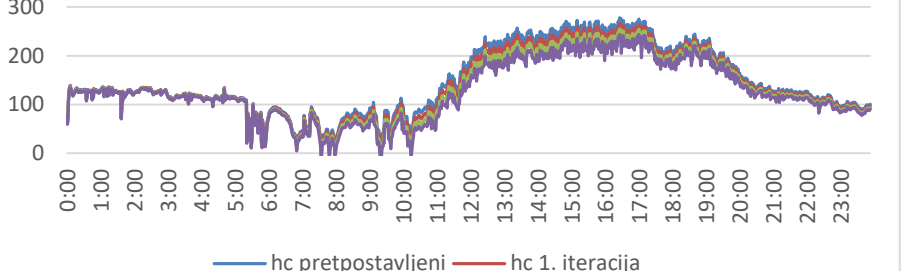


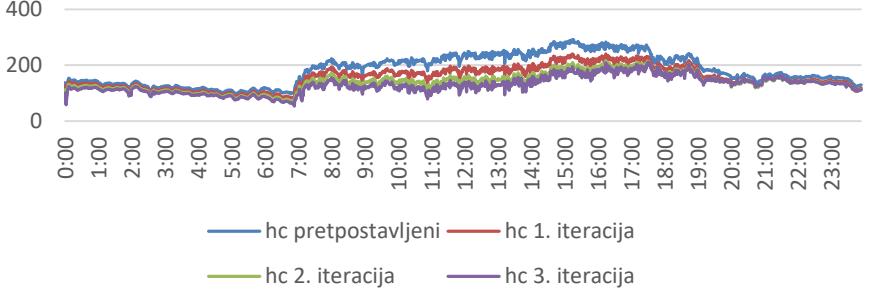
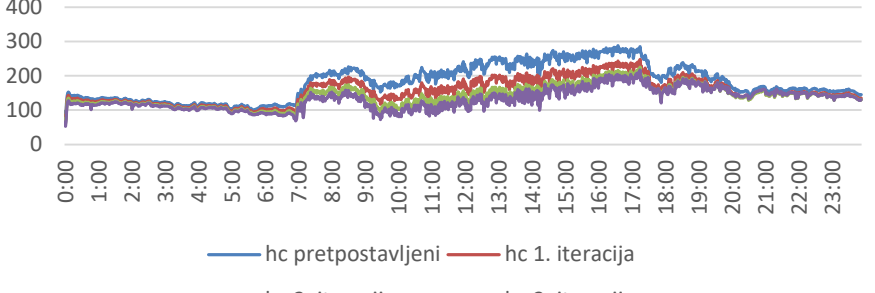
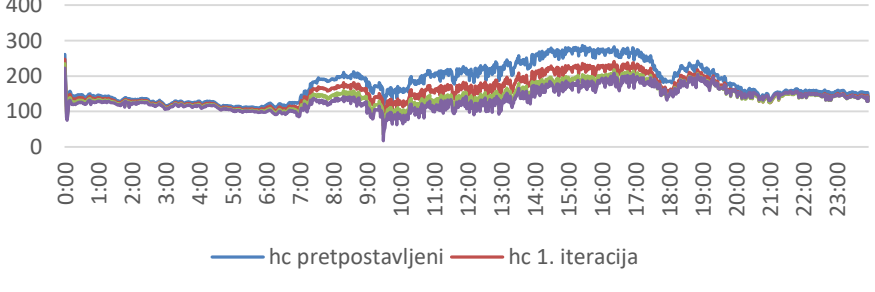
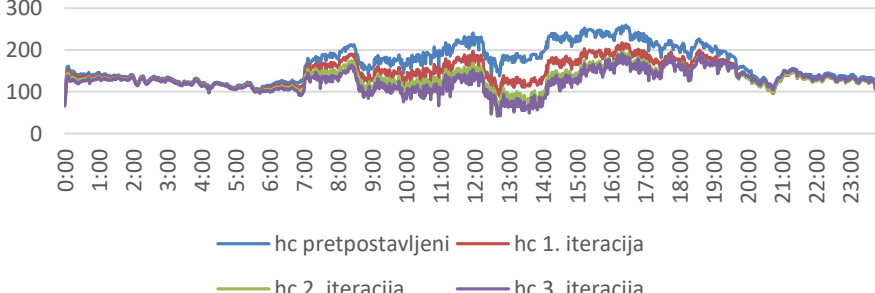


6.4.3. Mjerjenja provedena u srpnju 2015. godine

U Tablici 6.21, Tablici 6.23 i Tablici 6.25 prikazan je iterativni postupak kalibracije koeficijenta konvektivnog prijenosa topline za mjesec srpanj 2015 godine za polje AC 8 surf, AC 11 surf i PA 8 surf. Iz grafova je vidljiva promjena koeficijenta konvektivnog prijenosa topline svakom iteracijom što je prikazano koeficijentima korelacije za svaki iterativni korak.

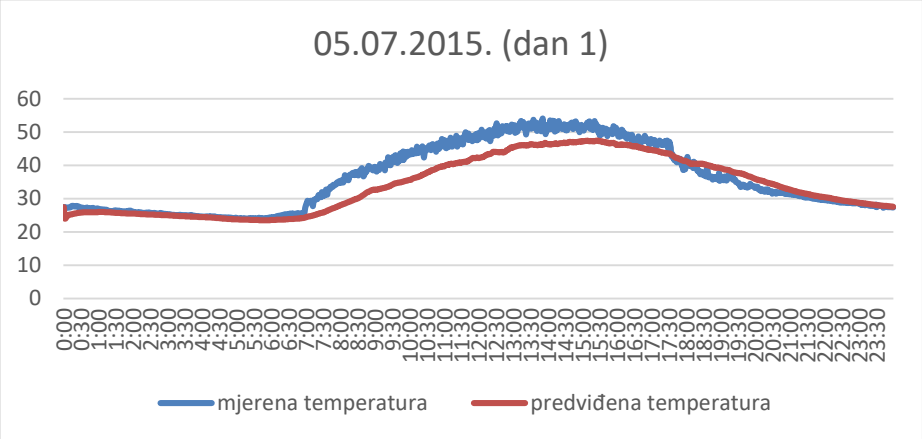
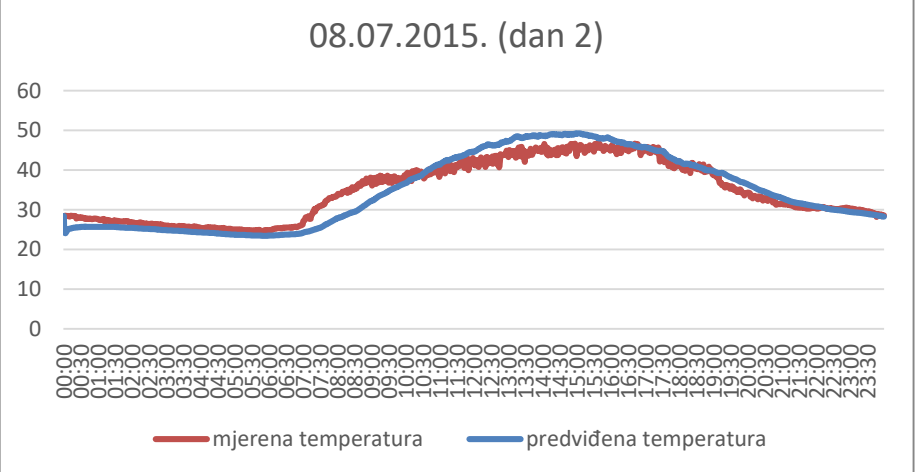
Tablica 6-21: Prikaz kalibracije nelinearnog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline iterativnim postupkom za polje AC8 surf

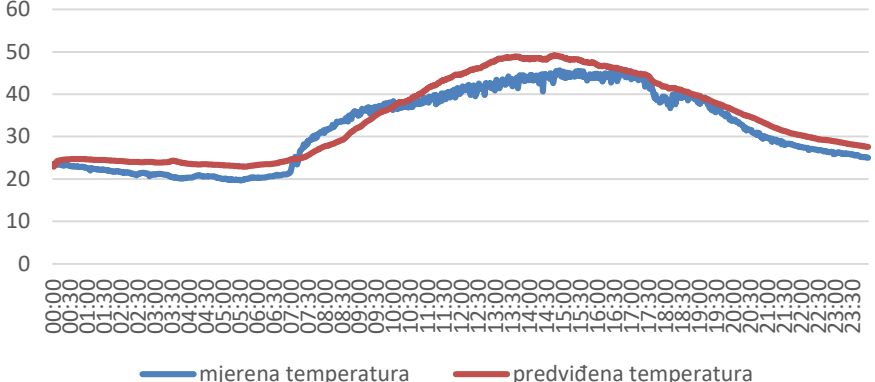
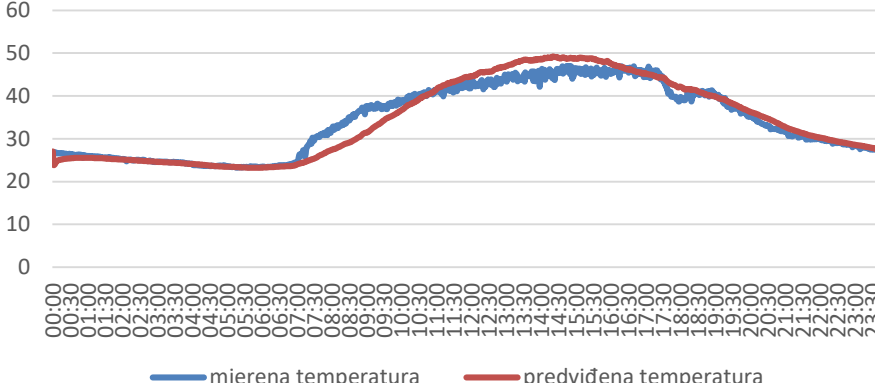
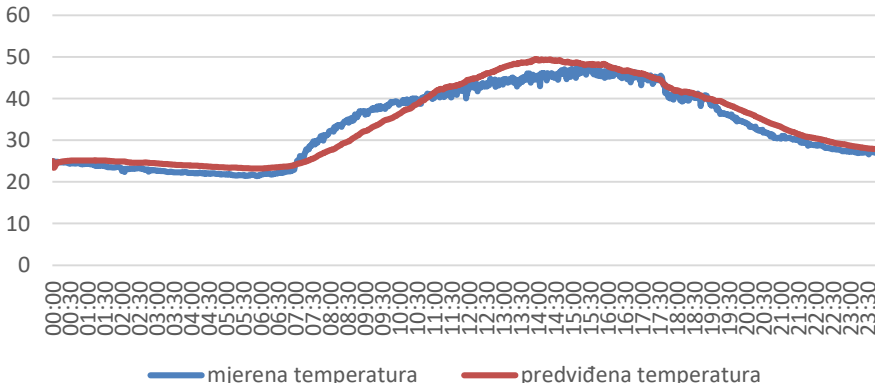
GRAFIČKI PRIKAZ – KOEFICIJENTI AC 8 surf SRPANJ 2015. godina	KORELACIJA
DAN 1  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,99744$ $h_{c2} = 0,98615$ $h_{c3} = 0,95804$
DAN 2  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,95391$ $h_{c2} = 0,78036$ $h_{c3} = 0,59737$
DAN 3  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,97680$ $h_{c2} = 0,89856$ $h_{c3} = 0,80789$

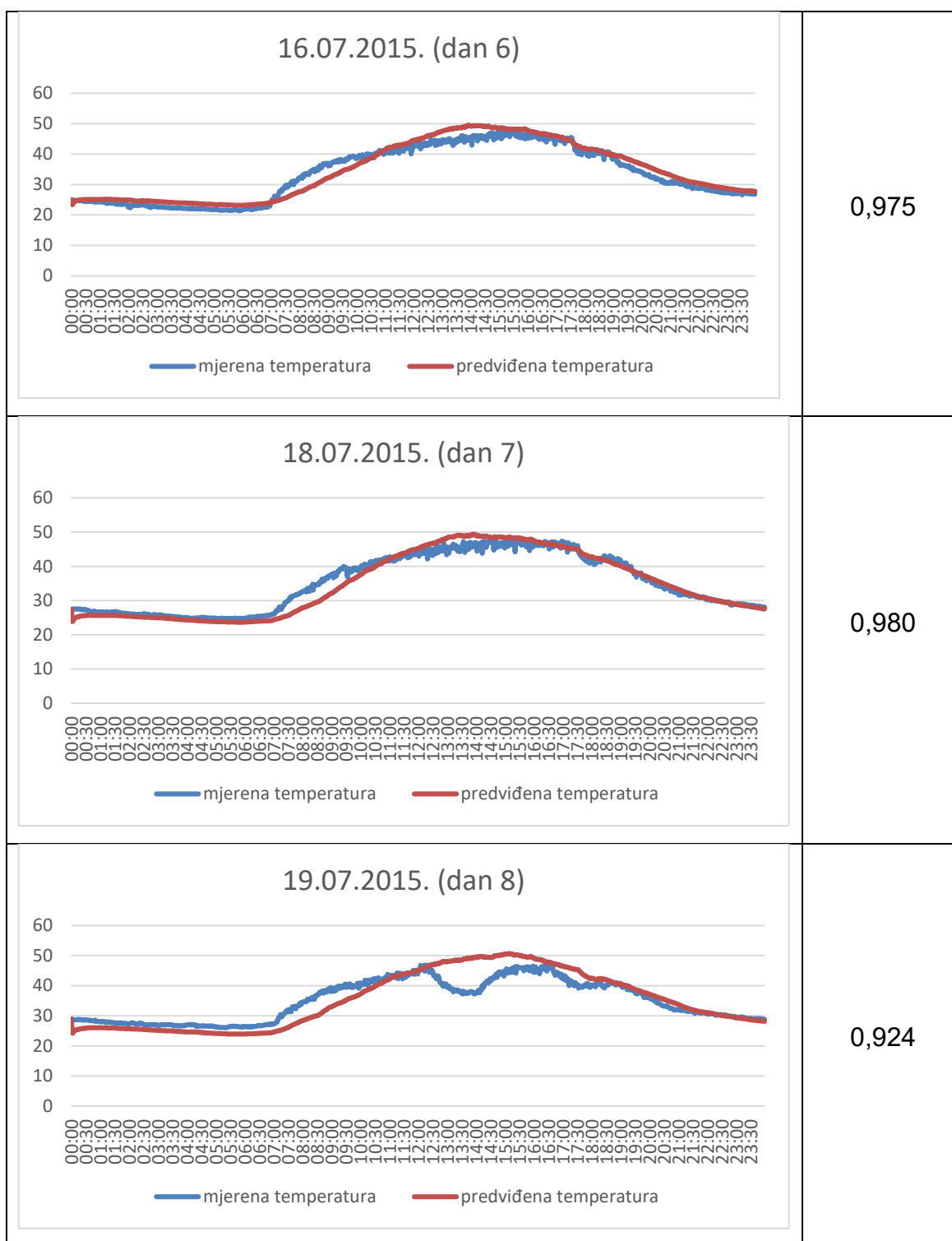
DAN 4  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,98176$ $h_{c2} = 0,90383$ $h_{c3} = 0,78931$
DAN 5  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,97294$ $h_{c2} = 0,86516$ $h_{c3} = 0,72915$
DAN 6  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,97039$ $h_{c2} = 0,85767$ $h_{c3} = 0,72205$
DAN 7  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,92123$ $h_{c2} = 0,67801$ $h_{c3} = 0,48821$

U Tablici 6.22, Tablici 6.24 i Tablici 6.26 prikazani su grafovi mjerene i izračunate temperature sa uključenim kalibriranim koeficijentima konvektivnog prijenosa topline u 3. iteraciji prikazanim u Tablici 6.21, Tablici 6.23 i Tablici 6.25. Iz prikaza dnevnog kretanja temperature te usporedbom izračunatih vrijednosti temperatura površine s mjerenim podacima vidljivo je da izrađeni model slijedi zadovoljavajući izračun temperature što je opisano koeficijentima korelacije prikazanim u tablicama.

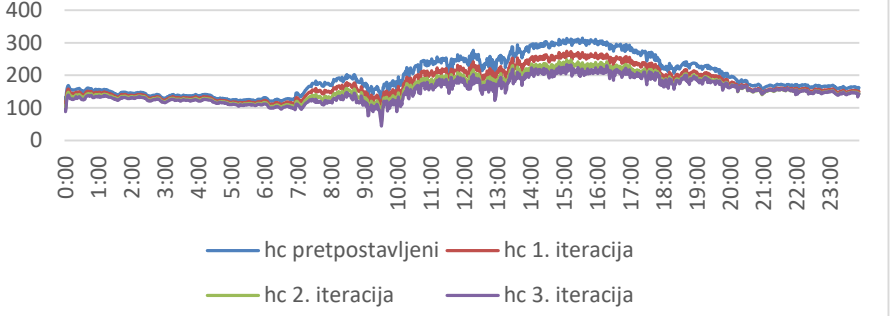
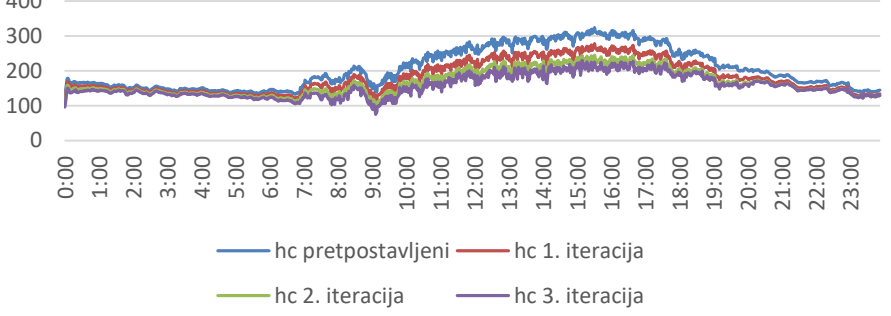
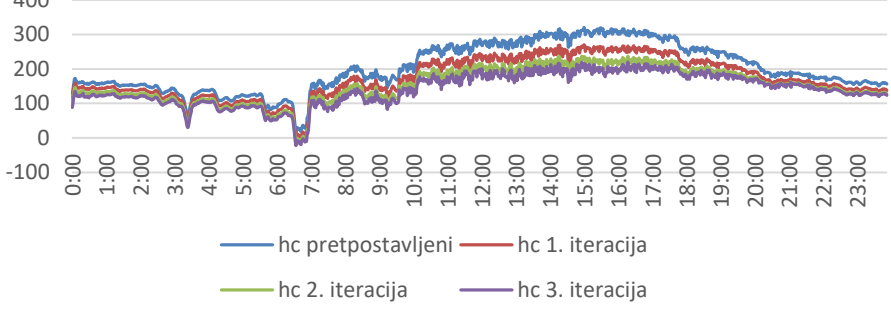
Tablica 6-22: Prikaz izračunatih i mjerenih temperatura površine kolnika uz primjenu nelinearnog kalibriranog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline za polje AC 8 surf

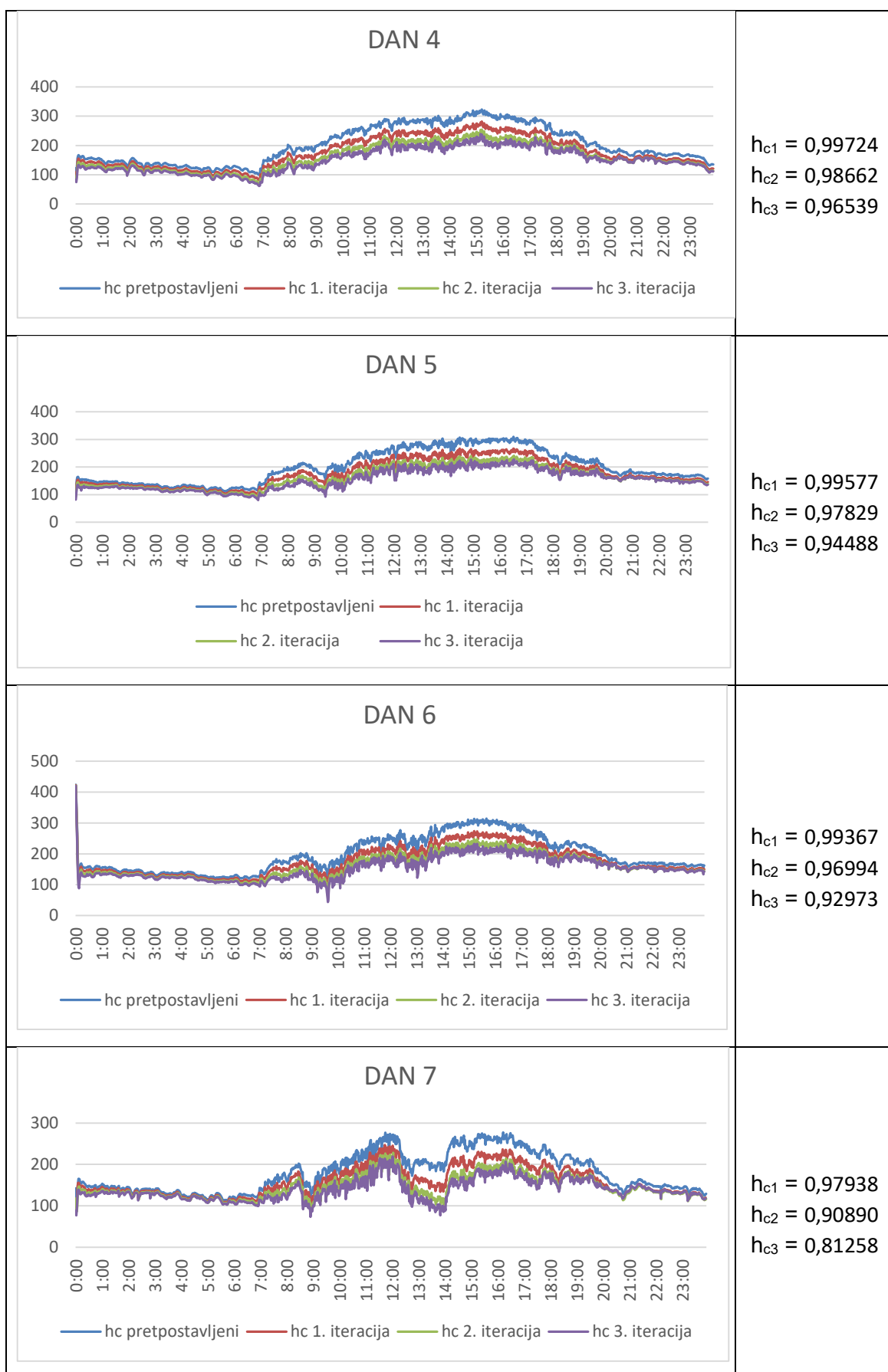
GRAFIČKI PRIKAZ – TEMPERATURE AC 8 surf, SRPANJ 2015. godina		KORELACIJ A
05.07.2015. (dan 1) 		0,950
08.07.2015. (dan 2) 		0,971

11.07.2015. (dan 3)  — mjerena temperatura — predviđena temperatura	0,970
12.07.2015. (dan 4)  — mjerena temperatura — predviđena temperatura	0,975
15.07.2015. (dan 5)  — mjerena temperatura — predviđena temperatura	0,973

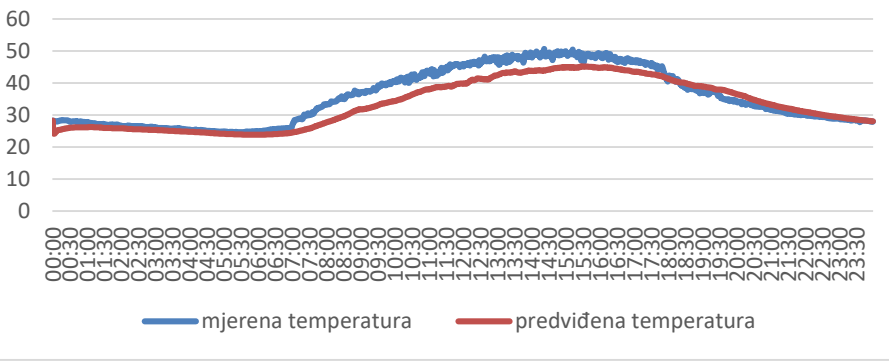
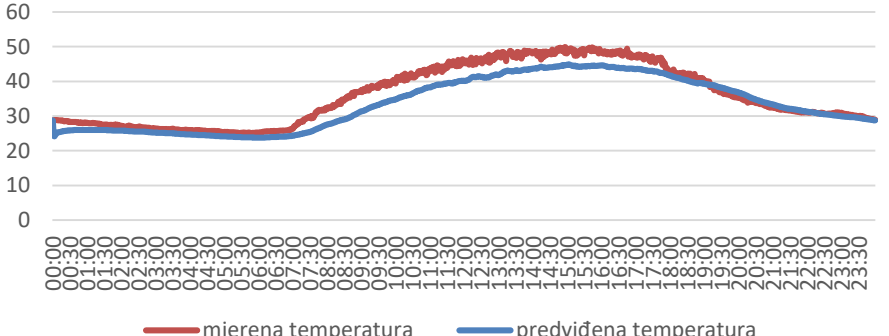
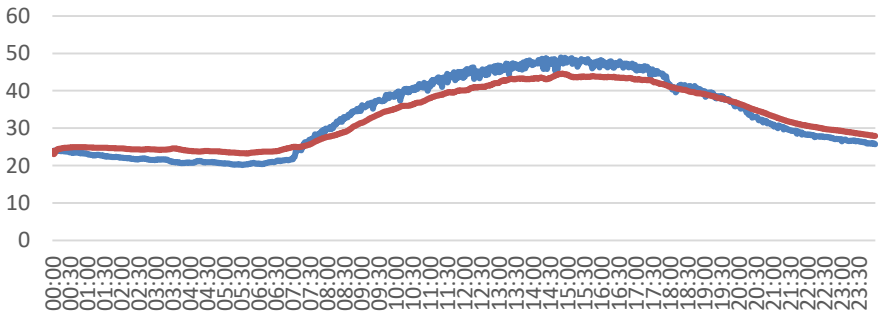


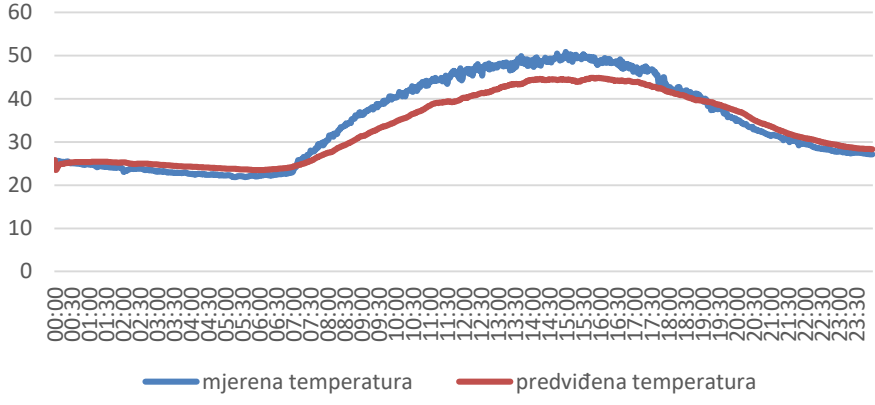
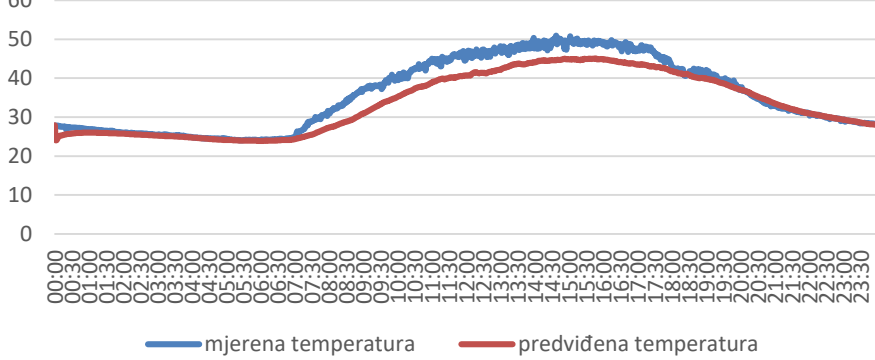
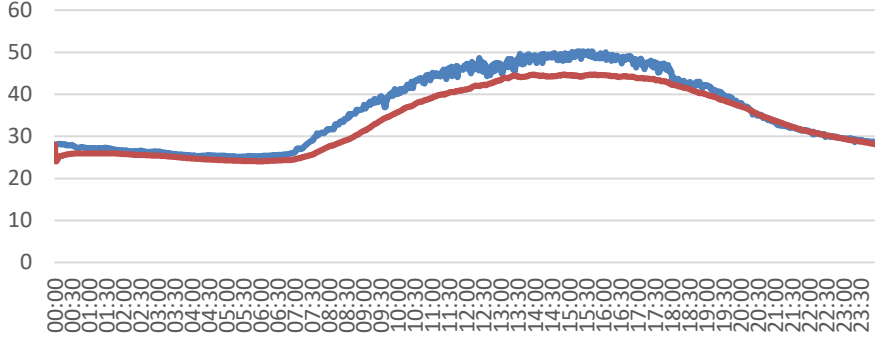
Tablica 6-23: Prikaz kalibracije nelinearnog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline iterativnim postupkom za polje AC11 surf

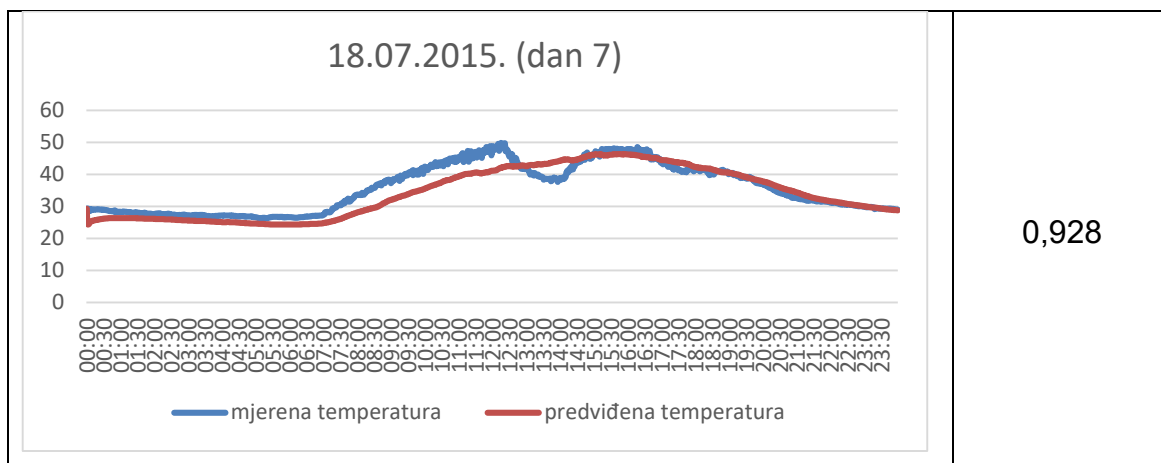
GRAFIČKI PRIKAZ – KOEFICIJENTI AC 11 surf SRPANJ 2015. godina	KORELACIJA
DAN 1  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,99367$ $h_{c2} = 0,96994$ $h_{c3} = 0,92973$
DAN 2  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,99403$ $h_{c2} = 0,97106$ $h_{c3} = 0,92767$
DAN 3  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,99577$ $h_{c2} = 0,98183$ $h_{c3} = 0,95970$



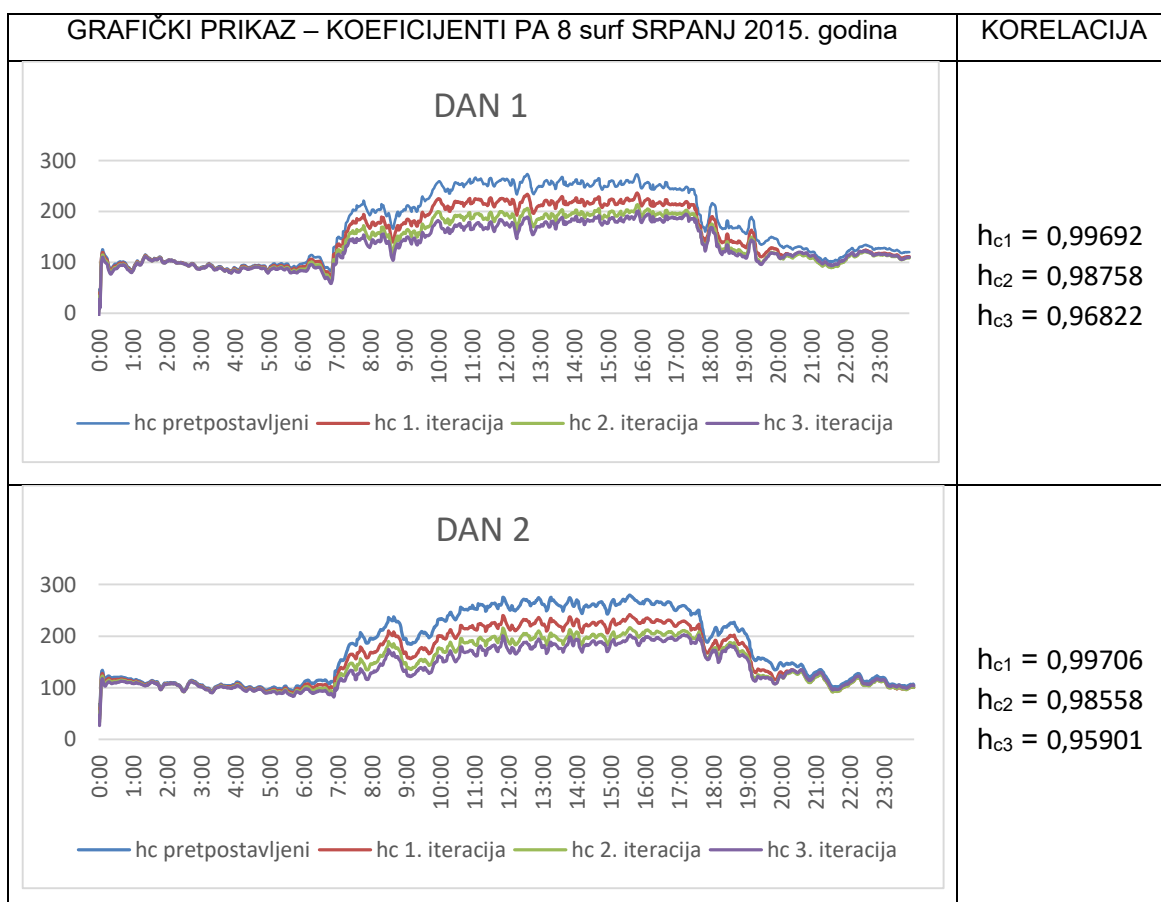
Tablica 6-24: Prikaz izračunatih i mjerenih temperatura površine kolnika uz primjenu nelinearnog kalibriranog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline za polje AC 11 surf

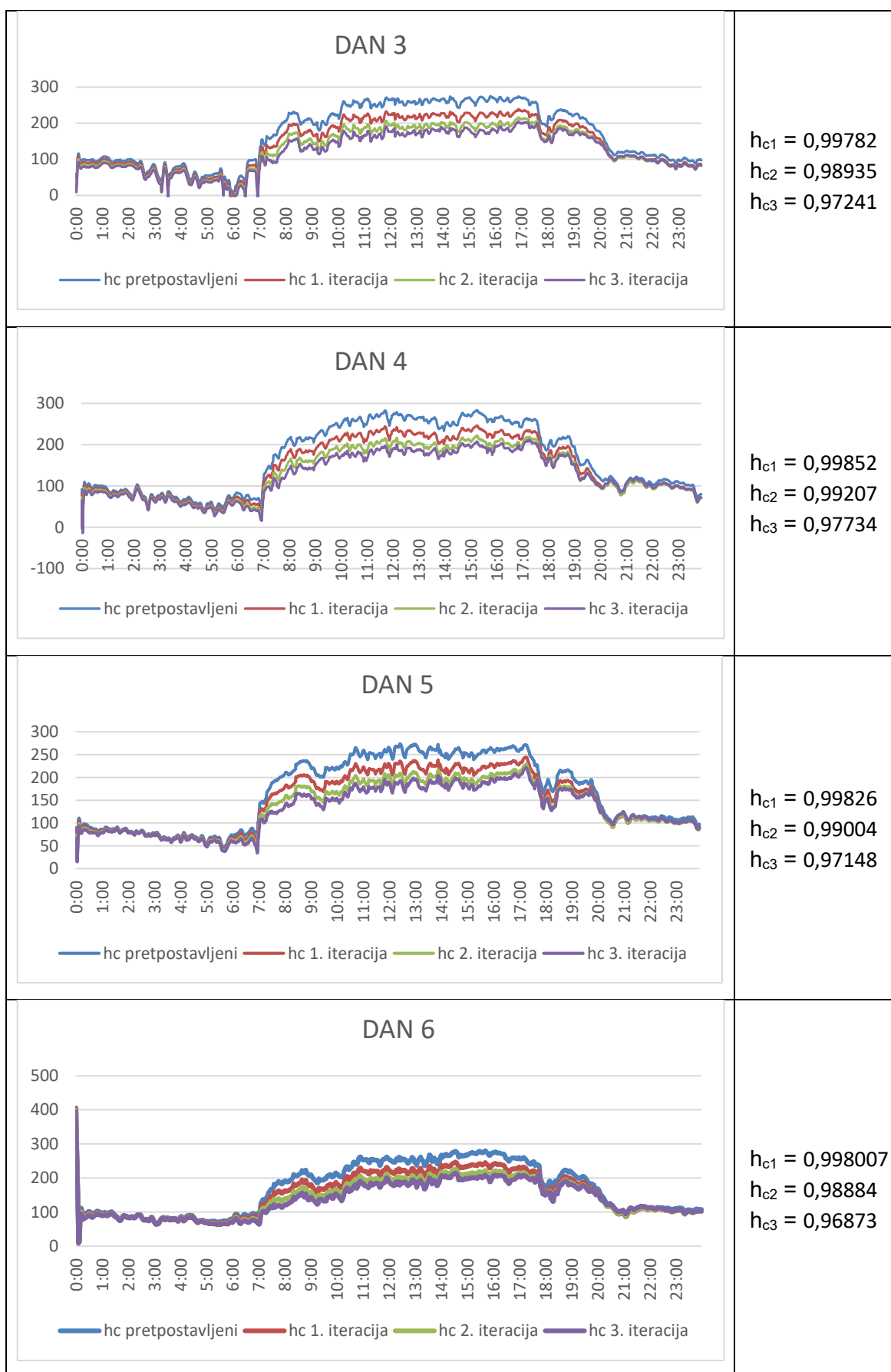
GRAFIČKI PRIKAZ – TEMPERATURE AC 11 surf, SRPANJ 2015. godina	KORELACIJA
05.07.2015. (dan 1)  — mjerena temperatura — predviđena temperatura	0,956
08.07.2015. (dan 2)  — mjerena temperatura — predviđena temperatura	0,971
11.07.2015. (dan 3)  — mjerena temperatura — predviđena temperatura	0,983

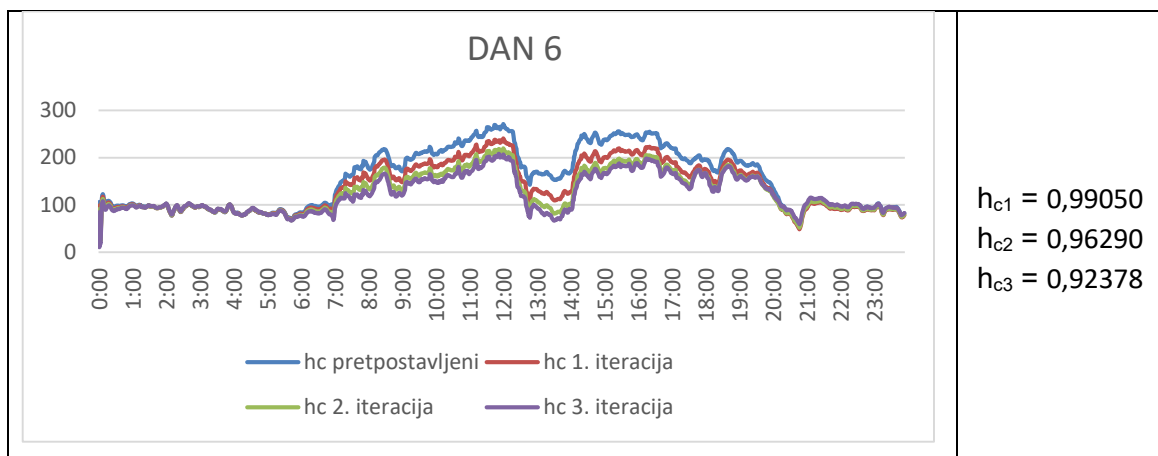
12.07.2015. (dan 4)  — mjerena temperatura — predviđena temperatura	0,972
15.07.2015. (dan 5)  — mjerena temperatura — predviđena temperatura	0,980
16.07.2015. (dan 5)  — mjerena temperatura — predviđena temperatura	0,982



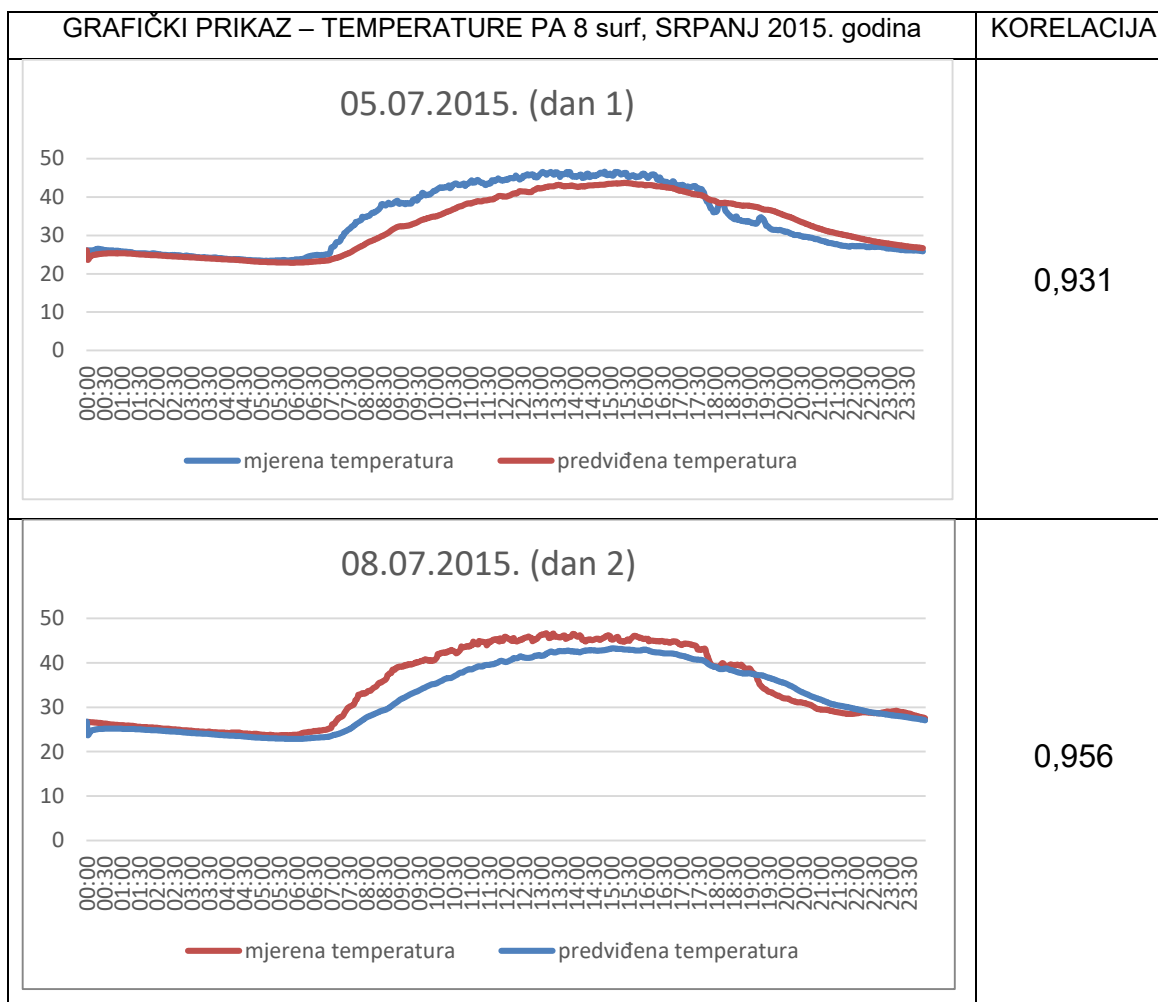
Tablica 6-25: Prikaz kalibracije nelinearnog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline iterativnim postupkom za polje PA 8 surf

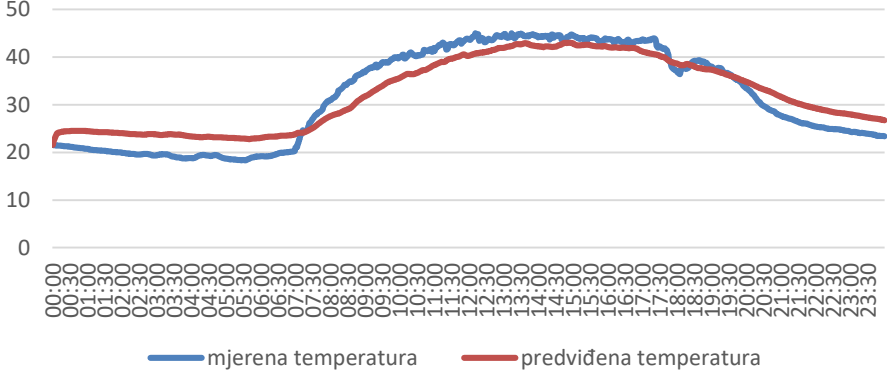
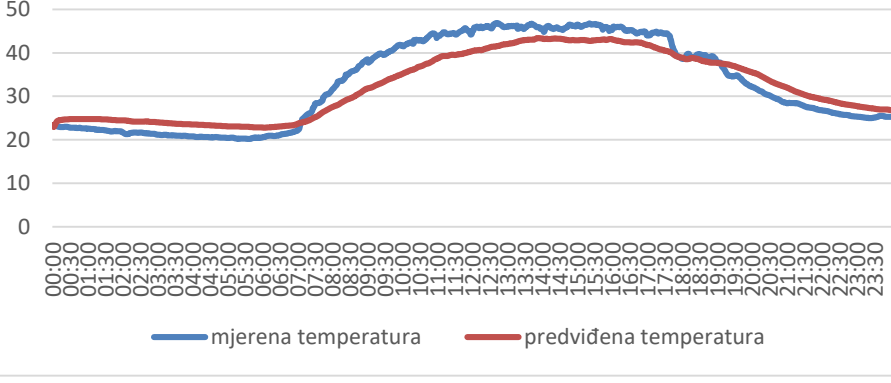
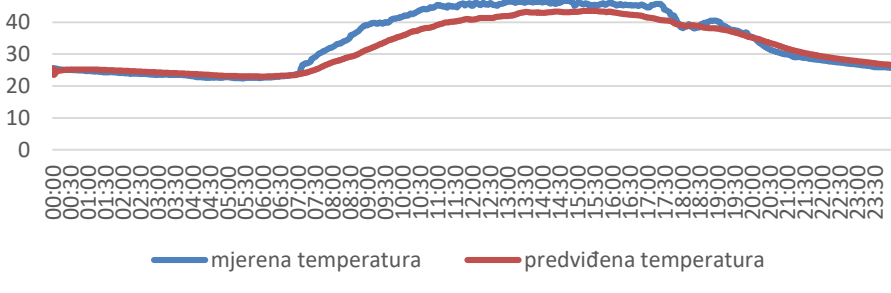


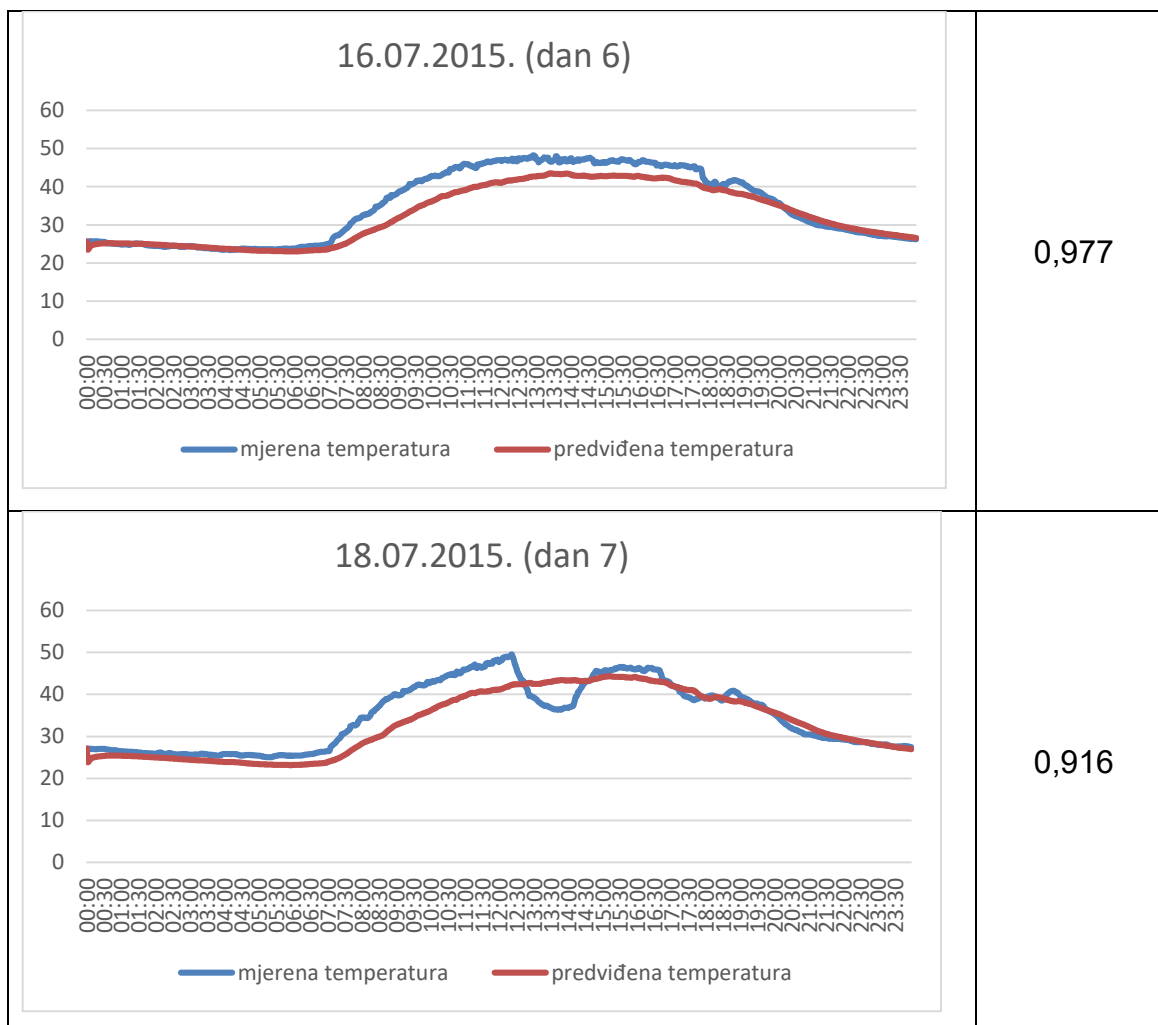




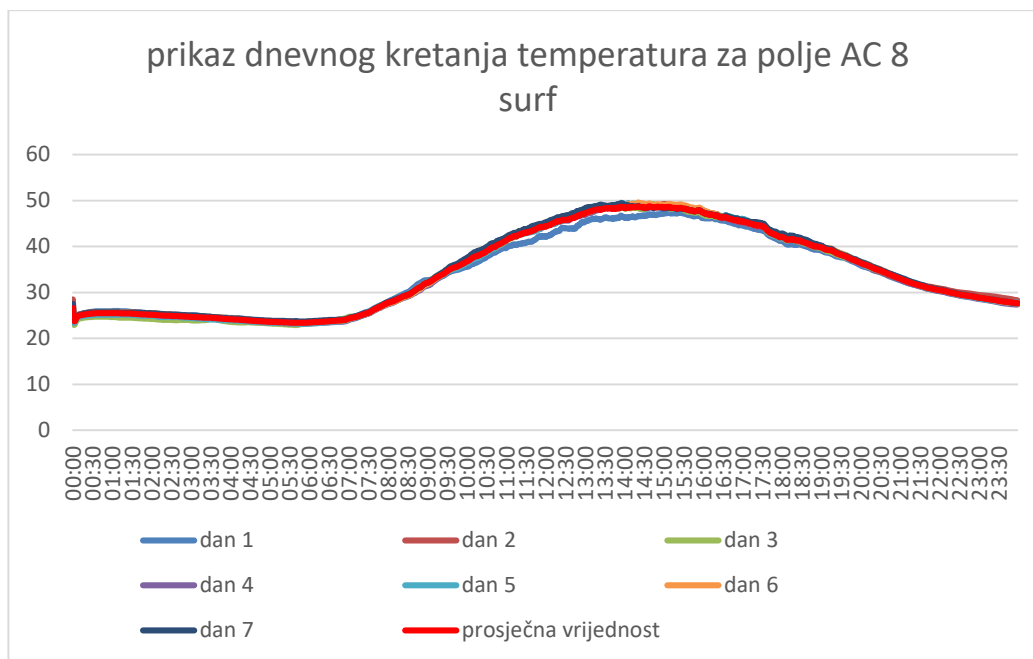
Tablica 6-26: Prikaz izračunatih i mjerenih temperatura površine kolnika uz primjenu nelinearnog kalibriranog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline za polje PA 8 surf



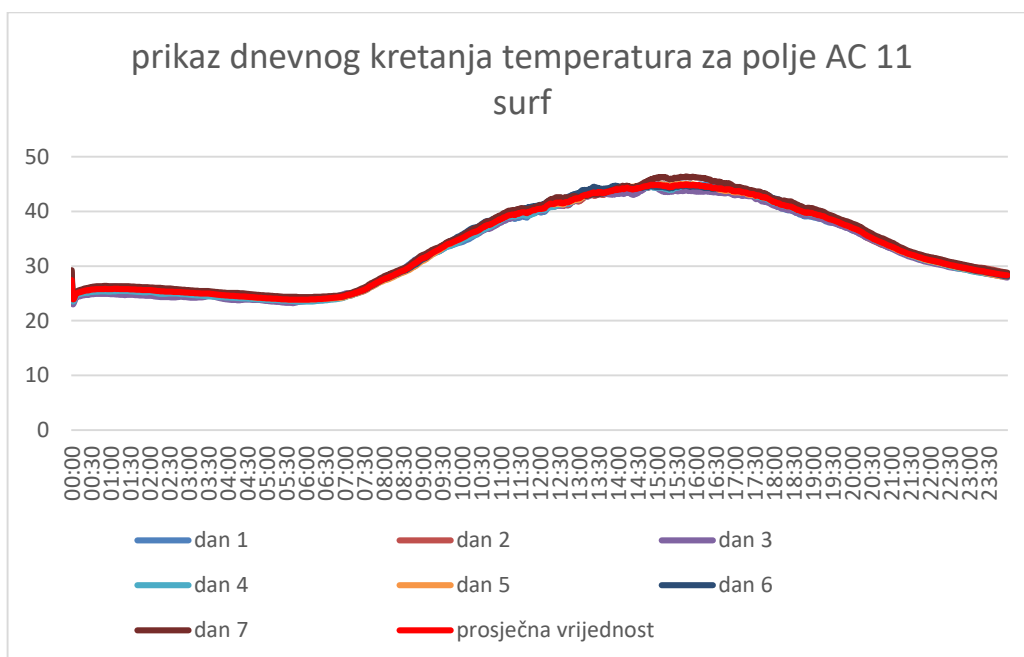
11.07.2015. (dan 3)  — mjerena temperatura — predviđena temperatura	0,972
12.07.2015. (dan 4)  — mjerena temperatura — predviđena temperatura	0,964
15.07.2015. (dan 5)  — mjerena temperatura — predviđena temperatura	0,969



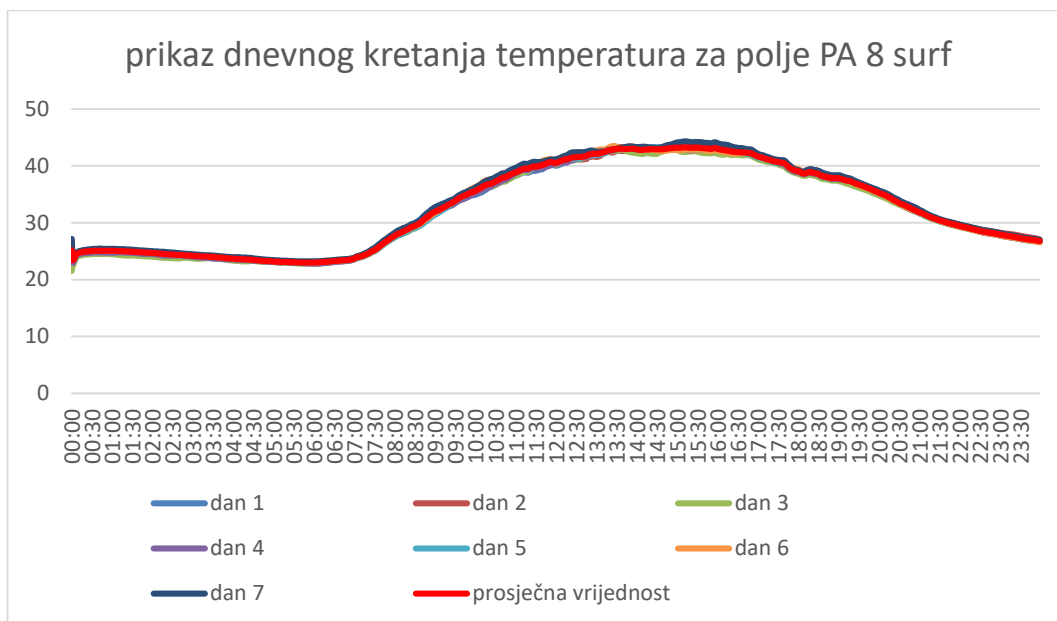
Na Slici 6.29 **Slika 6.29**, Slici 6.30 i Slici 6.31 **Slika 6.31** prikazano je dnevno kretanje izračunatih temperatura površina kolnika (dan 1 – dan 8) za polje AC 8 surf, AC 11 surf i PA 8 surf u odnosu na krivulju prosječnih vrijednosti temperature (označena crvenom bojom). Iz rezultata je vidljivo da nema većeg odstupanja izračunatih temperatura od prosječnih vrijednosti što je računski pokazano izračunom statističkih parametara (standardne devijacije i varijance) za svaki presjek mjerenih podataka (1440 točaka), a rezultati su prikazani u Tablici 6.27, Tablici 6.28 i Tablici 6.29.



Slika 6.29: Prikaz dnevnog kretanja temperatura u odnosu na krivulju prosječne temperature za kolovoz 2013. godine i polje PA 8 surf

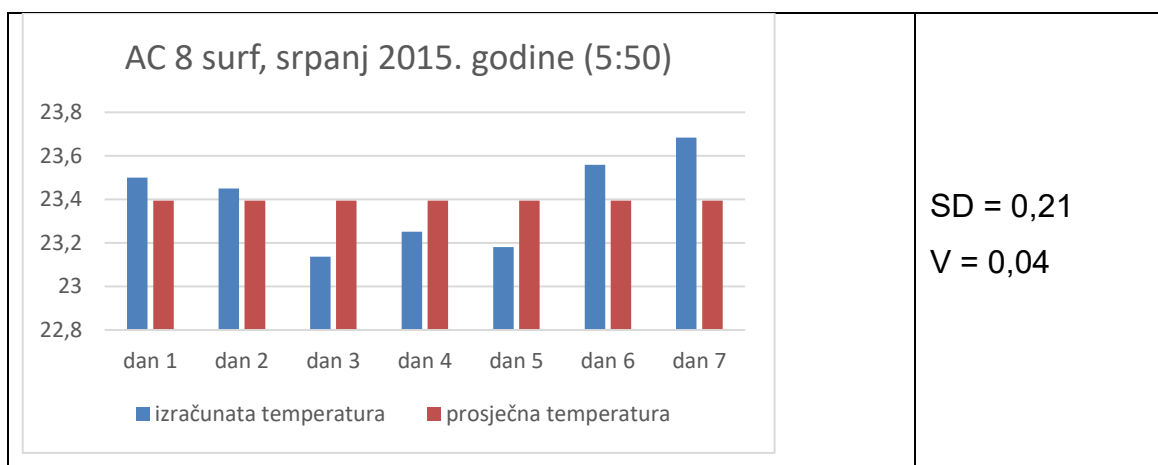


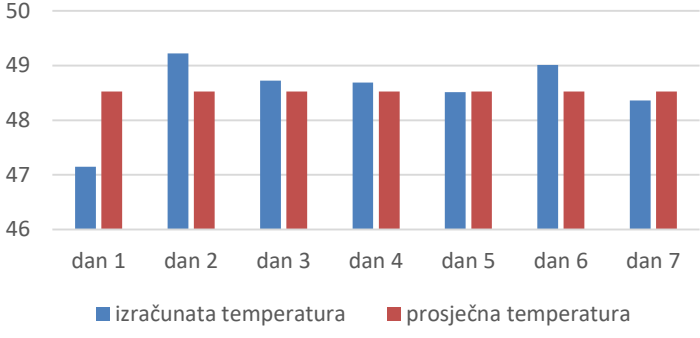
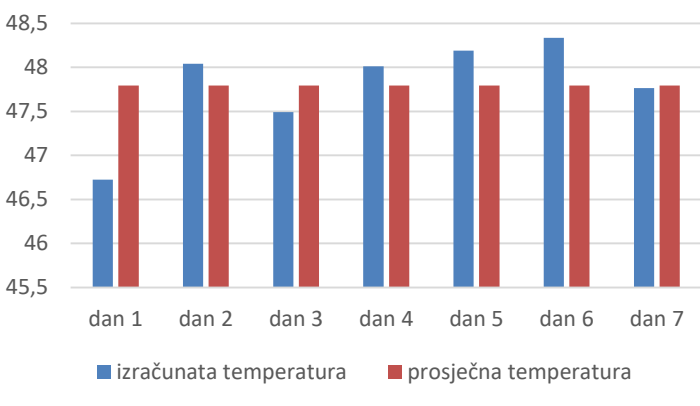
Slika 6.30: Prikaz dnevnog kretanja temperatura u odnosu na krivulju prosječne temperature za srpanj 2015. godine i polje AC 11 surf



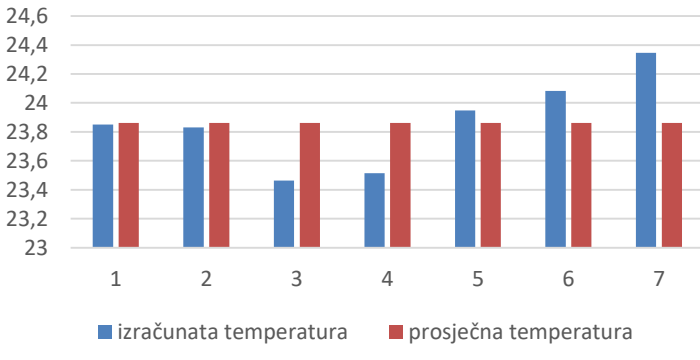
Slika 6.31: Prikaz dnevnog kretanja temperatura u odnosu na krivulju prosječne temperature za srpanj 2015. godine i polje PA 8 surf

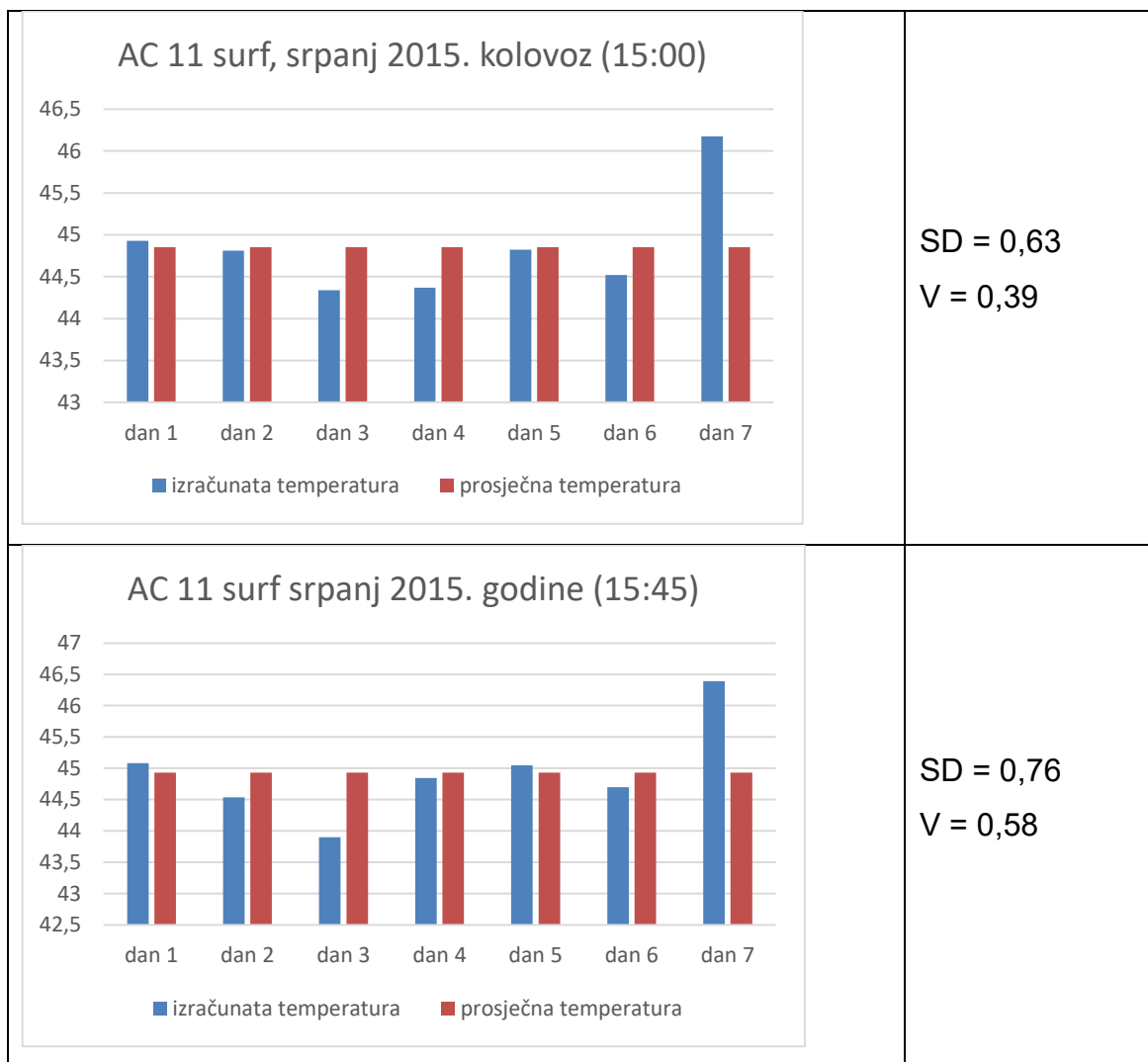
Tablica 6-27: Prikaz odstupanja izračunatih temperatura površine kolnika od prosječnih vrijednosti temperatura za kritične točke



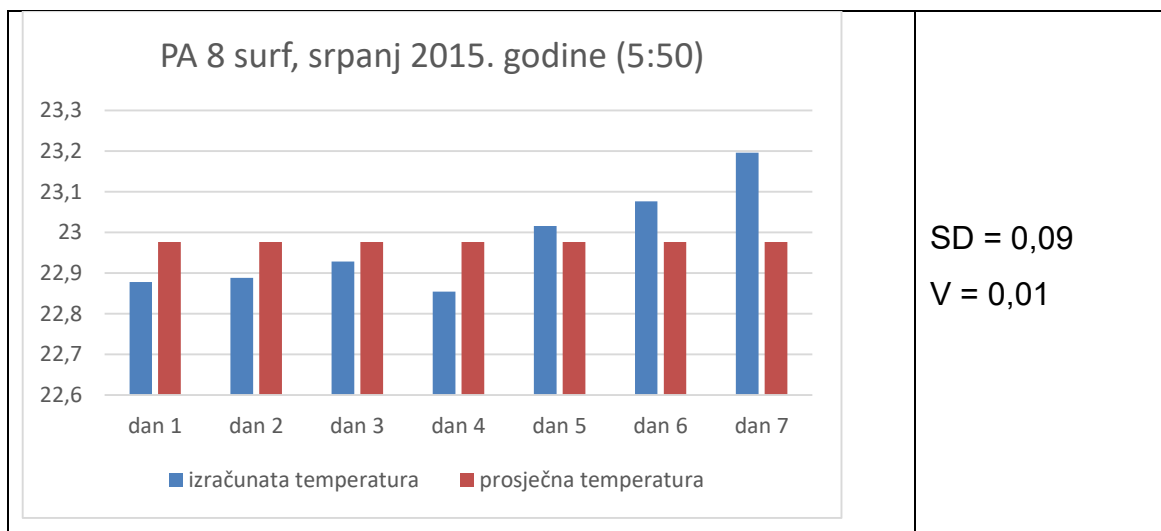
AC 8 surf, srpanj 2015. kolovoz (15:00)  ■ izračunata temperatura ■ prosječna temperatura		SD = 0,67 V = 0,45
AC 8 surf srpanj 2015. godine (15:45)  ■ izračunata temperatura ■ prosječna temperatura		SD = 0,55 V = 0,30

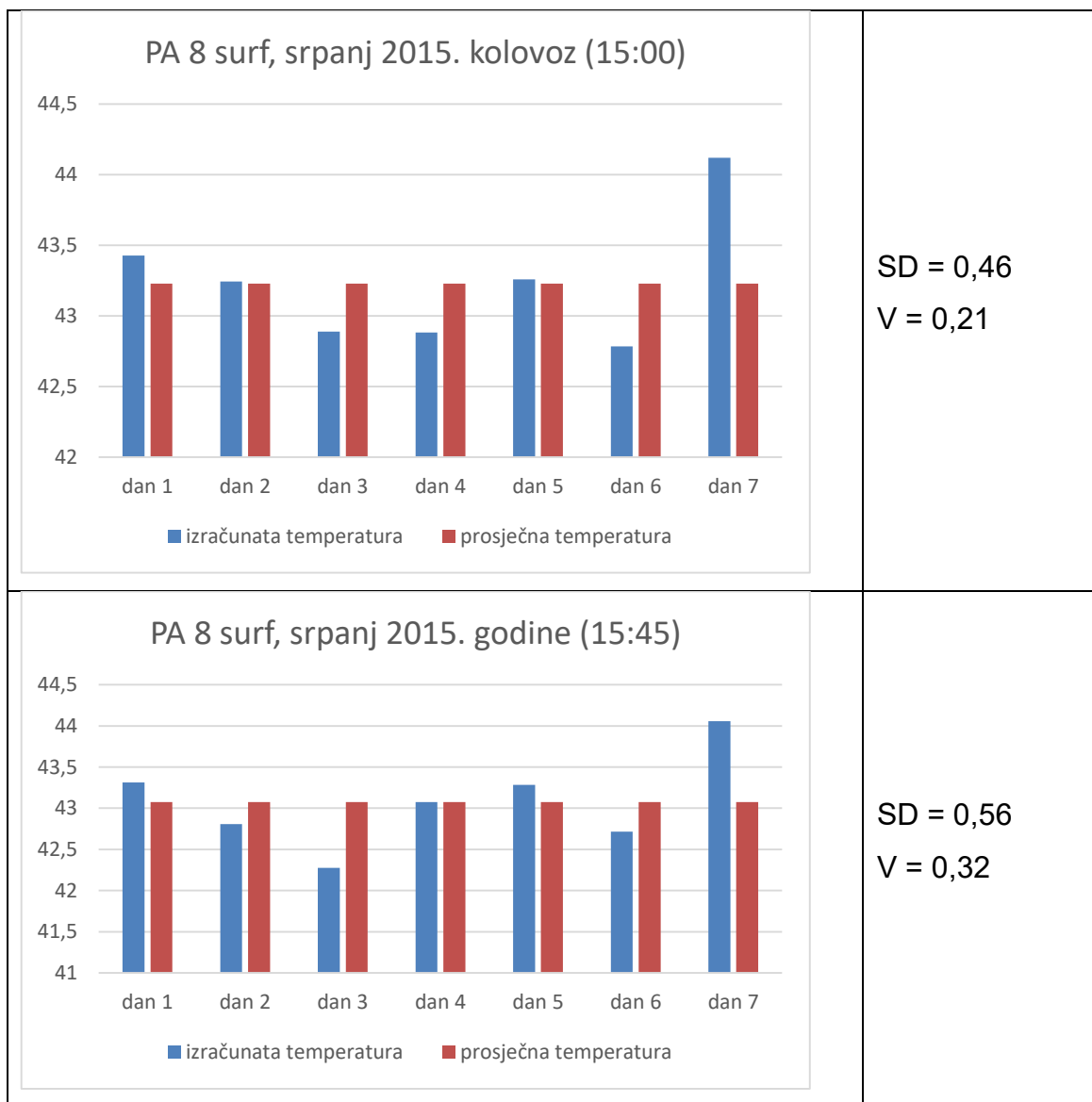
Tablica 6-28: Prikaz odstupanja izračunatih temperatura površine kolnika od prosječnih vrijednosti temperatura za kritične točke

AC 11 surf, srpanj 2015. godine (5:50)  ■ izračunata temperatura ■ prosječna temperatura		SD = 0,24 V = 0,06
---	--	-------------------------------



Tablica 6-29: Prikaz odstupanja izračunatih temperatura površine kolnika od prosječnih vrijednosti temperatura za kritične točke

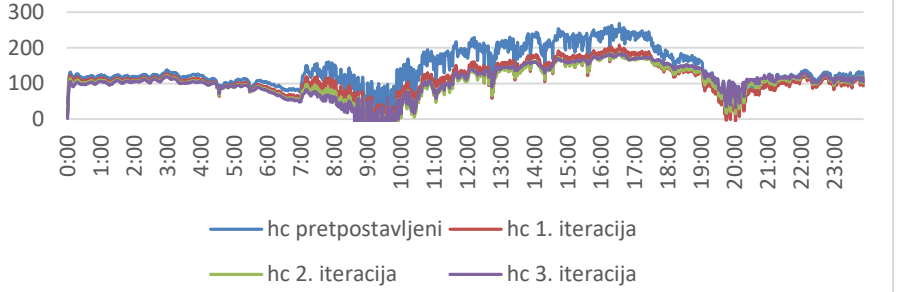
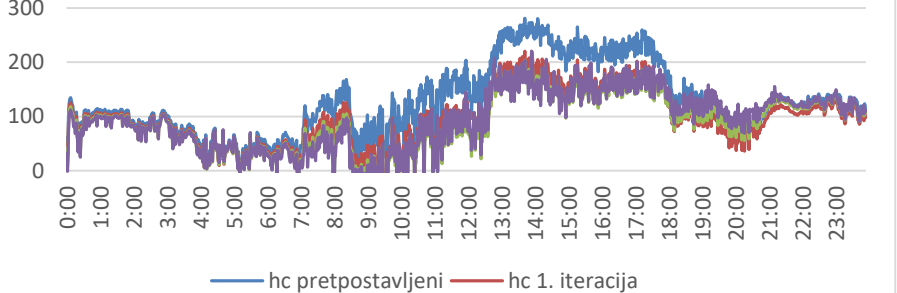
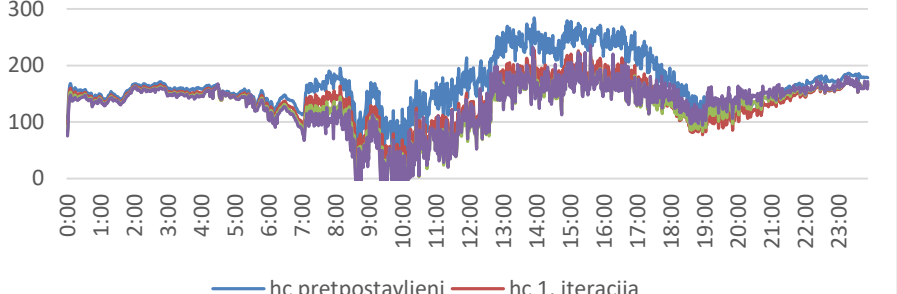


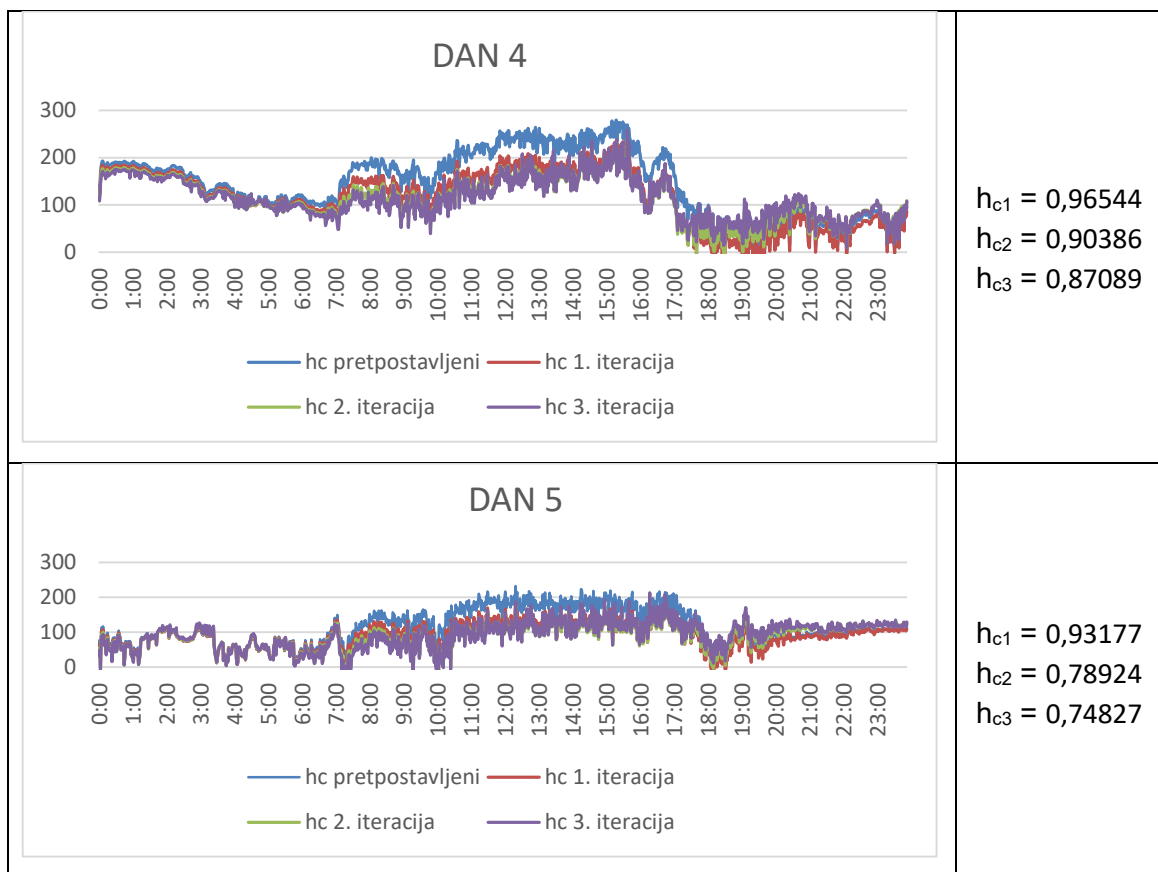


6.4.4. Mjerenja provedena u kolovozu 2015. godine

U Tablici 6.30, Tablici 6.32 i Tablici 6.34 prikazan je iterativni postupak kalibracije koeficijenta konvektivnog prijenosa topline za mjesec kolovoz 2015 godine za polje AC 8 surf, AC 11 surf i PA 8 surf. Iz grafova je vidljiva promjena koeficijenta konvektivnog prijenosa topline svakom iteracijom što je prikazano koeficijentima korelacije za svaki iterativni korak.

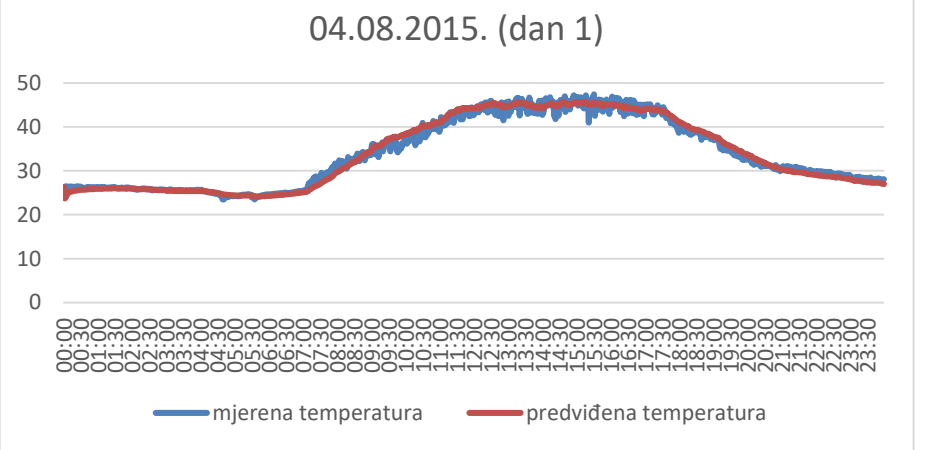
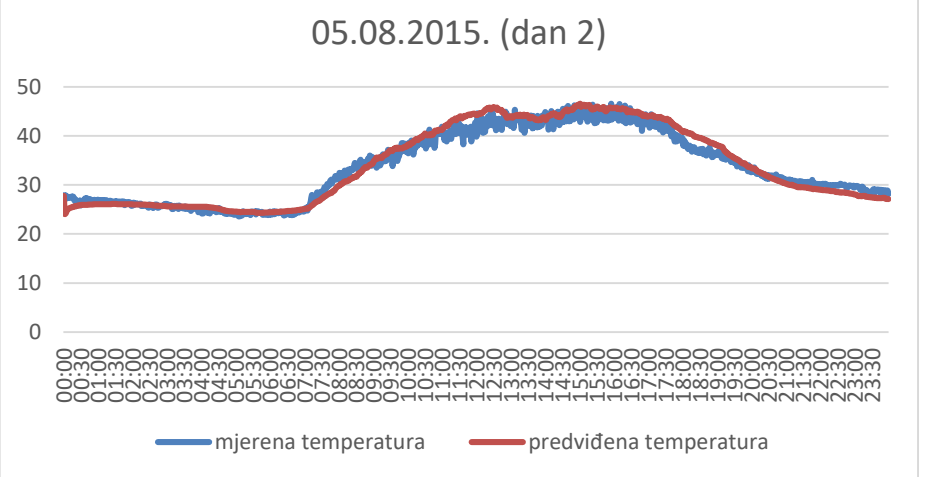
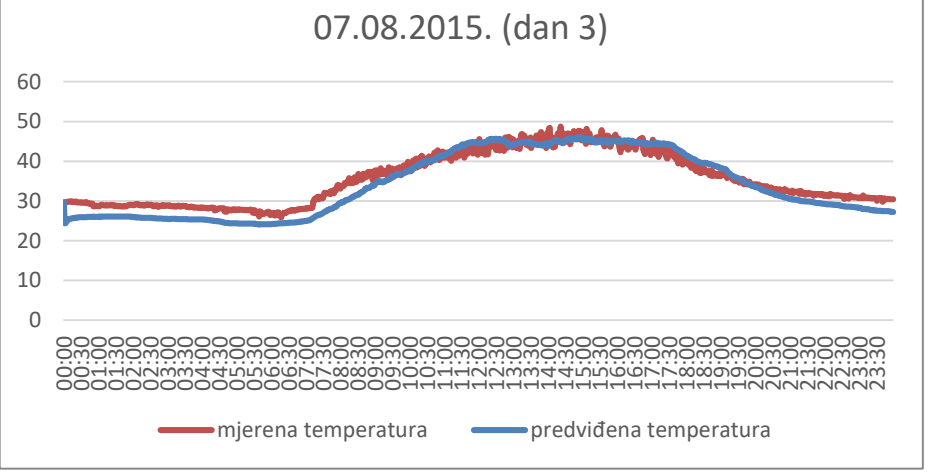
Tablica 6-30: Prikaz kalibracije nelinearnog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline iterativnim postupkom za polje AC8 surf

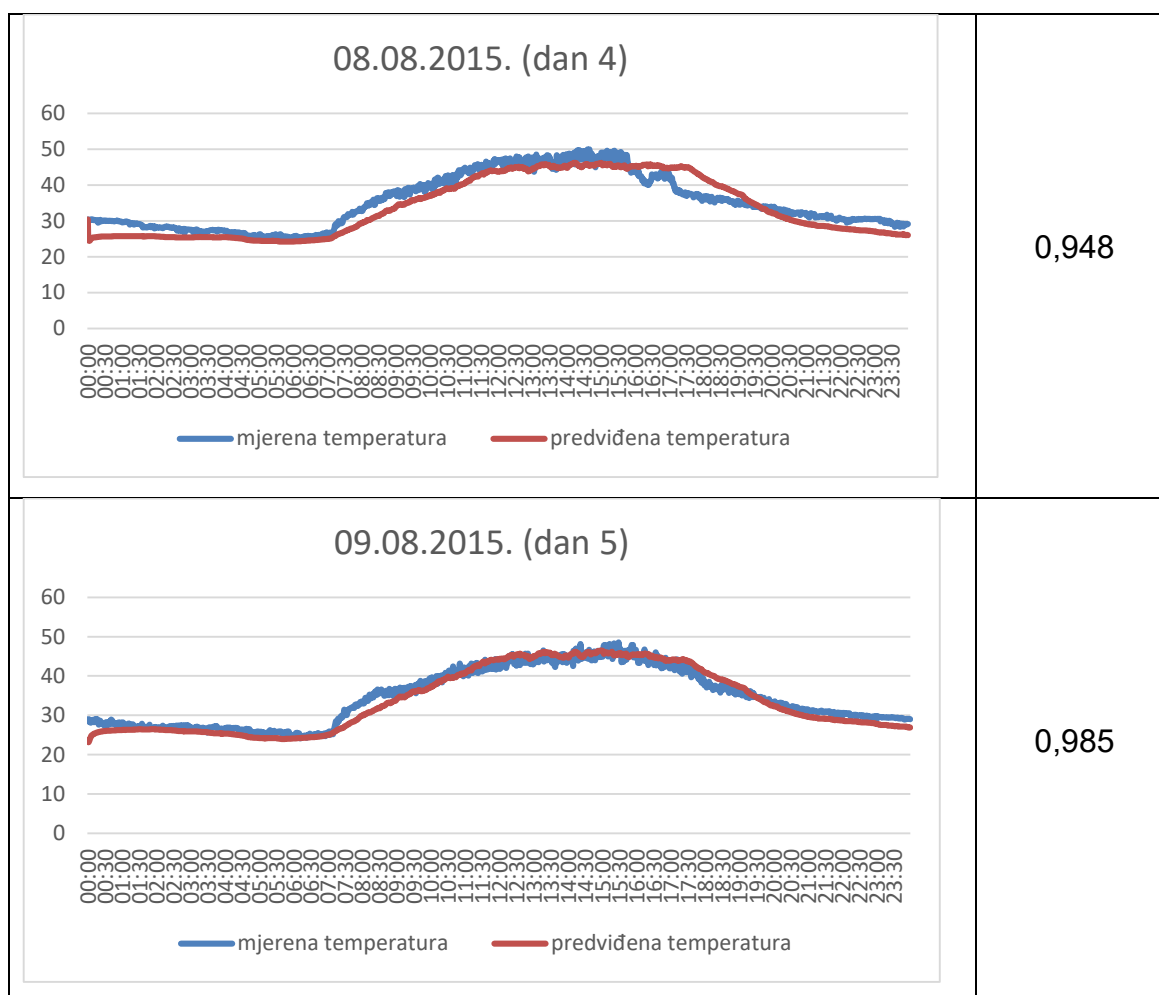
GRAFIČKI PRIKAZ – KOEFICIJENTI AC 8 surf KOLOVOZ 2015. godina	KORELACIJA
DAN 1  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,93227$ $h_{c2} = 0,84540$ $h_{c3} = 0,82260$
DAN 2  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,94936$ $h_{c2} = 0,87675$ $h_{c3} = 0,85568$
DAN 3  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,87820$ $h_{c2} = 0,76601$ $h_{c3} = 0,73805$



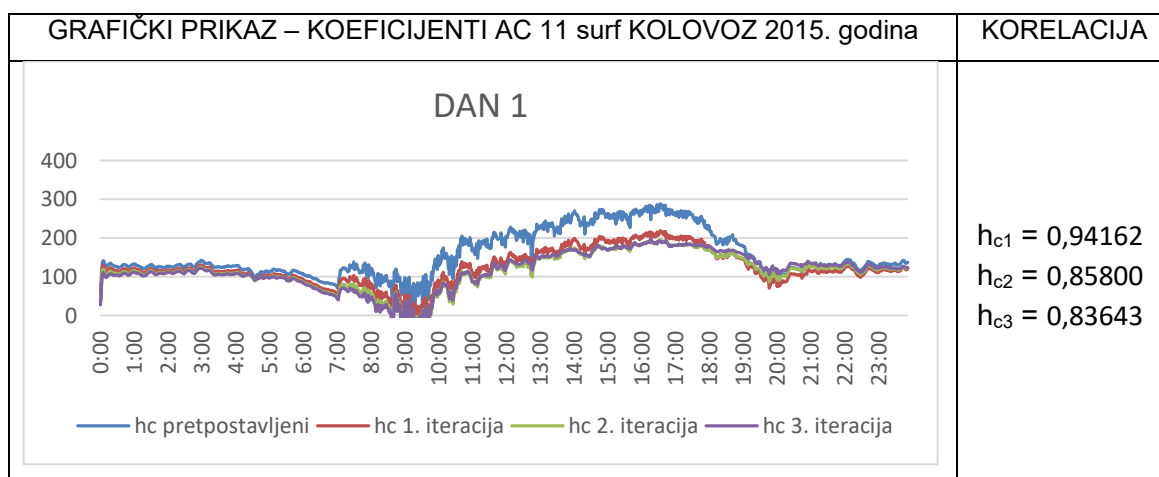
U Tablici 6.31, Tablici 6.33 i Tablici 6.35 prikazani su grafovi mjerene i izračunate temperature sa uključenim kalibriranim koeficijentima konvektivnog prijenosa topline u 3. iteraciji prikazanim u Tablici 6.30, Tablici 6.32 i Tablici 6.34. Iz prikaza dnevnog kretanja temperature te usporedbom izračunatih vrijednosti temperatura površine s mjerenim podacima vidljivo je da izrađeni model slijedi zadovoljavajući izračun temperature što je opisano koeficijentima korelacije prikazanim u tablicama.

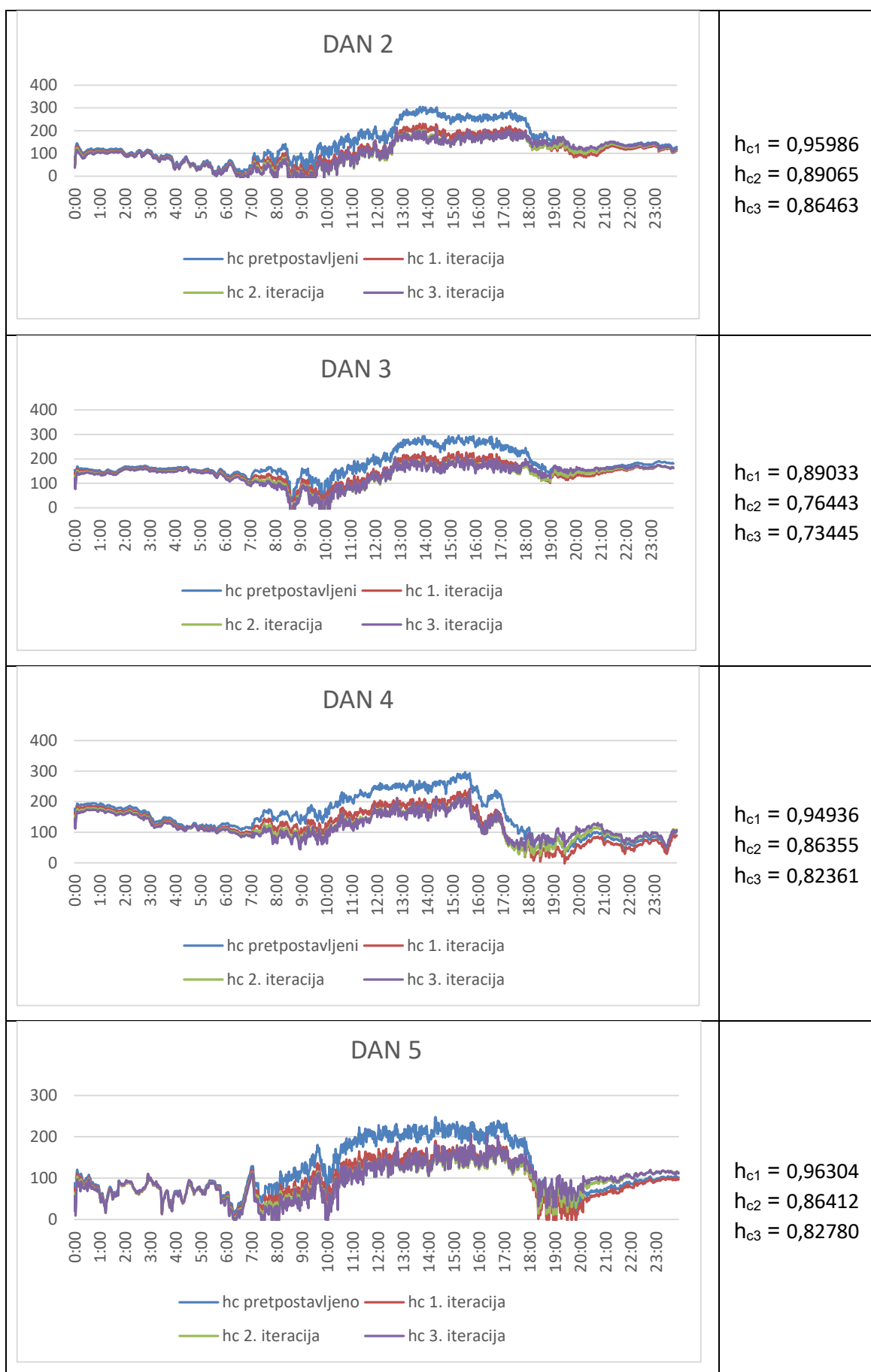
Tablica 6-31: Prikaz izračunatih i mjerenih temperatura površine kolnika uz primjenu nelinearnog kalibriranog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline za polje AC 8 surf

GRAFIČKI PRIKAZ – TEMPERATURE AC 8 surf, KOLOVOZ 2015. godina	KORELACIJA
04.08.2015. (dan 1)  — mjerena temperatura — predviđena temperatura	0,994
05.08.2015. (dan 2)  — mjerena temperatura — predviđena temperatura	0,988
07.08.2015. (dan 3)  — mjerena temperatura — predviđena temperatura	0,983

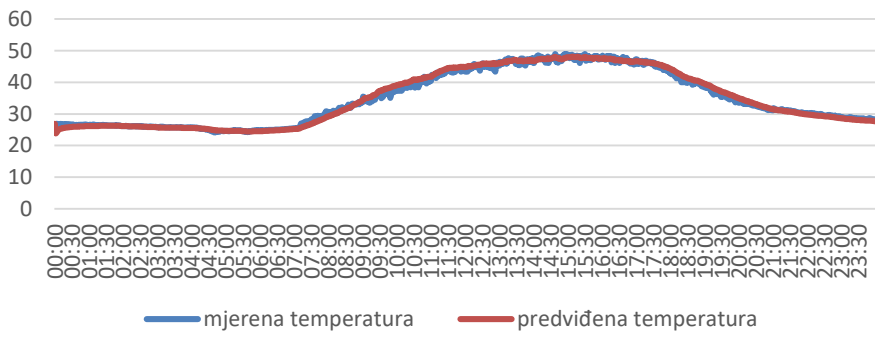
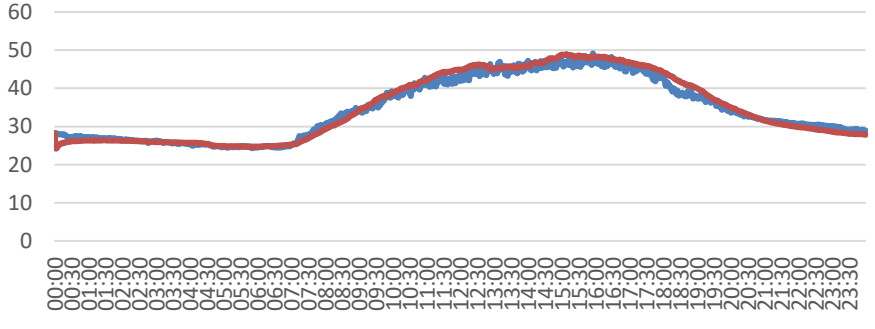
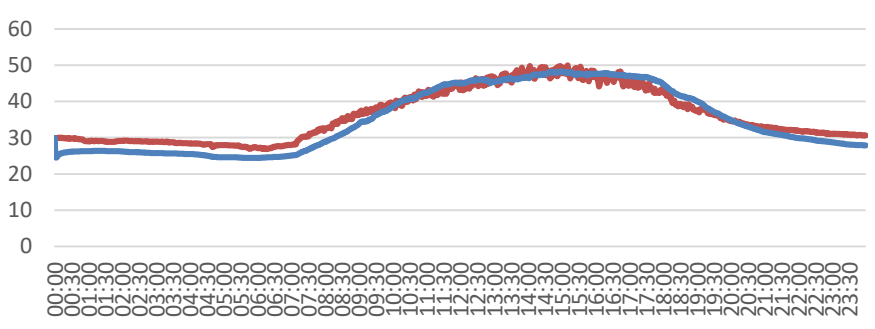


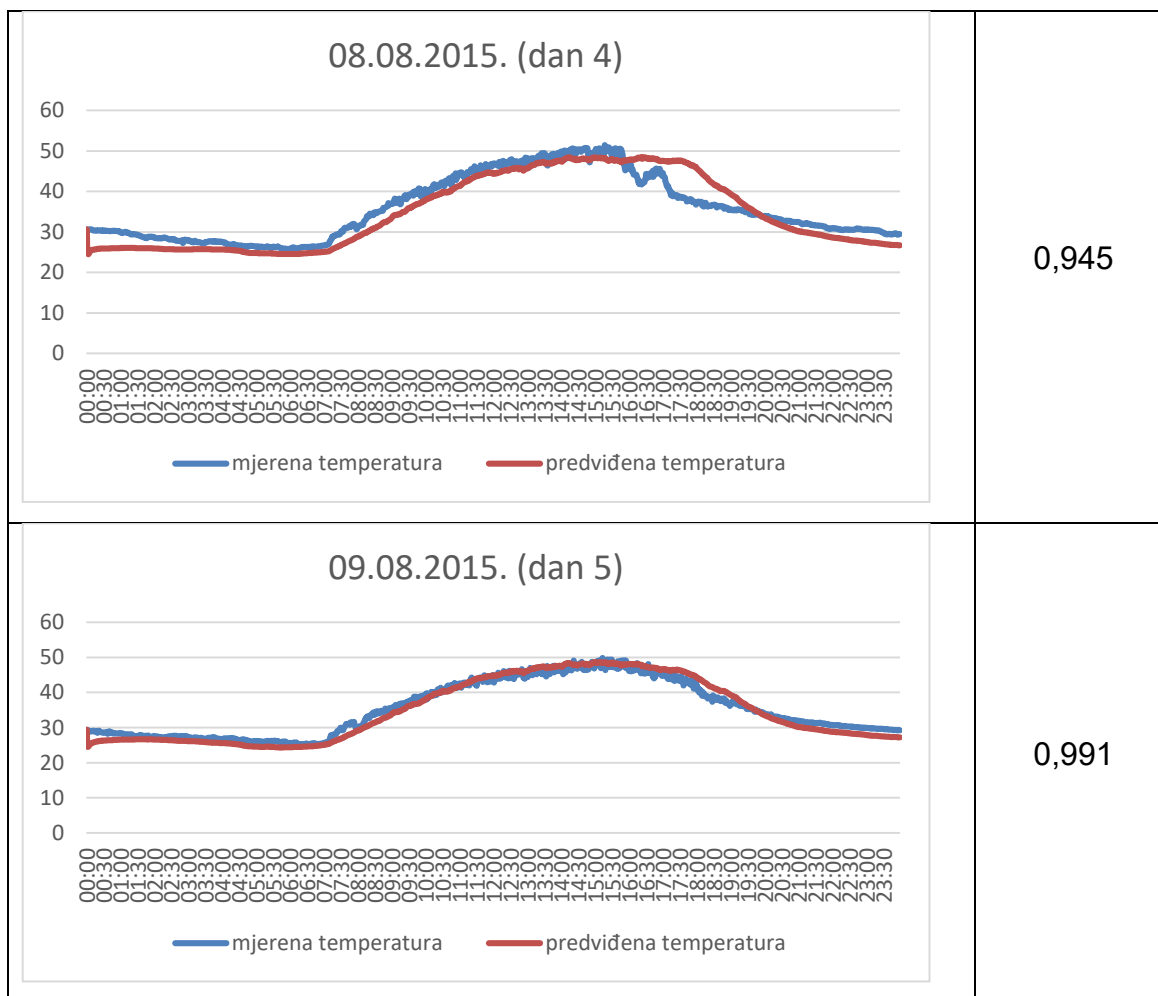
Tablica 6-32: Prikaz kalibracije nelinearnog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline iterativnim postupkom za polje AC11 surf



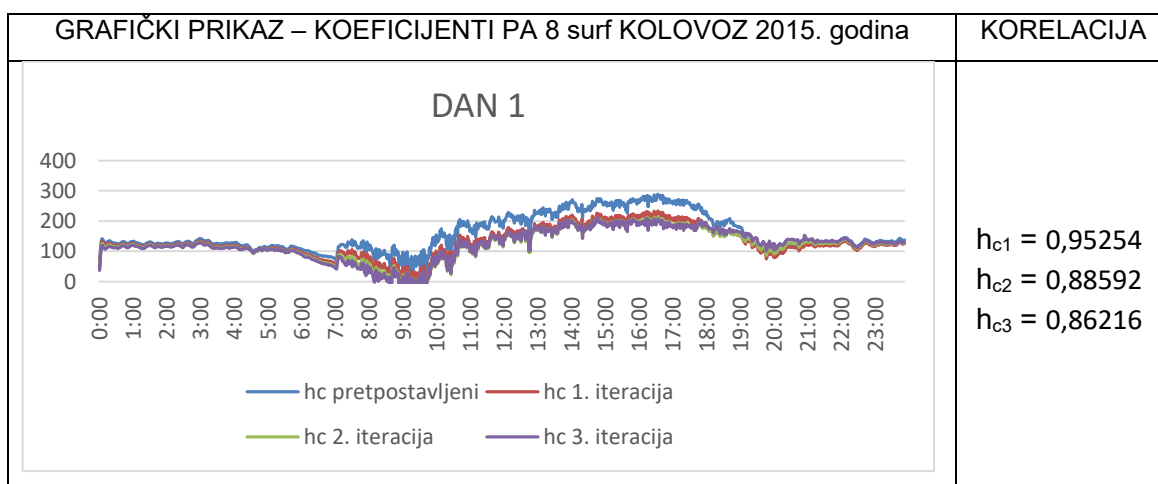


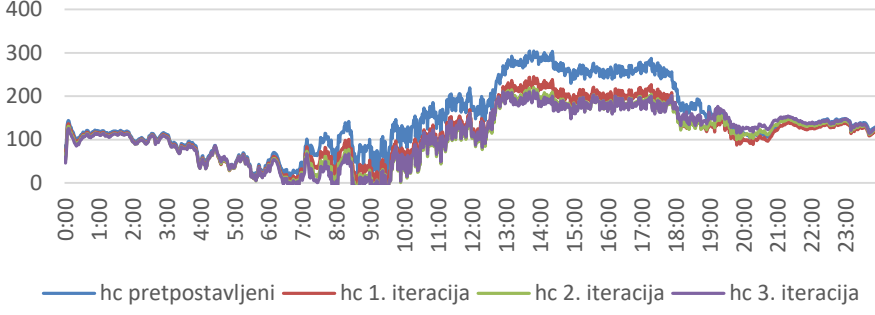
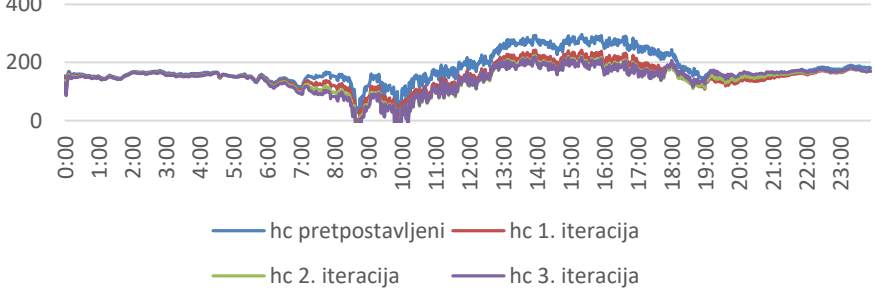
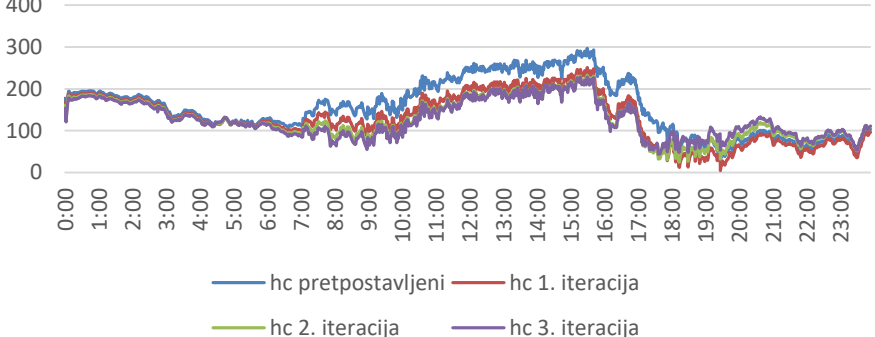
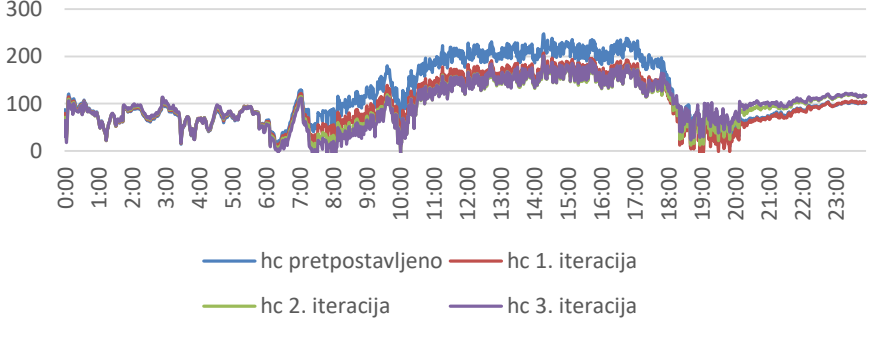
Tablica 6-33: Prikaz izračunatih i mjerenih temperatura površine kolnika uz primjenu nelinearnog kalibriranog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline za polje AC 11 surf

GRAFIČKI PRIKAZ – TEMPERATURE AC 11 surf, KOLOVOZ 2015. godina	KORELACIJA
04.08.2015. (dan 1)  — mjerena temperatura — predviđena temperatura	0,997
05.08.2015. (dan 2)  — mjerena temperatura — predviđena temperatura	0,993
07.08.2015. (dan 3)  — mjerena temperatura — predviđena temperatura	0,987

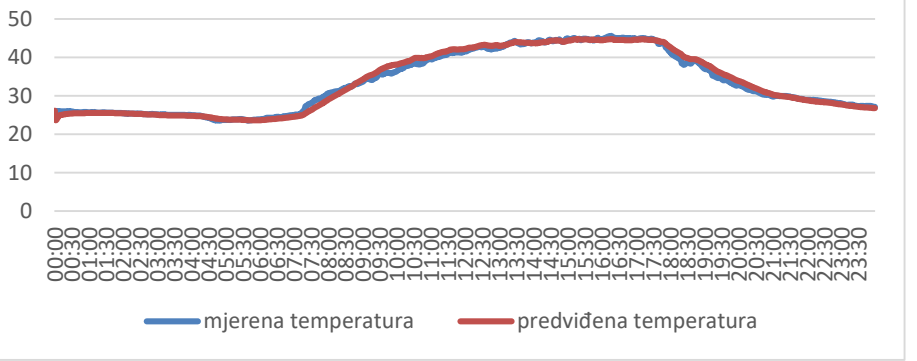
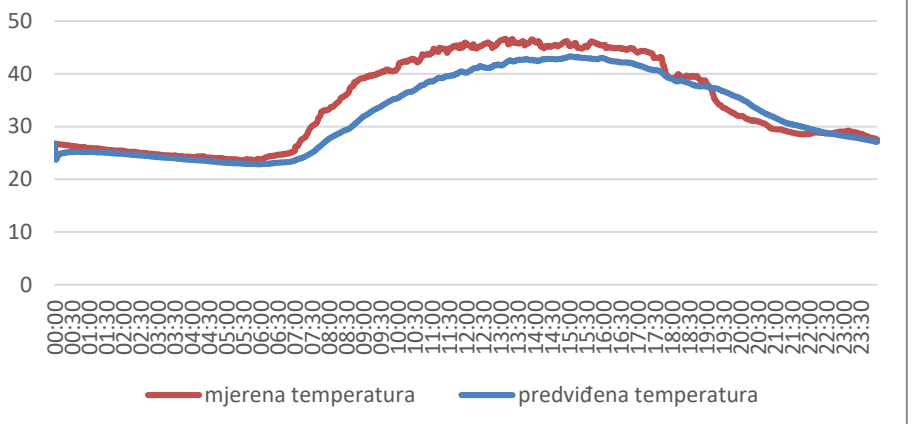
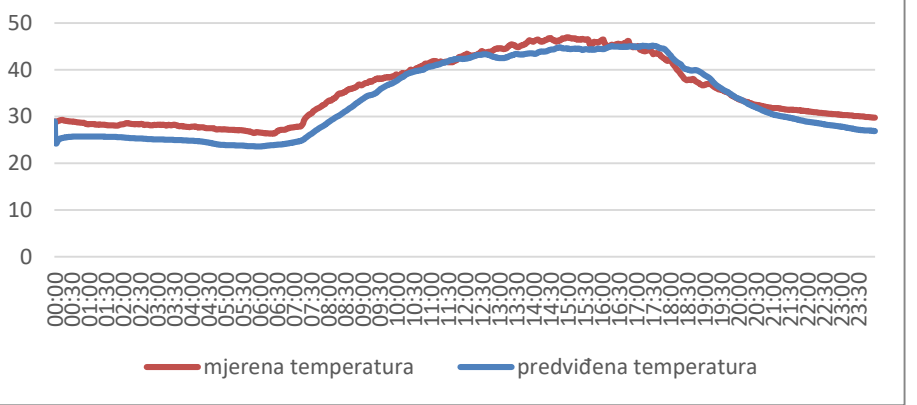


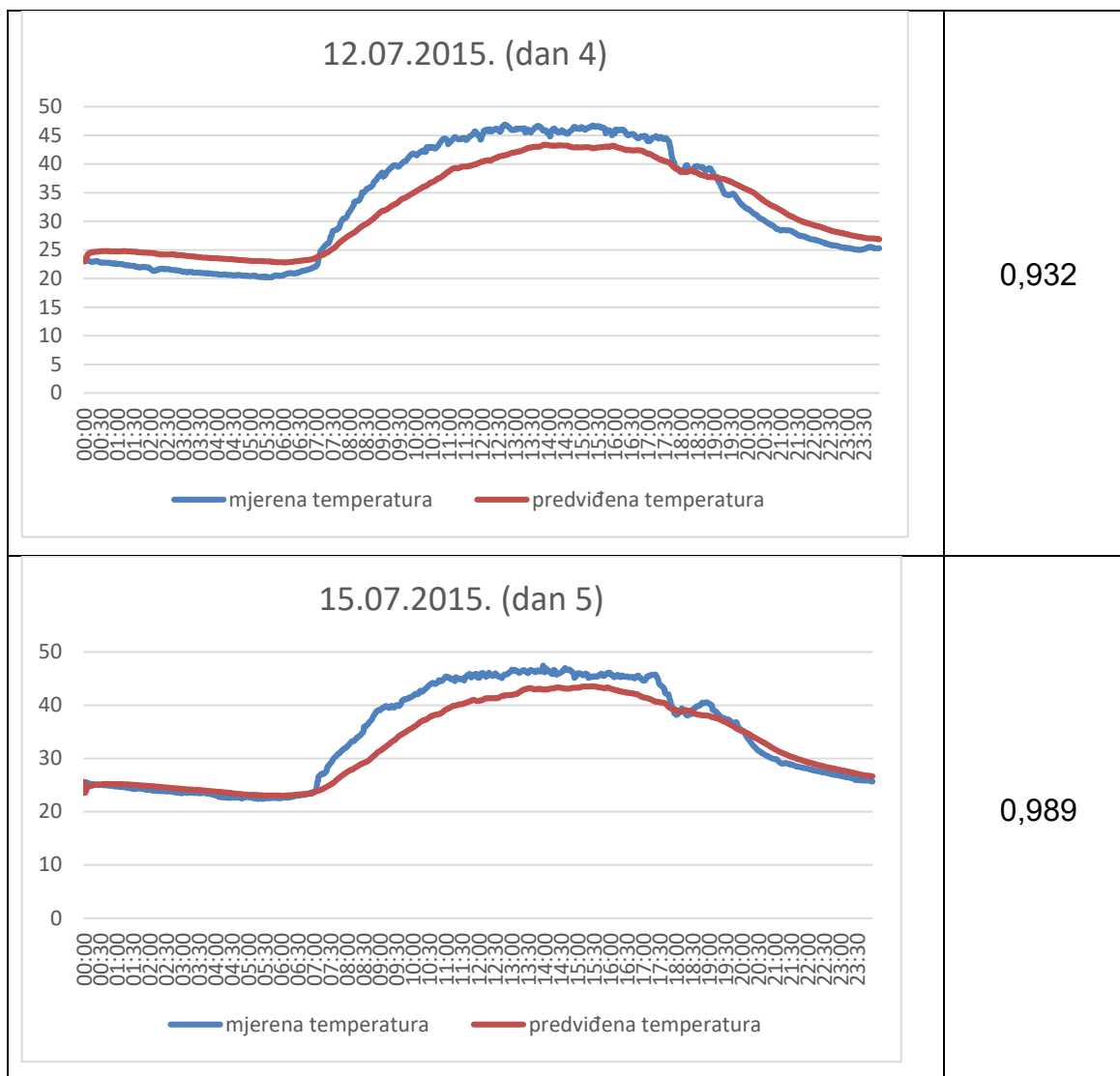
Tablica 6-34: Prikaz kalibracije nelinearnog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline iterativnim postupkom za polje PA 8 surf



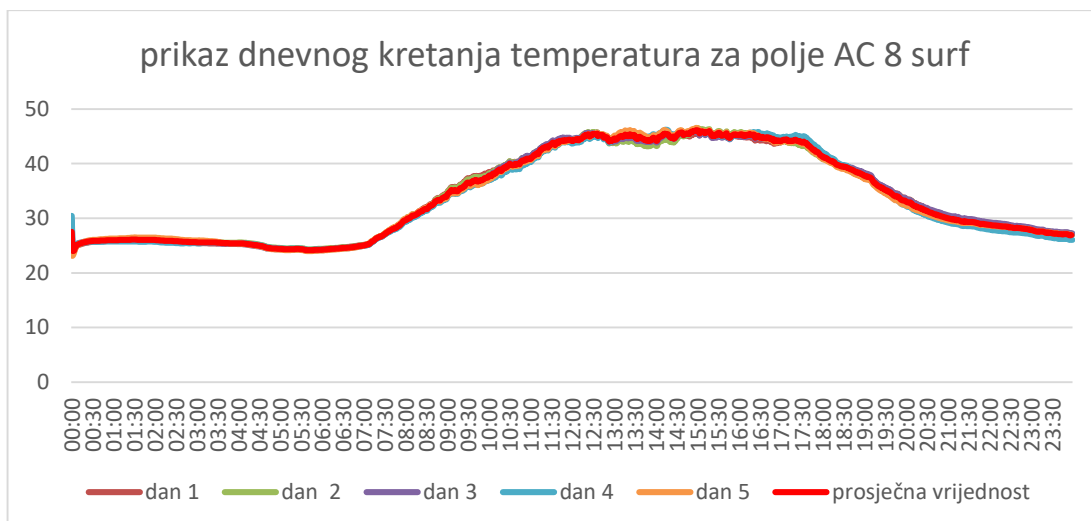
DAN 2  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,96698$ $h_{c2} = 0,91187$ $h_{c3} = 0,88679$
DAN 3  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,91858$ $h_{c2} = 0,81869$ $h_{c3} = 0,78036$
DAN 4  — hc pretpostavljeni — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,96231$ $h_{c2} = 0,89667$ $h_{c3} = 0,85772$
DAN 5  — hc pretpostavljeno — hc 1. iteracija — hc 2. iteracija — hc 3. iteracija	$h_{c1} = 0,96967$ $h_{c2} = 0,89580$ $h_{c3} = 0,85991$

Tablica 6-35: Prikaz izračunatih i mjerenih temperatura površine kolnika uz primjenu nelinearnog kalibriranog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline za polje PA 8 surf

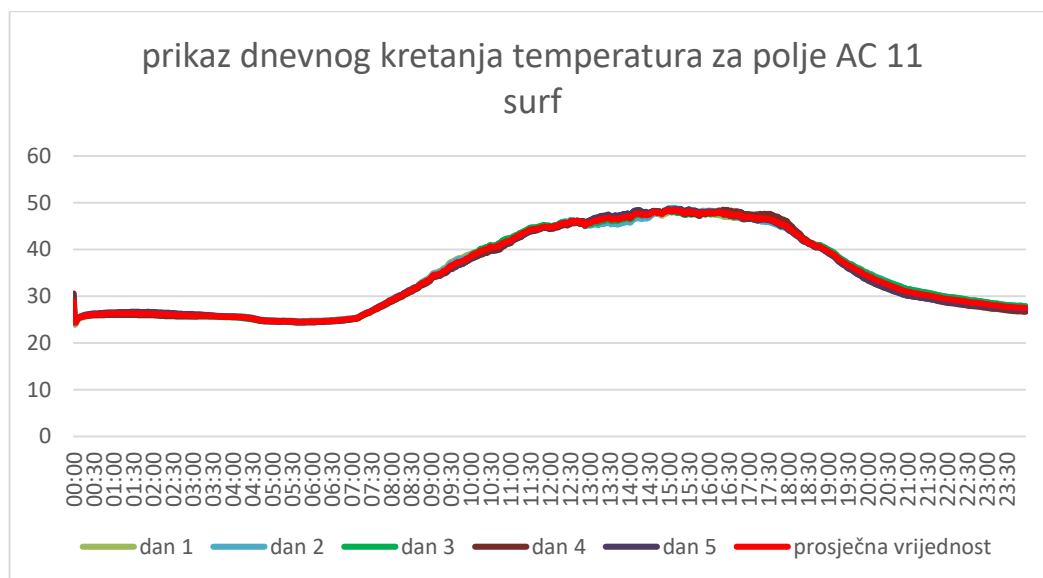
GRAFIČKI PRIKAZ – TEMPERATURE PA 8 surf, KOLOVOZ 2015. godina	KORELACIJA
04.08.2015.(dan 1) 	0,996
08.07.2015. (dan 2) 	0,994
07.08.2015. (dan 3) 	0,985



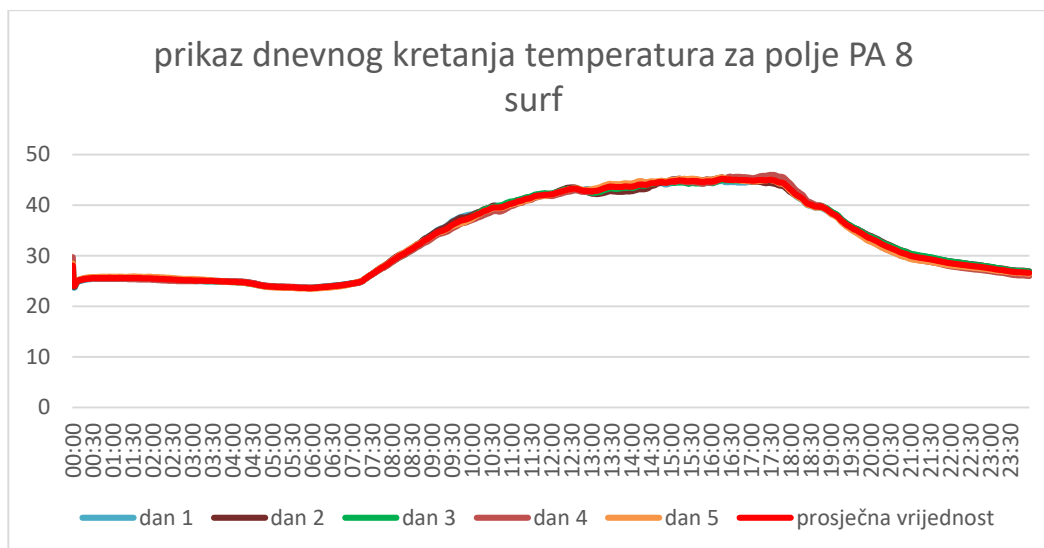
Na Slici 6.32, Slici 6.33 i Slici 6.34 prikazano je dnevno kretanje izračunatih temperatura površina kolnika (dan 1 – dan 8) za polje AC 8 surf, AC 11 surf i PA 8 surf u odnosu na krivulju prosječnih vrijednosti temperature (označena crvenom bojom). Iz rezultata je vidljivo da nema većeg odstupanja izračunatih temperatura od prosječnih vrijednosti što je računski pokazano izračunom statističkih parametara (standardne devijacije i varijance) za svaki presjek mjerenih podataka (1440 točaka), a rezultati su prikazani u Tablici 6.36, Tablici 6.37 i Tablici 6.38..



Slika 6.32: Prikaz dnevnog kretanja temperatura u odnosu na krivulju prosječne temperature za kolovoz 2015. godine i polje AC 8 surf



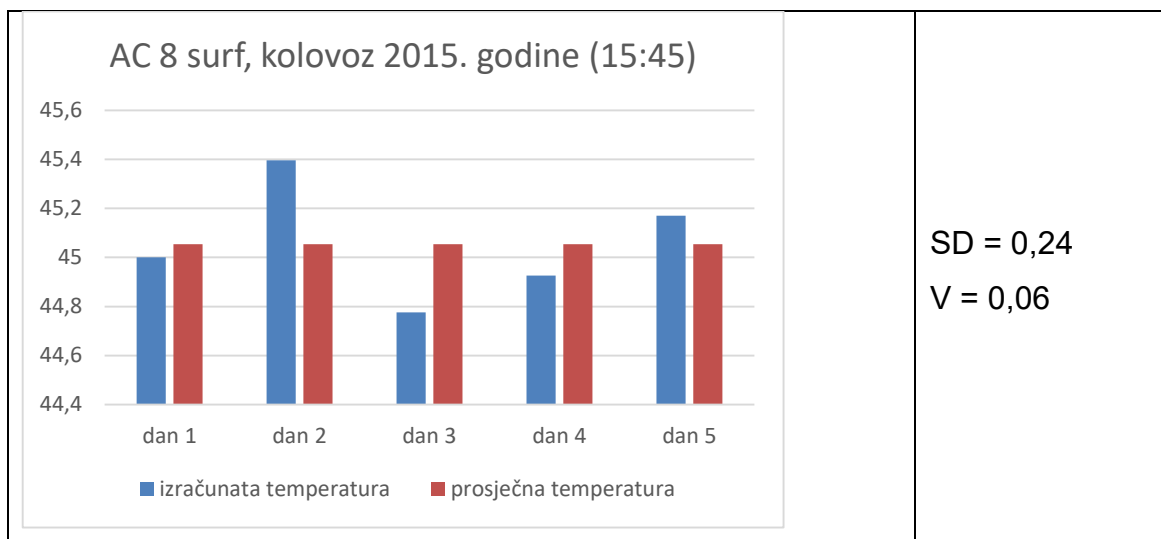
Slika 6.33: Prikaz dnevnog kretanja temperatura u odnosu na krivulju prosječne temperature za kolovoz 2015. godine i polje AC 11 surf



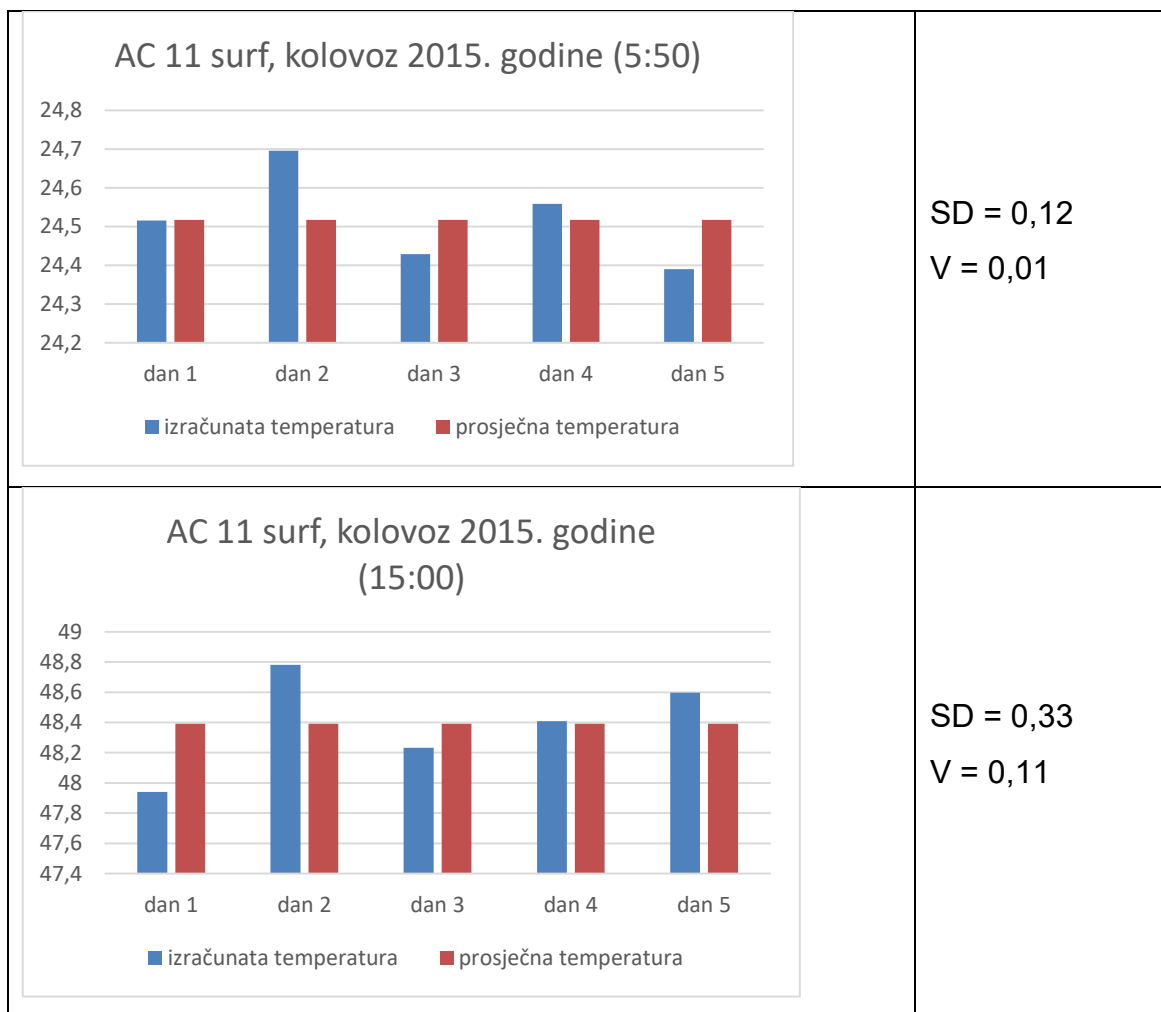
Slika 6.34: Prikaz dnevnog kretanja temperatura u odnosu na krivulju prosječne temperature za kolovoz 2015. godine i polje PA 8 surf

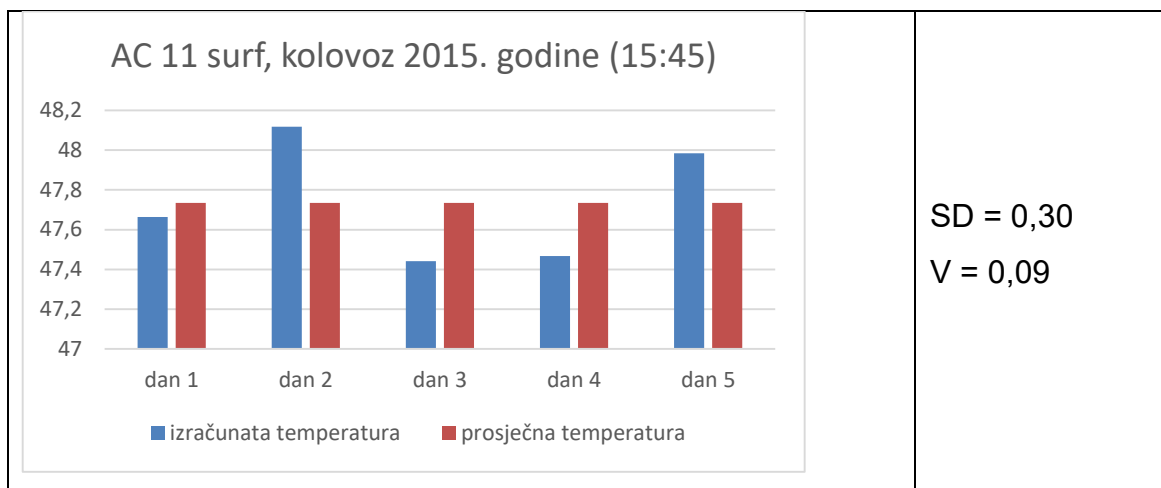
Tablica 6-36: Prikaz odstupanja izračunatih temperatura površine kolnika od prosječnih vrijednosti temperatura za kritične točke

AC 8 surf, kolovoz 2015. godine (5:50) dan 1 dan 2 dan 3 dan 4 dan 5 izračunata temperatura prosječna temperatura	SD = 0,11 V = 0,01
AC 8 surf, kolovoz 2015. godine (15:00) dan 1 dan 2 dan 3 dan 4 dan 5 izračunata temperatura prosječna temperatura	SD = 0,36 V = 0,13

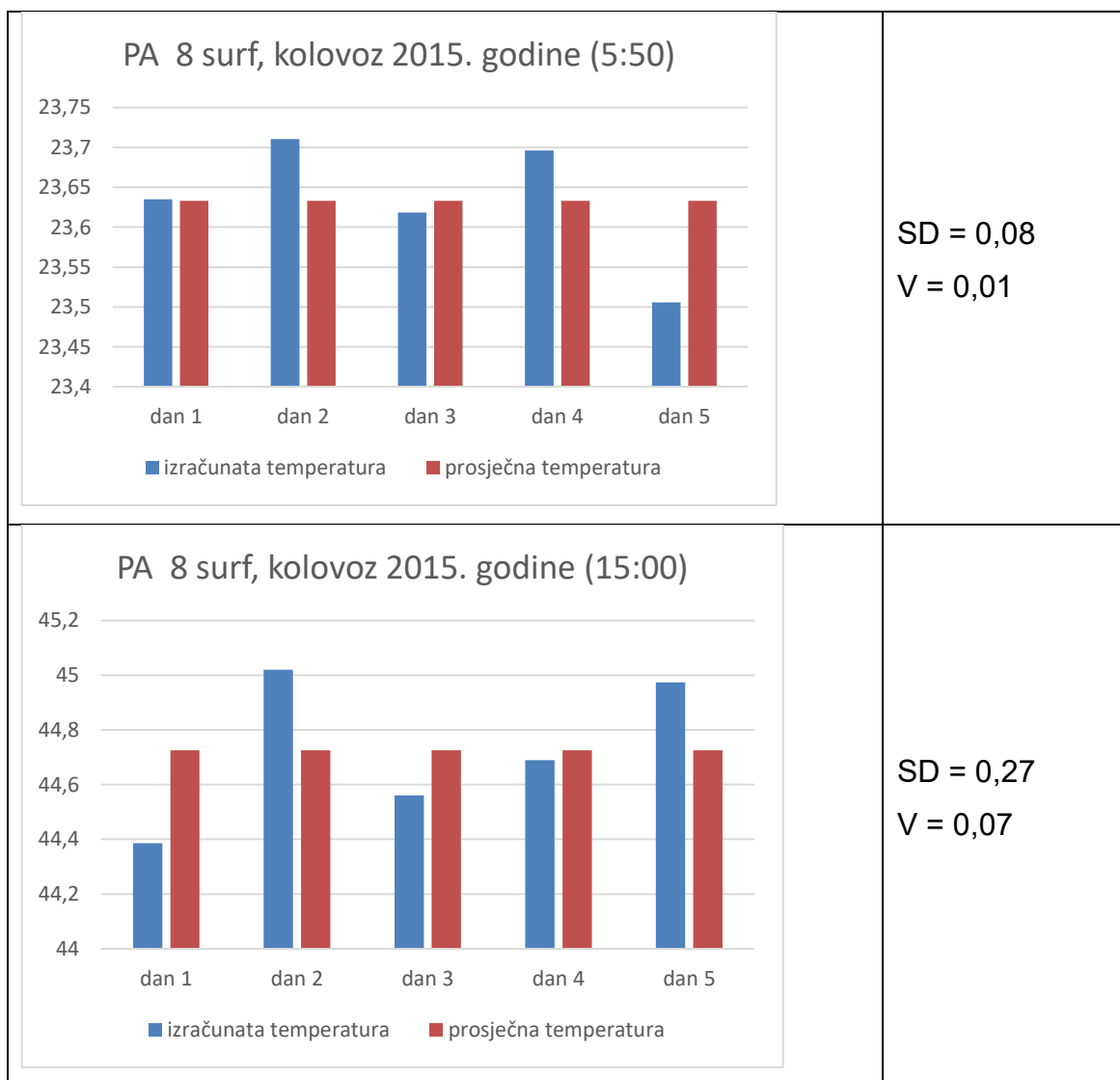


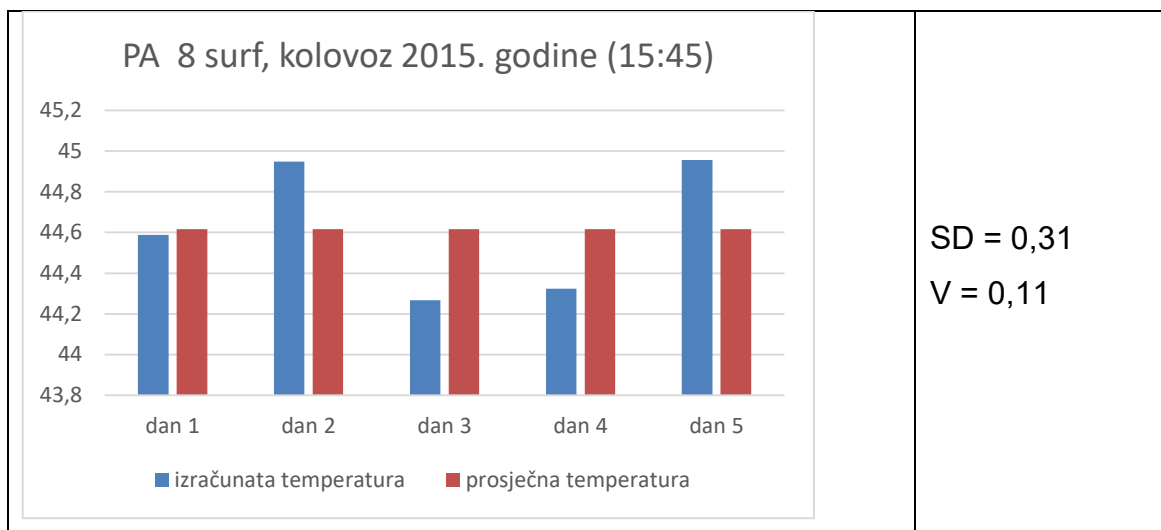
Tablica 6-37: Prikaz odstupanja izračunatih temperatura površine kolnika od prosječnih vrijednosti temperatura za kritične točke





Tablica 6-38: Prikaz odstupanja izračunatih temperatura površine kolnika od prosječnih vrijednosti temperatura za kritične točke





7. ZAKLJUČAK I SMJERNICE ZA BUDUĆA ISTRAŽIVANJA

Predmet istraživanja ovog doktorskog rada je analiza utjecaja asfaltnih kolničkih konstrukcija izloženih sunčevom zračenju na temperaturu površine kolnika te određivanje mjere utjecaja na temperaturu okolnog zraka. Cilj ovog rada je razvoj numeričkog modela za izračun distribucije temperature u kolničkim konstrukcijama s obzirom na mjerene meteorološke podatke uz uvođenje nelinearnog koeficijenta prijenosa topline.

2011. i 2012. godine provedena su preliminarna istraživanja u svrhu utvrđivanja ponašanja standardno korištenih materijala kolničkih površina s obzirom na utjecaj temperature zraka i sunčevo zračenje.

Preliminarnim istraživanjima je utvrđeno da:

- (i) osunčanost pojedine lokacije ima značajan utjecaj na temperaturu površine materijala što je prikazano na Slici 5.2 i Tablici 5.2
- (ii) boja površine materijala utječe na vrijednost maksimalnih temperatura površine što je prikazano na Slici 5.2 i Tablici 5.2
- (iii) za istu vrstu materijala nema većih razlika u maksimalnim temperaturama površine bez obzira na vrijeme izloženosti sunčevom zračenju što je prikazano na Slici 5.2 i Tablici 5.2
- (iv) na maksimalne vrijednosti temperatura istih površina u istim uvjetima temperatura zraka i izloženosti sunčevom zračenju utječe vlažnost podloge što je prikazano na Slici 5.3 za dan 18. i 19.07.2011.
- (v) veća toplinska vodljivost materijala utječe na brže zagrijavanje i hlađenje materijala što je prikazano na Tablici 5.3
- (vi) vlažnost zraka utječe na vrijednosti maksimalnih temperatura površina i zraka što je prikazano na Slici 5.9 i Slici 5.10
- (vii) urbano zelenilo utječe na vrijednosti maksimalnih temperatura površina što je prikazano na Slici 5.12
- (viii) vlažnost zraka i isparavanje vodenih površina utječe na vrijednosti maksimalnih temperatura površina i zraka što je prikazano na Slici 5.12
- (ix) intenzitet prometa utječe na povećanje temperatura površina što je prikazano na Slici 5.12

Temeljem rezultata preliminarnih istraživanja utvrđeno je da za daljnju analizu utjecajnih parametara neophodno:

- (i) Obuhvatiti ispitivanja materijala koja pokazuju najnepovoljniji utjecaj u smislu zagrijavanja,
- (ii) Obuhvatiti ispitivanja različitih tipova iste vrste materijala,
- (iii) Provesti mjerenja klimatskih parametara (temperature zraka, brzine vjetra, sunčevog zračenja)
- (iv) Provesti mjerenja temperatura površine i dna kolničke konstrukcije
- (v) Provesti ispitivanja materijala u izoliranim uvjetima (bez utjecaja prometa i vodnih površina)
- (vi) Mjerenja provesti u uvjetima potpune izloženosti sunčevom zračenju (bez utjecaja urbanog zelenila)
- (vii) U analizi obuhvatiti toplinska svojstva materijala

U periodu 2013. – 2015. godine provedena su terenska mjerenja (temperatura različitih tipova asfaltnih površina, temperatura zraka, sunčevog zračenja i brzine vjetra) na ispitnom polju smještenom izvan centra grada, izoliranom od prometa.

U ovom radu predstavljen je 1D numerički model koji omogućava predviđanje ponašanja asfaltnih kolničkih konstrukcija (prijenos u tlo, zračenje) uzimajući u obzir meteorološke uvjete (zračenje, temperatura zraka, vjetar) te određivanje parametara modela inverznim postupkom iz mjerenih podataka. Model se temelji na nestacionarnoj diferencijalnoj jednadžbi diskretiziranoj metodom konačnih elemenata s posebnim konačnim elementom toplinskog toka prema tlu. Razvijeni model se temelji na novoj metodi za utvrđivanje nelinearnog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline koji je funkcija vremena i temperaturne razlike zraka i površine kolnika te je kalibriran za specifične lokalne uvjete. Nelinearni koeficijent konvektivnog prijenosa topline, koji uključuje sve utjecajne parametre, dobiva se inverznim postupkom.

U radu su analizirani koeficijenti konvektivnog prijenosa topline temeljeni na modelima ovisnim o brzini vjetra i koeficijenti konvektivnog prijenosa topline temeljeni na modelima ovisnim o meteorološkim parametrima tzv. Vehrecampovi modelima. Primjenjeni koeficijent konvektivnog prijenosa topline

koji ovisi isključivo o brzini vjetra ne pokazuje dobro predviđanje temperature površine kolnika u periodu hlađenja što je prikazano na Slici 6.9. Iz rezultata se zaključuje potreba uvođenja dodatnih meteoroloških parametara pri izračunu temperatura površine, što je u ovom radu i napravljeno.

Primjenjeni koeficijent konvektivnog prijenosa topline koji je ovisan o meteorološkim parametrima (tzv. Vehrencampov model) pokazuje dobar trend ponašanja, iako se pojavljuju veća odstupanja izračunatih temperatura površine kolnika u periodu zagrijavanja (Slika 6.10). Navedeni rezultati ukazuju na potrebu kalibracije koeficijenta konvektivnog prijenosa topline za stvarne vremenske uvjete.

Daljnjom analizom rezultata pokazano je da koeficijent prijenosa topline koji je funkcija temperature daje najbolje rezultate (Slika 6.13) iako točnost nije zadovoljavajuća što ukazuje na nedostatak pojedinih utjecajnih parametara u modelu.

Budući da identifikacija i razdvajanje utjecaja različitih parametara može dovesti do netočnih rješenja, ovim radom se predlaže uvođenje jednog parametra kroz kalibracijski postupak modela. Kalibracija se temelji na iterativnom inverznom postupku za izračun koeficijenta konvektivnog prijenosa topline koji u sebi sadrži sve utjecajne parametre. Kroz iterativni postupak, koristeći mjerene podatke temperatura, korigira se i kalibrira koeficijent konvektivnog prijenosa topline u svrhu simuliranja stvarnih uvjeta kako bi se povećala točnost rezultata (Slika 6.14 – Slika 6.20). Postupak je validiran kroz usporedbu s mjerenim vrijednostima.

Iz rezultata provedenog istraživanja slijede zaključci:

- (i) s povećanjem sunčevog zračenja naglo raste temperatura površine dok temperatura podloge, bez obzira na porast sunčevog zračenja i porast temperature zraka, ima trend blagog porasta, a maksimalne temperature podloge zabilježene su nakon smanjenja temperature zraka i utjecaja sunčevog zračenja
- (ii) koeficijent konvektivnog prijenosa topline koji ovisi isključivo o brzini vjetra ne daje dobre rezultate izračuna što ukazuje na potrebu uvođenja dodatnih meteoroloških parametara pri izračunu temperatura površine

- (iii) koeficijent konvektivnog prijenosa topline koji ovisi o meteorološkim parametrima (tzv. Vehrencampov model) daje bolje rezultate, ali je vidljivo da za primjenjeni koeficijent konvektivnog prijenosa topline za stvarne vremenske uvjete (mjereni ulazni podaci), dolazi do velikih odstupanja u odnosu na mjerene temperature površina kolnika, pogotovo u periodu zagrijavanja što ukazuje na potrebu kalibracije koeficijenta
- (iv) konstantna vrijednost koeficijenta konvektivnog prijenosa topline ne daje dobre rezultate izračunatih vrijednosti temperatura površine (iako su veće od mjerenih) što ukazuje na potrebu uvođenja koeficijenta konvektivnog prijenosa topline promjenjivog u vremenu
- (v) temperaturna razlika (kao funkcija vremena) ima veći utjecaj na izračun temperatura površina kolnika od utjecaja vjetra
- (vi) Modeliranje topline zračenjem zahtjeva uvođenje nelinearnog koeficijenta konvektivnog prijenosa topline
- (vii) koeficijent konvektivnog prijenosa topline mora biti nelinearan, ali isto tako da mora biti funkcija temperaturnih razlika zraka i površine kolnika
- (viii) Za povećanje točnosti rješenja koeficijent konvektivnog prijenosa topline mora u sebi sadržavati sve utjecajne parametre što ukazuje na potrebu kalibracije koeficijenta
- (ix) Zbog specifičnosti utjecajnih parametra s obzirom na lokaciju nužna je kalibracija koeficijenta konvektivnog prijenosa topline na lokalne uvjete
- (x) Kalibraciju je potrebno provesti inverznim iterativnim postupkom
- (xi) Validaciju je potrebno provesti usporedbom s mjerenim podacima

LITERATURA

- AASHTO. *AASHTO: Mechanistic-empirical pavement design guide: A manual of practice*. Washington D.C.: AASHTO, 2001.
- Ackerman, B. »Temporal march of the Chicago heat island.« *Journal of Climate and Applied meteorology* 24, 1985: 547-554.
- ACPA. *Albedo: A measure of pavement surface reflectance*. R&T update-Concrete pavement research and technology, 2002.
- Adebayo, Y.R. »A note on the effect of urbanization on temperature in Ibadan.« *Journal of Climatology* 7, 1987: 185-192.
- Adwan, I., i dr. »Asphalt pavement temperature prediction models: A review.« *Applied Sciences*, 2021.
- Akbari, H. *Cooling our communities: A guidebook on tree planting and light colored surfaces*. Berkley: LBNL 31587, 1992.
- Akbari, H. »Shade trees reduce building energy use and CO₂ emissions from power plants.« *Environmental Pollution* 116, 2002: 119-126.
- Akbari, H., D. Kurn, S. Bretz, i J. Hanford. »Peak power and cooling energy savings of shade trees.« *Energy and Buildings* 25, 1997: 139-148.
- Akbari, H., i H. Taha. »The impact of trees and white surfaces on residential heating and cooling energy use in four Canadian cities.« *Energy* 17, 1992: 141-150.
- Akbari, H., M. Pomerantz, i H. Taha. »Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas.« *Solar Energy* 70, 2001: 295-310.
- Akbari, H., S. Bretz, D. Kurn, i J. Hanford. »Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs.« *Energy and Buildings* 25, 1997: 117-126.
- Akbari, H., S. Konopacki, i M. Pomerantz. »Cooling energy savings potential of reflective roofs for residential and commercial buildings in the United States.« *Energy*, vol 24; no. 5, 1999: 391-407.
- Al-Abdul Wahhab, H.I., i F.A. Balghunaim. »Asphalt pavement temperature related to arid Saudi environment.« *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1994: 1-14.
- Alavi, M.Z., M.R. Pouranian, i E.Y. Hajj. »Prediction af asphalt pavement temperature profile using the finite control volume method (FCVM).«

- Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 2014: 96-106.
- Alchapar, N.L., E.N. Correa, i M.A. Canton. »Classification of building materials used in the urban envelopes according to their capacity for mitigation of the urban heat island in semiarid zones.« *Energy and Buildings* 69, 2014: 22-32.
- Alonso, M.S., J.L. Labajo, i M.R. Fridalgo. »Characteristic of the urban heat island in the city of Salamanca, Spain.« *Atmosfera* 16 (3), 2003: 137-148.
- Anderson, K.O., i J.T. Christison. »The response of asphalt pavements to low temperature climatic environments.« *The third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. London, 1972.
- Arangi, S.R., i R.K. Jain. »Review paper on pavement temperature prediction model for Indian climatic condition.« *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, 2015: 1-9.
- Arnfield, A.J. »Review two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island.« *International Journal of Climatology* 23, 2003: 1-26.
- Asaeda, T., V.T. Ca, i A. Wake. »Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere.« *Atmospheric Environment* 30 (3), 1996: 413-427.
- Asefzadeh, A., L. Hashemian, i A. Bayat. »Development of statistical models for a test road in Edmonton, Alberta, Canada.« *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2017: 369-382.
- ASTME1980-11. *Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces*. standard, West Conshohocken: ASTM International, 2001.
- Babić, S., A. Deluka-Tibljaš, M Cuculić, i S. Šurdonja. »Analysis of pavement surface heating in urban areas.« *Građevinar* 64 (2), 2012: 125-132.
- Baker, L. »Urbanizations and warming of Phoenix (Arizona, USA): Impacts, feedbacks and mitigation.« *Urban Ecosystems* 6, 2002: 183-203.
- Barber, E.S. »Calculation of maximum pavement temperatures from weather reports.« *Highway research board bulletin* 168, 1957: 1-8.
- Bentz, D.P. *A computer model to predict the surface temperature and time-of-wetness of concrete pavements and bridge decks*. NISTIR 6551, U.S. Department of Commerce, 2000.

- Berdahl, P, i S. Bretz. »Preliminary Survey of the Solar Reflectance of Cool Roofing Materials.« *Energy and Buildings* 25, 1997: 149-158.
- Berdhal, P. »The emissivity of the clear skies.« *Solar Energy*, 1984: 663-664.
- Berg, R., i W. Quinn. »Use of light colored surface to reduce seasonal thaw penetration beneath embankments on permafrost.« *Proceedings of the Second International Symposium on Cold Regions Engineering*. Alaska: University of Alaska, 1978. 86-99.
- Blankenstein, S., i W. Kuttler. »Impact of street geometry on downward longwave radiation and air temperature in an urban environment.« *Meteorologische zeitschrift* 13 (5), 2004: 373-379.
- Bonacquisti, V, G.R. Casale, S. Palmieri, i A.M. Siani. »A canopy layer model and its application to Rome.« *Science of the Total Environment* 364, 2005: 1-13.
- Boriboonsomsin, K., i F. Reza. »Mix design and benefit evaluation of high solar reflectance concrete for pavements.« *Transportation Research Record*, 2007: 11-20.
- Bosscher, P.J., H.U. Bahia, S. Thomas, i J.S. Russell. »Relationship between pavement temperature and weather data Winsconsin field study to verify superpave algorithm.« *Journal of the Transportation Research Board*, 1998: 1-11.
- Brazel, A., N. Selover, R. Vose, i G.M. Heisler. »The tale of two climates - Baltimore and Phoenix urban LTER sites.« *Climate Research* 15, 2000: 123 - 135.
- Bretz, S., H. Akbari, i A. Rosenfeld. »Practical issues for using solar reflective materials to mitigate urban heat island.« *Atmospheric Environment* 32, 1998: 95-101.
- Carnielo, E., i M. Zinzi. »Optical and thermal characterization of cool asphalts to mitigate urban temperaures and building cooling demand.« *Building and Environment*, 2002: 56-65.
- Carpio, M, A. Gonzalez, M. Gonzalez, i K. Verichev. »Influence of pavements on the urban heat island phenomenon: A scientific evaluation analysis.« *Energy and Buildings*, 2020.
- Cengel, Y.A. *Heat transfer: A practical approach*. Reno: McGraw-Hill, 1998.
- Chadbourn, B.A., D.E. Newcomb, V.R. Voller, R.A. De Sombre, J.A. Luoma, i D.H. Timm. *An Asphalt Paving Tool for Adverse Conditions*. final report,

- Minneapolis: University of Minnesota, Department of Civil Engineering, 1998.
- Chang, C.R., M.H. Li, i S.D. Chang. »A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks.« *Landscape and Urban Planning* 80, 2007: 386-395.
- Chao, J., i J. Zhang. »Prediction model for asphalt pavement temperature in high-temperature season in Beijing.« *Advances in Civil Engineering*, 2018.
- Chem, M.Z., W. Wei, i S.P. Wu. »On cold materials of pavement and high-temperature performance of asphalt concrete.« *Materials Science Forum* (Material), 2009: 379-382. 620-622.
- Chen, J., H. Wang, i P. Xie. »Pavement temperature prediction: Theoretical models and critical affecting factor.« *Applied Thermal Engineering*, 2019.
- Chen, J., H. Wang, i P. Xie. »Theoretical models and critical affecting factors.« *Applied thermal engineering* 158, 2019.
- Chen, J., L. Li, L. Zhao, H. Dan, i H. Yao. »Solution of pavement temperature field in "environmental surface" system through green's function.« *Journal of Central South University*, 2014: 2108-2116.
- Chen, J., Z. Zhou, J. Wu, S.G. Hou, i M. Liu. »Field and laboratory measurement of albedo and heat transfer for pavement materials.« *Construction and Building Materials*, 2019: 46-57.
- Chen, J.Q., H. Wang, i H. Zhu. »Analytical approach for evaluating temperature field of thermal modified asphalt pavement and urban heat island effect.« *Applied Thermal Engineering*, 2017: 739-748.
- Chen, J.Q., H. Wang, i L. Li. »determination of effective thermal conductivity of asphalt concrete with random aggregate microstructure.« *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015.
- Chen, J.Q., M. Zhang, H. Wang, i L. Li. »Evaluation of thermal conductivity of asphalt concrete with heterogeneous microstructure.« *Applied Thermal Engineering*, 2015: 368-374.
- Chen, J.Q., R. Chu, H. Wang, i P. Xie. »Experimental measurement and microstructure-based simulation of thermal conductivity of unbound aggregates.« *Construction and Building Materials* , 2018: 8-18.

- Chen, S., H. Yoshino, i N. Li. »Statistical analysis on summer energy consumption characteristics of residential buildings in some cities of China.« *Energy and Buildings* 42, 2010: 136-146.
- Chen, Z., i D. Ma. »Effectiveness of solar heat reflective coatings in reducing asphalt concrete temperature.« *Journal of Testing and Evaluation*, 2012.
- Chiarelli, A., A. Al-Mohammedawi, A.R. Dawson, i A. Garcia. »Construction and configuration of convection-powered asphalt solar collectors for the reduction of urban temperatures.« *International Journal of Thermal Sciences*, 2017: 242-251.
- Chong, W., R. Tramontini, i L. Pivoto Specht. »Application of Laplace transform and its numerical inversion to temperature profile of two-layer pavement under site conditions.« *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2009: 1004-1018.
- Chong, W., R. Tramontini, i L.P. Specht. »Application of the Laplace transform and its numerical inversion to temperature profile of a two-layer pavement under site conditions.« *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2009: 1004-1018.
- Conti, S., Meli, P., i dr. »Epidemiologic study of mortality during summer 2003 heat wave in Italy.« *Environmental Research* 98, 2005: 390-399.
- Corlew, J.S., i P.F. Dickson. »Methods for Calculating Temperature Profiles of Hot-Mix Asphalt Concrete as related to the Construction of Asphalt Pavements.« *Asphalt Paving Technology Vol. 37. Association of Asphalt Paving Technologists Technical Sessions*, 1968. 101-140.
- Costa, A., L. Labaki, i V. Araujo. »A methodology to study the urban distinction of air temperature in fixed points.« *2nd PALENC conference and 28th AIVC conference on building low energy cooling and advanced ventilation technologies in the 21st century, Vol 1*. Crete island: Heliotopos Conferences, 2007. 227-230.
- Cote, J., V. Grosjean, i J.M. Konrad. »Thermal conductivity of bitumen concrete .« *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2013: 172-180.
- Crevier, L.P., i Y. Delage. »METRo: A new model for road condition forecasting in Canada.« *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2001: 2026-2037.

- Cuculić, M., A. Deluka-Tibljaš, i S. Babić. »Urban pavement surfaces heating - influencing parameters.« *3rd International Conference on Road and Rail Infrastructure - CETRA 2014*. Split: Department of Transportation, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, Croatia, 2014. 853-858.
- Cuculić, M., S. Babić, A. Deluka-Tibljaš, i S. Šurdonja. »Pavement surfaces in urban areas.« *2nd International Conference on Road and Rail Infrastructure - CETRA 2012*. Dubrovnik: Department of Transportation, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, Croatia, 2012. 273-279.
- Cuculić, M., S. Šurdonja, S. Babić, i A. Deluka-Tibljaš. »Possible locations for cool pavement use in the city of Rijeka.« *The 4th European Pavement and Asset Management Conference*. Malmö, 2012.
- Daba, D. *Prediction of maximum pavement surface temperature using maximum air temperature and latitude*. Addis Ababa: PhD thesis, 2018.
- Dan, H., J. Tan, i J.Q. Chen. »Temperature distribution of asphalt bridge deck pavement with groundwater circulation temperature control system under high and low temperature conditions.« *Road Materials and Pavement Design*, 2019: 509-527.
- De Picado Santos, L.P. »Design temperature on flexible pavements.« *Road Materials and Pavement design*, 2000: 355-371.
- Dehdezi, P.K. *Enhancing Pavements for Thermal Applications*. PhD Thesis, Nottingham: Department of Civil Engineering, Nottingham Transportation Engineering Centre, 2012.
- Dehdezi, P.K., M.R. Hall, i A. Dawson. »Thermophysical optimization of specialized concrete pavement materials for collection of surface heat energy and applications for shallow heat storage.« *Transportation Research Record*, 2011: 96-106.
- Deluka-Tibljaš, A., S. Babić, S. Šurdonja, i M. Cuculić. »Analyses of urban pavement surface temperatures.« *the Baltic Journal Of Road and Bridge Engineering*, 2015: 239-246.
- Dempsey, B.J., i M.R. Thompson. »A heat transfer model for evaluating frost action and temperature related effects in multilayered pavement systems.« *Highway Research Record*, 1970.
- Denby, B.R., i dr. »A coupled road dust and surface moisture model to predict non-exhaust road traffic induced particle emissions (NORTRIP), Part 2: surface

- moisture and salt impact modelling.« *Atmospheric Environment*, 2013: 485-503.
- Diefenderfer, B.K., I.L. Al-Qadi, S.D. Rebush, i T.E. Freeman. »Development and validation of model to predict pavement temperature profile.« *TRB 2003 Annual meeting*. Washington, D.C.: TRB, 2003.
- Diefenderfer, B.K., I.L. Al-Qadi, S.D. Rebush, i T.E. Freeman. »Model to predict pavement temperature profile: Development and validation.« *Journal of Transportation Engineering*, 2006: 162-167.
- Djen, C.S. »The urban climate of Shanghai.« *Atmospheric Environment B* 26, 1992: 9-15.
- Dong, W. »Simplified analytical approach to predicting asphalt pavement.« *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015: 864-870.
- Doulos, D., M Santamouris, i I. Livada. »Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials.« *Solar Energy* 77, 2001: 231-249.
- Doulos, L., M. Santamouris, i I. Livada. »Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials.« *Solar Energy* 77, 2004: 231-249.
- Eliasson, I. »Intra-urban nocturnal temperature differences: a multivariate approach.« *Climate Research* 7, 1996: 21-30.
- Eliasson, I., i B. Holmer. »Urban heat island circulation in Goteborg, Sweden.« *Theoretical and Applied Climatology* 42, 1990: 187-196.
- Emmanuel, M.R. *An urban approach to climate-sensitive design; Strategies for the tropics*. London: Spon Press, 2005.
- EPA. *EPA's Report on the Environment*. Washington: United States Environmental Protection Agency, 2008.
- Fahed, J., E. Kinab, S. Ginestet, i L. Adolphe. »Impact of urban heat island mitigation measures on microclimate and pedestrian comfort in dense urban district of Lebanon.« *Sustainable Cities and Society* , 2020.
- Feng, D., J. Yi, i D. Wang. »Performance and thermal evaluation of incorporating waste ceramic aggregates in wearing layer of asphalt pavement.« *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013: 857-863.
- Ferrari, A., A. Kubilay, D. Derome, i J. Carmeliet. »The use of permeable and reflective pavements as potential strategy for urban heat island mitigation.« *Urban Climate*, 2020.

- Figuerola, P.I., i N.A. Mazzeo. »Urban-rural temperature differences in Buenos Aires.« *International Journal of Climatology* 18, 1998: 1709-1723.
- Fujimoto, A., H. Watanabe, i A. Fukuhara. »Effects of vehicle heat on road surface temperature of dry condition.« *14th Standing International Road Weather Conference* . Prague, 2008.
- Gajić Čapka, M., K. Zaninović, i K. Cindrić. *Climate Change Impacts and Adaptation Measures - Observed Climate Change in Croatia*. Zagreb: Ministry of Environmental Protection, Physical Planning and Construction, 2010.
- Gao, W., X. Wang, L. Haifeng, P. Zhao, J. Ren, i O. Toshio. »Living environment and energy consumption in cities of Yangtze Delta area.« *Energy and Buildings* 36, 2006: 1241-1246.
- Gartland, L. *Heat Island: Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas*. London: Earthscan, 2008.
- George, K., L.H. Ziska, i B.B. Quebedeaux. »Elevated atmospheric CO2 concentration and temperature across and urban-rural transect.« *Atmospheric Environment* 41, 2007: 7654-7665.
- Giannaros, M.T., i D. Melas. »Study of the urban heat island in a coastal mediterranean city: the case study of Thessaloniki, Greece.« Thessaloniki, 2012.
- Giannopoulou, K, M Santamouris, I. Livada, C. Georgakis, i Y. Caouris. »The impact of canyon geometry on intra urban and urban: suburban night temperature differences under warm weather conditions.« *Pure and Applied Geophysics* 167, 2010: 1433-1449.
- Giguere, M. *Urban heat island mitigation strategies*. Quebec: Institut National De Sante Publique Du Quebec, 2009.
- Giridharan, R., S. Ganesan, i S.S.Y. Lau. »Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong.« *Energy and Buildings* 36, 2004: 525-534.
- Goh, K.C., i C.H. Chang. »The relationship between height to width ratios and the heat island intensity at 22:00 for Singapore.« *International Journal of Climatology* 19, 1999: 1011-1023.
- Golden, J.S. "The Built Environment Induced Urban Heat Island Effect in Rapidly Urbanizing Arid Regions-A Sustainable Urban Engineering Complexity." *Environmental Sciences, Vol 1, No 4*, 2004: 321-349.

- Golden, J.S., i K.E. Kaloush. »Mesoscale and microscale evaluation of surface pavement impacts on the urban heat island effects.« *The International Journal of Pavement Engineering*; Vol. 7; No. 1, 2006: 37-52.
- Goldreich, Y. »Urban climate studies in Israel - a review.« *Atmospheric Environment* 29, 1995: 467-478.
- Goldreich, Y. »urban climate studies in Johannesburg, a sub-tropical city located on a ridge - a review.« *Atmospheric Environment B* 26, 1992: 407-420.
- google maps. 01. 10 2015.
www.google.hr/maps/@45.329410,14.467244,321m/data=!3m1!1e3
(pokušaj pristupa 01. 10 2015).
- Gui, J., P. Phelan, K. Kaloush, i J. Golden. »Impact of Pavement Thermophysical Properties on Surface Temperatures.« *Journal of Materials in Civil Engineering* 19 (8), 2007: 683-690.
- Guntor, N.A.A., M.F.M. Din, M. Ponraj, i K. Iwao. »Thermal performance of developed coating materials as cool pavement material for tropical regions.« *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014: 755-760.
- Gustavsson, T., i J. Bogren. »Infrared thermography in applied road climatological studies.« *International Journal of Remote Sensing* 12, 1991: 1811-1828.
- Hall, M.r., P.K. Dehdezi, A.R. Dawson, J. Grenfell, i R. Isola. »Influence on the thermophysical properties of pavement materials on the evolution of temperature depth profile in different climatic regions.« *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012: 32-47.
- Hamdi, R., i G. Schayes. »Sensitivity study of the urban heat island intensity to urban characteristic.« *International Journal of Climatology* 28, 2008: 973-982.
- Hamed, M.H., i S.M. Maryam. »Influence of ambient temperature on stiffness of asphalt paving materials.« *Journal of Engineering*, 2011: 1090-1108.
- Han, R., X. Jin, i C.J. Glover. »Modelling pavement temperature for use in binder oxidation models and pavement performance prediction.« *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2011: 351-359.
- Hassan, H.F., A. Al-Nuaimi, S. Al-Oraimi, i T.M.A. Jafar. »Development of asphalt binder performance grades for Omani climate.« *Construction Building Materials*, 2008: 1684-1690.

- Hermansson, A. »Mathematical model for calculation pavement temperature.« *Journal of Transportation Research Board*, 2001: 180-188.
- Hermansson, A. »Mathematical model for paved surface summer and winter temperature: Comparison of calculated and measured temperatures.« *Cold Regions Science and Technology*, 2004: 1-17.
- Hermansson, A. »Simulation model for calculating pavement temperatures including maximum temperature.« *Journal of the Transportation Research Board*, 2000: 134-141.
- Highter, W.H., i W.J. Douglas. »Thermal properties of some asphaltic concrete mixes .« *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1984.
- Ho, C., i P. Romero. »low design temperatures of asphalt pavements in dry-freeze regions predicting by means of solar radiation, transient heat transfer, and finite element method.« *Journal of the Transportation Research Board*, 2009: 60-71.
- Hogan, A.W., i M.G. Ferrick. »Observations in nonurban heat islands.« *Journal of Applied Meteorology* 37, 1998: 232-236.
- Holmer, B., i I. Eliasson. »Urban-rural vapour pressure differencies and their role in the development of urban heat islands.« *International Journal of Climatology* 19, 1999: 989-1009.
- Howard, L. *The Climate of London deduced from meteorological observations made in metropolis and at various places around it 2nd edition, 3 Vols.* London: J . and A. ARch, 1833.
- Hsu, S.I. »Variation of an urban heat island in Phoenix.« *Proffesional Geographer* 36, 1984: 196-200.
- Hu, L., Y. Li, X. Zou, S. Du, Z. Liu, i H. Huang. »Temperatire characteristic of porous portland cement concrete during the hot summer season.« *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017.
- Huang, K., D.G. Zollinger, X. Shi, i P. Sun. »A developed method of analyzing temperature and moisture profiles in rigid pavement slabs.« *Constriction and Building Materials*, 2017: 782-788.
- Hung, T., D. Uchiama, S. Ochi, i Y. Yasuoka. »Assesment with satellite data of the urban heat island effect in Asian mega cities.« *International Journal of Applied Earth Observation and Geo-Information* 8 (1) , 2006: 34-48.

- Ichinose, T., K. Shimodozono, i K. Hanaki. »Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo.« *Atmospheric Environment* 33, 1999: 3897-3909.
- Idso, S., C. Idso, i R.J. Bailling. »Seasonal and diurnal variations of near surface atmospheric CO₂ concentration with a residential sector of urban CO₂ dome of Phoenix, AZ, USA.« *Atmospheric Environment* 36, 2002: 1655-1660.
- Ihara, T., Y. Kikegawa, K. Asahi, Y. Genchi, i H. Kondo. »Changes in year round air temperature and annual energy consumption in office building areas by urban heat island countermeasures and energy-saving measures.« *Applied Energy* 85, 2008: 12-25.
- Imamura, R. *Air-Surface Temperature Correlations, Controlling Summer Heat Islands*. Berkley: Lawrence Berkley Laboratory, 1989.
- Incropera, F.P., D.P. DeWitt, T.L. Bergman, i A.S. Lavine. *Fundamentals of heat and mass transfer*. New York: John Wiley & Sons Inc, 2006.
- Iqbal, M. *An introduction to solar radiation*. Toronto: Academic Press, 1983.
- Jauregui, E. »Heat island development in Mexico City.« *Atmospheric Environment* 31, 1997: 3821-3831.
- Jeong, J., i D.G. Zollinger. »Finite-element modeling and calibration of temperature prediction of hydrating portland cement concrete pavements.« *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2006: 317-324.
- Jia, L., S. Lijun, i Y. Yu. »Asphalt pavement statistical temperature prediction models developed from measured data in China.« *Proceedings of the Transportation Infrastructure in China*. Shanghai: ASCE, 2008. 723-732.
- Jiji, L. *Heat transfer convection*. Berlin: Springer, 2006.
- Johnson, D.B. »Urban modification of diurnal temperature cycles in Birmingham, U.K.« *Journal of Climatology* 5, 1985: 221-225.
- Jonsson, P., C. Bennet, I. Eliasson, i E.S. Lindgren. »Suspended particulate matter and its relation to the urban climate in Dar es Salaam, Tanzania.« *Atmospheric Environment* 38, 2004: 4175-4181.
- Jordan, P.G., i M.E. Thomas. *Prediction of Cooling Curves for Hot-Mix Paving Materials by Computer Program*. laboratory report, Bracknell: Transport and Road Research Laboratory Report 729, 1976.
- Jusuf, S.K., i W.N. Hien. »Study on air temperature distribution and its correlation with sky view factor in a green Singapore estate.« *the seventh International Conference on Urban Climate*. Yokohama, Japan, 2009.

- Kai, Q., G. Liu, R. Hu, i S. Wei. »Heat reflectivity properties of asphalt mixtures modified with nano A / SBS-II: Prediction of temperature in asphalt pavement.« *Tenth international conference of Chinese transportation professionals (ICCTP)*. Beijing, 2010. 3819-3826.
- Karl, T., H. Diaz, i G. Kukla. »Urbanization: Its detection and effect in the United States.« *Journal of Climate* 1, 1988: 1099-1123.
- Kavianipour, A. »Thermal Property Estimation Utilizing the Laplace Transform with Application to Asphaltic pavement.« *International Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 20*, 1967: 259-267.
- Kawashima, S., T. Ishida, M. Minomura, i T. Miwa. »Relations between surface temperature and air temperature on a local scale during winter nights.« *Journal of Applied Meteorology* 39, 2000: 1570-1579.
- Kersten, M.S. *Thermal Properties of Soils*. Bulletin No. 28, Minnesota: University of Minnesota Institute of Technology Engineering Experiment Station Vol. 52, 1949.
- Kevern, J.T., V.R. Schaefer, i K. Wang. »Temperature behavior of pervious concrete systems.« *Transportation Research Record*, 2015: 94-101.
- Khan, Z.H., M.R. Islam, i R.A. Tarefder. »Determining asphalt surface temperature using weather parameters.« *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2019.
- Kidder, S.Q., i O.M. Essenwanger. »The effect of clouds and wind on the difference in nocturnal cooling rates between urban and rural areas.« *Journal of Applied Meteorology* 34, 1995: 2440-2448.
- Kim, Y., i J. Baik. »Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul.« *Journal of Applied Meteorology* 44, 2005: 591-605.
- King Johnson, V., i C. Davies. »A case study of urban heat islands in the Carolinas.« *Environmental Hazards* 7, 2007: 353-359.
- Klysiak, K., i K. Fortuniak. »Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Lodz, Poland.« *Atmospheric Environment* 33, 1999: 3885-3895.
- Kolditz, O. »Computational methods in environmental fluid mechanics.« *Springer*, 2002.
- Kolokotroni, M., R. Giridharan, i M. Santamouris. »urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on

- changes in outdoor air temperature during summer.« *Solar Energy* 82, 2008: 986-998.
- Kondo, Y., i Y. Miura. »The prediction of temperature in pavement structures.« *Japan Society of Civil Engineers*, 1976: 123-132.
- Kondoh, A., i J. Nishiyama. »Changes in hydrological cycle due to urbanization in the suburb of Tokyo Metropolitan Area, Japan.« *Advances in Space Research* 26, 1999: 1173-1176.
- Konopacki, S., i H. Akbari. *Energy savings for heat island reduction strategies in Chicago and Houston including updates for Baton Rouge, Sacramento and Salt Lake City*. Berkley: University of California, 2002.
- Kožar, I., i D. Lozzi-Kožar. »Flux determination using finite elements: Global vs. local calculation.« *Technical Gazzete*, 2017: 247-252.
- Kožar, I., K. Peša, M. Cuculić, i N. Torić Malić. »Some elements for assessing the radiated heat in urban areas.« *43rd International Convention of Information, Communication and Electronic Technology*. Opatija: Croatian Society for Information, Communication and Electronic Technology - MIPRO, 2020. 1695-1698.
- Kožar, I., M. Cuculić, i N. Torić Malić. »Establishing of parameters for model of radiated heating of urban pavement.« *4th International Conference on Multi-scale Computational Methods for Solids and Fluids*. Sarajevo: ECCOMAS MSF 2019 , 2019. 184-187.
- Kršmanc, R., A.Š. Slak, i J. Demšar. »Statistical approach for forecasting road surface temperature.« *Meteorological Applications*, 2013: 439-446.
- Ksaibati, K., C. Yavuzturk, i A.D. Chiasson. »Assesment of temperature fluctuations in asphalt pavements due to thermal environmental conditions using a two-dimensional transient finite difference approach.« *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2005.
- Ksaibati, K., i C. Yavuzturk. *Assessment of thermal stresses in asphalt pavements due to environmental conditions*. Washington D.C.: The National Academy of Sciences, 2006.
- Kubo, K., H Kido, i M. Ito. »Study on pavement technologies to mitigate the heat island effect and their effectiveness.« Quebec: international society for asphalt pavements (ISAP), 2006.
- Kulišić, P. *Mehanika i toplina*. Zagreb: Školska knjiga, 2005.

- Kumar, S., T. Prasad, N.V. Sashidharan, i S.k. Nair. »heat island intensities over Brihan Mumbai on a cold winter and hot summer night.« *Mausam* 52, 2001: 703-708.
- Lafrance, M. *Review and critical analysis of international UHI studies*. Vienna: Navigant Consulting Inc, 2009.
- Lai, D., W. Lin, T. Gan, K. Liu, i Q. Chen. »A review of mitigating strategies to improve thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces.« *Science of Total Environment*, 2019: 337-353.
- Lai, L.W., i W.L. Cheng. »Air quality influences by urban heat island coupled with synoptic weather patterns.« *Science of Total Environment* 407 (8), 2009: 2724-2733.
- Lariviere, I., i G. Lafrance. »Modeling the electricity consumption of cities: effect on urban density.« *energy Economics* 21, 1999: 53-66.
- Levinson, R., i H. Akbari. »Effects of composition and exposure on the solar reflectance of portland cement concrete.« *Cement and Concrete Research*, 2002: 1679-1698.
- Lewis, R.W. *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*. London: John Wiley and Sons Ltd England, 2004.
- Li, H., J. Harvey, i A. Kendall. »Field measurement of albedo for different land cover materials and effects on thermal performance.« *Building and Environment*, 2013: 536-546.
- Li, H., J. Harvey, i D. Jones. »Development and preliminary validation of integrated local microclimate model for numerical evaluation of cool pavement strategies.« *Journal of Transportation Research Board*, 2014: 151-164.
- Li, H., J. Harvey, i D. Jones. »Multi-dimensional transient temperature simulation and back-calculation for thermal properties of building materilas.« *Building and Environment*, 2013: 501-516.
- Li, H., J. Harvey, Y. He, Z. Chen, i P. Li. »Pavement treatment practices and dynamic albedo change in urban pavement network in California.« *Transportation Research Record*, 2002: 145-155.
- Li, H., J.T. Harvey, T.J. Holland, i M. Kayhanian. »The use of reflective and permeable pavements as a potential practice for heat island mitigation and stormwater management.« *Environmental Research Letters* 8, 2013: 1-14.

- Li, Y., L. Liu, i L. Sun. »Temperature predictions for asphalt pavement with thick asphalt layer.« *Construction Building Materials*, 2018: 802-809.
- Liang, C., i Y.Z. Niu. »Temperature and curling stress in concrete pavements: Analytical solutions.« *Journal of Transportation Engineering*, 1998: 91-100.
- Lienhard IV, J.H., i J.H. Lienhard V. *A heat transfer textbook third edition*. Cambridge: Phlogiston Press, 2008.
- Liu, C., i D. Yuan. »Temperature distribution in layered road structures.« *Journal of Transportation Engineering*, 2000: 93-95.
- Livada, I., M. Santamouris, K. Niachou, N. Papanikolaou, i G. Mihalakakou. »Determination of places in the great Athens area where the heat island effect is observed.« *Theoretical and Applied Climatology* 71, 2002: 219-230.
- Lopez, A., i H.A. Ali. »Statistical analyses of temperature and moisture effect on pavement structural properties based on seasonal monitoring data.« *Transportation Research Record*, 1996: 48-55.
- Lozzi-Kožar, D., i I. Kožar. »Estimation of the eddy thermal conductivity for Lake Botonega.« *Engineering Review*, 2017: 322-334.
- Lutfi, R., S. Saboundjian, P Sebaaly, i J. Epps. »Minimum pavement temperature modelling and mapping for Alaskan conditions.« *Journal of the Transportation Research Board*, 1998: 86-94.
- Lytton, R.L., D.E. Pufahl, C.H. Michalak, H.S. Liang, i B.J. Dempsey. *An integrated model of climatic effects on pavements*. Washington, D.C., USA: Federal Highway Administration, 1990.
- Madlener, R., i Y. Sunak. »Impacts of urbanization on urban structures and energy demand: What can we learn for urban energy planning and urbanization management?« *Sustainable Cities and Society* 1, 2011: 45-53.
- Maduabuchukwu, C., C.C. Onn, S.P. Yap, C.W. Yuen, i P. Dinwoke. »Urban heat island studies with emphasis on urban pavements: A review.« *Sustainable Cities and Society*, 2020: 1-20.
- Magee, N., J. Curtis, i G. Wendler. »The urban heat island effect at Fairbanks, Alaska.« *Theoretical and Applied Climatology* 64, 1999: 39-47.
- Mammeri, A., L. Ulmet, C. Petit, i A.M. Mokhtari. »Temperature modelling in pavements: the effect of long and short wave radiation.« *International Journal of Pavement Engineering*, 2015.

- Matić, B., D. Matić, D. Čosić, S. Sremac, G. Tepić, i P. Ranitović. »A model for pavement temperature prediction at specified depth.« *Metalurgija*, 2013: 505-508.
- Matić, Z. *Sunčevo zračenje na području Republike Hrvatske: Priručnik za energetske korištenje Sunčevog zračenja*. Zagreb : Energetski institut Hrvoje Požar, 2007.
- McPherson, E.G., L. Herrington, i G. Heisler. »Impacts of vegetation on residential heating and cooling.« *Energy and Buildings* 12, 1988: 41-51.
- Memon, R.A., D.Y.C. Leung, i L. Chunho. »A review on the generation, determination and mitigation of the Urban Heat Island.« *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 20, No. 1, 2008: 120-128.
- Mihalakakou, P., M. Santamouris, N. Papanikolaou, C. Cartalis, i A. Tsangrassoulis. »Simulation of the urban heat island phenomenon in Mediterranean climates.« *Journal of Pure and Applied Geophysics* 161, 2004: 429-451.
- Mihalakakou, P., H.A. Flocas, M. Santamouris, i C.G. Helmis. »Application of neural networks to the simulation of the heat island over Athens, Greece, using synoptic types as a predictor.« *Journal of Applied Meteorology* 41, 2002: 519-527.
- Millstein, D., i S. Menon. »Regional climate consequences of large-scale cool roof and photovoltaic array deployment.« *Environmental Research Letters* 6, 2011: 1-9.
- Min, m., C. Lin, X. Duan, Z. Jin, i L. Zhang. »Spatial distribution and driving force analysis of urban heat island effect based on raster data: A case study of the Nanjing metropolitan area, China.« *Sustainable Cities and Society*, 2019.
- Minhoto, M.J.C., J.C. Pais, P.A.A. Pereira, i L.G. Picado-Santos. »Predicting asphalt pavement temperature with three-dimensional finite element method.« *Journal of the Transportation Research Board*, 2005: 96-110.
- Ministry of Environment. *Examination investigation committee on solution for actual condition of urban heat islands in a big city*. Japan: Report of actual condition analysis of urban heat-island phenomena and countermeasures in 2000FY (Unabridged edition), 2001.
- Mirzaei, P.A., i F. Haghighat. »Approaches to study urban heat island - abilities and limitations.« *Building and Environment* 45 (10), 2010: 2192-2201.

- Mitchell, J.M. »On the causes of instrumentally observed secular temperature trends.« *Journal of the meteorology* 10, 1953: 244-261.
- Mitchell, J.M. »The temperature of cities.« *Weatherwise* 14, 1961: 224-229; 258.
- Montavez, J.P., i A., Jimenez, J.I. Rodriguez. »A study of the urban heat island of Granada.« *International Journal of Climatology* 20, 2000: 899-911.
- Moreno Garcia, M.C. »Intensity and form of the urban heat island in Barcelona.« *International Journal of Climatology* 14, 1994: 705-710.
- Morris, C.J.G., i I. Simmonds. »Associations between varying magnitudes of the urban heat island and synoptic climatology in Melbourne, Australia.« *International Journal of Climatology* 20, 2000: 1931-1954.
- Morris, C.J.G., I. Simmonds, i N. Plummer. »Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city.« *Journal of Applied meteorology* 40, 2001: 169-182.
- Mrawira, D.M., i J. Luca. »Thermal properties and transient temperature response of full-depth asphalt pavements.« *Journal of the Transportation Research Board*, 2002: 160-171.
- Nakayama, T., i T. Fujita. »cooling effect of water-holding pavements made of new materials on water and heat budgets in urban areas.« *Landscape and Urban Planning* 96 (2010): 57-67.
- Nasrallah, H., R.J. Balling, S.M. Madi, i L. Al-Ansari. »Temporal variations in atmospheric CO₂ concentrations in Kuwait City, Kuwait with comparisons to Phoenix, Arizona, USA.« *Environmental Pollution* 121, 2003: 301-305.
- Nasrallah, H.A., A.J. Brazel, i R.C. Balling. »Analysis of Kuwait City urban heat island.« *International Journal of Climatology* 10, 1990: 401-405.
- Newton, P., D. Prasad, A. Sproul, i S. White. »Decarbonising the Built Environment (Charting the Transition).« *U Urban Heat Island Mitigation*, 337-355. 2019.
- Niachou, A., I. Livada, i M. Santamouris. »Experimental study of temperature and airflow distribution inside an urban street canyon during hot summer weather conditions.« *Boundary Layer Meteorology* 56, 2008: 1383-1392.
- Nichol, J. »High-resolution surface temperature patterns related to urban morphology in a tropical city: a satellite-based study.« *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 35, 1996: 135-146.

- Nichol, J., W.Y. Fung, K. Lam, i M.S. Wong. »Urban heat island diagnosis using ASTER satellite images and in situ air temperature.« *Atmospheric Research* 94, 2009: 276-284.
- Nižetić, S., i A. Papadopoulos. »The role of exergy in energy and the environment .« *Springer International Publishing*, 2018.
- Nuijten, A.D.W. »Runway temperature prediction, a case study for Oslo airport, Norway.« *Cold Regions Science and Technology*, 2016: 72-84.
- Offerle, B., C.S.B. Grimmond, i K. Fortuniak. »Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central European city centre.« *International Journal of Climatology* 25, 2005: 1405-1419.
- Offerle, B., C.S.B. Grimmond, K. fortuniak, i W. Pawlak. »Intraurban differences of surface energy fluxes in a central european cities.« *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 45, 2006: 125-136.
- Offerle, B., C.S.B. Grimmond, K. Fortuniak, i W. Pawlak. »Intraurban differences of surface energy fluxes in a central european cities.« *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 45, 2006: 125-136.
- Okada, K., A. Ooyama, T. Isobe, Y. Kameshima, A. Nakajima, i K. MacKenzie. »Water retention properties of porous geopolymers for use in cooling applications.« *Journal of European Ceramic Society* 29, 2008: 1917-1923.
- Oke, T. *Boundary Layer Climates*. New York: Routledge, 1987.
- Oke, T. »City size and the urban heat island.« *Atmospheric Environment* 7, 1973: 769-779.
- Oke, T. »Street design and urban canopy layer climate.« *Energy and Buildings* 11, 1988: 103-113.
- Oke, T.R. »The energetic basis of the urban heat island.« *Quartely Journal of the Royal Meteorological Society* 108, 1982: 1-24.
- Oke, T.R. »The heat island of the urban boundary layer: Characteristics, causes and effects.« U *Wind climate in cities*, autor J.E. Cermak, A.G. Davenport, E.J. Plate, & D.X. Viegas, 81-107. Waldbronn, Germany: Kluwer Academic Publishers, 1995.
- Oke, T.R., G.T. Johnson, G. Steyn, i D. Watson. »Simulation of surface urban heat islands under "ideal" conditions at night. Part 2: Diagnosis of causation.« *Boundary Layer Meteorology* 56, 1991: 339-358.

- Ovik, J., B. Birgisson, i D.E. Newcomb. »Characterizing seasonal variations in flexible pavement material properties.« *Transportation Research Record*, 1999: 1-7.
- Papanastasiou, D, i C Kittas. »Maximum urban heat island intensity in a medium-sized coastal Mediterranean city.« *Theoretical and Applied Climatology* 107 (3), 2012: 407-416.
- Park, D., N. Buch, i K. Chatti. »Effective layer temperature prediction model and temperature correction via falling weight deflectometer deflections.« *Transportation Research Record*, 2001: 97-111.
- Park, H.S. »Features of the heat island in Seoul and its surrounding cities.« *Atmospheric Environment* 20, 1986: 1859-1866.
- Patz, J., S. Olson, C. Uejio, i H. Gibbs. »Disease emergence from global climate and land use change.« *Medical The Clinics* 92, 2008: 1473-1491.
- Philandras, C.M., D.A. Metaxas, i P.T. Nastos. »Climate variability and urbanization in Athens.« *Theoretical and Applied Climatology* 63, 1999: 65-72.
- Pomerantz, M, H. Akbari, A. Chen, H. Taha, i A. Rosenfeld. *Paving materials for heat island mitigation*. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1997.
- Pomerantz, M., H. Akbari, i S.C. Chang. *The effect of pavements temperatures on air temperatures in large cities* . Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2000.
- Pomerantz, M., H. Akbari, S.C. Chang, R. Levinson, i B. Pon. *Examples of cooler reflective streets for urban heat island mitigation: Portland cement concrete and chip seals*. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2003.
- Pongracz, R., J. Bartholy, i Z. Dezso. »Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis.« *Advances in Space Research* 37 (12), 2006: 2191-2196.
- Prieto, J.I., J.C. Martinez-Garcia, i D. Garcia. »Correlation between global solar irradiation and air temperature in Asturias, Spain.« *Solar Energy*, 2009: 1076-1085.
- Qi., J.D., B.J. He, M. Wang, J. Zhu, i W.C. Fu. »Do grey infrastructures always elevate urban temperature? No, utilizing grey infrastructures to mitigate urban heat island effects.« *Sustainable Cities and Society* , 2019.

- Qin, H., i J.E. Hiller. »Modeling temperature distribution in rigid pavement slabs: Impact of air temperature.« *Construction and Building Materials*, 2011: 134-141.
- Qin, Y, i J.E. Hiller. »Understanding pavement-surface energy balance and its implications on cool pavement development.« *Energy and Buildings*, 2014: 389-399.
- Qin, Y. »A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect.« *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015: 445-459.
- Qin, Y. »Pavement surface maximum temperature increases linearly with solar absorption and reciprocal thermal inertial.« *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016: 391-399.
- Qin, Y. »Urban canyon albedo and its implication on the use of reflective cool pavements.« *Energy and Buildings*, 2015: 86-94.
- Qin, Y., i J.E. Hiller. »Modeling the temperature and stress distributions in rigid pavements: Impact of solar absorption and heat history development.« *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2011: 1361-1371.
- Qin, Y., i J.E. Hiller. »Ways of formulating wind speed in heat convection significantly influencing pavement temperature prediction.« *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013: 745-752.
- Qin, Y, i J.E. Hiller. »Modelling temperature distribution in rigid pavement slab: Impact of air temperature.« *Construction and Building Materials*, 2011: 3753-3761.
- Ramadhan, R.H., i H.I. Al-Abdul Wahhab. »Temperature variation of flexible and rigid pavements in eastern Saudi Arabia.« *Building and Environment*, 1997: 367-373.
- Raznjevic, K. *Handbook of Thermodynamic Tables and Charts*. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1976.
- Ren, Z.S., H. Wang, L. Zhang, i X. Chen. »Computational analysis of thermal conductivity of asphalt mixture based on multi-scale mathematical model.« *Journal of Engineering Mechanics*, 2018.
- Renou, E. »Differences de temperature entre la ville et la campagne.« *Annuaire Societe Meteorologie de France* 3, 1968: 83-97.
- Renou, E. »Differences de temperature entre Paris et Choisy-le-Roy.« *Annuaire Societe Meteorologie de France* 10, 1862: 105-109.

- Renou, E. »Instructions meteorologiques.« *Annuaire Societe Meteorologie de France* 3 (1), 1855: 73-160.
- Resler, J., i dr. »PALM-USM v1.0: A new urban surface model integrated into the PALM larg-eddy simulation model.« *Geoscientific Model Development*, 2017: 3635-3659.
- Ripley, E.A., O.W. Archibold, i D.L. Brettel. »Temporal and spatial temperature patterns in Saskatoon.« *Weather* 51, 1996: 398-405.
- Robertson, W.D. *Determining the winter design temperature for asphalt pavements*. Ottawa: Transportation Association of Canada, 1997.
- Roesler, J., i S. Sen. *Impact of pavements on the urban heat island*. ICT-16-025, Center for highway pavement preservation, 2016.
- Rosenfeld, A.H., i dr. »Mitigation of urban heat island: materials, utility programs, updates.« *Energy and Buildings* 22, 1995: 255-265.
- Rumney, T.N., i R.A. Jimenez. »Pavement temperatures in the southwest.« *Highway Research Record*, 1970.
- Sailor, D., i L. Lu. »A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas.« *Atmospheric Environment* 38, 2004: 2737-2748.
- Sakakibara, Y. »Numerical study of the effect of urban geometry upon the surface energy budget.« *Atmospheric Environment*, 1996: 487-496.
- Santamouris, M. »Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments.« *Solar Energy*, 2012: in press.
- Santamouris, M. »Heat island research in Europe - the state of the art.« *Journal Advances Building Energy Research* 1, 2007: 123-150.
- Santamouris, M. »Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments.« *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013: 224-240.
- Santamouris, M., A. Synnefa, i T. Karlessi. »Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions.« *Solar Energy* 85 (12), 2011: 3085-3102.
- Santamouris, M., D. Nasimakopoulos, V.D. Assimakopoulos, N. Christomallidou, N. Klitsikas, i D. et al Mangold. *Energy and Climate in the urban built environment*. London: James & James (Science Publishers), 2001.

- Santamouris, M., i dr. »On the impact of urban climate on energy consumption of building.« *Solar Energy* 70 (3), 2001: 201-216.
- Santamouris, M., N. Papanikolaou, I. Koronakis, I. Livada, i D. Asimakopoulos. »Thermal and air flow characteristic in a deep pedestrian canyon under hot weather consitions.« *Atmospheric Environment* 33, 1999: 4503-4521.
- Sarrat, C., A. Lemonsu, V. Masson, i D. Guedalia. »Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution.« *Atmospheric Environment* 40, 2006: 1743-1758.
- Satterthwaite, D. »Cities contribution to global warming: notes on the allocation of greenhouse gas emissions.« *Environment and Urbanization* 20 (2), 2008: 539-549.
- Schmidlin, T.W. »The urban heat island at Toledo, Ohio.« *Ohio Journal of Science* 89, 1989: 38-41.
- Shahgedanova, M., T.P. Burt, i T.D. Davies. »Some aspects of the three dimensional heat island in Moscow.« *International Journal of Climatology* 17, 1997: 1451-1465.
- Simmonds, I., i K. Keay. »Weekly cycle of meteorological variations in Melbourne and the role of pollution and athropogenic heat release.« *Atmospheric Environment* 31 (11), 1997: 1589-1603.
- Smidth, W. »Die Verteilung der Minimum temperaturen in der Frostnacht de 12 Mai 1927 im Gemeindegebiet von Wien.« *Fortschritte der Landwirtschaft* 2 (21), 1929: 681-686.
- Smidth, W. »Zum Einfluss grosser Stadte auf das Klima.« *Naturwissen* 5, 1917: 494-495.
- Solaimanian, M, i T.W. Kennedy. »Predicting maximum pavement surface temperature using maximum air temperature and hourly solar radiation.« *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 1993.
- Solaimanian, M., i P. Bolzan. *Analysis of the integrated model of climatic effects on pavements*. SHRP-A-639, Washington D.C.: Strategic Highway Research Program; National Research Council, 1993.
- Souza, L.C.L., C.P. Postigo, A.P. Oliverira, i C.M. Nakata. »Urban heat islands and electrical energy consumption in a Brazilian city.« *2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced*

- Ventilation Technologies in the 21st Century*. Crete island: Heliotopos conference, 2007. 1005-1009.
- Steinecke, K. »Urban climatological studies in Reykjavik subarctic environment, Iceland.« *Atmospheric Environment* 33, 1999: 4157-4162.
- Stempihar, J.J., T. Pourshams-Manzouri, K.E. Kaloush, i M.C. Rodezno. »Porous asphalt pavement temperature effects for urban heat island analysis.« *Transportation Research Record*, 2012: 123-130.
- Stone, B.J., i J.M Norman. »Land use planning and surface heat island formation: a parcel-based radiation flux approach.« *Atmospheric Environment* 40, 2006: 3561-3573.
- Straub, A.L., H.N.J. Schenck, i F.E. Przbycien. »Bituminous pavement temperature related to climate.« *Highway Research Record*, 1968: 53-77.
- Syneffa, A., T. Karlessi, N. Gaitani, M. Santamouris, D.N. Assimakopoulos, i C. Papakatsikas. »Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve urban microclimate.« *Building and Environment*, 2011: 38-44.
- Synnefa, A., A. Dandou, M. Santamouris, i M. Tombrou. »On the Use of Cool Materials as a Heat Island Mitigation Strategy.« *Journal of Applied Meteorology and Climatology* (47), 2008: 2846-2856.
- Synnefa, A., M. Saliari, i M. Santamouris. »Experimental and numerical assessment of the impact of increased roof reflectance on a school building in Athens.« *Energy and Buildings* 55, 2012: 7-15.
- Tabatabaie, S.A., H. Ziari, i M. Khalili. »Modelling temperature and resilient modulus of asphalt pavements for tropic zones of Iran.« *Asian Journal of Scientific Research*, 2008: 579-588.
- Taha, H. "Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat." *Energy and Buildings* 25, 1997: 99-103.
- Taha, H., D. Sailor, i H. Akbari. *High albedo materials for reducing cooling energy use*. Berkley, CA: Lawrence Berkley Laboratory Report 31721, 1992.
- Taha, H., H. Akbari, D. Sailor, i R. Ritschard. *Causes and Effects of Heat Islands: Sensitivity to Surface parameters and Anthropogenic Heating*. Rep. 29864, Berkeley: Lawrence Berkeley Laboratory, 1992.

- Takebayashi, H., i M. Moriyama. »Study on surface heat budget of various pavements for urban heat island mitigation.« *Advances in Materials Science and Engineering* 2012 (2012): 1-11.
- Tapper, N.J. »Urban influences on boundary layer temperature and humidity: results from Christchurch, New Zealand.« *Atmospheric Environment B* 24, 1990: 19-27.
- Tarleton, L.F., i R.W. Katz. »Statistical explanation for trends in extreme summer temperatures at Phoenix, Arizona.« *Journal of Climate* 8, 1995: 1704-1708.
- Tegeler, P.A., i Dempsey B.J. »A Method of Predicting Compaction Time For Hot-Mix Bituminous Concrete.« *Asphalt Paving Technology Vol. 42*. Association of Asphalt Paving Technologists Technical Sessions, 1973. 499-523.
- Teltayev, B., i K. Aitbayev. »Modeling of transient temperature distribution in multilayer asphalt pavement.« *Geomechanics and Engineering*, 2015: 133-152.
- Tereschenko, I.E., i A.E. Filonov. »Air temperature fluctuations in Guadalajara, Mexico from 1926 to 1994 in relation to urban growth.« *International Journal of Climatology* 21, 2001: 483-494.
- Torok, S.J., C.J.G. Morris, C. Skinner, i N. Plummer. »Urban heat island features of southeast Australian Towns.« *Australian Meteorological Magazine* 50, br. 1 (2001): 120-128.
- Travis, D.J., V. Meentemeyer, i P.W. Suckling. »Influence of meteorological conditions on urban/rural temperature and humidity differences for a small city.« *Southeastern Geographer* 27, 1987: 90-100.
- Trenberth, K.E., J.T. Fasullo, i J. Kiehl. »Earth's global energy budget.« *Bulletin of American Meteorological Society* 90(3), 2009: 311-323.
- Tsai, M.Y., i K.S. Chen. »Measurements and three-dimensional modeling of air pollutant dispersion in an urban street canyon.« *Atmospheric Environment* 38, 2004: 5911-5924.
- Tso, C.P. »A survey of urban heat island studies in two tropical cities.« *Atmospheric Environment* 30, 1996: 507-519.
- Tumanov, S., A. Stan-Sion, A. Soci, C. Lupu, i C. Oprea. »Influences of the city of Bucharest on weather and climate parameters.« *Atmospheric Environment* 33, 1999: 4173-4183.

- Turner, W.C., i J.F. Malloy. *Thermal Insulation Handbook*. Malabar, Florida: Robert E. Krieger Publishing Company, 1981.
- Unger, J. »Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database.« *International Journal of Environment and Pollution* 36 (1,2,3), 2009: 59-80.
- Unger, J. »Heat island intensity with different meteorological conditions in a medium-sized town: Szeged, Hungary.« *Theoretical and Applied Climatology* 54, 1996: 147-151.
- Unger, J., Z. Sumeghy, i J. Zoboki. »Temperature cross-section features in an urban area.« *Atmospheric Research* 58, 2001: 117-127.
- United Nations. *World Urbanization Prospects: The Revision 2011*. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Divisions, 2012.
- Unwin, D.J. »The synoptic climatology of Birmingham's heat island.« *Weather* 35, 1980: 43-50.
- Van Dam, T.J., i dr. *Towards sustainable pavement systems*. Urbana, IL, USA: Applied pavement technology inc., 2015.
- Villena Del Carpio, J.A., D.L. Marinoski, G. Triches, R. Lamberts, i J.V.S. De Melo. »Urban pavements used in Brasil: Characterization of solar reflectance and temperature verification in the field.« *Solar Energy*, 2016: 72-81.
- Voogt, J.A., i T.R. Oke. »Thermal Remote Sensing of Urban Areas.« *Remote Sensing of Environment* 86 (Special issue on Urban Areas), 2003: 370-384.
- Wahhab, H.I., I.M. Asi, i R.H. Ramadhan. »Modelling resilient modulus and temperature correction for Saudi roads.« *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2001: 298-305.
- Wang, D. *Analytical solutions for temperature profile prediction in multilayered pavement systems, PhD thesis*. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2011.
- Wang, D. »Prediction of asphalt pavement temperature profile during FWD testing: Simplified analytical solution with model validation based on LTTP data.« *Journal of Transportation Engineering*, 2013: 109-113.
- Wang, D., i J.R. Roesler. »One dimensional temperature profile prediction in multilayered rigid pavement systems using a separation of variables method.« *International Journal of Pavement Engineering*, 2014: 373-382.

- Wang, D., i J.R. Roesler. »One-dimensional rigid pavement temperature prediction using Laplace transformation.« *Journal of Transportation Engineering*, 2012: 1171-1177.
- Wang, D., J.R. Roesler, i D.Z. Guo. »Analytical approach to predicting temperature fields in multilayered pavement systems.« *Journal of Engineering Mechanics*, 2009: 334-344.
- Wang, S., Q. Zhu, Y. Duan, i P. Shang. »Unidirectional heat-transfer asphalt pavement for mitigating the urban heat island effect.« *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014: 812-821.
- Watkins, R., J. Palmer, M. Kolokotroni, i P. Littlefair. »The London heat island-surface and air temperature measurements in a park and street gorges.« *ASHRAE Transactions* 108 (1), 2002: 419-427.
- Wei, J., i J. He. »Numerical simulation for analyzing the thermal improving effect of evaporative cooling urban surfaces on the urban built environment.« *Applied Thermal Engineering* 51, 2013: 144-154.
- Weng, Q. »A remote sensing GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China.« *International Journal of Remote Sensing* 22 (10), 2001: 1999-2014.
- Weng, Q., i S. Yang. »Managing the adverse thermal effects of urban development in a densely populated Chinese city.« *Journal of Environmental Management* 70, 2004: 145-156.
- Weng, Q., i S. Yang. »Urban air pollution patterns, land use and thermal landscape: an examination of the linkage using GIS.« *Environmental Monitoring and Assessment* 117, 2006: 463-489.
- White, P., J.S. Golden, K.P. Biligiri, i K.E. Kaloush. »Modeling climate change impacts of pavement production and construction.« *Resources, Conservation and Recycling* 54 (11), 2010: 776-782.
- Williamson, R.H. »Effects of environment on pavement temperatures.« *Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. London, 1972. 144-158.
- Wong, E., i dr. *Reducing urban heat islands: compendium of strategies-urban heat island basics*. Washington DC: US Environmental Protection Agency, 2008.

- Wu, H., B. Sun, Z. Li, i J. Yu. »Characterizing thermal behaviors of various pavement materials and their thermal impacts on ambient environment.« *Journal of Cleaner Production*, 2018: 1358-1367.
- Xiao, H., i Q. Weng. »The impact of land use and land cover changes on land surface temperature in karst area of China.« *Journal of Environmental management* 85, 2007: 245-257.
- Xu, T., J Sathay, H. Akbari, V. Garg, i S. Tetali. »Quantifying the direct benefits of cool roofs in an urban setting: reducing cooling energy use and lowered greenhouse gas emissions.« *Building and Environment* 48, 2012: 1-6.
- Yague, C., E. Zurita, i A. Martinez. »Statistical analysis of the Madrid urban heat island.« *Atmospheric Environment B* 25, 1991: 327-332.
- Yamamoto, Y. »Measures to mitigate urban heat islands.« *Qartely Review* 18, 2006.
- Yamashita, S. »Detailed structure of heat island phenomena from moving observations from electric tram-cars in metropolitan Tokyo.« *Atmospheric Environment* 30 (3), 1996: 429-435.
- Yamashita, S., i K. Sekine. »Some studies on the Earth's surface conditions relating to the urban heat island.« *Energy and Buildings* 15 - 16, 1990/1991: 279-288.
- Yamashita, S., Sekine, K., M. Shoda, K. Yamashita, i Y. Hara. »On relationships between heat island and sky view factor in the cities of Tama River Basin, Japan.« *Atmospheric Environment* 20 (4), 1986: 681-686.
- Yang, J., Z. Wang, K.E. Kaloush, i H. Dylla. »Effect of pavement thermal properties on mitigating urban heat islands: A multi-scale modeling case study in Phoenix.« *Building and Environment*, 2016: 110-121.
- Yap, D. »Seasonal excess urban energy and the nocturnal heat island - Toronto.« *Archiv fur Meteorologie Geophysik und Bioklimatologie Serie B* 23, 1975: 68-80.
- Yavuzturk, C., K. Ksaibati, i A.D. Chiasson. »Assessment of temperature fluctuations in asphalt pavements due to thermal environmental conditions usin a two-dimensional, transient finite-difference approach.« *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2005: 465-475.
- Yin, Z., J. Hadzimustafic, A. Kann, i Y. Wang. »On statistical nowcasting of road surface temperature.« *Meteorological Applications*, 2019: 1-13.

- Yoshikado, H., i M. Tsuchida. »High levels of winter air pollution under the influence of the urban heat island along the shore of Tokyo Bay.« *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 35, 1996: 1804-1813.
- Zaghloul, S., N. Gucunski, H. Jackson, i R. Hadidi. *Material characterization and seasonal variation in material properties*. FHWA-NJ-2005-024, Piscatway: The State University of New Jersey, 2006.
- Zhang, G., B.J. He, Z. Zhu, i B.J. Dewancker. »Impact of morphological characteristic of green roofs on pedestrian cooling in subtropical climates.« *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019: 179.
- Zhang, L., H. Wang, i Z.S. Ren. »Computational analysis of thermal conductivity of asphalt mixture using virtually generated three-dimensional microstructure.« *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017.
- Zhang, R., G. Jiang, i L. Liang. »The albedo of pervious cement concrete linearly decreases with porosity .« *Advances in Material Science and Engineering*, 2015.
- Zheng, Y.X., Y.C. Cai, i Y.M. Zhang. »Study on temperature field of asphalt concrete pavement.« *Geotechnical Special Publication*, 2011: 266-273.
- Zhu, X., Y. Yu, i F. Li. »A review on thermoelectric energy harvesting from asphalt pavement: Configuration, performance and future.« *Construction and Building Materials*, 2019.