

Određivanje koeficijenta prolaska topline elemenata vanjske ovojnice zgrade korištenjem infracrvene termografije

Gaši, Mergim

Doctoral thesis / Disertacija

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:794501>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Mergim Gaši

**ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA
PROLASKA TOPLINE ELEMENATA
VANJSKE OVOJNICE ZGRADE
KORIŠTENJEM INFRACRVENE
TERMOGRAFIJE**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2023.



Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Mergim Gaši

**ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA
PROLASKA TOPLINE ELEMENATA
VANJSKE OVOJNICE ZGRADE
KORIŠTENJEM INFRACRVENE
TERMOGRAFIJE**

DOKTORSKI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Bojan Milovanović

Zagreb, 2023.



University of Zagreb

Faculty of Civil Engineering

Mergim Gaši

**DETERMINATION OF THERMAL
TRANSMITTANCE OF BUILDING
ELEMENTS USING INFRARED
THERMOGRAPHY**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor: Assoc. Prof. Bojan Milovanović, PhD

Zagreb, 2023.

IZJAVA O IZVORNOSTI

Ja, Mergim Gaši, potvrđujem da je moj Doktorski rad izvorni rezultat mojega rada te da se u njegovoj izradi nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Mergim Gaši, mag. ing. aedif.

Informacije o mentoru

Mentor doktorske disertacije je izv. prof. dr. sc. Bojan Milovanović, dipl. ing. građ., izvanredni profesor na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na Zavodu za materijale.

Bojan Milovanović rođen je u Čakovcu 1984. godine, gdje je završio osnovnu i srednju školu. Diplomirao je 2007. godine na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na smjeru Konstrukcije. Doktorirao je 2013. godine s temom „*Karakterizacija oštećenja armiranog betona primjenom metode infracrvene termografije*“. Nakon završenog doktorskog studija ostaje raditi na Zavodu za materijale Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu gdje je 2016. izabran u znanstveno-nastavno zvanje docenta, a 2022. godine stječe titulu izvanrednog profesora. Kao izvanredni profesor na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu predaje na preddiplomskom studiju na kolegijima: Građiva i Poznavanje materijala. Na diplomskom studiju: Građevinska fizika, Nerazorna ispitivanja te Energetska obnova zgrada. Sudjeluje i na održavanju nastave na poslijediplomskom doktorskog studija na kolegiju Patologija izolacijskih materijala. Mentor je na ukupno 57 na završnih i diplomskih radova. Područje znanstvenog istraživanja između ostalog obuhvaća: energetska učinkovitost, građevinsku fiziku, razorne i nerazorne metode ispitivanja, određivanje higrotermalnih svojstava materijala. Autor je i koautor na 37 znanstvenih i stručnih radova u časopisima, 96 znanstvenih radova u zbornicima skupova, sedam poglavlja u knjigama te 157 sažetaka na raznim znanstvenim i stručnim skupovima. Sudjeluje na raznim znanstveno istraživačkim projektima kao voditelj i partner od kojih su neki:

- *"ECO-SANDWICH – Energy Efficient, Recycled Concrete Sandwich Facade Panel*
- *Razvoj inovativnih građevnih kompozita primjenom biopepela*
- *CROSKILLS II – Build Up Skills CROatia: Strengthening energy efficiency SKILLS and certification schemes for building workers*
- *CROSKILLS – BUILD UP Skills Croatia*
- *BIMzeED – Education for zero energy Buildings using Building Information Modelling*
- *FIT-TO-NZEB – Innovative training schemes for retrofitting to nZEB-levels*
- *CPD4GB – Razvoj profesionalnih kompetencija za zelenu gradnju*
- *Net-UBIEP – Network for Using BIM to Increase the Energy Performance*
- *Istraživanje i razvoj E-burze energetske obnove u zgradarstvu i industriji*
- *Od nano do makrostrukture betona*

- *Prominent MED – Public pROcureMent of INnovation boosting greEn growTh in MED area*
- *KLIK – Kompozitni lagani panel s integriranom nosivom konstrukcijom*
- *Modeliranje higrotermalnih uvjeta u NZEB zgradama*
- *The nZEB Roadshow*
- *CONGREGATE – Consumer Engagement in building renovation and renewable energy cooperatives for grassroots climate action*
- *Analiza utjecaja toplinskih mostova na gubitke topline u zgradama gotovo nulte energije*
- *Mikrostruktura mineralnih kompozita s ovčjom vunom*
- *Sanacija povijesnih građevina ekološkim mortovima*
- *South East Europe strategic partnership in vocational education and training in Passive House Design for nearly zero energy building development – SEEDPass*
- *Intelligent Energy Europe project INTENSE Intelligent energy saving measures for municipal housing in Central and Eastern European countries*
- *BUS-GoCircular – Stimulate demand for sustainable energy skills with circularity as a driver and multifunctional green use of roofs, façades and interior elements as focus*
- *Ocjena utjecaja na okoliš prilikom energetske obnove zgrada*
- *CRO skills – rebooting the National Platform and Roadmap*
- *TAREC2 – Transformacija pepela iz drvene biomase u građevne kompozite s dodanom vrijednošću*
- *CA EPBD IV – Concerted Action EPBD IV*

Zahvala

Mi smo išli putem. Put je bio dug. Kasno opazismo da je taj put krug. Jedan dio pjesme kojeg se prečesto sjetim, a u sjećanje ga je urezala moja nastavnica Hrvatskog jezika u srednjoj školi koja ga je uvijek pratila s izrekom: „Jednog dana ćete završiti srednju školu pa fakultet i izaći ćete u svijet i shvatiti da vaše učenje tek počinje i da ste se vratili na početak.“ Pa, eto, prije četiri dana je završen još jedan izazov u mom životu. Jedna epoha koja je možda trajala duže nego je trebala, ali je završila. Put je bio dug, ali zabavan. Ne bi bio moguć bez određenih pojedinaca koji su me do njega doveli, a i po tom putu se sa mnom družili.

Od svih ljudi kojima sam vrlo zahvalan što su me oblikovali u osobu koja jesam danas, želio bih istaknuti dio njih. Prva osoba koja me je naučila većinu toga o tome kako biti osoba je moja mama bez čije borbe ne bih bio tu gdje jesam. Njena žrtva i odricanje je mojim sestrama, bratu i meni pružila život koji danas živimo. Da živim još 100 života ne bih joj se mogao odužiti. Mama, hvala ti!

Tu je zatim moja supruga Antonia koja je uvijek tu za mene. I najteži dani pokraj njenog pozitivima blijede. Antonia, hvala ti na svemu, a posebno hvala na tvojim roditeljima koje s ponosom mogu zvati punicom i puncem, a koji su nas pratili kroz naš zajednički život i pružili nam sve da oblikujemo svoju sadašnjost. U tebi vidim puno njih.

Sad smo malo skrenuli s puta pa bih se htio vratiti na svog mentora Bojana. Zahvaljujem mu se na svim savjetima, druženjima i stečenim iskustvima kroz zadnjih šest godina.

Zahvaljujem se kolegama iz Instituta IGH na svoj pruženoj pomoći i jako ugodnom iskustvu i suradnji.

Na kraju bih se htio zahvaliti svima koji su bili tu uz mene. Prijateljima i kolegama s posla koji su mi nekada i pomagali iako to nisu znali. Nekad je najteže biti sam sa svojim mislima.

“You're an interesting species. An interesting mix. You're capable of such beautiful dreams, and such horrible nightmares. You feel so lost, so cut off, so alone, only you're not. See, in all our searching, the only thing we've found that makes the emptiness bearable, is each other.”

~ Alien – Kontakt (1997.)

Kapetanov dnevnik, zvjezdani nadnevak 101338.37

Sažetak

Najveći dio potrošnje energije u zgradama otpada na transmisijske toplinske gubitke. Tradicionalni načini određivanja tih gubitaka svode se na određivanje koeficijenta prolaska topline (U-vrijednosti) pojedinih elemenata zgrade u stacionarnim uvjetima koji se u stvarnosti nikada ne ostvare. Ta U-vrijednost ne uzima u obzir akumulaciju topline u elementima, degradaciju materijala uslijed efekta starenja, dinamiku prijenosa topline na površini uslijed strujanja zraka te energiju koja se zračenjem prenosi iz okoliša na promatranu površinu. Glavni cilj ovog rada je odrediti U-vrijednost pojedinih građevinskih elemenata zgrade korištenjem infracrvene termografije te izmjerenih parametara koji opisuju okoliš koji odvaja promatrani element. Tako određena U-vrijednost koristila bi se kako bi se realnije opisale energetske potrebe zgrade u cilju smanjenja potrošnje energije, za kontrolu izvedenog stanja novih zgrada te analizu stanja ovojnice postojećih zgrada prije energetske obnove.

Ključne riječi: U-vrijednost, infracrvena termografija (ICT), prividna reflektirana temperatura, tokomjerna metoda (HFM), granični sloj, ambijentalna temperatura, srednja temperatura zračenja.

Prošireni sažetak

Najveći dio potrošnje energije i emisije stakleničkih plinova otpada na zgrade, a najveći dio potrošene energije otpada na transmisivne toplinske gubitke, tj. gubitke uslijed provođenja topline kroz elemente vanjske ovojnice zgrade. U današnje vrijeme se taj problem rješava na način da se zgrade izoliraju s određenom debljinom toplinske izolacije koja je u nekim slučajevima nepotrebna i povećava ekonomski trošak građenja. Kod većine postojećih zgrada početni transmisivni gubici nisu poznati pošto nisu dostupne adekvatne informacije o postojećim slojevima elemenata vanjske ovojnice zgrade pa je uštedu nakon obnove teško procijeniti. Međutim, greške u izvođenju radova te neadekvatna instalacija materijala tijekom gradnje (utjecaj kiše, sunca, itd.) mogu povećati toplinske gubitke za korisnike zgrade što može rezultirati povećanim troškovima za grijanje i hlađenje te građevinskom štetom u vidu izbijanja gljivica i plijesni na unutarnjoj površini. Cilj Europske unije je različitim Direktivama ograničiti potrošnju energije u zgradarstvu te povećati korištenje energije iz obnovljivih izvora. Međutim, projektne vrijednosti koeficijenta prolaska topline (U-vrijednosti) kojima se dokazuje smanjenje potrošnje energije u odnosu na početno stanje kod energetske obnove ili energetska učinkovitost kod novih zgrada u većini slučajeva ne odgovaraju stvarnoj potrošnji. Stvarne U-vrijednosti se mogu razlikovati od projektnih zbog gore navedenih razloga, ali i zbog različitih drugih čimbenika kao što su: nehomogenost strukture koja se pretpostavlja kod određivanja projektnih vrijednosti, starosti ugrađenih materijala, povećanim plošnim prijelazima topline zbog vjetrova, itd. Kako bi se dokazala stvarna potrošnja koriste se razne metode određivanja U-vrijednosti na terenu, a dvije najčešće metode su metoda tokomjera („*Heat Flow Meter*“ – HFM) i metoda infracrvene termografije (ICT).

Metoda HFM je standardizirana metoda prema normi HRN EN ISO 9869-1 „*Toplinska izolacija – Građevni elementi – Mjerenje toplinskog otpora i prolaska topline in situ – 1. dio: Tokomjerna metoda*“ te se kao takva može koristiti za određivanje stvarnih U-vrijednosti elemenata vanjske ovojnice zgrade. Metoda koristi senzor za mjerenje gustoće toplinskog toka (tokomjer) te dva termočlanka za mjerenje unutarnje i temperature vanjskog zraka. Najveći nedostatak ove metode je što se U-vrijednost određuje točkasto te metoda nije u stanju sagledati širu sliku distribucije toplinskog toka po površini promatranog elementa kao ni stanje površine iza tokomjera.

Primjenom ICT metode se toplinski tok računa iz određene površinske temperature elementa, prividne reflektirane temperature iz okoline, temperature zraka te koeficijenta koji opisuju

prijenos topline strujanjem iz okoliša na promatranu površinu. Mjerenje se provodi infracrvenom kamerom pomoću koje se u vremenu određuju prividna površinska temperatura te prividna reflektirana temperatura koje opisuju zračenje koje se prenosi između promatrane površine i okoline i obrnuto. Pomoću termočlanka se mjeri temperatura zraka koja je potrebna za opisivanje toplinskog toka strujanjem na površini, a anemometrom se određuje režim strujanja uz površinu – laminarno ili turbulentno. Prividna reflektirana temperatura se određuje metodom refleksije korištenjem komada zgužvane i nakon toga spljoštene aluminijske folije dok je za određivanje površinske temperatura potrebno odrediti koeficijent emisivnosti površine. Na temelju izmjerenih veličina korištenjem Stefan-Boltzmannovog zakona zračenja te Newtonovog zakona hlađenja i teorije graničnog sloja se određuje ukupan toplinski tok koji se prenese s površine na okolinu i obrnuto.

Prednost korištenja metode ICT je što se može sagledati šira slika distribucije toplinskog toka po površini. Također moguće je odrediti neizoternost površine kao standardno odstupanje površinske temperature na određenom dijelu zida na način da se temperatura mjeri na većem području zida te se statistički odredi standardna devijacija temperature na toj površini. Najveći nedostatak korištenja metode ICT je ovisnost rezultata mjerenja o uvjetima na površini koje je potrebno pretpostaviti: konstantan koeficijent emisivnosti po cijeloj površini, režim strujanja, konstantna prividna reflektirana temperatura po cijeloj površini zida, itd. Osim toga je potrebno koristiti puno više opreme nego što je to slučaj kod metode HFM.

Analizom izmjerenih veličina identificirani su parametri koji najviše utječu na određivanje U-vrijednosti korištenjem metode ICT. Parametri koji najviše utječu na U-vrijednost određenu metodom ICT su: prividna reflektirana temperatura, površinska temperatura zida, unutarnja i vanjska temperatura zraka, koeficijent plošnog prijelaza topline strujanjem te emisivnost površine. Mjerna nesigurnost izmjerene U vrijednosti procijenjena je korištenjem linearnih matematičkih transformacija. Razine pouzdanosti su određene od 4,91 do 35,71 % ovisno o tome je li element vanjske ovojnice zgrade promatran u zimskim ili ljetnim uvjetima okoliša.

Provedbom laboratorijskih i terenskih mjerenja (Na 17 različitih uzoraka - devet laboratorijskih i osam terenskih) se pokazalo da je metodu ICT moguće koristiti za određivanje U-vrijednosti elemenata vanjske ovojnice zgrade. U-vrijednosti određene metodom ICT su za sve uzorke uspoređene s U-vrijednostima dobivenim metodom HFM. Kod laboratorijskih uzoraka uspoređeni su toplinski tokovi i površinske temperature s numerički dobivenim vrijednostima.

Usporedba toplinskih tokova je pokazala dobru korelaciju i s metodom HFM i s numerički izračunatim toplinskim tokovima.

Primjetno je da se metoda ICT ponaša na način da za veće U-vrijednosti (neizolirani ili slabo izolirani zidovi) pruža bolju pouzdanost u određivanju U-vrijednosti, dok za manje U-vrijednosti (izolirani zidovi) rezultira lošijom pouzdanošću. Kada je toplinski tok nizak, pogreška u očitavanju površinske temperature i prividne reflektirane temperature infracrvenom kamerom ima sličan red veličine kao i razlika u temperaturi između ambijentalne temperature i površinske temperature zida te razlika u temperaturi između prividne reflektirane temperature i površinske temperature zida. Iz toga slijedi da najmanja vrijednost toplinskog toka koju je moguće odrediti metodom ICT, pri čemu se postiže najveća pouzdanost u izmjerenoj U-vrijednosti. Ta vrijednost iznosi otprilike 1 W/m^2 .

Structured abstract

The largest part of energy consumption in buildings are transmission heat losses. Traditional ways of determining these losses are done using the heat transfer coefficient (U-value) of building elements in stationary boundary conditions that are never achieved. This U-value does not take into account the heat accumulated in the elements, the degradation of materials due to the effect of aging, the dynamics of heat transfer on the surface due to air flow and the energy radiated from the environment. The main goal of this research is to determine the U-value of building elements using infrared thermography, and measured parameters that describe the environment that separates the observed element. The U-value determined in this way would be used to describe the energy needs of the buildings more realistically in order to reduce energy consumption, to assess energy needs of new buildings and to analyse the existing building's envelope in terms of heat losses before energy renovation

Keywords: U-value, infrared thermography (IRT), apparent reflected temperature, HFM method, boundary layer, ambient temperature, mean radiant temperature.

Popis slika

Slika 1: Prvi termograf koji je snimio John Herschel [41].....	8
Slika 2: Elektromagnetski spektar [46]	9
Slika 3: Optički dio elektromagnetskog spektra [47].....	9
Slika 4: Mikrobolometar –Shematski prikaz klasičnog (a) mikrobolometra, (b) jednoslojnog mikrobolometra [48]	12
Slika 5: Crno tijelo [51].....	12
Slika 6: Spektri zračenja crnog tijela za različite temperature	13
Slika 7: Pomak maksimalnog intenziteta zračenja s termodinamičkom temperaturom.....	14
Slika 8: Specifični intenzitet zračenja pri nižim temperaturama.....	15
Slika 9: Wienov zakon pomaka.....	16
Slika 10: Stefan-Boltzmannov zakon	17
Slika 11: Realno tijelo	18
Slika 12: Usporedba zračenja crnog, sivog i realnog tijela	21
Slika 13: Spektralna propusnost atmosfere	22
Slika 14: Granični sloj pri strujanju uzduž ravne površine	31
Slika 15: Hidrodinamički granični sloj na ravnoj površini	34
Slika 16: Hidrodinamički granični sloj debljine δ	34
Slika 17: Temperaturni granični sloj na ravnoj površini.....	36
Slika 18: Temperaturni granični sloj.....	36
Slika 19: Lokalni i prosječni toplinski tok strujanjem	37
Slika 20: Strujnice u homogenom horizontalnom toku $\Psi = u^\infty \cdot y$	40
Slika 21: Odnos točnog i približnog rješenja $\delta t \delta$ i Prandtlovog broja (nacrtano pomoću podataka iz [77]).....	48
Slika 22: Fourierov zakon [80].....	52
Slika 23: 1D provođenje topline.....	54
Slika 24: Infinitesimalno mali uzorak Δx	54
Slika 25: Aproksimacija funkcije korištenjem MKR.....	56
Slika 26: Sheme aproksimacije derivacija – a) eksplicitna shema, b) implicitna shema i c) Crank-Nicolson shema	56
Slika 27: MKR za 1D provođenje topline	59
Slika 28: MKR – aproksimacija prve derivacije	59
Slika 29: Shema rada termoelementa	64

Slika 30: Thomsonov efekt	65
- Slika 31: Funkcija za određivanje optimalnog perioda mjerenja metodom srednje vrijednosti.....	69
Slika 32: Dijagram toka dinamičke metode [85]	73
Slika 33: Dio algoritma za izračun U-vrijednosti metodom najmanjih kvadrata [85]	75
Slika 34: Princip mjerenja metodom infracrvene termografije: (1) okolina, (2) mjerena površina, (3) okoliš, (4) IC kamera	76
Slika 35: Infracrvena kamera [99].....	81
Slika 36: Sustav za mjerenje gustoće toplinskog toka TRSYS01 [101]	82
Slika 37: Globus termometar [103]	83
Slika 38: Termoanemometar [103]	83
Slika 39: Površinski termočlanak [103]	84
Slika 40: Piranometar [101]	85
Slika 41: Dataloggeri: a) ALMEMO® 2890-9 [103] i b) CR300 [108]	85
Slika 42: Postojeći uzorak za kondicioniranje ETICS sustava	86
Slika 43: Ispitivani uzorak.....	87
Slika 44: Unutrašnjost komore i razmještaj različitih komponenti sustava za mjerenje i simulaciju vanjskog okoliša	87
Slika 45: Prikaz sustava za mjerenje U-vrijednosti.....	89
Slika 46: Shema postavljanja mjerne opreme na unutarnjoj površini zida	90
Slika 47: Sustav za mjerenje: a) i b) površina prema laboratoriju, c) površina unutar komore	91
Slika 48: Zaštita promatrane površine od zračenja okoline	91
Slika 49: Toplinska masa uzoraka za unutarnju površinu bez plošnog prijelaza topline.....	100
Slika 50: Toplinska masa uzoraka za unutarnju površinu s plošnim prijelazom topline	100
Slika 51: Toplinska masa uzoraka za vanjsku površinu bez plošnog prijelaza topline.....	100
Slika 52: Toplinska masa uzoraka za vanjsku površinu s plošnim prijelazom topline	101
Slika 53: Prikaz postavljenog mjerenja i mjerenih površina (crvenom bojom je na vanjskoj površini zida prikazana mjerena površina).....	104
Slika 54: Podaci vremenske prognoze za Ivanovec: a) Temperatura zraka, b) Relativna vlažnost zraka, c) Brzina vjetrova, d) Sunčevo zračenje i e) Količina oborina (podaci preuzeti s [110])	110
Slika 55: Podaci vremenske prognoze za Lenti: a) Temperatura zraka, b) Relativna vlažnost zraka, c) Brzina vjetrova, d) Sunčevo zračenje i e) Količina oborina (podaci preuzeti s [110])	111

Slika 56: Podaci vremenske prognoze za Muraszemenye: a) Temperatura zraka, b) Relativna vlažnost zraka, c) Brzina vjetra, d) Sunčevo zračenje i e) Količina oborina (podaci preuzeti s [110]).....	112
Slika 57: Podaci vremenske prognoze za Mursko Središće: a) Temperatura zraka, b) Relativna vlažnost zraka, c) Brzina vjetra, d) Sunčevo zračenje i e) Količina oborina (podaci preuzeti s [110]).....	113
Slika 58: Podaci vremenske prognoze za Palovec: a) Temperatura zraka, b) Relativna vlažnost zraka, c) Brzina vjetra, d) Sunčevo zračenje i e) Količina oborina (podaci preuzeti s [110])	115
Slika 59: Podaci vremenske prognoze za Tornyszentmiklos: a) Temperatura zraka, b) Relativna vlažnost zraka, c) Brzina vjetra, d) Sunčevo zračenje i e) Količina oborina (podaci preuzeti s [110]).....	116
Slika 60: Podaci vremenske prognoze za Totovec: a) Temperatura zraka, b) Relativna vlažnost zraka, c) Brzina vjetra, d) Sunčevo zračenje i e) Količina oborina (podaci preuzeti s [110])	117
Slika 61: Podaci vremenske prognoze za Vaspor: a) Temperatura zraka, b) Relativna vlažnost zraka, c) Brzina vjetra, d) Sunčevo zračenje i e) Količina oborina (podaci preuzeti s [110])	118
Slika 62: Rezultati mjerenja HFM-a (unutarnja i vanjska temperatura zraka i toplinski tokovi)	119
Slika 63: Lokacije mjerenja ICT	125
Slika 64: Rezultati mjerenja ICT-om (prividna reflektirana temperatura T_{refl} , temperatura zida $T_{ct,1}$ i $T_{ct,2}$; i standardna devijacija σ_{refl} , $\sigma_{ct,1}$ i $\sigma_{ct,2}$) za slučaj 2K	125
Slika 65: Transmitivnost atmosfere za $T_{atm} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	126
Slika 66: Transmitivnost atmosfere za $T_{atm} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	127
Slika 67: Algoritam za izračun karakteristika zraka ovisnih o temperaturi i tlaku zraka	130
Slika 68: Usporedba različitih modela za određivanje koeficijenta plošnog prijelaza topline strujanjem za uzorak 2K.....	131
Slika 69: Funkcija za pronalaženje težinskih koeficijenata za ambijentalnu temperaturu.....	132
Slika 70: MeanShiftFilter [122]	133
Slika 71: Primjer primjene MeanShiftFiltera na toplinskom toku mjerenom HFM-om za uzorak „2K“	134
Slika 72: Usporedba toplinskih tokova određenih metodama ICT i HFM s numeričkim modelima.....	144
Slika 73: Usporedba površinske temperature na unutarnjoj površini (ICT i numerički model)	148

Slika 74: Usporedba toplinskih tokova izmjerenih metodom HFM i aproksimiranih metodom ICT	158
Slika 75: U-vrijednosti (metoda srednje vrijednosti) određene metodama HFM i ICT.....	174
Slika 76: Rezultati analize dinamičkom metodom.....	183
Slika 77: Rezultati određivanja U-vrijednosti dinamičkom metodom za laboratorijske uzorke s izolacijom s vanjske strane.....	184
Slika 78: Rezultati određivanja U-vrijednosti dinamičkom metodom za laboratorijske uzorke bez izolacije.....	184
Slika 79: Rezultati određivanja U-vrijednosti dinamičkom metodom za laboratorijske uzorke s izolacijom s unutarnje strane.....	185
Slika 80: Rezultati određivanja U-vrijednosti dinamičkom metodom za terenske uzorke	185
Slika 81: Mjerna nesigurnost za gustoću toplinskog toka (ICT) – a) laboratorijski uzorci i b) terenski uzorci	188
Slika 82: Usporedba U-vrijednosti za različite duljine mjerenja za laboratorijska mjerenja (HFM).....	193
Slika 83: Usporedba U-vrijednosti za različite duljine mjerenja za terenska mjerenja (HFM)	193
Slika 84: Odstupanja U-vrijednosti za različite duljine mjerenja za HFM (laboratorij)	194
Slika 85: Odstupanja U-vrijednosti za različite duljine mjerenja za HFM (teren).....	194
Slika 86: Ovisnost duljine mjerenja o U-vrijednosti – a) HFM1 i b) HFM2	195
Slika 87: Usporedba U-vrijednosti za različite duljine mjerenja za laboratorijska mjerenja (ICT)	196
Slika 88: Usporedba U-vrijednosti za različite duljine mjerenja za terenska mjerenja (ICT)	197
Slika 89: Odstupanja U-vrijednosti za različite duljine mjerenja za ICT (laboratorij)	197
Slika 90: Odstupanja U-vrijednosti za različite duljine mjerenja za ICT (teren).....	198
Slika 91: Ovisnost duljine mjerenja o U-vrijednosti – a) lijevi dio (ICT,L) i b) desni dio (ICT,D)	198
Slika 92: Utjecaj emisivnosti površine na gustoću toplinskog toka.....	207
Slika 93: Usporedba toplinskog toka određenog korištenjem MRT-a i prividne reflektirane temperature.....	212
Slika 94: Usporedba površinske temperature izmjerene metodom ICT i površinskim termočlankom.....	217

Slika 95: Kašnjenje očitavanja površinske temperature i prividne reflektirane temperature i temperature unutarnjeg zraka za Mursko Središće – a) za 1 minutu i b) za 2 minute	218
Slika 96: Kašnjenje očitavanja površinske temperature i prividne reflektirane temperature i temperature unutarnjeg zraka za Palovec – a) za 1 minutu i b) za 2 minute.....	219

Popis tablica

Tablica 1: Emisivnosti nekih materijala korištenih u građevinarstvu	21
Tablica 2: Konstante za zrak u izrazu (18).....	31
Tablica 3: Termofizička svojstva zraka pri atmosferskom tlaku [78] [79]	49
Tablica 4: Analogija provođenja topline i električnog strujnog kruga.....	51
Tablica 5: Površinski otpori prijelaza topline prema normi HRN EN ISO 6946.....	62
Tablica 6: Iznosi plošnog koeficijenta prijelaza topline strujanja prema normi HRN EN ISO 6946.....	62
Tablica 7: Mjereni parametri i mjerni uređaji	80
Tablica 8: Karakteristike IC kamere [100].....	81
Tablica 9: Karakteristike tokomjera [102]	82
Tablica 10: Karakteristike globus termometra [104]	83
Tablica 11: Karakteristike termoanemometra [105]	83
Tablica 12: Karakteristike površinskog termočlanka [106]	84
Tablica 13: Karakteristike piranometra [107]	85
Tablica 14: Popis i oznake uzoraka.....	88
Tablica 15: Koeficijent prolaska topline za armiranobetonski zid bez izolacije (4B, 7B i 8B)91	
Tablica 16: Proračunski koeficijent prolaska topline za armiranobetonski s izolacijom s vanjske strane (1K, 2K i 3K).....	92
Tablica 17: Proračunski koeficijent prolaska topline za armiranobetonski s izolacijom s unutarnje strane (9S, 10S i 11S).....	92
Tablica 18: Proračunski koeficijent prolaska topline za Ivanovec.....	94
Tablica 19: Proračunski koeficijent prolaska topline za Lenti.....	94
Tablica 20: Proračunski koeficijent prolaska topline za Muraszemenye	95
Tablica 21: Proračunski koeficijent prolaska topline za Mursko Središće	96
Tablica 22: Proračunski koeficijent prolaska topline za Palovec.....	96
Tablica 23: Proračunski koeficijent prolaska topline za Tornyszentmiklos	97
Tablica 24: Proračunski koeficijent prolaska topline za Totovec	98
Tablica 25: Proračunski koeficijent prolaska topline za Vaspör.....	98
Tablica 26: Prikaz snimljenih termograma ispitivane površine	104
Tablica 27: Parametri određeni prije početka mjerenja	107
Tablica 28: Trajanje ispitivanja.....	108
Tablica 29: Modeli korišteni za aproksimiranje strujanja na površini	127

Tablica 30: Koeficijenti korelacije za određivanje težinskih koeficijenata za ambijentalnu temperaturu.....	133
Tablica 31: U-vrijednosti određene metodama ICT i HFM.....	159
Tablica 32: Usporedba U-vrijednosti određene metodom HFM i ICT	159
Tablica 33: Minimalne i maksimalne U-vrijednosti određene metodom ICT (zbog neizoternosti površine).....	160
Tablica 34: Prihvatljivost izračunate U-vrijednosti metodom HFM prema normi HRN EN ISO 9869-1.....	161
Tablica 35: Prihvatljivost izračunate U-vrijednosti metodom ICT prema normi HRN EN ISO 9869-1.....	162
Tablica 36: Određivanje mjerne nesigurnosti za gustoću toplinskog toka za metodu ICT....	186
Tablica 37: Određivanje mjerne nesigurnosti za U-vrijednost za metodu ICT.....	189
Tablica 38: Određivanje mjerne nesigurnosti za U-vrijednost za metodu HFM	190
Tablica 39: Rezultati određivanja U-vrijednosti metodom ICT (od najveće do najmanje)...	225

Popis oznaka i skraćenica

Oznake

Oznaka	Opis	Mj. jed.
$W_{\lambda,ct}$	Specifični intenzitet zračenja crnog tijela	W/m ³
c	Brzina svjetlosti u vakuumu	m/s
h	Planckova konstanta	J×s
k	Boltzmannova konstanta	J/K
T	Termodinamička temperatura crnog tijela	K
λ	Valna duljina	m
C_1	$2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2$	W m ²
C_2	$h \cdot c/k$	m K
ν	frekvencija elektromagnetskog vala	s ⁻¹
λ_{max}	Valna duljina pri maksimumu zračenja crnog tijela	μm
b	Wienova konstanta	m K
W_{ct}	Ukupna energija kojom zrači crno tijelo	W/m ²
σ	Stefan–Boltzmannova konstanta	W/(m ² K ⁴)
α	Apsorbirano zračenje	--
ρ	Reflektirano zračenje	--
ρ	Preneseno zračenje	--
ε	Emisivnost površine	--
ε_λ	Emisivnost površine pri valnoj duljini λ	--
W_{rt}	Ukupna energija kojom zrači realno tijelo	W/m ²
T_{refl}	Prividna reflektirana temperatura	K/°C
T_{amb}	Ambijentalna temperatura	K/°C
MRT/T _{MRT}	Srednja temperatura zračenja	K/°C
q_c	Gustoća toplinskog toka strujanjem	W/m ²
T_p	Temperatura promatranog dijela površine	K/°C
T_∞	Temperatura fluida u okolišu	K/°C
h_c	Lokalni koeficijent prijelaza topline strujanjem	W/(m ² ·K)
\bar{h}_c	Prosječni koeficijent prijelaza topline strujanjem	W/(m ² ·K)
\bar{q}_c	Uprosječena vrijednost toplinskog toka strujanjem	W/m ²
A	Površina elementa vanjske ovojnice zgrade	m ²
ΔA	Dio površine elementa vanjske ovojnice zgrade	m ²

\bar{N}_u	Prosječna vrijednost Nusseltovog broja	--
Nu	Nusseltov broj	--
L	Karakteristična dimenzija elementa	M
λ_f	toplinska provodljivost fluida	W/(m·K)
Pr	Prandtlov broj	--
$c_{p,f}$	specifični toplinski kapacitet fluida pri konstantnom tlaku	J/(kg·K)],
μ	dinamička viskoznost	N·s/m ²
ν	kinematička viskoznost	m ² /s
α	toplinska difuzivnost	m ² /s
Re	Reynoldsov broj	--
ρ_f	Gustoća fluida	kg/m ³
u_∞	brzina slobodnog strujanja fluida	m/s
Re_{kr}	Kritični Reynoldsov broj	--
x_{kr}	Granica laminarnog režima strujanja fluida	M
μ_{ref}	dinamička viskoznost fluida pri referentnoj temperaturi	N·s/m ²
S	Sutherlandova konstanta	K
T_{ref}	referentna temperatura fluida	K
ρ_z	Gustoća zraka	kg/m ³
p	Tlak zraka	Pa
R_{zrak}	Plinska konstanta zraka	J/(kg·K)
T_m	Srednja temperatura graničnog sloja	K
δ	Debljina hidronimaničkog graničnog sloja	m
δ_t	Debljina temperaturnog graničnog sloja	m
x	Koordinata na površini elementa vanjske ovojnice zgrade	M
τ_p	Posmično naprezanje na površini	Pa
C_f	Lokalni koeficijent trenja	--
Q_c	Ukupni toplinski tok	W
A_p	Površina oplošja	m ²
$u, v i w$	Komponente vektora brzine u	--
$x, y i z$	Koordinate Kartezijevog koordinatnog sustava	--
p	Tlak fluida izvan graničnog sloja	Pa
$\Psi(x, y)$	Funkcija strujnice	--
c	Konstanta	--

F	Blasiusove funkcija	--
$a, b, c i d$	Konstante	--
U	Napon	V
I	Električna struja	A
G	Električna vodljivost	S
V	Električni izvor	--
P	Snaga toplinskog toka	W
Q	Toplinski tok	W/m ²
R	Toplinski otpor	(m ² K)/W
U	Koeficijent prolaska topline (U-vrijednost)	W/(m ² K)
m	Masa	kg
c	Specifični toplinski kapacitet	J/(kg K)
t	Vrijeme	s
ΔU	Promjena unutarnje energije	J
λ_x	Toplinska provodljivost	W/(m K)
Λ	Toplinska provodljivost	W/(m K)
T_i	Temperatura unutarnjeg zraka	K
T_e	Temperatura vanjskog zraka	K
Δx	Širina kontrolnog volumena	m
t_0	Početno vrijeme	s
ρ_V	Gustoća u čvoru kontrolnog volumena	J/(m ² K)
$h_{c,int}$	Unutarnji plošni koeficijent prijelaza topline strujanjem	W/(m ² K)
$h_{c,ext}$	Vanjski plošni koeficijent prijelaza topline strujanjem	W/(m ² K)
h_{si}	Unutarnji plošni koeficijent prijelaza topline	W/(m ² K)
h_{se}	Vanjski plošni koeficijent prijelaza topline	W/(m ² K)
R_{uk}	Ukupni toplinski otpor elementa s plošnim prijelazima	(m ² K)/W
Δt	Vremenski korak	s
q	Gustoća toplinskog toka	W/m ²
R_d	Ukupni plošni otpor elementa bez plošnih prijelaza	(m ² K)/W
R_{si}	Unutarnji plošni otpor prijelaza topline	(m ² K)/W
R_{se}	Vanjski plošni otpor prijelaza topline	(m ² K)/W
h_r	Koeficijent plošnog prijelaza topline zračenjem	W/(m ² K)
h_{r0}	Koeficijent plošnog prijelaza topline zračenjem za crno tijelo	W/(m ² K)

T_{mn}	Temperatura crnog tijela	K
v	Brzina strujanja zraka	m/s
R_{tot}	Ukupni plošni otpor elementa	(m ² K)/W
ERR_{dg}	Donja granica greške mjerenja	%
ERR_{gg}	Gornja granica greške mjerenja	%
$K_1, K_2, P_n i Q_n$	Dinamičke karakteristike zida za dinamičku metodu	--
β_n	Eksponecijalna funkcija vremenske konstante	--
τ_n	Vremenska konstanta	--
$\dot{T}_{I,j}$	Vremenska derivacija funkcije temperature unutarnjeg zraka	K/s
$\dot{T}_{E,j}$	Vremenska derivacija funkcije temperature vanjskog zraka	K/s
m	Broj vremenskih konstanti	--
$\{q\}$	vektor od M izmjerenih gustoća toplinskog toka	W/m ²
$[X]$	Pravokutna matrica s M redova i 2 m + 3 stupca	--
$\{Z\}$	Vektor s 2 m + 3 elementa	--
$[X]^+$	Pseudoinvers matrice [X]	--
$[X]^T$	Transponirana matrica [X]	--
$\{Z\}^*$	Aproksimacija vektora {Z}	--
r	Razmak vremenskih konstanti	--
S^2	Ukupno kvadratno odstupanje	W/m ²
S_{min}^2	Minimalno kvadratno odstupanje	W/m ²
Z_1	Najbolja aproksimacija vektora U-vrijednosti prema dinamičkoj metodi	W/(m ² K)
I	Mjerna nesigurnost prema dinamičkoj metodi	W/(m ² K)
P	Vjerojatnost	%
$Y(1,1)$	Prvi element matrice [Y]	--
F	Interval pouzdanosti Studentove t raspodjele	--
$W_{tot} =$	Ukupna energija zračenja na leću infracrvene kamere	J
W_{obj}	Energija emitirana s promatrane površine	J
W_{refl}	Energija emitirana sa svih površina u okolini	J
W_{atm}	Energija emitirana iz atmosfere	J
q_{ICT}	Gustoća toplinskog toka određena metodom ICT	
T_{si}	Površinska temperatura određena metodom ICT	K
T_{pov}	Površinska temperatura određena termočlankom	K
E_{gh}	Globalno Sunčevo zračenje	W/m ²

q_{HFM}	Gustoća toplinskog toka određena metodom HFM	W/m^2
d	Debljina sloja elementa vanjske ovojnice zgrade	m
ρ	Gustoća	kg/m^3
R_d	Toplinski otpor homogenih slojeva izraza	$(\text{m}^2 \text{K})/\text{W}$
ω	Koeficijent procjene sadržaja vodene pare u zraku	--
T_{atm}	Temperatura zraka	$^{\circ}\text{C}$
d	Udaljenost kamere od površine	m
K_{atm}	Koeficijent skaliranja atmosferskog prigušenja	--
a_1, a_2, b_1, b_2 i h_1, h_2, h_3, h_4	Koeficijenti koji opisuju prigušenje atmosfere	--
τ	Koeficijent transmisije atmosfere	--
ΔT	Apsolutna razlika temperature između ambijentalne temperature i temperature zida	$^{\circ}\text{C}$
Ra	Rayleighov broj	--
Gr	Grashofov broj	--
h_c	Plošni koeficijent prijelaza topline strujanjem	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$
T_{amb}	Ambijentalna temperatura	$^{\circ}\text{C}/\text{K}$
R^2	Koeficijent korelacije	--
$q_{\text{ICT,L}}$	Gustoća toplinskog toka određena u okolini lijevog tokomjera metodom ICT	W/m^2
$q_{\text{ICT,D}}$	Gustoća toplinskog toka određena u okolini desnog tokomjera metodom ICT	W/m^2
q_{NUM}	Gustoća toplinskog toka određena numerički	W/m^2
$q_{\text{HFM,1}}$	Gustoća toplinskog toka određena metodom HFM (lijevi tokomjer)	W/m^2
$q_{\text{HFM,2}}$	Gustoća toplinskog toka određena metodom HFM (desni tokomjer)	W/m^2
$T_{\text{si,ICT}}$	Površinska temperatura određena metodom ICT	$^{\circ}\text{C}/\text{K}$
$T_{\text{si,NUM}}$	Površinska temperatura određena numerički	$^{\circ}\text{C}/\text{K}$
U_p	Projektna U-vrijednost određena prema normi HRN EN ISO 6946	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$
$U_{p,\text{min}}$	Minimalna projektna U-vrijednost određena prema normi HRN EN ISO 6946	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$
$U_{p,\text{max}}$	Maksimalna projektna U-vrijednost određena prema normi HRN EN ISO 6946	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$
$U_{\text{ICT,L}}$	U-vrijednost određena u okolini lijevog tokomjera metodom ICT	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$
$U_{\text{ICT,D}}$	U-vrijednost određena u okolini desnog tokomjera metodom ICT	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$
$U_{\text{HFM,1}}$	U-vrijednost određena metodom HFM (lijevi tokomjer)	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$

$U_{HFM,2}$	U-vrijednost određena metodom HFM (desni tokomjer)	W/(m ² K)
dU_1	Nesigurnost u određenu U-vrijednost za lijevi tokomjer	%
dU_2	Nesigurnost u određenu U-vrijednost za desni tokomjer	%
$U_{ICT,L,min}$	Minimalna U-vrijednost određena u okolini lijevog tokomjera metodom ICT	W/(m ² K)
$U_{ICT,L,max}$	Maksimalna U-vrijednost određena u okolini lijevog tokomjera metodom ICT	W/(m ² K)
$U_{ICT,D,min}$	Minimalna U-vrijednost određena u okolini desnog tokomjera metodom ICT	W/(m ² K)
$U_{ICT,D,max}$	Maksimalna U-vrijednost određena u okolini desnog tokomjera metodom ICT	W/(m ² K)
dR_{24}	Odstupanje U-vrijednosti za prva 24 sata mjerenja	%
$dR_{2/3}$	Odstupanje U-vrijednosti za zadnje 2/3 ukupnog trajanja mjerenja	%
d_i	doprinos pojedinačne varijable x_i na ukupnu nesigurnost	--
u_i	Mjerna nesigurnost	--
r_i	relativni doprinos parametra i na mjernu veličinu	--
$d\varepsilon$	Nesigurnost u određenu emisivnost	--
dT_{refl}	Nesigurnost u izmjerenu reflektiranu temperaturu	°C/K
dT_{si}	Nesigurnost u izmjerenu površinsku temperaturu	°C/K
dT_i	Nesigurnost u izmjerenu temperaturu unutarnjeg zraka	°C/K
dT_e	Nesigurnost u izmjerenu temperaturu vanjskog zraka	°C/K
dh_c	Nesigurnost u izračunati koeficijent plošnog prijelaza topline strujanjem	W/(m ² K)
dq_{ICT}	Nesigurnost u određenu gustoću toplinskog toka metodom ICT	W/m ²
q_{ICT}^*	Ukupna gustoća toplinskog toka izražena s mjernom nesigurnosti (ICT)	W/m ²
dU_{ICT}	Nesigurnost u određenu U-vrijednost metodom ICT	W/(m ² K)
U_{ICT}^*	Ukupna U-vrijednost izražena s mjernom nesigurnosti (ICT)	W/(m ² K)
$dq_{HFM}b$	Nesigurnost u izmjerenu gustoću toplinskog toka (HFM)	W/(m ² K)
$dq_{ICT,L}$	Nesigurnost u određenu gustoću toplinskog toka metodom ICT u okolini lijevog tokomjera	W/m ²
$dq_{ICT,D}$	Nesigurnost u određenu gustoću toplinskog toka metodom ICT u okolini desnog tokomjera	W/m ²
dU	Nesigurnost u izmjerenu U-vrijednost metodom ICT i HFM	%
$T_{si,TC}$	Površinska temperatura određena termočlankom	°C/K
w_{refl}	Težinski koeficijent prividne reflektirane temperature za određivanje ambijentalne temperature	--

w_i	Težinski koeficijent temperature unutarnjeg zraka za određivanje ambijentalne temperature	--
-------	---	----

Skraćenice

Oznaka	Opis
MKR	Metoda Konačnih Razlika
HFM	Metoda tokomjera (eng. „Heat Flux Method“)
ICT	Infracrvena termografija
VBA	Visual Basic for Applications
EPS	Ekspandirani polistiren
AB	Armirani beton
FOV	Vidno polje kamere
NETD	Temperaturna razlučivost
RSS	Root Sum Square

Sadržaj

Informacije o mentoru	I
Zahvala	III
Sažetak	IV
Prošireni sažetak.....	V
Structured abstract.....	VIII
Popis slika	IX
Popis tablica	XIV
Popis oznaka i skraćenica.....	XVI
Sadržaj.....	XXIII
1 Uvod.....	1
2 Cilj i hipoteze	4
2.1 Cilj istraživanja	4
2.2 Očekivani znanstveni doprinos	4
2.3 Hipoteze	4
2.4 Opis istraživanja.....	4
3 Stanje područja.....	7
3.1 Infracrvena termografija.....	7
3.1.1 Elektromagnetski spektar	8
3.1.2 Infracrveni detektori.....	9
3.1.3 Zračenje crnog tijela.....	12
3.1.4 Planckov zakon zračenja	12
3.1.5 Wienov zakon pomaka	15
3.1.6 Stefan-Boltzmannov zakon	16
3.1.7 Kirchhoffov zakon zračenja	17
3.1.8 Zračenje realnog tijela	18

3.1.9 Emisivnost površine	19
3.1.10 Emisivnost građevinskih materijala	19
3.1.11 Prividna reflektirana temperatura.....	22
3.2 Postupak mjerenja infracrvenom termografijom.....	23
3.2.1 Pasivna termografija.....	24
3.2.2 Naknadna obrada termograma	24
3.2.3 Srednja temperatura zračenja	25
3.2.4 Toplinski tok kao posljedica zračenja tijela	26
3.2.5 Utjecaj strujanja na mjerenje infracrvenom termografijom	27
3.3 Prijenos topline strujanjem.....	28
3.3.1 Osnovne veličine kojima se opisuje strujanje fluida	29
3.3.1.1 Nusseltov broj	29
3.3.1.2 Prandtlov broj	29
3.3.1.3 Reynoldsov broj	30
3.3.1.4 Dinamička viskoznost	31
3.3.1.5 Kinematička viskoznost	32
3.3.1.6 Srednja temperatura graničnog sloja	32
3.3.1.7 Toplinska difuzivnost	32
3.3.2 Granični sloj	33
3.3.2.1 Važnost graničnoga sloj	33
3.3.2.2 Hidrodinamički granični sloj.....	33
3.3.2.3 Temperaturni granični sloj	35
3.3.3 Plošni koeficijent prijelaza topline strujanjem	37
3.3.4 Granični sloj pri laminarnom strujanju fluida po ravnoj površini.....	38
3.3.4.1 Zakon očuvanja mase i jednažba kontinuiteta.....	38
3.3.5 Zakon očuvanja količine gibanja.....	38
3.3.6 Debljina hidrodinamičkog graničnog sloja	39

3.3.6.1 Egzaktno rješenje	40
3.3.6.2 Integralna metoda	42
3.3.7 Jednadžba očuvanja energije	44
3.3.8 Lokalni koeficijent plošnog prijelaza topline za laminarni nestlačivi tok preko ravne površine	45
3.3.8.1 Debljina graničnoga sloja kao funkcija Prandtlovog broja	45
3.3.8.2 Integralna metoda za rješavanje jednadžbe očuvanja energije.....	46
3.3.8.3 Prosječni koeficijent prijelaza topline	50
3.4 Jednadžba provođenja topline (JPT)	50
3.4.1 Početni uvjeti.....	53
3.4.2 Rubni uvjeti	53
3.4.2.1 Dirichletovi rubni uvjeti	53
3.4.2.2 Neumannovi rubni uvjeti.....	53
3.4.2.3 Robinovi rubni uvjeti	53
3.4.3 Matematička formulacija jednadžbe provođenja topline	53
3.4.4 Numeričko rješenje JPT višeslojnih elemenata vanjske ovojnice zgrade	55
3.4.4.1 Aproksimacija derivacije preko MKR	56
3.4.4.2 1D nestacionarno provođenje topline.....	59
3.4.4.3 1D stacionarno provođenje topline	60
3.5 Određivanje gubitaka topline elemenata vanjske ovojnice zgrade in-situ	61
3.5.1 Koeficijent prolaska topline (U-vrijednost)	61
3.5.2 Tokomjerna metoda (HFM)	63
3.5.3 Metoda infracrvene termografije.....	75
3.6 Prednosti i ograničenja metode HFM.....	77
3.7 Prednosti i ograničenja metode ICT	78
3.8 Zaključak.....	79
4 Eksperimentalni rad.....	80

4.1 Mjerna oprema i mjerene veličine.....	80
4.2 Planiranje i provedba istraživanja	86
5 Metodologija	119
5.1 Ulazni parametri.....	119
5.1.1 HFM	119
5.1.2 ICT	119
5.1.2.1 Transmisija atmosfere	126
5.1.2.2 Konvekcija	127
5.1.2.3 Ambijentalna temperatura	131
5.1.2.4 Filtriranje ulaznih parametara	133
5.1.3 Dodatni parametri.....	134
5.1.4 Mjerna nesigurnost i greška mjerenja	135
5.1.5 Primjena metode RSS na mjerenje gustoće toplinskog toka.....	136
5.1.6 Primjena metode RSS na određivanje U-vrijednosti.....	138
6 Rezultati i analiza.....	139
6.1 Provjera valjanosti izmjerenih podataka usporedbom s numeričkim modelom	139
6.2 Usporedba toplinskih tokova između metoda ICT i HFM.....	148
6.3 Proračun U-vrijednosti	158
6.3.1 HFM i ICT.....	162
6.3.1.1 Metoda srednje vrijednosti	162
6.3.1.2 Dinamička metoda.....	174
6.4 Mjerna nesigurnost i greška mjerenja	186
6.4.1 HFM	192
6.4.1.1 Utjecaj duljine mjerenja	192
6.4.1.2 Utjecaj senzora na 1D toplinski tok	195
6.4.2 ICT	195
6.4.2.1 Utjecaj duljine mjerenja	195

6.4.2.2 Utjecaj emisivnosti površine	198
6.4.2.3 Utjecaj transmisije atmosfere	207
6.4.2.4 Utjecaj razlike prividne reflektirane temperature i srednje temperature zračenja	207
6.4.2.5 Utjecaj greške očitavanja površinske temperature metodom ICT	212
6.4.2.6 Utjecaj razmaka u vremenu uzorkovanja	217
7 Diskusija.....	220
7.1 Mjerenje koeficijenta prolaska topline metodom ICT	220
7.1.1 Utjecaj strujanja.....	222
7.1.2 Utjecaj emisivnosti površine	222
7.1.3 Utjecaj razlike prividne reflektirane temperature i površinske temperature zida .	223
7.1.4 Utjecaj razlike srednje temperature zračenja i prividne reflektirane temperature.	223
7.1.5 Utjecaj razlike ambijentalne temperature i površinske temperature zida	224
7.1.6 Utjecaj greške mjerenja površinske temperature i prividne reflektirane temperature	224
7.1.7 Pouzdanost određivanje U-vrijednosti	224
7.1.8 Prednosti i nedostaci korištenja metode ICT	227
8 Zaključak.....	228
8.1 Izvorni znanstveni doprinos	231
8.2 Preporuke za daljnja istraživanja.....	232
Popis literature.....	233
Prilog 1: Tlocrti i orijentacije zidova	242
Prilog 2: Rezultati mjerenja.....	247
Životopis.....	265
Popis objavljenih radova	267

1 Uvod

Jedan od osnovnih principa u cilju smanjenja potrošnje energije zgrada je nametanje strožih kriterija za vanjsku ovojnicu zgrade, a najbitniji kriterij odnosi se na maksimalnu vrijednost koeficijenta prolaska topline (U-vrijednost). Tako je, na primjer u Hrvatskoj, u razdoblju od 2010. do danas ta vrijednost smanjena u prosjeku za 30 % (preuzeto iz Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama) [1]. Dva su načina određivanja U-vrijednosti – teoretski [2] ili eksperimentalno [3].

Teoretska U-vrijednost određuje se u stacionarnim uvjetima te se koristi kao ulazni parametar za određivanje transmisijskih toplinskih gubitaka kroz vanjsku ovojnicu zgrade. Međutim, teoretska U-vrijednost ne opisuje adekvatno stvarnu U-vrijednost na koju uvelike utječe izvođenje radova, uvjeti okoliša te način korištenja zgrade, što najčešće dovodi do nepredvidivih toplinskih gubitaka te povećanih ekonomskih troškova za korisnika zgrade [4].

Metoda gustoće toplinskog toka (HFM) je standardizirana metoda koja se koristi za in-situ određivanje U-vrijednosti. Prema ovoj metodi U-vrijednost se aproksimira iz prosjeka izmjerenih veličina – temperatura unutarnjeg i vanjskog zraka i gustoće toplinskog toka (metoda srednje vrijednosti) ili korištenjem matematičkih transformacija jednadžbe provođenja topline koja se zatim korelira s temperaturom unutarnjeg i vanjskog zraka te gustoćom toplinskog toka (dinamička metoda) [5].

U svome radu Evangelisti i sur. [6,7] provode laboratorijsko i in-situ istraživanje za određivanje U-vrijednosti iz mjerenja HFM-a te ih uspoređuju s teoretskom U-vrijednosti. Za U-vrijednost određenu in-situ [6,7] dobivaju razlike 17-153 %, dok za laboratorijsko mjerenje dobivaju razlike 17,4-22,8 %. Rezvani i Bribián [8] u svome istraživanju također uspoređuju U-vrijednosti dobivene in-situ (metodom srednje vrijednosti) i teoretske U-vrijednosti te dobivaju razlike između 8 i 23,5 %. Gaspar i sur. [9], Choi i Ko [10] te Gaši i sur. [11] u svojim radovima pokazuju superiornost dinamičke metode u odnosu na metodu srednje vrijednosti. Za metodu srednje vrijednosti razlika je iznosila ± 5 % dok je za dinamičku metodu ta razlika iznosila ± 1 %. Nadalje, Gaspar i sur. [9] zaključuju da se dinamička metoda može koristiti čak i u slučaju nestacionarnih rubnih uvjeta.

Glavni nedostaci HFM-a su to što se U-vrijednosti određuju samo za mali broj točaka. Meng i sur. [12] su u svome istraživanju ustanovili da greška mjerenja može biti do 6 % ili do 26 % u slučaju pogrešnog postavljanja termočlanaka ili senzora za mjerenje gustoće toplinskog toka.

Nadalje, na samo mjerenje uvelike utječe razlika u temperaturi između unutarnjeg i vanjskog zraka [13–16] pa se mjerenje uglavnom provodi zimi.

Jedna od eksperimentalnih metoda za određivanje U-vrijednosti je primjena infracrvene termografije (ICT). Kod metode ICT toplinski tok se aproksimira preko površinske temperature mjerene pomoću infracrvene kamere i niza parametara koji opisuju promatranu površinu i okoliš u kojemu se element nalazi. Osnovna prednost metode ICT u odnosu na HFM je izbjegavanje korištenja senzora za mjerenje gustoće toplinskog toka čime se lokalno ne narušava toplinski tok [17]. Mnoga istraživanja su usmjerena korištenju metode ICT za određivanje U-vrijednosti korištenjem različitih postupaka potvrđenih na malom broju slučajeva. U svome radu Albatici i sur. [18] koriste metodu ICT za određivanje U-vrijednosti i uspoređuju je s rezultatima dobivenim HFM metodom. Njihovo istraživanje je provedeno na modelu zgrade u stvarnim uvjetima okoliša. Rezultati su pokazali da metoda ICT daje dobre rezultate u slučaju teških elemenata (kod kojih je površinska toplinska masa manja od $30 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K})$), dok za slučaj laganih ili dobro izoliranih elemenata metoda nije primjenjiva. Tejedor i sur. [19] koriste metodu ICT u slučaju neizoliranog i izoliranog zida te daju svoj postupak za određivanje U-vrijednosti i plošnog koeficijenta prijelaza topline zračenjem i strujanjem (razlike između teoretske i in-situ U-vrijednosti su između 1 i 4 %). Beatriz i sur. [20] koriste metodu ICT na vanjskoj površini u dijelovima dana kada nema pregrijavanja elementa. Međutim, njihov pristup nije u obzir uzeo akumulaciju topline u elementu kao ni utjecaj vjetrova. Marshal i sur. [21] svoje su istraživanje fokusirali na usporedbi HFM i ICT metode za kameru niske i visoke rezolucije. Najkvalitetniji rezultati su dobiveni za kameru visoke rezolucije kod koje je U-vrijednost varirala za $\pm 12 \%$. Danielski i Fröling [22] su svoje istraživanje proveli in-situ, a istovremeno su određivali koeficijent plošnog prijelaza topline strujanjem i U-vrijednost pomoću HFM i ICT metode. Rezultati dobiveni metodom ICT su odstupali do 6 % u odnosu na HFM. Također su zaključili da je najveća greška u rezultatu nastala mjerenjem prividne reflektirane temperature potrebne za korigiranje očitavanja infracrvene kamere. Patel i sur. [23] provode analizu utjecaja veličina korištenih za određivanje U-vrijednosti pomoću metode ICT te utvrđuju da prividna reflektirana temperatura i površinska temperatura najviše doprinose nesigurnosti izmjerene veličine (76,5 % i 15,6 %) dok termočlanci za mjerenje temperature vanjskog zraka doprinose sa 7,3 % od ukupne nesigurnosti. Soares i sur. [24] u svome istraživanju kao glavni problem navode neistraženost utjecaja pojedinih parametara (emisivnost površine, koeficijent prijelaza topline strujanjem i zračenjem, brzina strujanja zraka, prisustvo toplinskih mostova, itd.) na U-vrijednost te premalo

istraživanja provedenih na nehomogenim elementima vanjske ovojnice zgrade i manjkavost mjerenja provedenih u stvarnom mjerilu u kontroliranim uvjetima. Teni i sur. [25] također daju opsežan pregled stanja područja za metode korištene kod in-situ određivanja U-vrijednosti te kao glavne nedostatke navode nedovoljno istraživanja provedenih u ljetnim mjesecima, predugačko vrijeme ispitivanja te kao parametar koji najviše utječe na U-vrijednost navode plošni koeficijent prijelaza topline (strujanjem i zračenjem). Tejedor i sur. [19,26,27] su se fokusirali na određivanje U-vrijednosti metodom ICT u kraćem vremenskom periodu te su pokazali da vrijeme uzorkovanja ne doprinosi značajno aproksimiranoj U-vrijednosti. Također su razvili metodu kojom je moguće provjeriti stacionarnost ponašanja rubnih uvjeta te kriterij prekida mjerenja kada je razina pouzdanosti zadovoljavajuća [26]. Bienvenido-Huertas i sur. [28,29] su uvidjeli neistraženost prijenosa topline s vanjskog zraka na vanjsku površinu zida te su proveli opsežno istraživanje utjecaja vanjskog koeficijenta prijelaza topline strujanjem na U-vrijednost određenu preko metode ICT, a kao glavne nedostatke metode ICT navode ograničenost korištenja u ljetnim mjesecima i nedostatak dinamičkih metoda korištenih za analizu izmjerenih podataka. Određena istraživanja su se fokusirala i na određivanje toplinskih gubitaka mjesta na vanjskoj ovojnici zgrade gdje se toplinski tok ne može nužno pretpostaviti jednodimenzionalnim [30–33]. U tim slučajevima se metoda ICT pokazala kao jedina metoda koju je u tom slučaju moguće koristiti. Istraživanje u sklopu ovog doktorskog rada fokusirat će se na određivanju U-vrijednosti u ljetnim i zimskim mjesecima za neizolirani i izolirani zid u laboratorijskim i stvarnim uvjetima.

2 Cilj i hipoteze

2.1 Cilj istraživanja

- Analizirati utjecaj parametara koji najviše utječu na U-vrijednost.
- Razviti dinamički model i postupak kojim se metodom ICT iz izmjerenih parametara okoliša i parametara koji opisuju promatrani element može odrediti U-vrijednost.
- Odrediti utjecaj pregrijavanja vanjske površine na U-vrijednost u ljetnim mjesecima.
- Odrediti optimalno vrijeme trajanja ispitivanja.

2.2 Očekivani znanstveni doprinos

- Razvoj dinamičke metode za određivanje U-vrijednosti metodom ICT te postupka za provođenje mjerenja na terenu.
- Parametarska analiza utjecaja na U-vrijednost u cilju pouzdanije aproksimacije stvarnih toplinskih gubitaka u zgradarstvu.
- Primjena razvijene metode za određivanje U-vrijednosti korištenjem metode ICT i u slučajevima ljetnih mjeseci, odnosno u periodu ekstremnih temperatura na vanjskoj površini elementa.

2.3 Hipoteze

- Korištenjem matematičkih transformacija iz vremenskog zapisa izmjerenih veličina metodom infracrvene termografije moguće je odrediti U-vrijednost koja s velikom razinom pouzdanosti opisuje realne toplinske gubitke kroz elemente vanjske ovojnice zgrade.
- U slučaju U-vrijednosti određene pomoću srednje temperature zračenja moguće je ostvariti manje greške nego u slučaju U-vrijednosti određene pomoću prividne reflektirane temperature.
- Primjenom parametara koji opisuju promatrani element te okoliš u kojemu se taj element nalazi u ljetnim mjesecima moguće je postići istu razinu pouzdanosti aproksimirane U-vrijednosti kao i u slučaju zimskih mjeseci.

2.4 Opis istraživanja

Istraživanje je provedeno u cilju određivanja koeficijenta prolaska topline (U-vrijednosti) metodom infracrvene termografije. Istraživanje je podijeljeno na četiri dijela: ispitivanje uzoraka u laboratoriju, ispitivanje stvarnih elemenata vanjske ovojnice zgrade na terenu,

analizu izmjerenih parametara u cilju određivanja U-vrijednosti te validaciju izmjerenih vrijednosti numeričkim modelima.

U laboratoriju su ispitani uzorci koji predstavljaju tri različita sastava zidnih elemenata:

- 1) Uzorak armiranobetonskog zida s toplinskom izolacijom s vanjske strane
- 2) Uzorak armiranobetonskog zida bez toplinske izolacije
- 3) Uzorak armiranobetonskog zida s toplinskom izolacijom s unutarnje strane.

Za svaki od navedenih tipova uzoraka zadane temperature vanjskog okoliša su bile:

- 1) Od 5 do 15 °C (zimski period)
- 2) Od 15 do 30 °C (prijelazni period) i
- 3) Od 25 do 40 °C (ljetni period).

Uzorci zidova dimenzija $b \times h = 290 \times 277$ cm su postavljeni na komoru koja ima mogućnost simuliranja uvjeta vanjskog okoliša (temperature, vjetrova i vlage). S unutarnje strane komore se mjerila temperatura na unaprijed definiranim mjestima te brzina strujanja zraka i relativna vlažnost zraka. Na strani uzorka zida prema laboratoriju je postavljen sustav za mjerenje U-vrijednosti metodom HFM: dva tokomjera za mjerenje gustoće toplinskog toka i dva termočlanka za mjerenje temperature unutarnjeg zraka neposredno uz površinu. Dodatno su na površinu zida unutar komore postavljena dva termočlanka za mjerenje temperature vanjskog zraka (tj., temperature unutar komore). Kako bi se metodom ICT odredio toplinski tok bilo je potrebno postaviti sljedeću opremu:

- 1) Infracrvenu kameru na poznatoj udaljenosti i na poznatom nagibu kojom se određivala površinska temperatura zida.
- 2) Aluminijsku foliju radi određivanja prividne reflektirane temperature.
- 3) Traku poznate emisivnosti radi kontrole površinske temperature zida.
- 4) Termoanemometar radi mjerenja vertikalnog strujanja po površini zida.
- 5) Površinski termočlanak radi kontrole mjerenja površinske temperature infracrvenom kamerom.
- 6) Globus termometar radi određivanja srednje temperature zračenja okoline.

Nakon provedenog mjerenja podaci su se analizirali pomoću posebnih računalnih programa za naknadnu obradu termograma, programskog paketa Mathematica te Microsoft Excela.

Drugi dio ispitivanja se odnosio na terenska ispitivanja kod kojih je postavljen ekvivalentan sustav na unutarnju i vanjsku površinu. Na vanjsku površinu je dodatno postavljen piranometar kako bi se pratilo Sunčevo zračenje, tj. pregrijavanje vanjske površine.

Na terenu je ukupno napravljeno osam mjerenja na osam različitih zidova koji su nazvani prema lokaciji mjerenja:

- 1) Ivanovec
- 2) Lenti
- 3) Muraszemenye
- 4) Mursko Središće
- 5) Palovec
- 6) Tornyszentmiklos
- 7) Totovec
- 8) Vaspör.

Kako bi se validirale izmjerene gustoće toplinskog toka, treći dio ispitivanja je uključivao izradu numeričkih modela za laboratorijske uzorke kojima su poznate debljine slojeva te toplinske karakteristike ugrađenih materijala.

3 Stanje područja

3.1 Infracrvena termografija

„Confining our perception of nature to visible light is like listening to music in only one octave.“ ~ N. D. Tyson

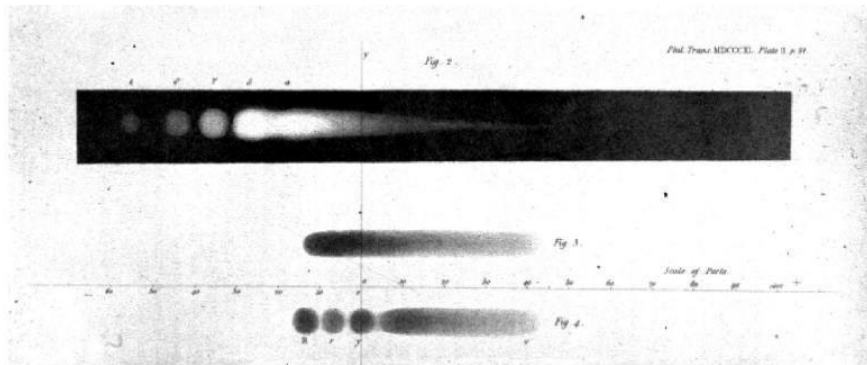
Infracrvena (IC) termografija je naziv metode koja se bavi beskontaktnim određivanjem temperature tijela korištenjem senzora koji detektiraju toplinsko zračenje [34].

Temperatura tijela se određuje iz intenziteta infracrvenog (toplinskog) zračenja emitiranog s površine promatranog tijela, a uređaji koji pretvaraju infracrveno zračenje u vidljivu sliku nazivaju se IC kamerama.

Do 1800. godine znanstvenici nisu niti naslućivali postojanje infracrvenog područja elektromagnetskog spektra. William Herschel je do otkrića došao sasvim slučajno propuštajući Sunčevu svjetlost kroz staklenu prizmu [35]. Herschelov cilj je bio pronaći novi materijal za optički filter kojim bi se smanjio intenzitet Sunčevog zračenja tijekom promatranja Sunca optičkim teleskopom [36]. Njegov eksperiment se sastojao od niza termometara kojima je mjerio temperature različitih boja svjetlosti prelomljenih kroz staklenu prizmu, a na kraju je postavio kontrolni termometar na mjestu gdje nije bilo svjetla [37]. Kontrolnim termometrom se mjerila temperatura zraka te je on služio kao referenca za ostale termometre. Rezultat njegovog eksperimenta je bila razlika temperatura između „viših“ temperatura različitih boja svjetlosti i „niže“ temperature zraka. Međutim, temperatura koju je mjerio referentni termometar bila je viša od temperatura mjerenih na svim bojama vidljive svjetlosti. Herschelov „neuspjeli“ eksperiment je dokazao postojanje infracrvenog spektra, tj. toplinskog zračenja. Iako se Herschelu dodjeljuje titula izumitelja infracrvenog zračenja, termin „infracrveno“ se pojavio tek krajem 19. stoljeća, a i danas je nepoznat autor tog termina.

Dugi niz godina su se za detektiranje infracrvenog zračenja koristili termometri. Godine 1829. je fizičar Leopoldo Nobili izumio termočlanak (termopar) koji je za razliku od Herschelovog termometra, koji je imao osjetljivost od 0,2 °C, mogao mjeriti temperaturu do osjetljivosti od 0,05 °C [38]. Iskorak u detektiranju infracrvenog zračenja je postigao Macedonio Melloni koji je spajanjem termočlanaka u seriju napravio prvi termoelement [39]. Osjetljivost tog termoelementa je bila 40 puta veća od najboljeg termometra iz tog doba te se njime mogla detektirati toplina od osobe udaljene tri metra od senzora.

Prva „toplinska slika“ je postala moguća 1840. godine kada je znanstvenik John Herschel, sin Williama Herschela, na temelju nejednolikog isparavanja tankog sloja ulja izloženom fokusiranom toplinskom zračenju uspio reproducirati prvu okom vidljivu sliku infracrvenog zračenja koju je nazvao „termograf“ (Slika 1) [40].



Slika 1: Prvi termograf koji je snimio John Herschel [41]

Iduće veliko poboljšanje u mjerenju infracrvenog zračenja bio je bolometar – vrlo osjetljiv instrument za mjerenje ukupne energije toka elektromagnetskog zračenja, koji je 1880. izumio Samuel Pierpont Langley [42]. Uređaj se sastojao od tanke crne trake platine spojene u strujni krug preko Wheatstoneovog mosta. Fokusiranjem toplinske energije na traku platine se inducirao električni napon na koji je reagirao osjetljivi galvanometar. Ovaj instrument je mogao detektirati toplinsko zračenje do udaljenosti od 400 metara.

Do perioda Prvog svjetskog rata svi instrumenti za detektiranje infracrvenog zračenja bili su temeljeni na varijaciji bolometra. Prvu infracrvenu kameru izumio je 1929. mađarski fizičar Kálmán Tihanyi [43]. Koristila ju je britanska vojska za protuzračne operacije nakon Prvog svjetskog rata.

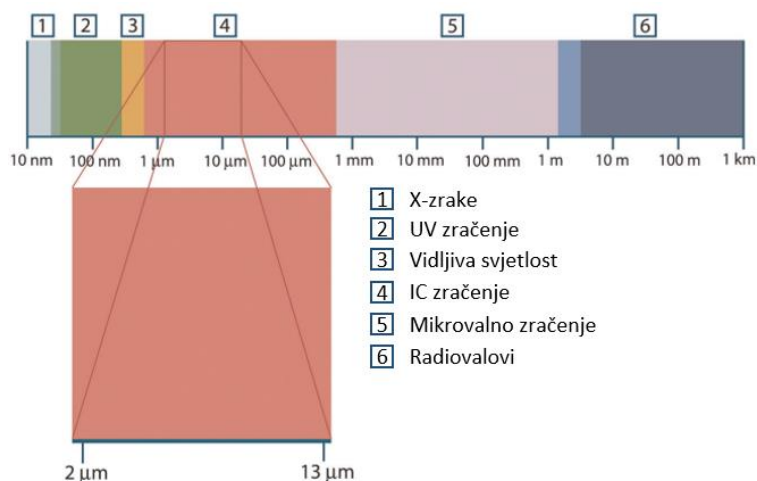
Za razliku od tadašnjih kamera koje su bile robusne i trebalo im je po par sati kako bi proizvele vidljivu sliku, današnje kamere koriste bolometre raspoređene u matricu, tzv. mikrobolometre. Veličina pojedinog bolometra je od 12 do 35 μm što u konačnici infracrvene kamere čini manjima. Današnje komercijalno dostupne IC kamere su u mogućnosti u realnom vremenu napraviti dvodimenzionalnu IC digitalnu sliku rezolucija 160×120 , 320×240 i 640×480 piksela koju nazivamo termogramom [44].

3.1.1 Elektromagnetski spektar

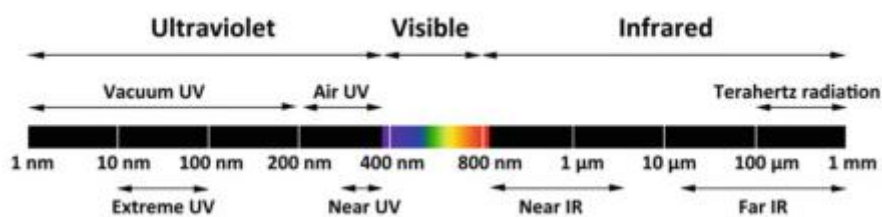
Elektromagnetski spektar (Slika 2) obuhvaća sve vrste elektromagnetskih valova, od radiovalova velike valne duljine (do nekoliko kilometara) preko mikrovalova (od 1 mm do 30

cm) i područja optičkog spektra u koji spada infracrveno zračenje, vidljiva svjetlost i ultraljubičasto zračenje (od 1 nm do 1 mm) pa sve do rendgenskog zračenja valne duljine 1 pm i naposljetku gama zračenja s valnim duljinama manjima od 1 pm [45].

U ovom radu fokus će biti na infracrvenom zračenju. Infracrveno zračenje spada u dio valnih duljina od približno 0,75 μm do 1 mm (Slika 3). Ljudskom oku to je zračenje nevidljivo, ali ga osjećamo na koži kao toplinu. Većina zračenja ljudskog tijela otpada na infracrveno zračenje. Ono nastaje pri translacijskom sudaranju čestica, vibriranjem kristalne rešetke krutih tvari, a u plinovima nastaje rotacijom atoma i atomskih skupina u molekulama. Sva tijela s temperaturom višom od apsolutne nule (0 K) emitiraju infracrveno zračenje. Termografijom se naziva postupak određivanja temperature nekog tijela korištenjem infracrvenog zračenja.



Slika 2: Elektromagnetski spektar [46]



Slika 3: Optički dio elektromagnetskog spektra [47]

3.1.2 Infracrveni detektori

Detektori elektromagnetskog zračenja koji su namijenjeni pretvaranju elektromagnetskog zračenja u druge vrste energije klasificirani su kao biološki i fizički. Tipičan biološki detektor je ljudsko oko čija osjetljivost na valne duljine od 0,38 do 0,78 μm omogućuje čovjeku

detektiranje vidljivog dijela elektromagnetskog spektra. Ljudsko oko je u mogućnosti detektirati elektromagnetsko zračenje za tijela čija je temperatura do 450 °C.

Primjer fizičkog detektora su infracrveni detektori koji detektiraju infracrveni dio elektromagnetskog spektra. Infracrveni detektori elektronički su uređaji koji pretvaraju infracrveno zračenje u električni signal. Postoje različite vrste infracrvenih detektora, a svaki od njih se sastoji od različitih komponenti. Najčešće komponente infracrvenog detektora su sljedeće [34]:

- Osjetni element: To je osnovni element infracrvenog detektora koji pretvara infracrveno zračenje u električni signal. Ovisno o vrsti detektora, osjetni element može biti termopar, fotodioda, piroelektrični element i slično.
- Optika: Optika služi za usmjeravanje i fokusiranje infracrvenog zračenja na osjetni element. Optički sustav detektora može biti izrađen od leća, ogledala ili drugih optičkih elemenata.
- Kućište: Kućište infracrvenog detektora služi za zaštitu osjetnog elementa i drugih komponenti od vanjskih utjecaja. Kućište također može biti izrađeno od materijala koji djeluju kao filteri za određene valne duljine infracrvenog zračenja.
- Hladnjak: Neke vrste infracrvenih detektora, poput termalnih detektora, zahtijevaju hlađenje kako bi se osigurala stabilnost osjetnog elementa. Hladnjak može biti pasivan ili aktivni, a najčešće je izrađen od materijala poput bakra ili keramike.
- Elektronička sklopka: Elektronička sklopka služi za pretvaranje izlaznog signala osjetnog elementa u digitalni signal koji se može prikazati na zaslonu ili analizirati na računaru. Elektronička sklopka također može sadržavati pojačala signala, filtre i druge komponente koje poboljšavaju performanse detektora.

Postoji nekoliko načina podjele infracrvenih detektora, ovisno o različitim kriterijima. Jedna od uobičajenih podjela je prema vrsti detektora koja uključuje sljedeće kategorije [34]:

Termički detektori: Termički detektori pretvaraju infracrveno zračenje u toplinsku energiju koja uzrokuje promjenu temperature detektora. Ti detektori koriste nekoliko različitih materijala za mjerenje toplinske promjene, kao što su žičani filament, termoelementi i termoparovi, bolometri i drugi.

Poluvodički detektori: Poluvodički detektori koriste optički osjetljive poluvodičke materijale koji generiraju struju prilikom apsorpiranja infracrvenog zračenja. Ovi detektori uključuju materijale poput silicija, germanija i kadmijevog telurida.

Fotonski detektori: Fotonski detektori rade tako da apsorbiraju pojedinačne fotone infracrvenog zračenja, čime generiraju električni signal. Ovi detektori uključuju materijale poput fotomultiplikatora, fotodioda i naponom povezanim uređajima (CCD).

Piroelektrički detektori: Piroelektrički detektori se temelje na piroelektričnom efektu u kojem se promjena temperature materijala pretvara u električni naboj. Ti detektori uključuju materijale poput litij-tantala.

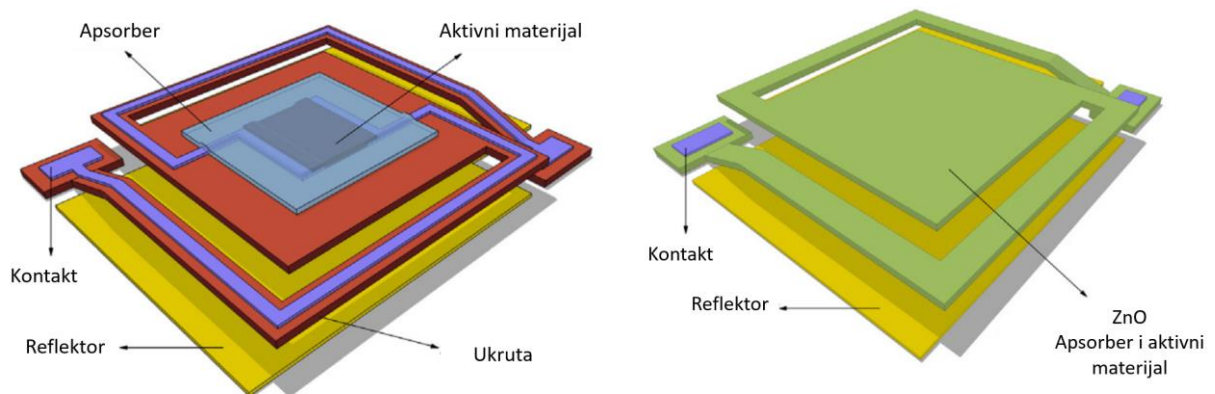
Magnetni detektori: Magnetni detektori koriste efekte koji se javljaju kada se infracrveno zračenje apsorbira u prisutnosti magnetskog polja. Ti detektori uključuju magneto-optičke detektore i magnetno-otporne senzore.

Mikrobolometri su jedan od najčešće korištenih detektora u infracrvenim kamerama i drugim sustavima za detekciju infracrvenog zračenja. Oni su izrađeni od tankog sloja materijala osjetljivog na infracrveno zračenje. Apsorbiranje infracrvenog zračenja uzrokuje promjenu temperature materijala te promjenu električnog otpora, koju mikrobolometri detektiraju i pretvaraju u električni signal koji se obrađuje u kameri.

Osnovni princip rada mikrobolometara je mjerenje promjene temperature osjetnog (aktivnog) materijala koji se nalazi u matrici na površini detektora. Matrica se sastoji od tisuću malih piksela, a svaki piksel sadrži mikrobolometar. Osjetljivi materijal u mikrobolometrima najčešće je amorfni silicij (a-Si), ali se također mogu koristiti i drugi materijali poput vanadijum oksida (VO_x) ili legura germanija i silicija (GeSi).

Kada infracrveno zračenje padne na matricu mikrobolometara, ono se apsorbira i pretvara u toplinsku energiju koja uzrokuje porast temperature aktivnog materijala. Promjena temperature uzrokuje promjenu električnog otpora. Ova promjena otpora se mjeri pomoću električnih sklopova u svakom pikselu i pretvara u digitalni signal. Na taj način mikrobolometri omogućuju prikazivanje „toplinskih“ slika (termograma) u kojima se različite temperature pojavljuju kao različite boje ili nijanse sive.

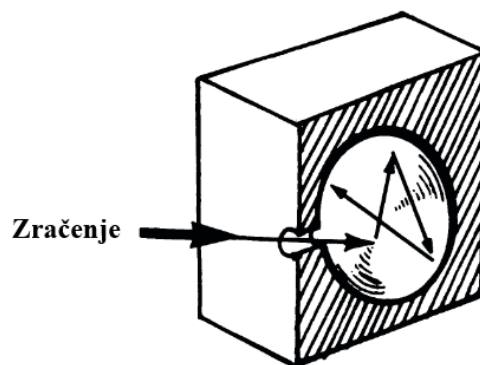
Mikrobolometri su vrlo osjetljivi na infracrveno zračenje, omogućujući im otkrivanje vrlo malih promjena temperature, a istovremeno su vrlo robusni i otporni na vibracije i ekstremne promjene temperature. Zbog svoje male veličine i niske potrošnje energije, mikrobolometri su postali izuzetno popularni u infracrvenoj termografiji, gdje se, između ostalog, koriste i za identificiranje problema s toplinskom izolacijom u zgradarstvu.



Slika 4: Mikrobolometar –Shematski prikaz klasičnog (a) mikrobolometra, (b) jednoslojnog mikrobolometra [48]

3.1.3 Zračenje crnog tijela

Crno tijelo se definira kao fizikalni sustav koji apsorbira svo upadno zračenje neovisno o valnoj duljini upadnog zračenja. Prema Kirchhoffovu zakonu zračenja [49,50] crno tijelo je ujedno i najbolji emiter zračenja. Iako u prirodi ne postoji takvo tijelo, njegova dobra aproksimacija je izotermna šupljina s vrlo malim otvorom čija je stjenka napravljena od neprozirnog apsorbirajućeg materijala. Svo zračenje koje uđe kroz otvor takve šupljine se refleksijom od stijenke u konačnici i apsorbira.



Slika 5: Crno tijelo [51]

Tri zakona koja opisuju zračenje crnog tijela su prikazana u nastavku.

3.1.4 Planckov zakon zračenja

Do kraja 19. stoljeća napravljena su dosta precizna mjerenja zračenja eksperimentalnih aproksimacija crnog tijela, ali 1900. godine njemački fizičar Max Planck je predstavljanjem svog revolucionarnog rada uveo konstantu h koja je po njemu nazvana Planckova konstanta. Uvođenjem Planckove konstante se vrlo precizno odredio intenzitet zračenja crnog tijela na

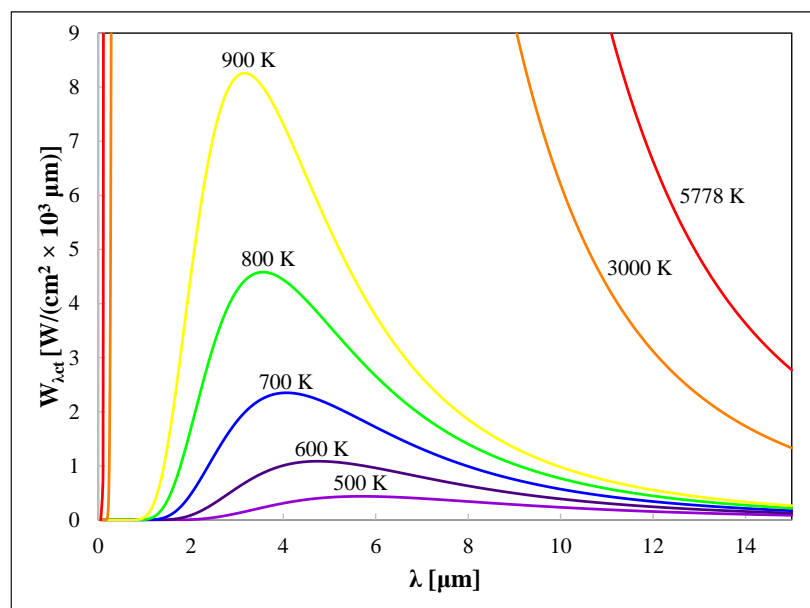
svim valnim duljinama elektromagnetskog spektra pri određenoj termodinamičkoj temperaturi [52]. Planckova revolucionarna teorija bazirana na termodinamici, ali s kvantnom prirodom emisije i apsorpcije zračenja, je uvela sasvim novi pogled ne samo na teoriju zračenja crnog tijela već u cijelom znanstvenom svijetu. Planckov zakon zračenja nam kaže da je specifični intenzitet (snaga) zračenja crnog tijela $W_{\lambda,ct}$ zagrijanog na temperaturu T za valnu duljinu zračenja λ jednak [53]:

$$W_{\lambda,ct}(\lambda, T) = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot (e^{h \cdot c / \lambda \cdot k \cdot T} - 1)} = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot (e^{C_2 / \lambda \cdot T} - 1)} \quad (1)$$

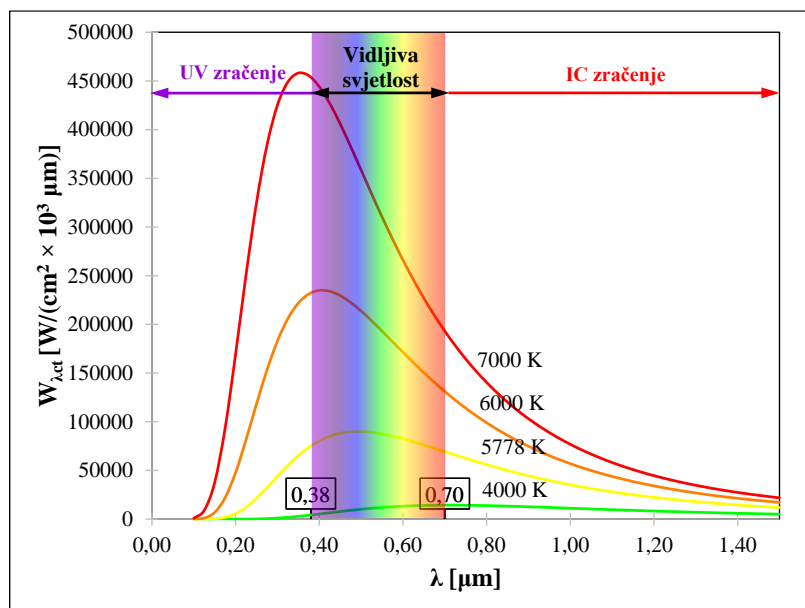
Gdje je:

- $W_{\lambda,ct}$ – Specifični intenzitet zračenja crnog tijela (W/m^3)
- c – Brzina svjetlosti u vakuumu (299792458 m/s)
- h – Planckova konstanta ($6,62607015 \times 10^{-34}$ J \cdot s)
- k – Boltzmannova konstanta ($1,3806505 \times 10^{-23}$ J/K)
- T – Termodinamička temperatura crnog tijela (K)
- λ – Valna duljina (m ili češće u μ m)
- C_1 – $2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2 = 3,7415 \times 10^{-16}$ ($W \cdot m^2$)
- C_2 – $h \cdot c / k = 1,4388 \times 10^{-2}$ (m K)

Korištenjem izraza (1) za različite termodinamičke temperature i valne duljine dobivaju se krivulje specifičnog intenziteta zračenja crnog tijela (Slika 6 i Slika 7) koje dosta dobro aproksimiraju eksperimentalno dobivene rezultate.



Slika 6: Spektri zračenja crnog tijela za različite temperature



Slika 7: Pomak maksimalnog intenziteta zračenja s termodinamičkom temperaturom

Pojmanje zračenja je dvojako. Može se opisati kao prijenos energije propagiranjem elektromagnetskog vala, ali isto tako se može opisati kao prijenos energije osnovnim djelićima (kvantima) elektromagnetskog zračenja, tj. fotonima [54]. Foton je, kao što je već rečeno, osnovni djelić energije elektromagnetskoga zračenja. U vakuumu se giba brzinom svjetlosti, a nema masu i električni naboj te nikad ne miruje. Albert Einstein je 1905. godine uveo koncept fotona te njime objasnio fotoelektrični efekt [55]. Umnožak valne duljine i frekvencije elektromagnetskog vala uvijek je jednak brzini svjetlosti:

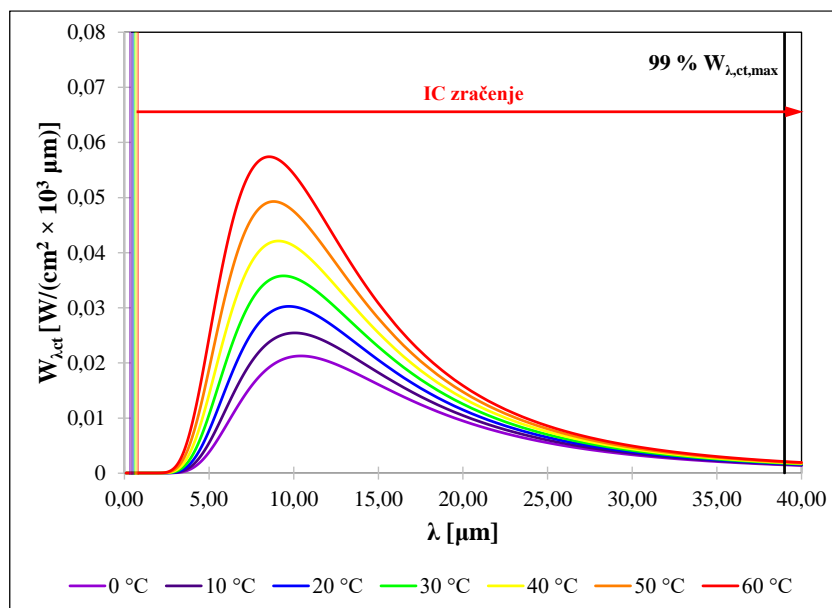
$$c = \lambda \cdot \nu \quad (2)$$

Gdje je ν frekvencija elektromagnetskog vala u s^{-1} .

Korištenjem izraza (2) Planckov zakon zračenja moguće je napisati i na sljedeći način [44]:

$$W_{\nu,ct}(\nu, T) = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot \nu^3}{c^2 \cdot (e^{h \cdot \nu / k \cdot T} - 1)} \quad (3)$$

Toplinsko zračenje je definirano kao zračenje koje tijelo emitira pri određenoj temperaturi. Drugim riječima, temperatura tijela je pokazatelj intenziteta toplinskog zračenja. Raspon valnih duljina u kojima se nalazi toplinsko zračenje je od otprilike 0,1 do 100 μm . Taj raspon je podijeljen na ultraljubičasti, vidljivi i infracrveni spektar (Slika 7). Pri višim temperaturama se iznos maksimalnog specifičnog zračenja pomiče prema ultraljubičastom spektru. Međutim, u pogledu građevinske fizike temperature se kreću od otprilike -10 do 60 $^{\circ}C$ pa većina valnih duljina koje tijela emitiraju pri tim temperaturama spadaju u infracrveni spektar (Slika 8). U sklopu ovog rada ta činjenica omogućuje precizno mjerenje temperature IC kamerom.



Slika 8: Specifični intenzitet zračenja pri nižim temperaturama

3.1.5 Wienov zakon pomaka

Kao što je prikazano u prošlom poglavlju, povećanjem temperature crnog tijela maksimum Plankovih krivulja se pomiče prema lijevom kraju elektromagnetskog spektra. Kako bi se odredila valna duljina na kojoj se maksimum postiže potrebno je derivirati izraz (1) te naći nultočku dobivene funkcije (izraz (4)).

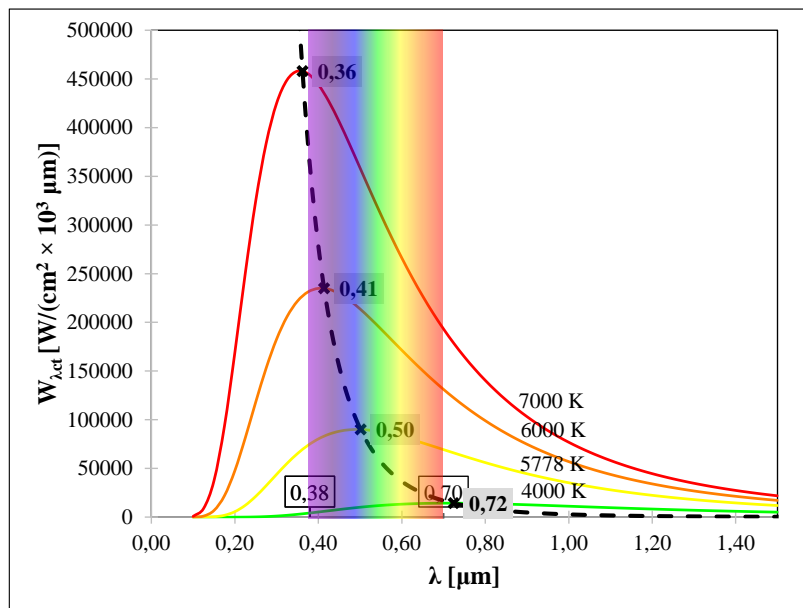
$$\frac{dW_{\lambda,ct}(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot (e^{h \cdot c / \lambda \cdot k \cdot T} - 1)} \right]_{T=const.} = 0 \quad (4)$$

Prvi znanstvenik koji je uspio dokazati linearnu ovisnost položaja maksimuma Planckove krivulje i temperature crnog tijela bio je njemački znanstvenik Wilhelm Wien te je po njemu taj zakon nazvan Wienov zakon pomaka (Slika 9) [54]:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (5)$$

Gdje je:

- λ_{max} – Valna duljina pri maksimumu zračenja crnog tijela (μm)
- b – Wienova konstanta (2898 m K)



Slika 9: Wienov zakon pomaka

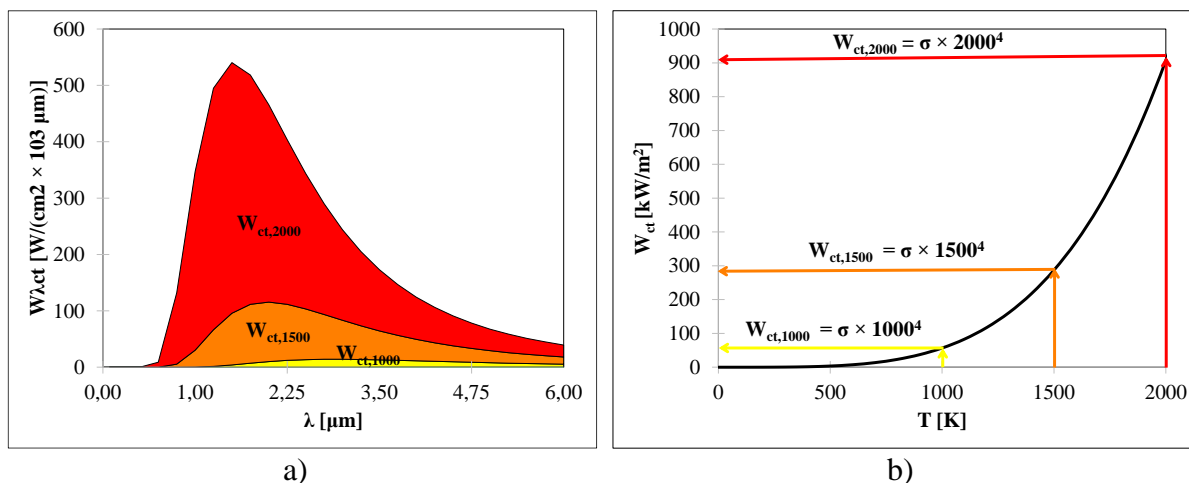
3.1.6 Stefan-Boltzmannov zakon

Za razliku od Wilhelma Wiena koji je deriviranjem Planckovog zakona dobio valne duljine na kojima se nalazi maksimum Planckove krivulje za određenu temperaturu crnog tijela, dva znanstvenika, Jožef Stefan i Ludwig Boltzmann, su neovisno jedan od drugom integriranjem Planckove krivulje došli do zaključka je ukupna energija koju zrači crno tijelo direktno proporcionalna četvrtoj potenciji termodinamičke temperature [56] (Slika 10).

$$W_{ct}(T) = \int_0^{\infty} W_{\lambda,ct}(\lambda, T) d\lambda = \sigma \cdot T^4 \quad (6)$$

Gdje je:

- W_{ct} – Ukupna energija kojom zrači crno tijelo (W/m^2)
- $\sigma = \frac{2 \cdot \pi^5 \cdot k^4}{15 \cdot c^2 \cdot h^3}$ – Stefan–Boltzmannova konstanta ($5,670400 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$)



Slika 10: Stefan-Boltzmannov zakon

Integriranjem specifičnog intenziteta zračenja crnog tijela po svim valnim duljinama za različite temperature crnog tijela (Slika 10a) dobiva se krivulja ovisnosti ukupne energije zračenja i temperature crnog tijela (Slika 10b).

3.1.7 Kirchhoffov zakon zračenja

Kirchhoffov zakon zračenja je važan koncept u razumijevanju interakcije elektromagnetskog zračenja i materije. Ovaj zakon se primjenjuje u različitim područjima znanosti, uključujući astrofiziku, kemiju, fiziku i inženjerstvo.

Jedna primjena Kirchhoffovog zakona zračenja u inženjerstvu i građevinskoj fizici je infracrvena termografija. Ova tehnika koristi infracrveno zračenje za mjerenje temperature tijela i površina. Infracrvena termografija može se primijeniti u različitim područjima, uključujući energetiku, građevinarstvo, medicinu i znanstvena istraživanja.

U građevinarstvu, infracrvena termografija se koristi za otkrivanje toplinskih nepravilnosti i gubitaka topline u zgradama i drugim građevinama. Termografija može otkriti područja s povećanom temperaturom (toplinski mostovi) koji mogu ukazivati na to da se zgrada ne zagrijava ravnomjerno, kao i hladna područja koja ukazuju na propuštanje topline iz zgrade. Ovi podaci mogu se koristiti za identifikaciju i rješavanje problema s izolacijom, brtvljenjem i ventilacijom, što može dovesti do značajnih ušteda u potrošnji energije.

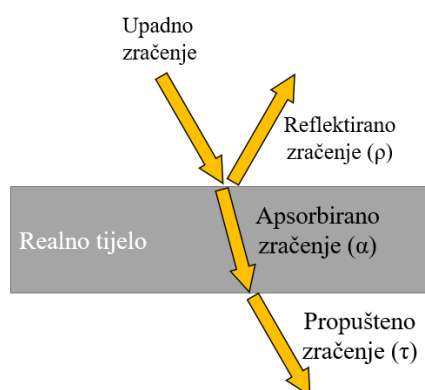
Infracrvena termografija se također može koristiti za provjeru kvalitete građevinskih materijala. Na primjer, može se koristiti za provjeru kvalitete izolacije, provjeru čvrstoće spojeva, detekciju pukotina u zidovima i drugim građevinskim materijalima, kao i za otkrivanje vlage u zgradama koja mogu uzrokovati oštećenja.

U znanstvenim istraživanjima, infracrvena termografija se koristi za proučavanje toplinskih svojstava materijala i struktura. Na primjer, može se koristiti za proučavanje toplinskog ponašanja betona i ostalih građevinskih materijala pod različitim uvjetima opterećenja i temperature.

Ukratko, Kirchhoffov zakon zračenja se primjenjuje u mnogim područjima znanosti i inženjerstva, a infracrvena termografija je jedna od primjena ovog zakona u građevinarstvu i građevinskoj fizici.

3.1.8 Zračenje realnog tijela

U realnom svijetu crno tijelo ne postoji. Za razliku od crnog tijela koji apsorbira svo upadno zračenje, kod realnih tijela se samo dio tog zračenja apsorbira, dok se dio zračenja reflektira natrag u okolinu i/ili propusti (Slika 11).



Slika 11: Realno tijelo

Ako s α označimo dio zračenja koji se apsorbira u realno tijelo (koeficijent apsorpcije), ρ dio zračenja koje se reflektira s površine (koeficijent refleksije) te s τ dio zračenja koje se propusti kroz realno tijelo (koeficijent propusnosti) tada se može napisati sljedeće:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (7)$$

Izraz (7) prikazuje zakon očuvanja energije, tj. da je suma apsorbiranog, reflektiranog i prenesenog zračenja jednaka ukupnom zračenju koje je dospjelo na površinu realnog tijela. Iz tog slijedi da koeficijenti α , ρ i τ moraju biti manji od 1. Oni ovise o materijalu, hrapavosti površine, termodinamičkom stanju površine te o valnoj duljini i otklonu upada elektromagnetskog zračenja.

Za neprozirna tijela nema propuštanja elektromagnetskog zračenja ($\tau = 0$). Nadalje, Kirchhoffov zakon zračenja kaže da su emisija i apsorpcija elektromagnetskog zračenja nekog

tijela jednake na svim temperaturama, u svim uvjetima te na svim valnim duljinama. Drugim riječima realno tijelo će emitirati onoliko zračenja koliko je apsorbiralo. Gornja granica emitiranog, tj. apsorbiranog zračenja, je zračenje crnog tijela. Prema tome izraz (7) se može zapisati na sljedeći način:

$$\varepsilon + \rho = 1 \quad (8)$$

Gdje je ε emisivnost realnog tijela.

3.1.9 Emisivnost površine

Najvažniji parametar kojim se određuje zračenje realnog tijela je emisivnost površine ε . Spektralna emisivnost (ε_λ) površine se definira kao omjer specifičnog intenziteta zračenja realnog i crnog tijela zagrijanog na istu temperaturu za valnu duljinu λ [34].

$$\varepsilon_\lambda = \frac{W_{\lambda,rt}}{W_{\lambda,ct}} \quad (9)$$

Gdje je $W_{\lambda,rt}$ specifični intenzitet zračenja realnog tijela.

Jednom kad je poznata spektralna emisivnost površine iz izraza (9) se određuje $W_{\lambda,rt}$.

Ako se emisivnost određuje za sve valne duljine elektromagnetskog spektra (ukupna emisivnost ili emisivnost ε) tada se primjenom Stefan-Boltzmannovog zakona (izraz (6)) ε računa kao:

$$\varepsilon = \frac{W_{rt}}{W_{ct}} \quad (10)$$

Gdje su W_{rt} i W_{ct} ukupne energije zračenja realnog i crnog tijela.

3.1.10 Emisivnost građevinskih materijala

Parametri koji najviše utječe na emisivnost nekog materijala su direktno vezani za njegovu površinu. Prema tome, ovisno o strukturi površine, emisivnost materijala može znatno varirati. Ako je struktura površine takva da je ona glatka, polirana, tj. reflektivna, koeficijent emisije može iznositi oko 0,20 pošto se takve površine ponašaju kao zrcala, tj. reflektiraju većinu upadnog zračenja. Isto tako, ako je površina hrapava ili oksidirana, koeficijent emisije može iznositi i preko 0,80. Pošto će se u ovom radu ograničiti na gubitke topline kroz vertikalne građevne element, tj. zidove, u daljnjem tekstu će se prikazati emisivnosti materijala najčešće korištenih u takvim elementima.

Emisivnost površine se u praksi određuje korištenjem:

- 1) prijenosnih emisometara [57] te
- 2) korištenjem IC kamere i materijala poznate emisivnosti [58].

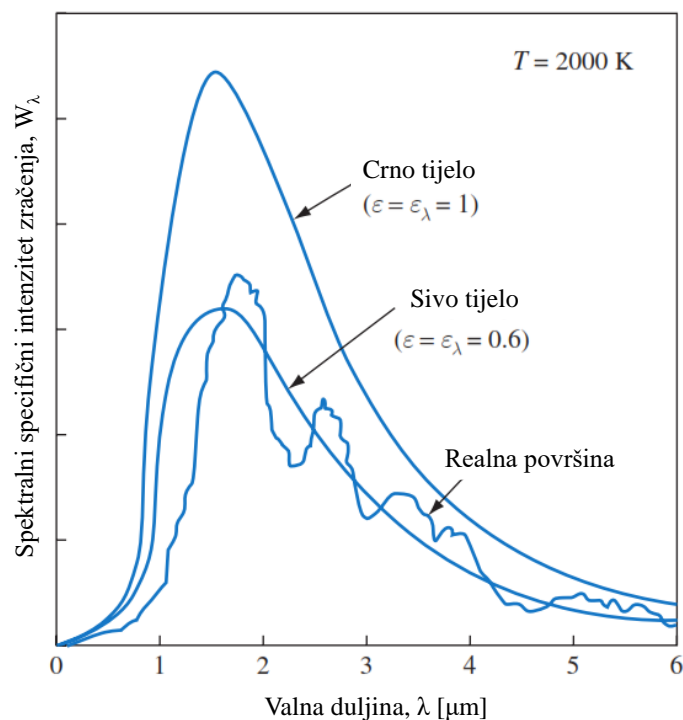
U praksi se najčešće koristi metoda s IC kamerom i materijalom poznate emisivnosti. Postupak određivanja je sljedeći [58]:

- 1) IC kamera se postavlja na tronožac na poznatu udaljenost od promatrane površine.
- 2) Na promatranu površinu se postavi predmet poznate emisivnosti (PPE) (najčešće je to električarska traka, $\varepsilon = 0,95$).
- 3) Emisivnost se u postavkama kamere postavi na emisivnost PPE (npr., $\varepsilon = 0,95$)
- 4) Promatrana površina i PPE se zagriju na jednaku temperaturu.
- 5) IC kamerom se izmjeri temperatura PPE.
- 6) U neposrednoj blizini PPE se variranjem koeficijenta emisivnosti određuje temperatura dok se temperatura na tom mjestu i na PPE ne izjednače.
- 7) Koeficijent kojim se dobiju jednake temperature na obje površine je stvarna emisivnost promatrane površine.

Postupak opisan iznad pretpostavlja sljedeće:

- Izotermnu distribuciju temperature po promatranoj površini, tj. da je temperatura na promatranoj površini i predmetu poznate emisivnosti jednaka.
- Izmjerene površinske temperature su umanjene za utjecaj reflektiranog zračenja iz okoline određenog prema [59].
- Emisivnost promatrane površine nije funkcija temperature.
- Emisivnost promatrane površine određena na uskom području valnih duljina je konstantna na svim valnim duljinama.

Emisivnost određena gore navedenim postupkom u praksi dovoljno dobro aproksimira ponašanje realnih površina. Međutim, stvarna emisivnost površine je funkcija temperature površine, valne duljine elektromagnetskog zračenja, stanja površine itd. Slika 12 prikazuje raspodjelu spektralnog specifičnog intenziteta zračenja za apsolutno crno tijelo, sivo tijelo kao aproksimaciju ponašanja realnog tijela te realno tijelo. U ovom radu će se emisivnost površine određivati prema postupku opisanom u [58] te će se pretpostaviti konstantnim za pojedine uzorke tijekom cijelog perioda mjerenja. Tablica 1 prikazuje vrijednosti emisivnosti površina najčešće korištenih materijala u građevinarstvu.



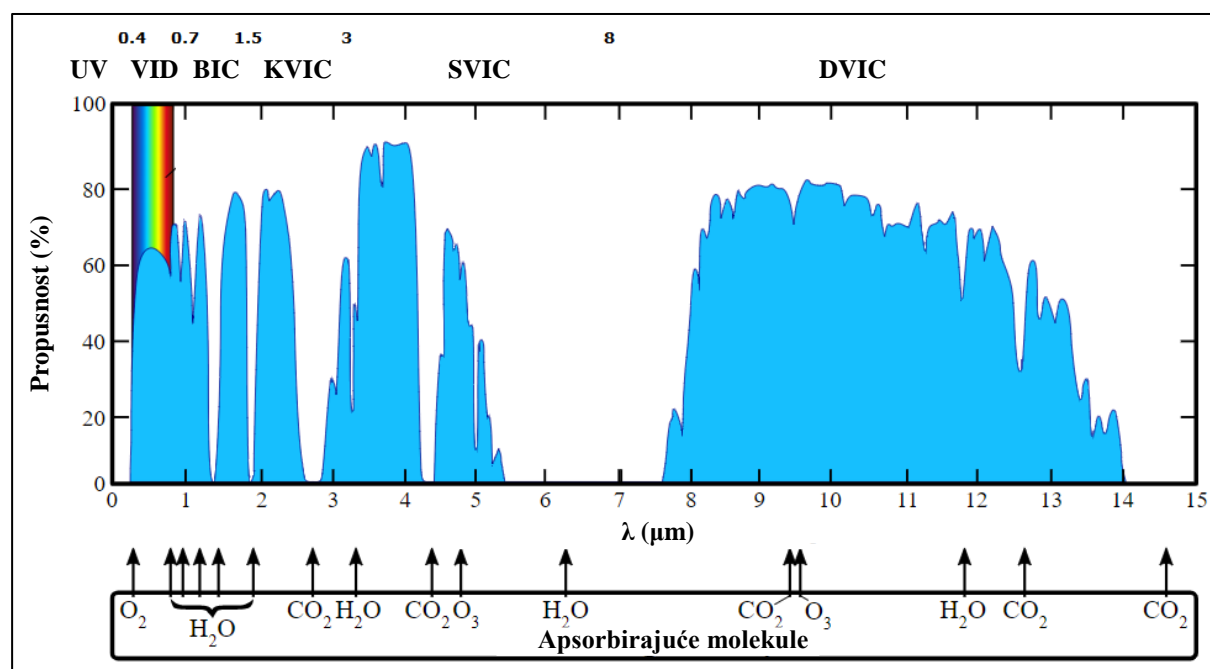
Slika 12: Usporedba zračenja crnog, sivog i realnog tijela

Tablica 1: Emisivnosti nekih materijala korištenih u građevinarstvu

Materijal	Temperatura površine [°C]	Opis površine	Spektar valnih duljina	Emisivnost ϵ	Izvor
Beton	20	–	0 – ∞	0,92	[60]
Beton	17	Gruba	6.5 – 20 μm	0,974	[61]
Beton	36	Suha	2 – 5 μm	0,95	[62]
Žbuka	17	–	2 – 5 μm	0,86	[61]
Žbuka	20	Gruba	0 – ∞	0,91	[60]
Gipskarton	20	Glatka	0 – ∞	0,80 – 0,90	[63]
Mort	17	–	2 – 5 μm	0,87	[61]
Mort	36	Suha	2 – 5 μm	0,94	[62]
Opeka	35	–	2 – 5 μm	0,94	[62]
Opeka	20	Ožbukana	0 – ∞	0,94	[64]
Čelik	70	Hladno valjana (sjajna, glatka)	2 – 5 μm	0,20	[65]
Čelik	70	Hladno valjana	8 – 14 μm	0,09	[65]

Čelik	20	Slabo oksidirana	0 – ∞	0,61 – 0,85	[64]
Čelik	20	Jako oksidirana	0 – ∞	0,69	[60]
Čelik	50	Gruba	0 – ∞	0,95 – 0,98	[64]
Drvo (bor)	70	–	2 – 5 μm	0,67 – 0,75	[65]
Drvo (hrast)	20	–	0 – ∞	0,90	[60]
Drvo (iverica)	36	Glatka	8 – 14 μm	0,81 – 0,89	[63]

Transmisija u atmosferi varira ovisno o valnoj duljini. Određeni plinovi uzrokuju svaku od apsorpcijskih vrpca (Slika 13). Značajan učinak na propusnost atmosfere ima plin CO₂, posebno u dugovalnom infracrvenom spektru (DVIC), koji objašnjavaju njegovu ulogu kao najbitnijeg stakleničkog plina.



Slika 13: Spektralna propusnost atmosfere

3.1.11 Prividna reflektirana temperatura

Mjerenje infracrvenom termografijom također zahtijeva poznavanje vrijednosti prividne reflektirane temperature, često označene kao T_{refl} ili T_{amb} . Prividna reflektirana temperatura ne predstavlja temperaturu zraka već predstavlja mjeru prosječne prividne temperature svih tijela u okolini promatrane površine. Ta temperatura je prividna zbog činjenice da ona ne predstavlja stvarnu temperaturu već samo odraz zračenja iz okoline u trenutku snimanja termograma.

Prividna reflektirana temperatura je nužna i potencijalno vrlo važna korekcija jer zračenje koje kamera detektira nije samo rezultat emisije zračenja s promatrane površine već je u tom zračenju sadržan i dio reflektiranog zračenja pošto površina nije apsolutno crno tijelo. Procjena prividne reflektirane temperature omogućuje očitavanja stvarne temperature tijela ako se pretpostavi da nema komponente zračenja transmisijom što je slučaj u ovom radu [66].

Dolje su navedeni opći koraci za mjerenje i kompenzaciju prividne reflektirane temperature pomoću difuznog infracrvenog reflektora. Difuzni reflektor može se napraviti od zgužvanog i ponovno spljoštenog lista aluminijske folije. Postupak određivanja prividne reflektirane temperature je sljedeći [59]:

- 1) Postavljanje kamere na željeno mjesto i udaljenost od promatrane površine.
- 2) Fokusiranje kamere.
- 3) Postavljanje difuznog reflektora na promatranu površinu.
- 4) Određivanje temperature difuznog reflektora s emisivnosti površine postavljenom na 1.

Temperatura određena na ovaj način je prividna reflektirana temperatura okoliša T_{refl} .

3.2 Postupak mjerenja infracrvenom termografijom

Postupak mjerenja infracrvenom kamerom in-situ je sljedeći:

- 1) Postavljanje kamere na stabilnu površinu ili stalak na poznatoj udaljenosti i poznatom nagibu kamere od promatrane površine.
- 2) Određivanje emisivnosti promatrane površine korištenjem postupka opisanog u poglavlju 3.1.10.
- 3) Određivanje prividne reflektirane temperature okoliša u kojemu se površina nalazi korištenjem postupka opisanog u poglavlju 3.1.11.
- 4) Snimanje termograma.
- 5) Naknadna obrada termograma s postavljenim parametrima (emisivnost površine, prividna reflektirana temperatura, udaljenost kamere od promatrane površine, temperature zraka, itd.).
- 6) Očitavanje stvarne temperature površine.

3.2.1 Pasivna termografija

Sva tijela s temperaturom višom od apsolutne nule (0 K) emitiraju infracrveno zračenje. Pasivna termografija iskorištava tu činjenicu. To znači da se kod pasivne termografije ne uvodi nikakvo dodatno zračenje koje bi pobudilo, tj. dodatno zagrijalo, površinu.

U ovom radu će se primjenjivati samo pasivna termografija. Površine će se promatrati u kvazistacionarnom stanju, tj. u prirodnom okruženju. Sve pobude objekta bit će izazvane promjenama u temperaturi okoliša i okolnih površina koje okružuju promatrano tijelo. Sve impulsne pobude (paljenje i gašenje rasvjete, otvaranje i zatvaranje vrata i prozora) će se smatrati dovoljno kratkima da ne bi promijenile ustaljeni prijenos topline zračenjem i strujanjem.

3.2.2 Naknadna obrada termograma

Obrada termograma se može obaviti ručno, no to može biti vrlo zahtjevno i dugotrajno. Naknadna obrada termograma se najčešće obavlja putem specijaliziranih računalnih programa. Ovi programi su vrlo korisni u građevinarstvu i građevinskoj fizici, jer omogućuju preciznu analizu termograma i pružaju korisne informacije o toplinskoj dinamici materijala i građevinskih elemenata. Također, ovi programi mogu pomoći u dijagnostici problema s izolacijom, infiltracijom zraka, problemima nastanka gljivica i plijesni te drugim problemima koji mogu utjecati na energetska učinkovitost zgrade.

Jedan od popularnih računalnih programa za analizu termograma je ResearchIR [67]. Ovaj program omogućuje naprednu analizu termograma korištenjem različitih filtera za prigušenje pozadinske buke i statističku obradu rezultata, kao što su promjena pozadinskog prizora, praćenje toplinske promjene tijekom vremena te izradu 3D modela termograma. ResearchIR također ima mogućnost kreiranja izvještaja i grafova te omogućuje usporedbu termograma kako bi se pratila promjena tijekom vremena.

ResearchIR pruža mogućnost istovremene analize više termograma kako bi se dobio zapis temperature u vremenu zbog čega je i odabran za analizu u ovom istraživanju. ResearchIR daje mogućnost izrade vlastitih funkcija što omogućuje dobivanje odstupanja temperature po površini u vremenu radi jednostavnijeg izračuna standardnih devijacija za površinske temperature, ali i mogućnost praćenja prividne reflektirane temperature koja se u standardnom snimanju infracrvenom kamerom uzima kao konstantna veličina, ali je u ovom radu uzeta kao funkcija vremena.

3.2.3 Srednja temperatura zračenja

Srednja temperatura zračenja (MRT – „*Mean Radiant Temperature*“) mjera je prosječne temperature svih površina koje okružuju određenu točku u prostoru, uključujući zidove, podove, stropove te sve predmete koji se nalaze u okolini promatrane površine. MRT spada u jedan od najvažnijih parametara u procjeni toplinske ugodnosti i kvalitete unutarnjeg okoliša jer utječe na prijenos topline između ljudskog tijela i okoline.

MRT se obično mjeri u stupnjevima Celzijevim (°C). Općenito, na MRT utječe niz čimbenika, kao što su: temperatura okolnih površina, emisivnost tih površina te upadni kut zračenja u odnosu na promatranu točku. Površinska temperatura svih tijela unutar prostorije je najvažniji čimbenik u određivanju MRT-a, budući da izravno utječe na količinu topline koju zrače i apsorbiraju okolne površine.

MRT se obično koristi u kombinaciji s temperaturom i brzinom strujanja zraka za procjenu toplinske ugodnosti. U zatvorenim prostorima na MRT mogu utjecati razni čimbenici, poput Sunčevog zračenja, sustava grijanja i hlađenja te prisutnost ljudi i drugih izvora topline.

Najčešći način mjerenja MRT-a je korištenje toplinskih senzora, kao što su termoelementi ili termistori, koji se postavljaju u neposrednoj blizini površina za koje se određuje površinska temperatura. Ovi senzori mjere temperaturu okolnih površina i omogućuju izračunavanje MRT-a na temelju ponderiranog prosjeka površinskih temperatura.

MRT je važan parametar u projektiranju i radu sustava grijanja, hlađenja i ventilacije (HVAC), budući da može utjecati na ugodnost i produktivnost korisnika zgrade. Osim toga, MRT se koristi u raznim područjima, poput meteorologije i energetske učinkovitosti.

Kako bi se održala toplinska ugodnost, važno je kontrolirati MRT zajedno s ostalim parametrima okoliša kao što su temperatura zraka te vlažnost i brzina strujanja zraka. To se može postići pravilnim projektiranjem i radom HVAC sustava, kao i korištenjem materijala s odgovarajućim toplinskim svojstvima.

U ovom radu se mjerenje srednje temperature zračenja određivalo primjenom globus termometra. Globus termometar je vrsta senzora koji se sastoji od šuplje, mat crne kugle (globusa) poznate emisivnosti u kojoj se nalazi termočlanak, a oplošje kugle je izloženo okolnom zraku.

Globus termometar radi na principu mjerenja površinske temperature kugle (globusa) koju zagrijava okolni zrak i zračenje okolnih površina. Za izračun MRT-a koristi se razlika između temperature izmjerene unutar globus termometra i temperature okolnog zraka.

Globus termometar često se koristi u kombinaciji s drugim sensorima (termočlancima i vlagomjerima za mjerenje temperature i relativne vlažnosti zraka), za procjenu toplinske ugodnosti i energetske učinkovitosti u zgradama. Obično se koriste u industrijskim i komercijalnim okruženjima, kao što su tvornice i skladišta, gdje je toplinska ugodnost važan čimbenik za produktivnost i sigurnost radnika.

Upotreba globus termometara ima neka ograničenja, kao što je njihova osjetljivost na vjetar i strujanje zraka, kao i njihova sposobnost točnog mjerenja MRT-a u područjima s nejednolikom zračenjem okoline (Sunčevo zračenje, grijanje, prisustvo ljudi, itd.). Međutim, oni ostaju koristan alat za procjenu toplinske ugodnosti i optimizaciju HVAC sustav. U ovom radu je cilj usporediti MRT te prividnu reflektiranu temperaturu kako bi se zaključilo koja od te dvije temperature bolje opisuje toplinski tok koji se strujanjem i zračenjem izmjeni između promatrane površine i okoline i obrnuto.

Glavna razlika između MRT-a i prividne reflektirane temperature je u tome što MRT daje uprosječenu temperaturu u vremenu zbog tromosti zagrijavanja kugle. Nagle promjene u okolišu malo ili uopće ne mijenjaju MRT. Suprotno tome, prividna reflektirana temperatura daje dinamičku temperaturu koja u stvarnom vremenu daje sliku okoliša. Nagle promjene temperature tijela i zraka unutar okoliša se istovremeno preslikavaju na promjenu prividne reflektirane temperature.

3.2.4 Toplinski tok kao posljedica zračenja tijela

Toplinski tok zračenjem je proces prijenosa topline između dva tijela koja su u prostoru jedan pored drugog, bez potrebe za fizičkim kontaktom ili prijenosom materije kao što je to slučaj kod strujanja i provođenja topline. U ovom procesu, toplina se prenosi elektromagnetskim zračenjem između tijela koja imaju različite temperature. Tijela s višom temperaturom zrače više topline, dok tijela s nižom temperaturom zrače manje.

Toplinski tok zračenjem se izražava kroz Stefan-Boltzmannov zakon, koji kaže da je količina topline koju zrači tijelo proporcionalna četvrtoj potenciji njegove apsolutne temperature. To znači da tijelo s dvaput većom temperaturom zrači 16 puta više topline. Stefan-Boltzmannov zakon se može primijeniti na svaku površinu koja zrači na bilo kojoj valnoj duljini

elektromagnetskog spektra, bilo da je riječ o Sunčevom zračenju ili toplinskom zračenju od grijalice ili leda.

Za izračunavanje toplinskog toka zračenjem, koristi se i koncept emisivnosti površina. Kao što je već rečeno emisivnost je mjera sposobnosti površine da emitira zračenje u odnosu na idealno crno tijelo koje apsorbira svo zračenje koje na njega padne. Idealno crno tijelo ima koeficijent emisivnosti 1, dok realna tijela imaju koeficijent emisivnosti između 0 i 1.

Korištenje činjenice da se zračenje prenosi bez fizičkog kontakta dva tijela je dovelo do korištenja infracrvenih senzora za mjerenje temperature infracrvenim osjetnicima kao što su infracrvene kamere.

3.2.5 Utjecaj strujanja na mjerenje infracrvenom termografijom

Strujanje zraka po površini može značajno utjecati na toplinsko zračenje tijela i mjerenje temperature infracrvenom kamerom. To je zbog toga što strujanje zraka uzrokuje konvekciju po površini tijela što dovodi do dodatnog prijenosa topline putem strujanja zraka. S obzirom da strujanje hladnijeg ili toplijeg zraka preko površine može značajno utjecati na brzinu hlađenja ili zagrijavanja površine, to može dovesti do značajne pogreške u mjerenju temperature infracrvenom kamerom.

Kako bi se smanjio utjecaj strujanja zraka na mjerenje infracrvenom kamerom, preporučuje se mjerenje temperature u okruženju s minimalnom brzinom strujanja zraka. To može uključivati mjerenje u zatvorenim prostorima ili uporabu zaštitnih okvira za sprječavanje strujanja zraka po površini. Također je važno osigurati da mjerenje bude izvršeno na stabilnoj površini, kako bi se smanjile oscilacije temperature koje mogu biti posljedica strujanja zraka.

U slučajevima kada nije moguće smanjiti utjecaj strujanja zraka, može se primijeniti korekcija na izmjenenom rezultatu kako bi se uklonili učinci strujanja. Ova korekcija može se provesti primjenom algoritama za prilagodbu temperature, koje mogu uzeti u obzir brzinu i smjer strujanja zraka, kao i ostale relevantne parametre. Međutim, važno je imati na umu da ova korekcija može biti samo približna, i da su mjerenja u uvjetima minimalne cirkulacije zraka i stabilne površinske temperature najtočnija.

3.3 Prijenos topline strujanjem

Vrlo važan način izmjene topline u građevinskoj fizici je predaja topline od fluida u gibanju na neku krutu stjenku i obrnuto. Praktičan način proračuna bazira se na Newtonovom zakonu hlađenja i računa se prema izrazu [49].

$$q_c = h_c \cdot (T_p - T_\infty) \quad (11)$$

Gdje je q_c gustoća toplinskog toka koja se prenese na promatranu površinu strujanjem [W/m^2], h_c je koeficijent proporcionalnosti koji se u literaturi naziva lokalnim koeficijentom prijelaza topline strujanjem [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$], T_p je temperatura promatranog dijela površine [$^\circ\text{C}$], T_∞ je temperatura fluida u okolišu (ili temperatura slobodnog strujanja fluida) [$^\circ\text{C}$], a razlika temperatura ($T_p - T_\infty$) predstavlja temperaturni pad u graničnom sloju fluida koji se formira neposredno uz krutu stjenku.

Koeficijent proporcionalnosti h_c u izrazu (11) opisuje uvjete pod kojima se praktično odvija prijelaz topline, odnosno opisuje intenzitet izmjene topline. Lokalni koeficijent prijelaza topline ovisi o: obliku krutog tijela, načinu strujanja tekućine, temperaturi i fizikalnim svojstvima tekućine [68]. Kod proračuna u građevinskoj fizici koristi se srednja uprosječna vrijednost koeficijenta prijelaza topline strujanjem \bar{h}_c [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]. Taj koeficijent se za razliku od lokalnog koeficijenta prijelaza topline strujanjem, koji se odnosi na dio površine (ΔA), odnosi na cjelokupnu površinu elementa (A). Koeficijent se računa preko izraza (12) [69].

$$\bar{h}_c = \frac{\bar{q}_c}{A \cdot (T_p - T_\infty)} \quad (12)$$

Gdje je \bar{q}_c uprosječna vrijednost toplinskog toka strujanjem po površini promatranog elementa.

Gibanje fluida može biti pobuđeno na dva načina:

- a) Prirodnim (slobodnim) strujanjem.
- b) Prisilnim ili prinudnim strujanjem.

Kod prirodnog strujanja gibanje fluida je uzrokovano silama uzgona zbog razlike gustoća u samom fluidu koje su izazvane promjenom temperature [70]. Čestice fluida koje su bliže toplijoj stjenci zagrijavaju se i postaju lakše, te se kao takve dižu u vis i pobuđuju strujanje koje je uvjetovano topline [68].

Kod prisilnog strujanja gibanje fluida je uzrokovano vanjskim izvorom kao što je pumpa, ventilator itd. [70]. Dakle, strujanje fluida uzrokovano je vanjskom nametnutom razlikom tlakova bez obzira na prijelaz topline (smjer) uzrokovan promjenom temperature u samom fluidu.

Izmjena topline strujanjem, i kod slobodnog i kod prisilnog strujanja, uvjetovana je brojem čestica fluida koje se međusobno dodiruju. Ako je tih dodira više, tj. ako je fluid bolje izmiješan, to će više hladnih čestica doći u blizinu toplije krute stijenke, pa će i izmjena topline biti intenzivnija. To znači da će na prijelaz topline s vanjske plohe elementa na fluid, ili obrnuto, znatno utjecati način strujanja fluida [68].

Znanje o načinu prijenosa topline strujanjem je bitno kako bi se što bolje opisao toplinski tok koji se iz fluida u okolišu prenosi na krute stijenke građevnih elemenata, te se zatim vođenjem prenosi kroz sam element. Bolja aproksimacija toplinskog toka nam omogućuje bolju aproksimaciju koeficijenta prolaska topline (U-vrijednost) građevinskih elemenata u stvarnim uvjetima.

3.3.1 Osnovne veličine kojima se opisuje strujanje fluida

3.3.1.1 Nusseltov broj

Nusseltov broj jednak je bezdimenzionalnom temperaturnom gradijentu na površini elementa, te predstavlja omjer konvektivnog toplinskog toka u odnosu na čisto vođenje topline [49]. Srednja vrijednost Nusseltovog broja računa se preko izraza:

$$\bar{N}_u = \frac{\bar{h}_c \cdot L}{\lambda_f} \quad (13)$$

Gdje je L karakteristična dimenzija elementa koji se promatra (npr. duljina ploče, visina zida) [m], a λ_f toplinska provodljivost fluida [W/(m·K)]. Nusseltov broj je u svom osnovnom obliku funkcija Reynoldsovoga i Prandtlovoga broja.

3.3.1.2 Prandtlov broj

Prandtlov broj fizikalno predstavlja omjer difuzije impulsa i toplinske difuzije [49]. On na makrorazini kvalitativno opisuje sposobnost međumolekularnih mehanizama prijenosa energije [71]. Računa se preko izraza:

$$Pr = \frac{c_{p,f} \cdot \mu}{\lambda_f} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (14)$$

Gdje je $c_{p,f}$ specifični toplinski kapacitet fluida pri konstantnom tlaku [J/(kg·K)], μ dinamička viskoznost [N·s/m²], ν je kinematička viskoznost [m²/s] i α toplinska difuzivnost [m²/s]. Kako je Prandtlov broj bezdimenzionalan u gornjoj jednadžbi μ se treba uvrstiti u (N·s)/m², $c_{p,f}$ u J/(kg·K), a λ_f u W/(m·K). U poglavlju 3.3.2 pokazati kako omjer debljine hidrodinamičkog i temperaturnog graničnog sloja fluida ovisi upravo o Prandtlovom broju.

3.3.1.3 Reynoldsov broj

Reynoldsov broj predstavlja omjer između sile inercije i sile trenja u graničnom sloju [72], a računa se prema izrazu:

$$Re = \frac{\rho_f \cdot u_\infty \cdot L}{\mu} = \frac{u_\infty \cdot L}{\nu} \quad (15)$$

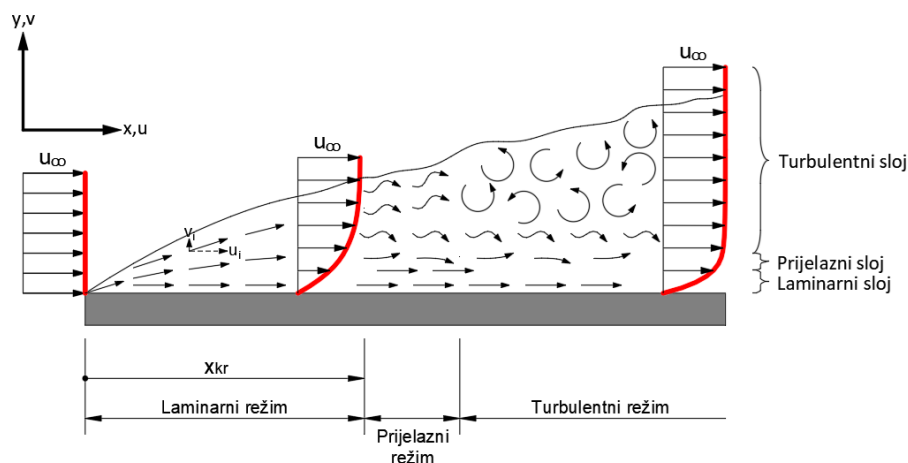
Gdje je u_∞ brzina slobodnog strujanja fluida [m/s] i ρ_f gustoća fluida [kg/m³]. Kako Reynoldsov broj predstavlja omjer inercijalne sile, koja nastoji održati brzinu fluida, i sile trenja, koja ga pokušava usporiti, to znači da Reynoldsov broj definira profil brzina strujanja fluida [68].

Kada se karakterizira ponašanje fluida u graničnom sloju (Slika 14), tada se pretpostavlja da postoji mjesto na elementu, udaljeno od mjesta slobodnog strujanja fluida za iznos x_{kr} , u kojem tok fluida prelazi iz laminarnog u turbulentni režim tečenja (16). x_{kr} se određuje iz kritičnog Reynoldsovog broja (Re_{kr}). Re_{kr} poprima vrijednosti 1 - 30×10^5 , ovisno o hrapavosti površine i turbulentnosti slobodnog strujanja fluida [49]. Najčešće korištena vrijednost kritičnog Reynoldsovog broja iznosi 5×10^5 , a računa se preko izraza (16).

$$Re_{kr} = \frac{\rho \cdot u_\infty \cdot x_{kr}}{\mu} \quad (16)$$

Iz izraza (16) može se izraziti x_{kr} kao:

$$x_{kr} = \frac{\nu}{u_\infty} \cdot Re_{kr} \quad (17)$$



Slika 14: Granični sloj pri strujanju uzduž ravne površine

3.3.1.4 Dinamička viskoznost

Veza između promjene impulsa i sile trenja svojstvena je svakom fluidu i smatra se njegovim fizikalnim svojstvom koje se naziva dinamička viskoznost, μ [71]. Dakle, viskoznost fluida je mjera otpora strujanju fluida.

U svojem radu Sutherland je povezo dinamičku viskoznost s apsolutnom temperaturom idealnog plina [73]. Izraz koji je on predložio u literaturi se naziva Sutherlandovim zakonom (eng. „*Sutherland's law*“) u njegovu čast. Računa se preko izraza (18) [74]:

$$\mu = \mu_{ref} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{3/2} \cdot \left(\frac{T_{ref} + S}{T + S} \right) \quad (18)$$

Gdje je T_{ref} referentna temperatura fluida [K], μ_{ref} dinamička viskoznost fluida pri referentnoj temperaturi [$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$], a S je Sutherlandova konstanta za fluid koji se promatra [K]. Ukoliko je fluid zrak tada se u izrazu (18) koriste konstante navedene u tablici 2. Tablica 2 prikazuje konstante korištene za zrak u izrazu (18).

Tablica 2: Konstante za zrak u izrazu (18)

Varijabla	Vrijednost
S	110,4 K
T_{ref}	273,15 K
μ_{ref}	$17,16 \times 10^{-6} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$

3.3.1.5 Kinematička viskoznost

Fizikalno svojstvo koje je također usko povezano sa silom trenja između slojeva fluida je kinematička viskoznost. Ona predstavlja fizikalno svojstvo difuzivnosti impulsa, a definirana je kao omjer dinamičke viskoznosti i gustoće fluida [71]. Računa se preko izraza:

$$\nu = \frac{\mu_f}{\rho_f} \quad (19)$$

Dok se dinamička viskoznost može smatrati konstantnom pri različitim temperaturama i tlakovima fluida, kinematička viskoznost se mijenja pošto gustoća fluida uvelike ovisi o temperaturi i tlaku fluida. Gustoća zraka se računa preko izraza (20) – jednadžba stanja idealnog/realnog plina.

$$\rho_z = \frac{p}{R_{zrak} \cdot T} \quad (20)$$

Gdje je p tlak zraka [Pa], R_{zrak} plinska konstanta zraka [J/(kg·K)] i T temperatura zraka [K].

3.3.1.6 Srednja temperatura graničnog sloja

Kako bi se u obzir uzele varijacije termodinamičkih svojstava fluida uveden je pojam srednje temperature graničnog sloja, T_m (eng. „*film temperature*“) [75]. Ona je definirana kao srednja vrijednost površinske temperature elementa i temperature slobodnog strujanja fluida (temperature zraka), a računa se preko izraza (21). U slučajevima kada se koristi srednja temperatura graničnog sloja svojstva fluida se smatraju konstantnima [71].

$$T_m = \frac{T_p + T_\infty}{2} \quad (21)$$

Važno je napomenuti da iako svojstva fluida ovise o tlaku, ta ovisnost je vrlo slaba i općenito se ne uzima u obzir!

3.3.1.7 Toplinska difuzivnost

Toplinska difuzivnost materijala, α , predstavlja omjer između toplinske provodljivosti materijala (u ovom slučaju fluida) i njegovog toplinskog kapaciteta. Velika vrijednost toplinske difuzivnosti ukazuje na to da će materijal brzo promijeniti svoju temperaturu, dok mala vrijednost ukazuje na sporu promjenu temperature materijala što znači da će mu trebati više vremena kako bi dosegnuo toplinsku ravnotežu [49]. Toplinska difuzivnost računa se preko izraza (22).

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (22)$$

3.3.2 Granični sloj

3.3.2.1 Važnost graničnoga sloj

Kada fluid struji preko neke površine, na toj površini se javljaju hidrodinamički granični sloj i trenje na površini, te u slučaju različitih temperatura fluida i površine, također se javlja i temperaturni granični sloj, koji uzrokuje prijenos topline. Odatle slijedi da je debljina hidrodinamičkog graničnog sloja δ karakterizirana brzinom strujanja fluida i trenjem, dok je debljina temperaturnoga graničnog sloja δ_t karakterizirana temperaturnim gradijentom i toplinskim tokom. U slučaju kada su prisutna oba sloja, i hidrodinamički i temperaturni, mjesta na kojem započinje njihov rast uglavnom nisu jednaka kao ni brzina kojom se šire [49].

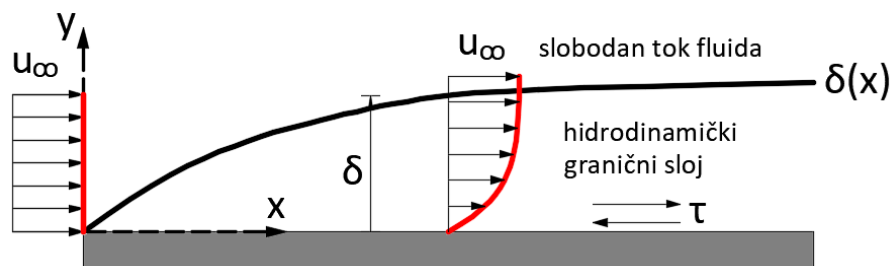
Za inženjere je pojava graničnog sloja bitna radi definiranja površinskog trenja i prijenosa topline strujanjem. Glavni parametri bitni za definiranje tih fizikalnih pojava su koeficijent trenja (lokalni i njegova prosječna vrijednost) C_f te koeficijent prijenosa topline strujanjem h_c . U ovom poglavlju će se opisati hidrodinamički i temperaturni granični sloj, te njihova veza s koeficijentom trenja i koeficijentom prijelaza topline strujanjem.

3.3.2.2 Hidrodinamički granični sloj

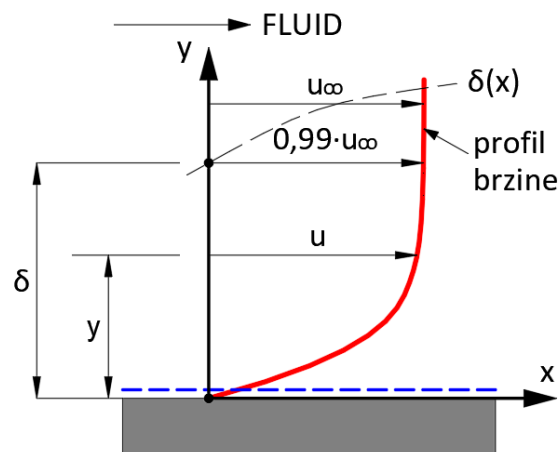
Kako bi se objasnio pojam hidrodinamičkog graničnog sloja, promatrat će se tok fluida preko ravne površine (Slika 15). Brzina čestica fluida koji su u dodiru s površinom pretpostavlja se jednaka nuli. Te čestice zatim djeluju na čestice u susjednom sloju na način da ih pokušavaju usporiti. Zatim čestice iz susjednog sloja djeluju na njima susjedne čestice, te se taj proces nastavlja sve dok prijenos količine gibanja (impulsa) postane nezamjetan [49]. To usporavanje fluida je povezano s posmičnim naprezanjem τ u slojevima fluida paralelnim sa smjerom gibanja fluida (Slika 15). Udaljavanjem od površine (povećanjem y koordinate) x komponenta vektora brzine, u , se povećava dok ne poprimi iznos u_∞ . Simbol ∞ koristi se za opisivanje uvjeta fluida (brzine, temperature itd.) izvan graničnoga sloja.

Veličina δ označava debljinu hidrodinamičkog graničnog sloja, te se definira kao udaljenost od površine (u smjeru normale) gdje brzina iznosi 99 % brzine slobodnog strujanja fluida, u_∞ (Slika 16) – izraz (23) [49].

$$u_x|_{y=\delta} = 0,99 \cdot u_\infty \quad (23)$$



Slika 15: Hidrodinamički granični sloj na ravnoj površini



Slika 16: Hidrodinamički granični sloj debljine δ

Prije nego se krene u određivanje koeficijenta plošnog prijelaza topline (lokalnog i prosječnog) potrebno je matematički opisati granični sloj (hidrodinamički i temperaturni). Prva osoba koja je dala matematički opis graničnog sloja bio je Ludwig Prandtl 1904. godine. Debljina graničnog sloja ravne površine je funkcija više varijabli kao što je prikazano izrazom (24) [76]:

$$\delta = f(u_{\infty}, \rho, \mu, x) \quad (24)$$

gdje je x koordinata na površini elementa [m], ρ gustoća fluida [$\text{kg}/(\text{m}^3)$] i μ dinamička viskoznost fluida [$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$].

Jednostavnije gledano debljina graničnoga sloja je funkcija dvije varijable: Reynoldsovog broja i koordinate x :

$$\frac{\delta}{x} = f(Re) \quad (25)$$

Kasnije će biti pokazano da izraz (25) za strujanje fluida po ravnoj površini, pri konstantnoj brzini strujanja fluida u_{∞} , poprima sljedeći oblik [76]:

$$\frac{\delta}{x} = \frac{4,92}{\sqrt{Re}} \quad (26)$$

Kao što je već rečeno, za inženjere je hidrodinamički granični sloj bitan zbog njegove veze s posmičnim naprezanjem na površini τ_p . Ta veza se očituje preko lokalnog koeficijenta trenja C_f – izraz (27) [49].

$$C_f = \frac{\tau_p}{\rho \cdot u_{\infty}^2 / 2} \quad (27)$$

Ako je poznata raspodjela brzine na površini elementa, uz pretpostavku Newtonovog fluida (viskozna naprezanja su linearno proporcionalna brzini deformacije fluida), tada se posmično naprezanje određuje preko izraza [49]:

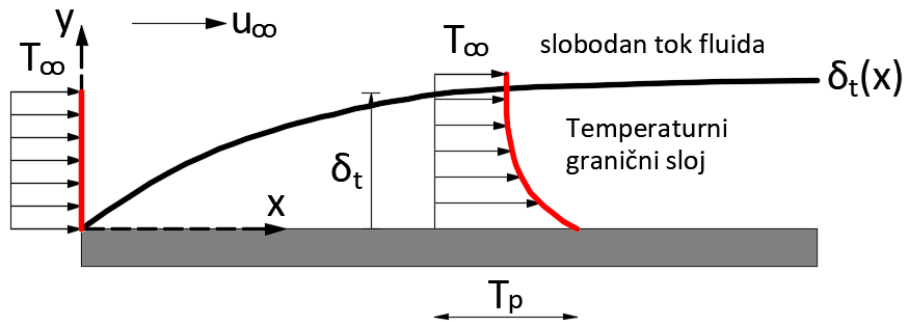
$$\tau_p = \mu \cdot \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (28)$$

3.3.2.3 Temperaturni granični sloj

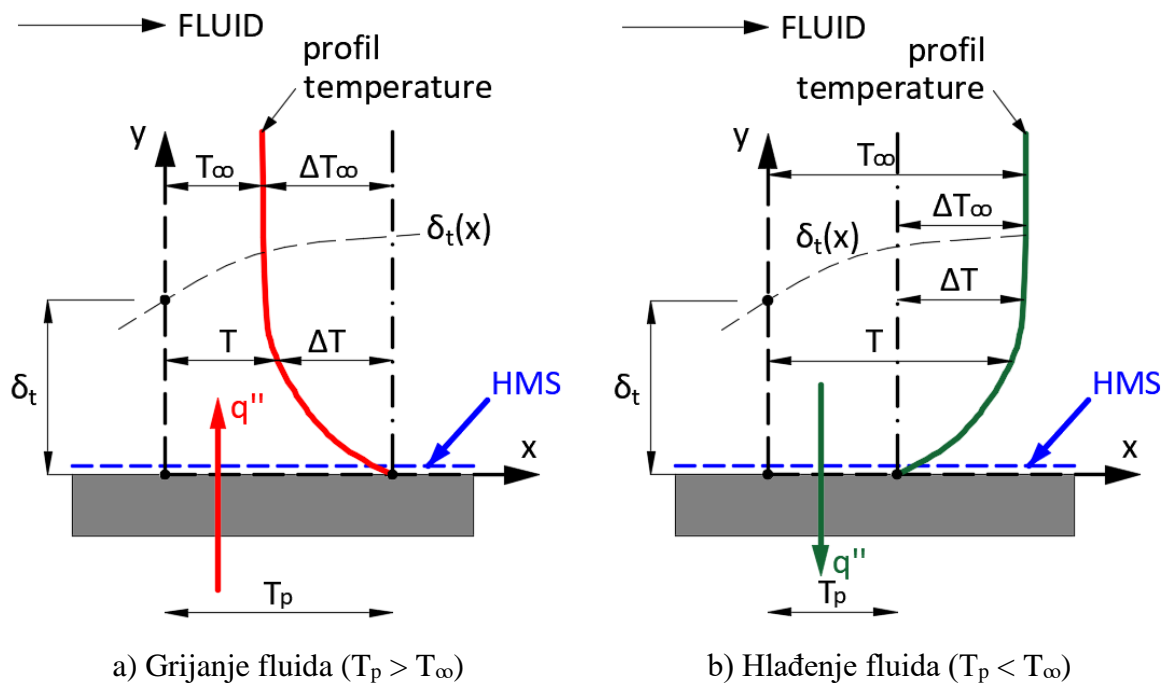
Kao i u slučaju hidrodinamičkog graničnog sloja, razmatra se ravna površina po kojoj struji fluid (Slika 17). Temperaturni granični sloj je područje fluida u kojem je zamjetan utjecaj stijenke na njegovu temperaturu. Temperaturno polje se, dakle, formira zbog izmjene topline s okolišem. To znači da je, na temelju poznavanja temperaturne distribucije unutar graničnog sloja, moguće odrediti intenzitet prijenosa topline – toplinski tok. Uobičajeni način iskazivanja prenesenog toplinskog toka je korištenjem koeficijenta prijelaza topline h_c , koji se iz poznatog profila temperature može izraziti na temelju poznate veze Newtonovog i Fourierovog zakona [71].

Veličina δ_t označava debljinu temperaturnoga graničnog sloja, te se definira kao udaljenost od površine (u smjeru normale) gdje razlika temperature fluida i stijenke iznosi 99 % razlike temperature fluida i temperature fluida u okolišu (Slika 18), a matematički se može prikazati preko izraza (29) [49]. Kada je fluid hladniji od stijenke dolazi do prijenosa topline sa stijenke na fluid (Slika 18a) – slučaj grijanja fluida). Kada je fluid topliji od stijenke dolazi do prijenosa topline s fluida na stjenku (Slika 18b) – slučaj hlađenja fluida). Način prijenosa topline između fluida i stijenke određuje smjer toplinskog toka kroz površinu elementa.

$$\left. \frac{T - T_p}{T - T_{\infty}} \right|_{y=\delta_t} = \frac{\Delta T}{\Delta T_{\infty}} = 0,99 \quad (29)$$



Slika 17: Temperaturni granični sloj na ravnoj površini



a) Grijanje fluida ($T_p > T_\infty$)

b) Hlađenje fluida ($T_p < T_\infty$)

Slika 18: Temperaturni granični sloj

Na površini elementa je brzina strujanja fluida jednaka nuli pa se prijenos topline odvija samo vođenjem. Gustoća toplinskog toka se određuje preko Newtonovog zakona hlađenja – izraz (11). Na bilo kojoj udaljenosti x od vodećeg ruba (eng. „*leading edge*“) – mjesta na kojem prvi puta dolazi do dodira fluida i površine ($x = 0$) – lokalni koeficijent prijelaza topline strujanjem se određuje preko Fourierovog zakona na udaljenosti $y = 0$ od površine elementa – izraz (30) [49].

$$q_c = -\lambda_f \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (30)$$

Uvrštavanjem Newtonovog zakona hlađenja u Fourierov zakon dobiva se izraz (31) [49].

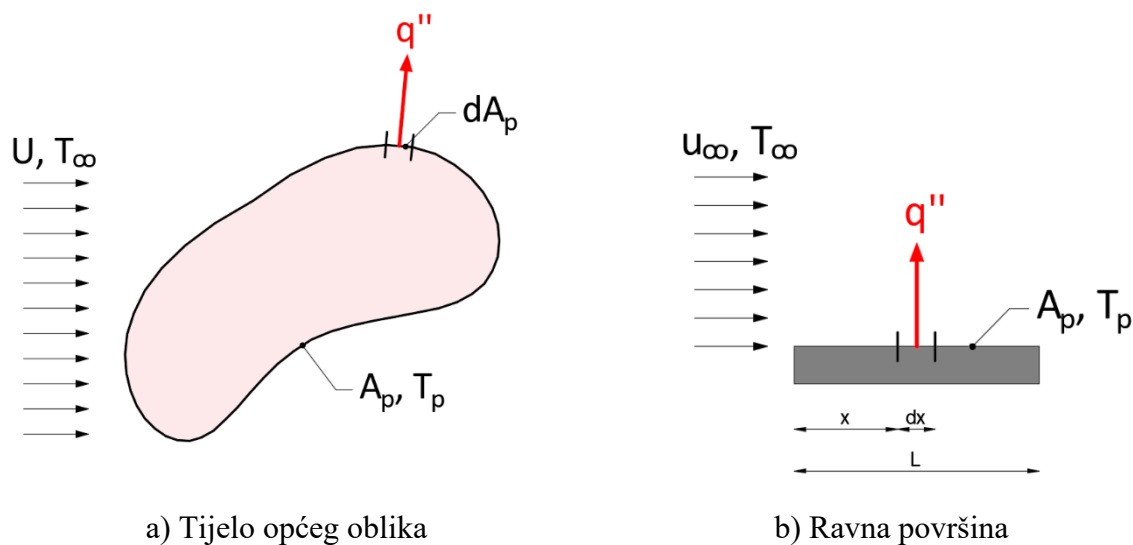
$$h_c = \frac{-\lambda_f \cdot \partial T / \partial y \Big|_{y=0}}{T_p - T_\infty} \quad (31)$$

Uvjeti u temperaturnom graničnom sloju, koji znatno utječu na temperaturni gradijent površine zida $\partial T/\partial y|_{y=0}$, određuju brzinu prolaska topline kroz granični sloj. Razlika temperature ($T_p - T_\infty$) je konstanta (neovisna je o x -koordinati), a debljina temperaturnoga graničnog sloja se povećava kako se udaljavamo od vodećeg ruba ($x = 0$). Iz toga proizlazi da se temperaturni gradijent $\partial T/\partial y|_{y=0}$ smanjuje kako se udaljavamo od vodećeg ruba, što rezultira smanjenjem koeficijenta prijelaza topline strujanjem, h_c , i naposljetku toplinskog toka, q_c .

3.3.3 Plošni koeficijent prijelaza topline strujanjem

Razmatra se opće tijelo preko kojeg struji fluid brzine U i temperature T_∞ i čije oplošje iznosi A_p (Slika 19a). Površina tijela se drži na konstantnoj temperaturi T_p , a u slučaju kada ($T_p \neq T_\infty$) dolazi do izmjene topline strujanjem između površine tijela i njegove okoline (fluida). Ukupni toplinski tok Q_c po cijelom oplošju tijela određuje se sumiranjem svih lokalnih toplinskih tokova po površini dA_p :

$$Q_c = \int_{A_p} q_c dA_p \quad (32)$$



Slika 19: Lokalni i prosječni toplinski tok strujanjem

Ako se s \bar{h}_c označi prosječni koeficijent prolaska topline strujanjem cijele površine A_p , tada se ukupni toplinski tok računa kao:

$$Q_c = \bar{h}_c \cdot A_p \cdot (T_p - T_\infty) \quad (33)$$

Uvrštavanjem Newtonovog zakona hlađenja, tj. izraza (11), u (33) dobiva se izraz za prosječni koeficijent prolaska topline \bar{h}_c :

$$\bar{h}_c = \frac{1}{A_p} \cdot \int_{A_p} h_c dA_p \quad (34)$$

Za slučaj kada je površina ravna (Slika 19b), tada \bar{h}_c ovisi samo o udaljenosti x od vodećeg ruba pa se izraz (33) pojednostavljuje na:

$$\bar{h}_c = \frac{1}{L} \cdot \int_{A_p} h_c dx \quad (35)$$

3.3.4 Granični sloj pri laminarnom strujanju fluida po ravnoj površini

Predviđanje profila brzine u graničnom sloju je definirano preko jednadžbe očuvanja mase (jednadžbe kontinuiteta) i jednadžbe očuvanja količine gibanja.

3.3.4.1 Zakon očuvanja mase i jednadžba kontinuiteta

Zakon očuvanja mase glasi [71]: „*Brzina promjene mase materijalnog volumena jednaka je nuli*“.

U općem obliku jednadžba očuvanja mase glasi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z} = 0 \quad (36)$$

U inženjerskim se problemima vrlo često susreću strujanja kod kojih su vanjski uvjeti takvi da ne izazivaju velike brzine strujanja, što posljedično znači da je promjena gustoće tijekom takvih strujanja zanemariva. Drugim riječima, bez obzira radi li se o stlačivom ili nestlačivom fluidu, razlike tlaka su u tim problemima takve da ne utječu značajno na promjenu gustoće fluida. Daljnje razmatranje će se ograničiti upravo na takva strujanja koja se zbog toga nazivaju nestlačivim strujanjima [71].

U trodimenzionalnom slučaju strujanja fluida po ravnoj površini jednadžba kontinuiteta za nestlačivo stacionarno strujanje glasi [76]:

$$\nabla \cdot \vec{u} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (37)$$

gdje su u , v i w komponente vektora brzine \vec{u} .

3.3.5 Zakon očuvanja količine gibanja

Zakon očuvanja količine gibanja glasi [71]: „*Brzina promjene količine gibanja materijalnog volumena jednaka je sumi vanjskih masenih i površinskih sila koje djeluju na materijalni volumen*“.

Opći slučaj zakona očuvanja količine gibanja glasi [76]:

$$\frac{\partial u^2}{\partial x^2} + \frac{\partial(u \cdot v)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dx} + v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (38)$$

gdje je p tlak u fluidu izvan graničnoga sloja i funkcija je samo x koordinate.

Izraz (38) vrijedi samo za dvodimenzionalni slučaj i za nestlačiv fluid. Iako se pretpostavilo da je gustoća fluida ρ konstantna, pokazalo se da jednadžba vrijedi i za stlačive fluide [76]. Ako se izraz (37) (uz zanemarivanje w komponente) pomnoži s u i oduzme od lijeve strane izraza (38) dobiva se drugi oblik jednadžbe očuvanja količine gibanja [76]:

$$u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dx} + v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (39)$$

Izraz (39) u sebi sadržava niz aproksimacija:

- $|\partial u / \partial x| \ll |\partial u / \partial y|$, tj. ubrzanje u x smjeru je zanemarivu u odnosu na y smjer.
- $v \ll u$, tj. brzina u y smjeru je zanemariva u odnosu na brzinu u x smjeru.
- $p \neq f(y)$.

U slučaju kada nije prisutan gradijent tlaka fluida, tj. kada su p i u konstantni, kao što je slučaj kod strujanja preko ravne površine, tada izrazi (38) i (39) postaju [76]:

$$\frac{\partial u^2}{\partial x^2} + \frac{\partial(u \cdot v)}{\partial y} = u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} = v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (40)$$

Gradijent tlaka se u izrazima eliminirao koristeći Bernoullijevu jednadžbu:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{u_\infty^2}{2} = const. \rightarrow \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dx} = -u_\infty \cdot \frac{du_\infty}{dx} \quad (41)$$

3.3.6 Debljina hidrodinamičkog graničnog sloja

Sustav jednadžbi (37) i (38) ima svoje egzaktno rješenje, koje je 1908. godine prezentirao Prandtl student H. Blasius. Druga metoda za rješavanje navedenog sustava je takozvana integralna metoda koja ne daje egzaktno rješenje, ali je kao takva, zbog svoje jednostavnosti, mnogo primjenjivija za veliki broj problema. U nastavku su izložene obje metode [71].

3.3.6.1 Egzaktno rješenje

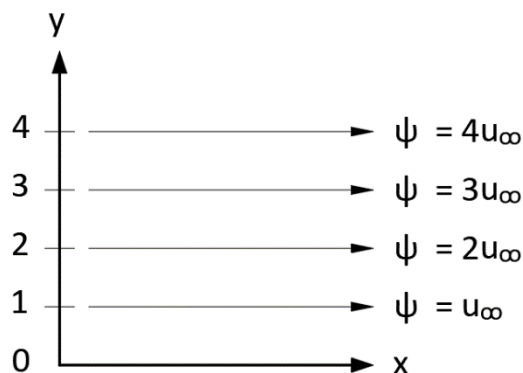
Ideja Blasiusovog rješenja je u tome da se nepoznate funkcije, u i v , u sustavima jednažbi (37) i (38) zamijene jednom funkcijom, te da se na taj način formira obična diferencijalna jednažba koju je zatim moguće riješiti, barem numeričkim metodama.

Iz kinematike fluida je poznat pojam strujnice koja se definira kao krivulja kojoj se u svakoj točki smjer tangente poklapa sa smjerom vektora brzine. Ako je strujanje stacionarno, trajektorije i strujnice se poklapaju, te je slika strujnica konstantna za sve vremenske trenutke [71].

U dvodimenzionalnom stacionarnom modelu jednažba strujnica ima svoj opći oblik [76]:

$$\Psi(x, y) = c \quad (42)$$

gdje c predstavlja konstantu koja definira novu strujnicu (0).



Slika 20: Strujnice u homogenom horizontalnom toku $\Psi = u_{\infty} \cdot y$

Veza između komponenti vektora brzine u i jednažbe strujnice dana je sljedećim izrazima:

$$\begin{aligned} u &= \frac{\partial \Psi}{\partial y} \\ v &= -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \end{aligned} \quad (43)$$

što proizlazi iz zakona očuvanja mase i činjenice da je parcijalna derivacija jednažbe strujnice po x i y jednaka nuli.

Uvrštavanjem izraza (43) u izraz (40) dobiva se parcijalna diferencijalna jednažba s jednom nepoznanicom – Ψ [76]:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial y} \cdot \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \partial y} - \frac{\partial \Psi}{\partial x} \cdot \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} = v \cdot \frac{\partial^3 \Psi}{\partial y^3} \quad (44)$$

Jednadžbu (44) moguće je svesti na običnu diferencijalnu jednadžbu ako se rješenja pretpostave u obliku [76]:

$$\Psi(x, y) = g(x) \cdot f(\eta) \quad (45)$$

gdje je $\eta(x, y) = y \cdot h(x)$.

Rubni uvjeti jednadžbe (44) glase:

$$\begin{aligned} u(x, \infty) &= \frac{\partial \Psi(x, \infty)}{\partial y} = u_{\infty} \\ u(x, 0) &= \frac{\partial \Psi(x, 0)}{\partial y} = 0 \\ v(x, 0) &= -\frac{\partial \Psi(x, 0)}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (46)$$

Uvrštavanjem izraza (45) u izraz (44) dobiva se obična diferencijalna jednadžba:

$$\begin{aligned} f'''(\eta) + \frac{1}{2} \cdot f(\eta) \cdot f''(\eta) &= 0 \\ \frac{u}{u_{\infty}} = f'(\eta) \frac{v}{\sqrt{u_{\infty} \cdot v/x}} &= \frac{1}{2} \cdot [\eta \cdot f'(\eta) - f(\eta)] \end{aligned} \quad (47)$$

s pripadajućim rubnim uvjetima:

- $f(0) = 0$
- $f'(0) = 0$
- $f'(\infty) = 1$.

u kojoj varijabla η , Blasiusove funkcije f ima sljedeći oblik [76]:

$$\eta(x, y) = \sqrt{\frac{u_{\infty}}{v \cdot x}} \cdot y \quad (48)$$

Rješavanjem jednadžbe (47) dobiva se debljina hidrodinamičkog sloja koja je već navedena u poglavlju 3.3.2.2:

$$4,92 = \frac{\delta}{\sqrt{v \cdot x/u_{\infty}}} \rightarrow \frac{\delta}{x} = \frac{4,92}{\sqrt{v \cdot x/u_{\infty}}} = \frac{4,92}{\sqrt{Re}} \quad (49)$$

u komponenta brzine raste od vrijednosti nula na površini zida ($\eta = 0$) do 99% od u_{∞} ($\eta = 4,92$), čime je definirana debljina hidrodinamičkog sloja.

3.3.6.2 Integralna metoda

Druga metoda, tzv. Integralna metoda, za razliku od egzaktna metode daje aproksimaciju rješenja bez korištenja numeričkih metoda, te je kao takva jednostavnija za primjenu u inženjerskoj praksi. Ideja metode je da se integracijom jednadžbe očuvanja količine gibanja od površine elementa do debljine graničnog sloja δ dobije sustav diferencijalnih jednadžbi čijim se rješavanjem u konačnici određuje nepoznati parametar – debljina hidrodinamičkog graničnog sloja [71,76].

Iako je zbog svojih pretpostavki približna, u praksi je prilično točna za izračun toplinskog toka na površini, što će kasnije i biti pokazano.

Integriranjem jednadžbe (40) dobiva se opći zapis jednadžbe očuvanja količine gibanja u integralnom obliku za određivanje debljine hidrodinamičkog graničnog sloja [76]:

$$\int_0^{\delta} \frac{\partial u^2}{\partial x} dy + \int_0^{\delta} \frac{\partial(u \cdot v)}{\partial y} dy = v \cdot \int_0^{\delta} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} dy \quad (50)$$

Sve veličine koje se definiraju u koordinati $y = \delta$ mogu se promatrati kao da se definiraju u „beskonačnosti“, pa se stoga, u koordinati $y = \delta$, brzina u se može pretpostaviti jednakoj brzini slobodnog strujanja fluida u_{∞} . Izraz (50) se zatim može napisati kao:

$$\int_0^{\delta} \frac{\partial u^2}{\partial x} dy + \left[\underbrace{(u \cdot v)|_{y=\delta}}_{=u_{\infty} \cdot v_{\infty}} - \underbrace{(u \cdot v)|_{y=0}}_{=0} \right] = v \cdot \left[\underbrace{\frac{\partial u}{\partial y}|_{y=\delta}}_{=0} - \frac{\partial u}{\partial y}|_{y=0} \right] \quad (51)$$

Isto vrijedi i za zakon očuvanja mase. U integralnom obliku on glasi:

$$v_{\infty} - \underbrace{v_{y=0}}_{=0} = - \int_0^{\delta} \frac{\partial u}{\partial x} dy \quad (52)$$

Množenjem izraza (52) s u_{∞} i uvrštavanjem u izraz (51) dobiva se:

$$\frac{d}{dx} \int_0^{\delta(x)} u \cdot (u - u_{\infty}) dy = - \frac{\tau_p}{\rho} \quad (53)$$

gdje je posmično naprežanje na površini jednako $\tau_p = \mu \cdot (\partial u / \partial y)$.

Izraz (53) predstavlja zakon očuvanja količine gibanja u integralnoj formi iz kojeg je vidljivo da je brzina promjene količine gibanja uravnotežena tangencijalnom silom na površini (posmičnim naprežanjem) [76].

Izraz (53) se može zapisati i u bezdimenzijskom obliku:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \left[\delta \cdot \int_0^1 \frac{u}{u_\infty} \cdot \left(\frac{u}{u_\infty} - 1 \right) d \left(\frac{y}{\delta} \right) \right] &= - \frac{\nu}{u_\infty \cdot \delta} \cdot \frac{\partial \left(\frac{u}{u_\infty} \right)}{\partial \left(\frac{y}{\delta} \right)} \Bigg|_{y=0} \\ &= - \frac{\tau_p(x)}{\rho \cdot u_\infty^2} = - \frac{1}{2} \cdot C_f(x) \end{aligned} \quad (54)$$

gdje je koeficijent trenja $C_f(x)$ definiran kao $\tau_p(x)/(\rho \cdot u_\infty^2)$.

Kako bi se riješila jednadžba (54) potrebno je pretpostaviti rješenje u obliku $u/u_\infty = f(y/\delta)$ što proizlazi iz teorema sličnosti [68] [71] [76]. Pretpostavljeno rješenje treba zadovoljiti sljedeće kriterije:

- $u/u_\infty \cong 0$ u $y/\delta = 0$
- $u/u_\infty \cong 1$ u $y/\delta = 1$
- $d(u/u_\infty)/d(y/\delta) \cong 0$ u $y/\delta = 1$

Ako se kao rješenje pretpostavi polinom trećeg stupnja u obliku:

$$\frac{u}{u_\infty} = a + b \cdot \frac{y}{\delta} + c \cdot \left(\frac{y}{\delta} \right)^2 + d \cdot \left(\frac{y}{\delta} \right)^3 \quad (55)$$

tada se, poštivanjem navedenih kriterija, dobivaju konstante a, b, c i d : $a = 0, b = 3/2, c = 0$ i $d = -1/2$. Dobiveno rješenje za u/u_∞ , tj. izraz (55), se uvrštava u izraz (54) čijim se integriranjem (uz uvrštavanje rubnih uvjeta) dobiva približno rješenje za debljinu graničnog sloja koje za slučaj polinoma trećeg stupnja glasi:

$$\frac{\delta}{x} = \frac{4,64}{\sqrt{Re}} \quad (56)$$

što odstupa za samo 5,6% od egzaktnog rješenja.

Potrebno je još naglasiti da funkcija $f(\eta)$ daje sve potrebne parametre koji opisuju tok fluida u graničnom sloju [76,77]. Preko izraza (27) moguće je odrediti koeficijent trenja (lokalni i prosječni).

Za tok fluida u blizini vodećeg ruba ne vrijede jednadžbe kojima se opisuje granični sloj. Izrazi su valjani za $x \geq 5 \cdot \delta$, tj. $Re \geq 600$.

3.3.7 Jednadžba očuvanja energije

U prošlom poglavlju je objašnjeno kako se fluid giba u graničnom sloju. Sada je potrebno proširiti Fourierov zakon za provođenje topline kako bi se omogućilo gibanje fluida.

$$h = \frac{q}{T_p - T_\infty} = - \frac{\lambda_f}{T_p - T_\infty} \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (57)$$

Prije nego se krene u objašnjavanje temperaturnoga graničnog sloja uvode se sljedeće pretpostavke za koje vrijedi matematički model:

- Fluid je nestlačiv. To znači da sve čestice imaju nepromjenjivu gustoću ρ . Ta pretpostavka je razumna za sve fluide koji se kreću brzinama manjim od trećine brzine zvuka ($u_{zvuka}/3 \approx 110 \text{ m/s}$).
- Promjene u tlaku unutar fluida nisu dovoljno velike kako bi utjecale na termodinamička svojstva. Diferencijalna varijacija pritiska dp se zanemaruje u izvodu jednadžbe očuvanja energije, a utjecaj tlaka zraka na gustoću je već ranije zanemaren.
- Temperaturne promjene u fluidu nisu dovoljno velike kako bi promijenile toplinsku provodljivost fluida (λ_f). Utjecaj temperature na gustoću je također zanemaren.
- Promjene u potencijalnoj i kinetičkoj energiji su zanemarive u odnosu na toplinsku energiju. Pošto se kinetička energija fluida mijenja ovisno o gradijentu tlaka, to također dokazuje da promjene u tlaku fluida nisu značajne.
- Viskozna naprezanja u fluidu nisu dovoljno velika kako bi značajno zagrijala fluid.

Jednadžba očuvanja energije za nestlačivi fluid glasi:

$$\rho \cdot c_p \cdot \left(\underbrace{\frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{akumulacija topline}} + \underbrace{\vec{u} \cdot \nabla T}_{\text{transport topline entalpijom}} \right) = \underbrace{\lambda_f \cdot \nabla^2 \cdot T}_{\text{vođenje topline}} + \underbrace{\dot{q}}_{\text{generirana topline u elementu}} \quad (58)$$

Izraz (58) sadrži član koji se odnosi na transport topline entalpijom zbog različitih brzina kojima se kreću čestice fluida.

Iz gornjeg izraza se dobiva jednadžba očuvanja energije u graničnome sloju koja glasi:

$$u \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (59)$$

Ako se jednadžba (59) napiše u bezdimenzionalnom obliku uvođenjem bezdimenzionalne temperature $\Theta = (T - T_p)/(T_\infty - T_p)$ dobiva se izraz:

$$u \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial y} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} \quad (60)$$

sa sljedećim rubnim uvjetima:

- $\Theta(y = 0) = 0$
- $\Theta(y = \infty) = 1$
- $\left. \frac{\partial \Theta}{\partial y} \right|_{y=\infty} = 0$

Iz izraza (60) može se uočiti analogija s izrazom (40). Iznimka je u koeficijentu ispred druge derivacije. Izraz (40) sadrži kinematičku viskoznost ν dok izraz (60) sadrži toplinsku difuzivnost α .

3.3.8 Lokalni koeficijent plošnog prijelaza topline za laminarni nestlačivi tok preko ravne površine

U ovom poglavlju će se detaljnije objasniti veza između hidrodinamičkog i temperaturnoga graničnog sloja. Sada se može sa sigurnošću reći da je koeficijent plošnog prijelaza topline h funkcija više varijabli:

$$h = f(\lambda_f, x, \rho, c_p, \mu, u_\infty) \quad (61)$$

U gornjem izrazu može se vidjeti da koeficijent h kod prisilne konvekcije nije funkcija razlike temperature $(T_p - T_\infty)$, tj. $h \neq f(\Delta T)$!

3.3.8.1 Debljina graničnoga sloja kao funkcija Prandtlovog broja

Razlikuju se tri slučaja odnosa δ i δ_t s Prandtlovim brojem:

- ako je $Pr = 1$ tada je $\delta = \delta_t$
- ako je $Pr > 1$ tada je $\delta > \delta_t$
- ako je $Pr < 1$ tada je $\delta < \delta_t$.

Što je istinito pošto velika viskoznost daje relativno debeli hidrodinamički granični sloj, a visoka toplinska difuzivnost daje debeli temperaturni granični sloj.

Pošto se jednadžbe (40) i (60) razlikuju samo u parametrima v i α , tada je za očekivati da će odnos hidrodinamičkog i temperaturnoga sloja ovisiti samo o tim parametrima. U nastavku će biti pokazano da je taj odnos funkcija samo Prandtlovog broja:

$$\frac{\delta}{\delta_t} = f\left(Pr = \frac{v}{\alpha}\right) \quad (62)$$

Omjer debljina hidrodinamičkog i temperaturnoga sloja definira se kao monotono rastuća funkcija Φ koja će u konačnici biti isključivo funkcija Prandtlovog broja. Egzaktno rješenje za debljinu temperaturnoga graničnog sloja neće se prikazivati već će se samo pokazati postupak integralne metode.

3.3.8.2 Integralna metoda za rješavanje jednadžbe očuvanja energije

Način rješavanja jednadžbe očuvanja energije integralnom metodom je isti kao kod jednadžbe očuvanja količine gibanja. Izraz (60) u integralnom obliku glasi:

$$\int_0^{\delta_t} u \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial x} dy + \int_0^{\delta_t} v \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial y} dy = \alpha \cdot \int_0^{\delta_t} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} dy \quad (63)$$

Korištenjem pravila $x \cdot dy = d(x \cdot y) - y \cdot dx$ i integriranjem desne strane izraz (63) se može zapisati kao:

$$\int_0^{\delta_t} \frac{\partial(u \cdot T)}{\partial x} dy - \int_0^{\delta_t} T \cdot \frac{\partial u}{\partial x} dy + \int_0^{\delta_t} \frac{\partial(v \cdot T)}{\partial y} dy - \int_0^{\delta_t} T \cdot \frac{\partial v}{\partial y} dy = \alpha \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_0^{\delta_t} \quad (64)$$

Ili

$$\int_0^{\delta_t} \frac{\partial(u \cdot T)}{\partial x} dy - \underbrace{v \cdot T \Big|_0^{\delta_t}}_{=T_\infty \cdot v \Big|_{y=\delta_t} - 0} - \int_0^{\delta_t} \underbrace{\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)}_{=0, \text{ izraz (37)}} dy = \alpha \cdot \left(\underbrace{\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\delta_t}}_{=0} - \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_0 \right) \quad (65)$$

Za $y = \delta_t$, uvrštavanjem jednadžbe kontinuiteta preko izraza (52) za temperaturni sloj, jednadžba (65) postaje:

$$\frac{d}{dx} \int_0^{\delta_t} [u \cdot (T - T_\infty)] dy = \frac{1}{\rho \cdot c_p} \cdot \left(-\lambda_f \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_0 \right) = \frac{q_c}{\rho \cdot c_p} \quad (66)$$

Izraz (66) predstavlja integralni oblik zakona očuvanja energije. Pokazuje da je brzina kojom se toplinska energija prenosi preko graničnog sloja jednaka gustoći toplinskog toka na površini elementa.

Pretpostavke kojima će se predvidjeti rješenje jednadžbe (66) su sljedeće:

- poznata je temperatura na površini elemente, te temperature zraka (unutarnja i vanjska)
- raspodjela temperature je glatka funkcija pošto ima asimptotu u beskonačnosti (T_∞), a prolazi kroz točke $y = 0$ i $y = \delta_t$. U jednadžbi je taj uvjet zadovoljen i u točki ($\partial T / \partial x|_{y=\delta_t} = 0$).
- zadnji uvjet se dobiva iz jednadžbe (60) za $y = 0$ (površina elementa) pošto je na njoj vektor brzine strujanja fluida, \vec{u} , jednak nula, tj. $u = v = 0$. Iz toga proizlazi da je $\partial^2 T / \partial y^2|_{y=0} = 0$.

Iz gornjih pretpostavki, uzimajući u obzir bezdimenzionalnu temperaturu $\Theta = (T - T_\infty) / (T_p - T_\infty)$ umjesto temperature T , proizlaze sljedeći uvjeti:

- $\frac{T - T_\infty}{T_p - T_\infty} = 1$ za $y / \delta_t = 0$
- $\frac{T - T_\infty}{T_p - T_\infty} = 0$ za $y / \delta_t = 1$
- $\frac{\partial[(T - T_\infty) / (T_p - T_\infty)]}{\partial(y / \delta_t)} = 0$ za $y / \delta_t = 1$
- $\frac{\partial^2[(T - T_\infty) / (T_p - T_\infty)]}{\partial(y / \delta_t)^2} = 0$ za $y / \delta_t = 0$

Ti uvjeti pružaju dovoljno informacija za aproksimiranje rješenja u obliku kubne parabole:

$$\frac{T - T_\infty}{T_p - T_\infty} = a + b \cdot \frac{y}{\delta_t} + c \cdot \left(\frac{y}{\delta_t}\right)^2 + d \cdot \left(\frac{y}{\delta_t}\right)^3 \quad (67)$$

Uvrštavanjem gornjih uvjeta u izraz (67) dobivaju se konstante a, b, c i d : $a = 1, b = -3/2, c = 0$ i $d = 1/2$.

Kako bi se odredila debljina temperaturnoga graničnog sloja potrebno je u izraz (66) uvrstiti bezdimenzionalne parametre dobivene rješavanjem zakona očuvanja količine gibanja i jednadžbe očuvanja energije, tj. izraze (55) i (67) s pripadnim koeficijentima a, b, c i d . Prije toga je potrebno izraz (66) zapisati u obliku:

$$u_\infty \cdot (T_p - T_\infty) \cdot \frac{d}{dx} \left[\delta_t \cdot \int_0^1 \left[\frac{u}{u_\infty} \cdot \left(\frac{T - T_\infty}{T_p - T_\infty}\right) \right] d\left(\frac{y}{\delta_t}\right) \right] = -\alpha \cdot \frac{(T_p - T_\infty)}{\delta_t} \cdot \frac{d\left(\frac{T - T_\infty}{T_p - T_\infty}\right)}{d(y/\delta_t)} \quad (68)$$

Gornja jednađba vrijedi samo ako je $\delta_t < \delta$. U slučaju da je $\delta_t > \delta$ omjer u/u_∞ u jednađbi (55) je veći od nule pa ne vrijede uvjeti postavljeni za rješavanje jednađbe očuvanja energije. Uvođenjem parametara $\Phi \equiv \delta_t/\delta$ i $\eta \equiv y/\delta_t$, te uvrštavanjem izraza (55) i (67) u jednađbu (68) dobiva se:

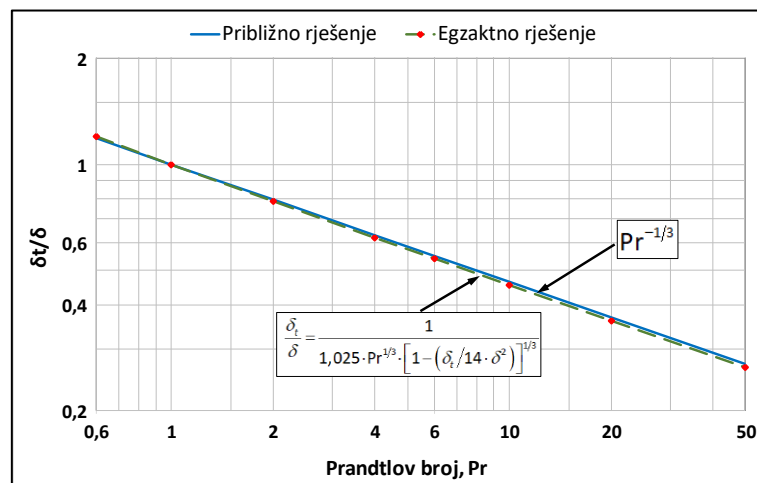
$$2 \cdot \frac{d\delta_t}{dx} = \frac{d\delta_t^2}{dx} = \frac{3 \cdot \alpha/u_\infty}{\left(\frac{3}{20} \cdot \Phi - \frac{3}{280} \cdot \Phi^3\right)} \quad (69)$$

Integriranjem gornje jednađbe po x uz uvjet da je $\delta_t(x=0) = 0$, te dijeljenjem s δ , dobiva se:

$$\frac{\delta_t}{\delta} \equiv \Phi = 0,9638/\sqrt{Pr \cdot \Phi \cdot (1 - \Phi^2/14)} \quad (70)$$

Zamjenom Φ s δ_t/δ , te razmještanjem izraza (70) dobiva se:

$$\frac{\delta_t}{\delta} = \frac{1}{1,025 \cdot Pr^{1/3} \cdot \left[1 - \left(\frac{\delta_t}{14 \cdot \delta^2}\right)\right]^{1/3}} \approx \frac{1}{1,025 \cdot Pr^{1/3}} \approx Pr^{-1/3} \quad (71)$$



Slika 21: Odnos točnog i približnog rješenja δ_t/δ i Prandtlovog broja (nacrtno pomoću podataka iz [77])

Slika 21 prikazuje odnos rješenja dobivenog integralnom metodom i egzaktnog rješenja. Točnost aproksimiranog rješenja iznosi 2,5% u rasponu Prandtlovog broja od 0,6 do 50:

$$\frac{\delta_t}{\delta} = Pr^{-\frac{1}{3}} \quad 0,6 \leq Pr \leq 50 \quad (72)$$

Razlog ograničavanju Prandtlvog broja proizlazi iz činjenice da je najmanja vrijednost Pr za plinove 0,67, a iduća manja vrijednost spada u raspon od 10^{-2} za tekuće metale. Za prosječnu vrijednost Prandtlvog broja od 0,7 za zrak pri atmosferskom tlaku omjer debljina graničnih slojeva δ_t/δ iznosi 1,126 što je protivno pretpostavci da je $\delta_t < \delta$, ali se u praksi pokazalo dovoljno točnim za tekućine i plinove, te neprihvatljivim za tekuće metale [76]. Kod laminarnog strujanja zraka po ravnoj površini izraz (72) je i više nego prihvatljiv pošto vrijednost Prandtlvog broja najčešće ne prelazi iznos od 1,0 (Tablica 3).

Tablica 3: Termofizička svojstva zraka pri atmosferskom tlaku [78] [79]

T [K]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kg·K]	μ [kg/(m·s)]	ν [m ² /s]	λ_f [W/(m·K)]	α [m ² /s]	Pr
250	1,4120	1006	1,606	1,137	0,02241	1,578	0,721
260	1,3580	1006	1,649	1,214	0,02329	1,705	0,712
270	1,3080	1006	1,699	1,299	0,02400	1,824	0,712
280	1,2610	1006	1,747	1,385	0,02473	1,879	0,711
290	1,2170	1006	1,795	1,475	0,02544	2,078	0,710
300	1,1770	1007	1,857	1,578	0,02623	2,213	0,713
310	1,1390	1007	1,889	1,659	0,02684	2,340	0,709
320	1,1030	1008	1,935	1,754	0,02753	2,476	0,708
330	1,0700	1008	1,981	1,851	0,02821	2,616	0,708
340	1,0380	1009	2,025	1,951	0,02888	2,821	0,707
350	1,0080	1009	2,090	2,073	0,02984	2,931	0,707
400	0,8821	1014	2,310	2,619	0,03328	3,721	0,704

Preostaje još odrediti gustoću toplinskog toka koristeći Fourierov zakon, te iz nje koeficijent prijelaza topline strujanjem h :

$$q_c = -\lambda_f \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = -\lambda_f \cdot \frac{T_p - T_\infty}{\delta_t} \cdot \frac{\partial \left(\frac{T - T_\infty}{T_p - T_\infty} \right)}{\partial \left(\frac{y}{\delta_t} \right)} \Big|_{\frac{y}{\delta_t}=0} \quad (73)$$

Uvrštavanjem izraza (67) u izraz (73), dijeljenjem s ΔT dobiva se izraz za h_c :

$$h_c \equiv \frac{q_c}{\Delta T} = \frac{3 \cdot \lambda_f}{2 \cdot \delta_t} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\lambda_f}{\delta} \cdot \frac{\delta}{\delta_t} \quad (74)$$

Ako je poznat koeficijent h_c tada se Nusseltov broj određuje preko izraza (13) za $L = x$:

$$Nu = \frac{h_c \cdot x}{\lambda_f} = 0,3314 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad 0,6 \leq Pr \leq 50 \quad (75)$$

iz čega slijedi izraz za koeficijent h_c u općenitome obliku:

$$h_c = 0,3314 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\lambda_f}{x} \right) \quad 0,6 \leq Pr \leq 50 \quad (76)$$

3.3.8.3 Prosječni koeficijent prijelaza topline

Koeficijent prijelaza topline strujanjem, h_c , je omjer dvije veličine: gustoće toplinskog toka i razlike temperature ΔT , a obje veličine su funkcija koordinate x . Jednadžba (76) se može koristiti za određivanje gustoće toplinskog toka preko izraza (11) u slučaju kada je razlika temperature

$\Delta T \equiv [T_p - T_\infty]$ konstanta vrijednost po cijeloj površini. Prosječni koeficijent prijelaza topline određuje se na sljedeći način:

$$\bar{h}_c = \frac{\bar{q}_c}{\Delta T} = \frac{1}{\Delta T} \cdot \left[\frac{1}{L} \cdot \int_0^L q_c dx \right] = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L h(x) dx \quad (77)$$

Uvrštavanjem izraza (76) u izraz (77), te uvrštavanjem Reynoldsovog broja, tj. izraza (15) uz $L = x$, dobiva se izraz za prosječni koeficijent prijelaza topline:

$$\bar{h}_c = 0,6628 \cdot Re_L^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\lambda_f}{L} \right) \quad (78)$$

Iz čega se vidi da je $\bar{h}_c = 2 \cdot h(x = L)$ kod laminarnog strujanja fluida uz ravnu površinu.

3.4 Jednadžba provođenja topline (JPT)

U ovom poglavlju će se prikazati matematička formulacija prijenosa topline. Tri su osnovna načina prijenosa topline: kondukcijom ili provođenjem, konvekcijom ili strujanjem te radijacijom ili zračenjem. Prijenosi topline strujanjem i zračenjem su prikazani u poglavljima 3.3 i 3.5.3. U nastavku će se prikazati provođenje topline. Provođenje topline je proces prijenosa topline između čestica unutar tijela. Kako bi uopće došlo do provođenja topline unutar tijela mora postojati temperaturni gradijent, tj. toplija i hladnija mjesta u samom tijelu. Analogija električnog i strujnog kruga je opće poznata pa prema tome za provođenje topline vrijedi Kirchhoffov prvi zakon za istosmjerne strujne krugove [80]:

- Zakon za struje – I. Kirchhoffov zakon za struju (KZS): Algebarski zbroj struja u svakom čvorištu strujnog kruga mora biti nula, tj. ako struju zamijenimo s toplinskim tokom tada KZS kaže da je suma svih toplinskih tokova u svakoj zamišljenoj točki unutar elementa jednaka nula.

Tablica 4: Analogija provođenja topline i električnog strujnog kruga

Električni strujni krug		Toplinski krug	
Veličina	Oznaka	Veličina	Oznaka
Napon	U	Temperatura	T
Električna struja	I	Toplinski tok	Q
Električna vodljivost	G	Toplinska provodljivost	λ
Električni otpor	R	Toplinski otpor	R
Električni kapacitet	C	Toplinski kapacitet	c
Električni izvor	V	Izvor topline	S

U dodiru dva tijela (ili dvije čestice) tijela će izmijeniti određenu količinu topline, tj. toplinske energije. Količina izmijenjene topline ovisi o masi m, specifičnom toplinskom kapacitetu c i temperaturi tijela T pojedinog tijela:

$$Q = m \cdot c \cdot T \quad (79)$$

Specifični toplinski kapacitet predstavlja količinu toplinske energije u džulima (J) potrebne za zagrijavanje jedinične mase (1 kg) tijela za 1K pa je njegova jedinica J/(kg K).

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \lambda_x \cdot \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \lambda_y \cdot \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \lambda_z \cdot \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \quad (80)$$

Ukupnu količinu energije koja prođe kroz materijal (površinu) u jediničnom vremenu nazivamo toplinskim tokom. Snaga toplinskog toka se označava sa P i izražava se u vatima (W). Ako se toplinski tok podijeli s površinom materijala tada se ta veličina naziva gustoćom toplinskog toka. Gustoća toplinskog toka označava se s q i izražava se u vatima po kvadratnome metru (W/m²).

$$q = \frac{P/t}{A} \quad (81)$$

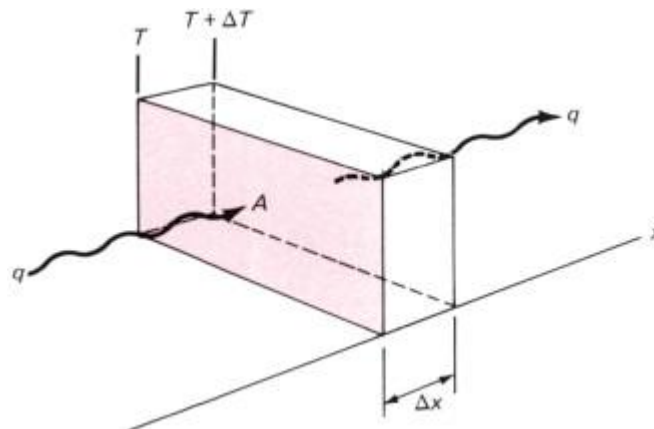
Gdje je A površina (m²), a t vrijeme (s).

Francuski matematičar Joseph Fourier je u 19. stoljeću ustanovio da je brzina prenesene topline proporcionalna negativnom gradijentu temperature te površini pod pravim kutom na taj gradijent.

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (82)$$

Gdje je λ toplinska provodljivost materijala u vatima po metru kelvinu [W/(m K)] i predstavlja toplinsku energiju u džulima (J) koja prođe kroz materijal jedinične duljine (1 m) u jedinici vremena (1 s) pri razlici temperature od 1 Kelvina (K).

Negativan predznak u izrazu (82) uzima u obzir činjenicu da toplina uvijek prelazi iz mjesta više temperature na mjesto niže temperature. Ako se pretpostavi da je pozitivan smjer toplinskog toka pozitivan smjer x-osi tada se razlika temperature mora sniziti kako bi se toplinski tok povisio pa je ΔT negativan.



Slika 22: Fourierov zakon [80]

Nadalje, kada je riječ o provođenju topline, tada je potrebno kvantificirati dovedenu, tj. odvedenu, toplinu i temperaturu tijela. Prvi zakon termodinamike glasi:

- Energija zatvorenog sustava ne može nestati niti ni iz čega nastati, energija može samo prelaziti iz jednog oblika u drugi, i ona je konstantna.

Ako sustav ne vrši nikakav rad, tada je dovedena toplina utrošena samo na promjenu unutarnje energije sustava:

$$\Delta U = Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (83)$$

Gdje je ΔU promjena unutarnje energije sustava u džulima (J), ΔT promjena temperature između dva stanja sustava (K).

3.4.1 Početni uvjeti

Početni uvjeti se odnose na stanje sustava u trenutku početka promatranja. U slučaju jednadžbe provođenja topline to su iznosi temperature u svim točkama elementa. Oni mogu biti konstantni ili funkcija položaja – $f(x, y, z)$. Ako se sustav promatra dovoljno dugo tada u vremenu $t_n \gg t_0$ rješenja diferencijalne jednadžbe ne ovisi o početnim uvjetima [81].

3.4.2 Rubni uvjeti

3.4.2.1 Dirichletovi rubni uvjeti

Dirichletovim rubnim uvjetima se smatraju uvjeti na rubovima elementa koji daju iznos promatrane funkcije – u slučaju provođenja topline to su temperature na rubovima.

$$T(0, t) = T_{ext}(t), T(l, t) = T_{int}(t) \quad (84)$$

3.4.2.2 Neumannovi rubni uvjeti

Neumannovim rubnim uvjetima se smatraju uvjeti na rubovima elementa koji daju promjenu promatrane funkcije. Matematički gledano to je prostorna derivacija promatrane funkcije. U slučaju provođenja topline to je derivacija funkcije temperature, tj. gustoća toplinskog toka.

$$\frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = q_{ext}(t), \frac{\partial T(l, t)}{\partial x} = q_{int}(t) \quad (85)$$

3.4.2.3 Robinovi rubni uvjeti

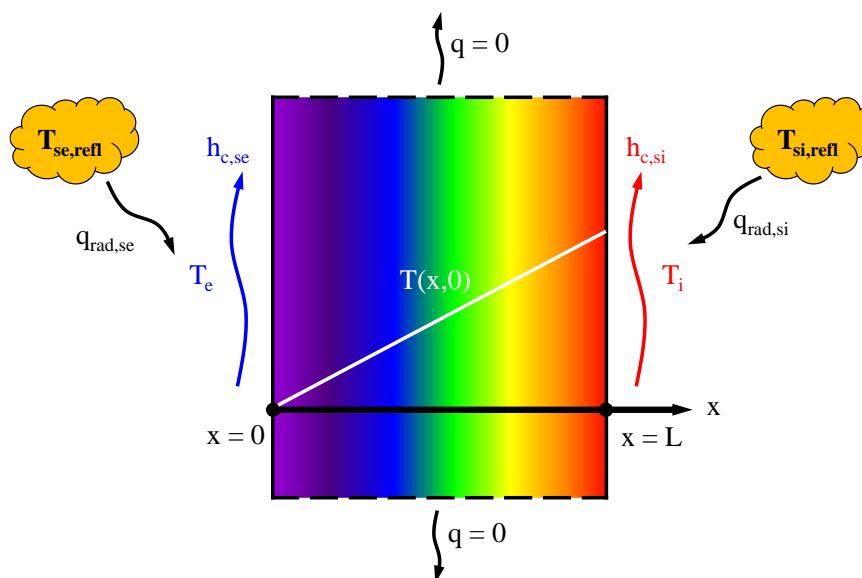
Robinovi rubni uvjeti su kombinacija Dirichletovih i Neumannovih rubnih uvjeta. U slučaju jednadžbe provođenja topline Robinovi rubni uvjeti su korisni u slučaju kada postoji izmjena toplinskog toka s okolinom (strujanjem i zračenjem).

$$\begin{aligned} -\lambda_x \cdot \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} &= h(t) \cdot [T_{ext}(t) - T(0, t)], \\ -\lambda_x \cdot \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=l} &= h(t) \cdot [T_{int}(t) - T(l, t)] \end{aligned} \quad (86)$$

3.4.3 Matematička formulacija jednadžbe provođenja topline

U ovom poglavlju će se prikazati izvod jednadžbe provođenja topline za jednodimenzionalan slučaj. 1D element će se pretpostaviti homogenim, tj. gustoća ρ , toplinski kapacitet c_p , toplinska provodljivost λ_x i površina elementa A će se pretpostaviti konstantnima po cijeloj duljini elementa L . U slučaju 1D provođenja topline bitna je samo jedna dimenzija – u ovom slučaju

to će biti dimenzija u smjeru osi x . Ostale dvije dimenzije će se pretpostaviti beskonačnima. Jednaka pretpostavka je i da je element po svom obodu apsolutni izoliran – nema izmjene topline s okolinom po obodu (Slika 23).

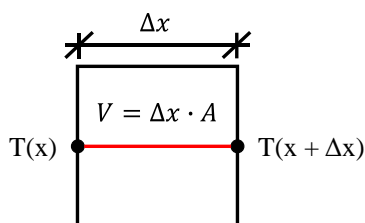


Slika 23: 1D provođenje topline

Ako iz elementa duljine L izdvojimo infinitezimalno mali element duljine Δx (Slika 24), tada se može pretpostaviti da je raspodjela temperature kroz duljinu Δx konstantna, tj. da je promjena unutarnje energije iz izraza (83) jednaka:

$$\Delta U = Q = \rho \cdot \Delta x \cdot A \cdot c \cdot T(x, t) \quad (87)$$

Gdje je masa elementa jednaka umnošku gustoće i volumena infinitezimalno malog elementa Δx , tj. $m = \rho \cdot \Delta x \cdot A$.



Slika 24: Infinitezimalno mali uzorak Δx

Kao što je već rečeno, ako sustav ne vrši nikakav rad, tada je razlika topline dovedene u sustav jednaka promjeni unutarnje energije sustava. Toplina koja se dovede u sustav u periodu Δt jednaka je:

$$Q_{t+\Delta t} - Q_t = \rho \cdot \Delta x \cdot A \cdot c_p \cdot [T(x, t + \Delta t) - T(x, t)] \quad (88)$$

Dok je promjena unutarnje energije primjenom izraza (81) jednaka:

$$Q_{x+\Delta x} - Q_x = \Delta t \cdot A \cdot (q_{x+\Delta x} - q_x) \quad (89)$$

Nadalje, primjenom Fourierovog zakona (82) izraz dobiva se:

$$Q_{x+\Delta x} - Q_x = -\lambda \cdot \Delta t \cdot A \cdot \left(\frac{dT(x + \Delta x, t) - dT(x, t)}{dx} \right) \quad (90)$$

Izjednačavanjem izraza (88) i (90) te računanjem limesa za $\Delta t \rightarrow 0$ i $\Delta x \rightarrow 0$ dobiva se JPT u diferencijalom obliku:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \quad (91)$$

Ili preko gustoće toplinskog toka:

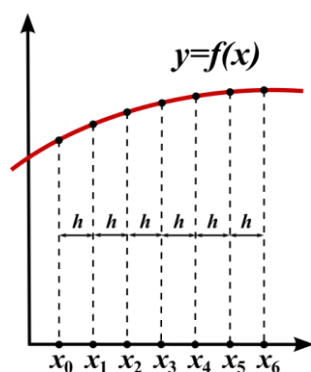
$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} \quad (92)$$

3.4.4 Numeričko rješenje JPT višeslojnih elemenata vanjske ovojnice zgrade

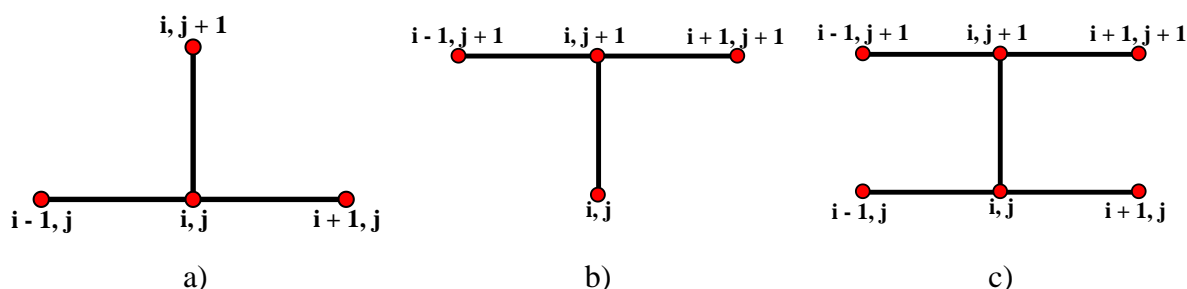
U slučaju kada je riječ o provođenju topline kroz element sačinjen od jednog materijala, tada JPT ima analitičko rješenje. Međutim, pošto je u ovom radu riječ o elementima vanjske ovojnice zgrade koji su u većini slučajeva višeslojni, rješenje JPT će se prikazati korištenjem numeričkih metoda pošto u slučaju višeslojnih elemenata analitičko rješenje ne postoji.

Numerička metoda korištena za aproksimiranje JPT je metoda konačnih razlika (MKR). MKR su klasa numeričkih metoda korištenih za aproksimiranje diferencijalnih jednadžbi korištenjem elemenata konačnih dimenzija. Područje na kojem se primjenjuje MKR naziva se domenom ili intervalom. MKR je moguće koristiti za aproksimaciju i prostorne i vremenske domene. Domena se diskretizira na konačan broj manjih koraka, a vrijednost rješenja za te korake se aproksimira rješavanjem sustava linearnih jednadžbi koje sadrže vrijednosti u okolnim točkama.

MKR transformiraju obične diferencijalne jednadžbe (ODJ) ili parcijalne diferencijalne jednadžbe (PDJ) u sustav linearnih jednadžbi.



Slika 25: Aproximacija funkcije korištenjem MKR



Slika 26: Sheme aproksimacije derivacija – a) eksplicitna shema, b) implicitna shema i c) Crank-Nicolson shema

Tri su najčešće korištene sheme aproksimacije derivacija:

- 1) Eksplicitna shema kod koje se vrijednost funkcije za čvor „i“ vremenu „j + 1“ aproksimira preko vrijednosti funkcije u čvorovima „i – 1“, „i“ te „i + 1“ u vremenu „j“ (Slika 26a).
- 2) Implicitna shema kod koje se vrijednost funkcije za čvor „i“ u vremenu „j + 1“ aproksimira preko nepoznatih vrijednosti u čvorovima „i – 1“ te „i + 1“ u vremenu „j + 1“ te poznate vrijednosti u čvoru „i“ u prošlom vremenu „j“ (Slika 26b).
- 3) Crank-Nicolson shema kod koje se vrijednost funkcije za čvor „i“ u vremenu „j + 1“ aproksimira preko susjednih čvorova „i – 1“ te „i + 1“ u vremenu „j + 1“ te vrijednosti funkcije u čvorovima „i – 1“, „i“ te „i + 1“ u vremenu „j“ (Slika 26c).

U nastavku će se prikazati implicitna shema pošto je ona korištena u ovom radu.

3.4.4.1 Aproximacija derivacije preko MKR

Osnovne pretpostavke korištenja metode MKR su da je funkcija neprekidna te da su njena prva i druga derivacija također neprekidne. Rješenje JPT zadovoljava sva tri navedena kriterija. Razvijanjem funkcije u Taylorov red oko točke t_0 dobiva se aproksimacija funkcije $T(x, t)$:

$$T(x, t_0 + \Delta t) = T(x, t_0) + \frac{\Delta t}{1!} \frac{\partial T(x, t_0)}{\partial t} + \dots + \frac{\Delta t^n}{n!} \frac{\partial^n T(x, t_0)}{\partial t^n} + O_n(x, t) \quad (93)$$

Ako se iz Taylorovog polinoma izdvoje samo prva dva člana i zanemare svi viši članovi dobiva se linearna aproksimacija derivacije oko točke (x, t_0) .

$$\frac{\partial T(x, t_0)}{\partial t} = \frac{T(x, t_0 + \Delta t) - T(x, t_0)}{\Delta t} \quad (94)$$

Isti postupak vrijedi i za prostornu derivaciju toplinskog toka:

$$\frac{\partial q(x_0, t)}{\partial x} = \frac{q(x_0 + \Delta x, t) - q(x_0, t)}{\Delta x} \quad (95)$$

Izrazi (94) i (95) vrijede za svaku točku mreže konačnih razlika. U slučaju aproksimacije konačnih razlika pomoću točaka u sredini svakog elementa mreže korištenjem izraza (94) i (95) aproksimacija JPT u implicitnom zapisu glasi:

$$-\lambda_{i-1} \cdot \frac{(T_i^{j+1} - T_{i-1}^{j+1})}{\Delta x_{i-1}} - \lambda_i \cdot \frac{(T_i^{j+1} - T_{i+1}^{j+1})}{\Delta x_i} = \rho_V \cdot \frac{(T_i^{j+1} - T_i^j)}{\Delta t} \quad (96)$$

Gdje je:

$$\rho_V = \frac{c_{p,i-1} \cdot \Delta x_{i-1} \cdot \rho_{i-1} + c_{p,i} \cdot \Delta x_i \cdot \rho_i}{2} \quad (97)$$

Izraz (96) može se zapisati i na sljedeći način:

$$-\frac{\lambda_{i-1}}{\Delta x_{i-1}} \cdot T_{i-1}^{j+1} + \left(\frac{\lambda_{i-1}}{\Delta x_{i-1}} + \frac{\lambda_i}{\Delta x_i} + \frac{\rho_V}{\Delta t} \right) \cdot T_i^{j+1} - \frac{\lambda_i}{\Delta x_i} \cdot T_{i+1}^{j+1} = \frac{\rho_V}{\Delta t} \cdot T_i^j \quad (98)$$

$$m_1 = \frac{\lambda_{i-1}}{\Delta x_{i-1}}, m_2 = \left(\frac{\lambda_{i-1}}{\Delta x_{i-1}} + \frac{\lambda_i}{\Delta x_i} + \frac{\rho_V}{\Delta t} \right), m_3 = \frac{\lambda_i}{\Delta x_i} \quad (99)$$

Za lijevi rubni uvjet (prema vanjskom okolišu):

$$\begin{aligned} h_{c,ext}^{j+1} \cdot (T_{ext}^{j+1} - T_1^{j+1}) + h_{r,ext}^{j+1} \cdot [T_{refl,ext}^{j+1} - T_1^{j+1}] - \lambda_1 \cdot \frac{(T_1^{j+1} - T_2^{j+1})}{\Delta x_1} \\ = \frac{\rho_1 \cdot c_{p,1} \cdot \Delta x_1}{2} \cdot \frac{(T_1^{j+1} - T_1^j)}{\Delta t} \end{aligned} \quad (100)$$

Ili u implicitnom zapisu:

$$\begin{aligned} \left(h_{c,ext}^{j+1} + h_{r,ext}^{j+1} + \frac{\lambda_1}{\Delta x_1} + \frac{c_{p,1} \cdot \Delta x_1 \cdot \rho_1}{2 \cdot \Delta t} \right) \cdot T_1^{j+1} - \frac{\lambda_1}{\Delta x_1} \cdot T_2^{j+1} \\ = h_{c,ext}^{j+1} \cdot T_{ext}^{j+1} + h_{r,ext}^{j+1} \cdot T_{refl,ext}^{j+1} + \frac{c_{p,1} \cdot \Delta x_1 \cdot \rho_1}{2 \cdot \Delta t} \cdot T_1^j \end{aligned} \quad (101)$$

$$l_1 = \left(h_{c,ext}^{j+1} + h_{r,ext}^{j+1} + \frac{\lambda_1}{\Delta x_1} + \frac{c_{p,1} \cdot \Delta x_1 \cdot \rho_1}{2 \cdot \Delta t} \right), l_2 = -\frac{\lambda_1}{\Delta x_1} \quad (102)$$

Za desni rubni uvjet (prema unutarnjem okolišu):

$$\begin{aligned} h_{c,int}^{j+1} \cdot (T_{int}^{j+1} - T_n^{j+1}) + h_{r,int}^{j+1} \cdot [T_{refl,int}^{j+1} - T_n^{j+1}] - \lambda_{n-1} \cdot \frac{(T_n^{j+1} - T_{n-1}^{j+1})}{\Delta x_{n-1}} \\ = \frac{\rho_{n-1} \cdot c_{p,n-1} \cdot \Delta x_{n-1}}{2} \cdot \frac{(T_n^{j+1} - T_n^j)}{\Delta t} \end{aligned} \quad (103)$$

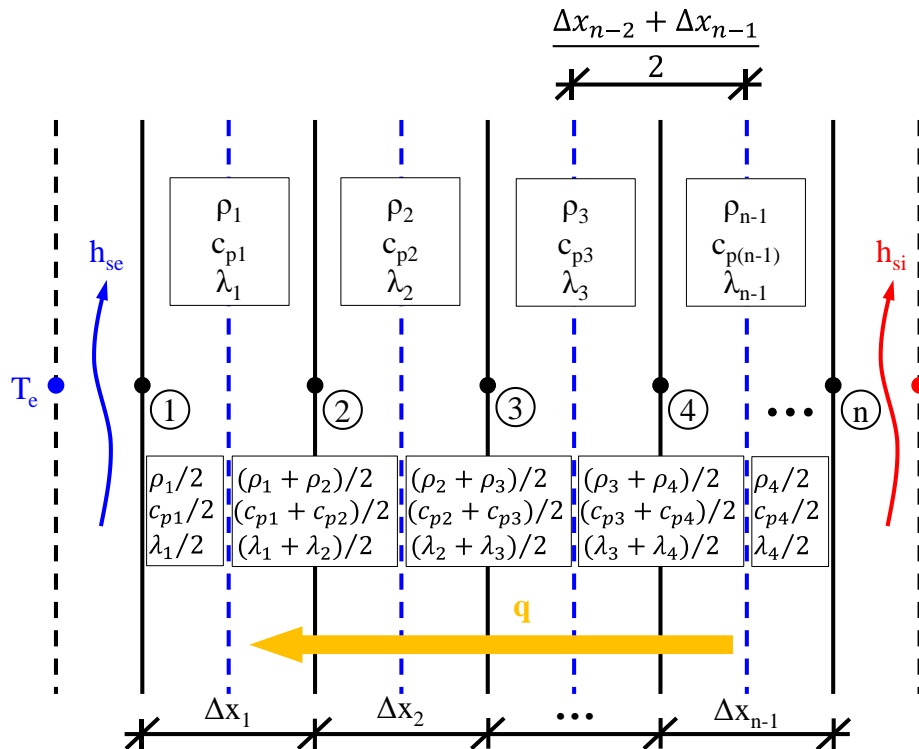
Ili u implicitnom zapisu:

$$\begin{aligned} -\frac{\lambda_{n-1}}{\Delta x_{n-1}} \cdot T_{n-1}^{j+1} + \left(h_{c,int}^{j+1} + h_{r,int}^{j+1} + \frac{\lambda_{n-1}}{\Delta x_{n-1}} + \frac{c_{p,n-1} \cdot \Delta x_{n-1} \cdot \rho_{n-1}}{2 \cdot \Delta t} \right) \cdot T_n^{j+1} \\ = h_{c,int}^{j+1} \cdot T_{int}^{j+1} + h_{r,int}^{j+1} \cdot T_{refl,int}^{j+1} + \frac{c_{p,n-1} \cdot \Delta x_{n-1} \cdot \rho_{n-1}}{2 \cdot \Delta t} \cdot T_n^j \end{aligned} \quad (104)$$

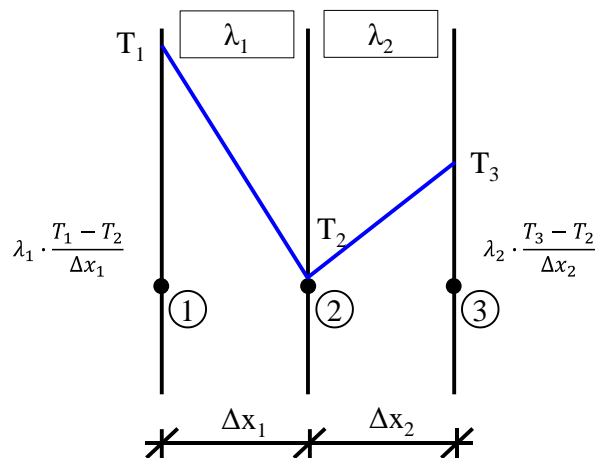
$$r_{n-1} = -\frac{\lambda_{n-1}}{\Delta x_{n-1}}, r_n = h_{c,int}^{j+1} + h_{r,int}^{j+1} + \frac{\lambda_{n-1}}{\Delta x_{n-1}} + \frac{c_{p,n-1} \cdot \Delta x_{n-1} \cdot \rho_{n-1}}{2 \cdot \Delta t} \quad (105)$$

Izrazi (98), (101) i (104) se u matičnom obliku mogu zapisati kao:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} l_1 & l_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_1 & m_2 & m_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & m_2 & m_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_1 & m_2 & m_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_1 & r_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \vdots \\ T_i \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} h_{c,ext}^{j+1} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ h_{c,int}^{j+1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{ext}^{j+1} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ T_{int}^{j+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_{r,ext}^{j+1} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ h_{r,int}^{j+1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{refl,ext}^{j+1} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ T_{refl,int}^{j+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{p,1} \cdot \Delta x_1 \cdot \rho_1 / 2 \cdot \Delta t \\ \rho_V / \Delta t \\ \rho_V / \Delta t \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ c_{p,n-1} \cdot \Delta x_{n-1} \cdot \rho_{n-1} / 2 \cdot \Delta t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1^j \\ T_2^j \\ T_3^j \\ \vdots \\ T_i^j \\ \vdots \\ T_n^j \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (106)$$



Slika 27: MKR za 1D provođenje topline



Slika 28: MKR – aproksimacija prve derivacije

Izraz (106) predstavlja sustav jednadžbi čijim se rješavanjem dobivaju temperature u čvorovima mreže konačnih razlika.

3.4.4.2 1D nestacionarno provođenje topline

Prije rješavanja sustava jednadžbi (106) potrebno je osim navedenih rubnih uvjeta pretpostaviti distribuciju temperature u elementu u trenutku $t = 0$, tj. početni uvjet. Početni uvjeti mogu biti:

- Temperatura u svakoj točki je konstantna ($T_i^0 = const.$).
- Temperatura u svakoj točki je funkcija položaja ($T_i^0 = f(x)$).

- Temperatura u svakoj točki je rješenje JPT za stacionarni slučaj ($T_i^0 = T_i|_{st}$).

Utjecaj početnih uvjeta je zanemariv nakon vremena $t \gg t_0$.

3.4.4.3 1D stacionarno provođenje topline

U slučaju kada su rubni uvjeti takvi da nisu promjenjivi u vremenu, vremenska derivacija u JPT je jednaka 0:

$$\begin{aligned} a) \frac{d^2 T(x)}{dx^2} = 0 &\rightarrow \Delta T(x) = 0 \\ b) \frac{dq(x)}{dx} = 0 &\rightarrow \nabla q(x) = 0 \end{aligned} \quad (107)$$

Pošto je u izrazima (107) riječ o običnim diferencijalnim jednadžbama njihovo rješavanje je jednostavnije nego u slučaju nestacionarnog provođenja topline. U slučaju višeslojnog građevnog elementa, izraz (b) moguće je napisati preko Fourierovog zakona na sljedeći način:

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_{n-1} = -\lambda_1 \cdot \frac{T_1 - T_2}{\Delta x_1} - \lambda_1 \cdot \frac{T_2 - T_3}{\Delta x_2} - \lambda_{n-1} \cdot \frac{T_{n-1} - T_n}{\Delta x_{n-1}} \quad (108)$$

Ako se kao pojam toplinskog otpora uvede $R_i = \Delta x_i / \lambda_i$ tada se izraz (108) može zapisati kao:

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_{n-1} = \frac{(T_2 - T_1)}{R_1} + \frac{(T_3 - T_2)}{R_2} + \dots + \frac{(T_n - T_{n-1})}{R_{n-1}} \quad (109)$$

Ako se duljina cijelog građevnog elementa označi s $d = \sum_{i=1}^{i=n-1} \Delta x_i$ tada je toplinski tok između čvorova $i = 1$ i $i = n$ jednak:

$$q = \frac{(T_{ext} - T_{int})}{R_d} \quad (110)$$

Pošto vrijedi analogija strujnog kruga i provođenja topline, tada se višeslojni građevni element može zamijeniti sa serijskim spojem otpornika za koji vrijedi:

$$R_{uk} = R_1 + R_2 + \dots + R_{n-1} = \sum_{i=1}^{i=n-1} R_i \quad (111)$$

Pa iz tog slijedi da je ukupni otpor višeslojnog građevnog elementa jednak:

$$R_d = \frac{\Delta x_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta x_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\Delta x_{n-1}}{\lambda_{n-1}} \quad (112)$$

Nadalje, ako se korištenjem Newtonovog zakona hlađenja odrede toplinski tokovi koji se prenesu s unutarnjeg zraka na unutarnju površinu te s vanjskog zraka na vanjsku površinu:

$$q_e = \frac{(T_e - T_{se})}{R_{se}} \quad (113)$$

$$q_i = \frac{(T_i - T_{si})}{R_{si}}$$

Tada je ukupni otpor jednak:

$$R_d = R_{se} + \frac{\Delta x_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta x_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\Delta x_{n-1}}{\lambda_{n-1}} + R_{si} \quad (114)$$

Otpori prijelaza topline s vanjske i unutarnje površine (R_{se} i R_{si}) u sebi sadrže utjecaje strujanja i zračenja. Recipročna vrijednost ukupnog otpora R_d se naziva koeficijentom prolaska topline ili U-vrijednost:

$$U = \frac{1}{R_d} \quad (115)$$

3.5 Određivanje gubitaka topline elemenata vanjske ovojnice zgrade in-situ

3.5.1 Koeficijent prolaska topline (U-vrijednost)

U praksi se pomoću U-vrijednosti određuju toplinski gubitci kroz elemente vanjske ovojnice zgrade. Korištenjem U-vrijednosti se pretpostavlja stacionarno provođenje topline kroz elemente. Takav način određivanja toplinskog toka zanemaruje utjecaj akumulacije topline u elementu.

U-vrijednost se u praksi određuje preko norme HRN EN ISO 6946 „Građevni dijelovi i građevni elementi – Toplinski otpor i koeficijent prolaska topline – Metode proračuna“. U toj normi je dan postupak određivanja kao i koeficijenti plošnog prijelaza topline s površine elementa na okolni zrak i obrnuto. Koeficijent otpora prijelaza topline prema toj normi ovise samo o smjeru toplinskog toka te je u njima sadržan utjecaj i strujanja i zračenja (Tablica 5). Koeficijenti površinskog otpora prijelaza topline prema normi HRN EN ISO 6946 su određeni:

- Za unutarnji koeficijent: $\varepsilon = 0,90$ i h_r određen pri temperaturi od 20 °C.
- Za vanjski koeficijent: $\varepsilon = 0,90$ i h_r određen pri temperaturi od 10 °C i brzini vjetra od 4 m/s.

Tablica 5: Površinski otpori prijelaza topline prema normi HRN EN ISO 6946

Površinski otpor prijelaza topline [(m ² K)/W]	Smjer toplinskog toka		
	Prema gore	Horizontalan	Prema dolje
R_{si}	0,10	0,13	0,17
R_{se}	0,04	0,04	0,04

Prošireni postupak određivanja koeficijenata R_{si} i R_{se} je dan u dodatku C norme HRN EN ISO 6946.

$$R_s = \frac{1}{h_c + h_r} \quad (116)$$

Gdje je R_s površinski otpor prijelaza topline u (m² K)/W, a h_c i h_r koeficijenti plošnog prijelaza topline strujanjem i zračenjem u W/(m² K).

Koeficijenti h_c i h_r se određuju kao:

$$\begin{aligned} h_r &= \varepsilon \cdot h_{r0} \\ h_{r0} &= 4 \cdot \sigma \cdot T_{mn}^3 \end{aligned} \quad (117)$$

Gdje je h_{r0} koeficijent plošnog prijelaza topline zračenjem za crno tijelo, a T_{mn} je srednja vrijednost temperature okoliše i površinske temperature promatrane površine. U slučaju korištenja gornjeg izraza T_{mn} je temperatura crnog tijela, a temperaturom okoliša je prividna reflektirana temperatura, tj.:

$$T_{mn} = \frac{T_{si,ct} + T_{refl}}{2} \quad (118)$$

U slučaju strujanja na unutarnjoj površini h_c se određuje kao:

$$h_c = h_{ci} \quad (119)$$

Tablica 5 daje iznose koeficijenta h_{ci} ovisno o smjeru toplinskog toka.

Tablica 6: Iznosi plošnog koeficijenta prijelaza topline strujanja prema normi HRN EN ISO 6946

Površinski otpor prijelaza topline [(m ² K)/W]	Smjer toplinskog toka		
	Prema gore	Horizontalan	Prema dolje
h_{ci}	5,0	2,5	0,7

U slučaju strujanja po vanjskoj površini h_c se određuje kao:

$$\begin{aligned} h_c &= h_{ce} \\ h_{ce} &= 4 + 4 \cdot v \end{aligned} \quad (120)$$

Gdje je v brzina strujanja zraka (vjetra) uz površinu u m/s.

Izraz (116) je samo aproksimacija stvarnog koeficijenta plošnog otpora prijelaza topline koji ne uzima u obzir: geometriju površine, geometriju prostorije, temperaturni gradijent u okolnom zraku ili na površini, prisilno strujanje, itd.

Slični postupci određivanja plošnog otpora prijelaza topline R_s su dani u normama:

- HRN EN ISO 10077: „*Toplinska svojstva prozora, vrata i zaslona – Proračun koeficijenta prolaska topline*“ [82]
- HRN EN ISO 9869: „*Toplinska izolacija – Građevni elementi – Mjerenje toplinskog otpora i prolaska topline in situ – 1. dio: Tokomjerna metoda*“ [83]

Koeficijent prolaska topline (U-vrijednost) se određuje kao recipročna vrijednost ukupnog toplinskog otpora elementa R_{tot} :

$$U = \frac{1}{R_{tot}} \quad (121)$$

Gdje je R_{tot} određen preko izraza (114), a plošni otpori prijelaza topline R_{si} i R_{se} se određuju preko izraza (116).

U slučaju da je višeslojni element nehomogen U-vrijednost se može odrediti i korištenjem numeričkih metoda preko norme HRN EN ISO 10211 [84]: „*Toplinski mostovi u zgradarstvu – Toplinski tokovi i površinske temperature – Detaljni proračuni*“.

Nadalje, u slučaju nepoznavanja slojeva elemenata vanjske ovojnice zgrade, kao što je to slučaj tijekom procesa energetske obnove postojećih zgrada, tada se U-vrijednost može odrediti i in-situ korištenjem standardiziranih metoda – tokomjerna metoda [83] ili korištenjem infracrvene termografije.

3.5.2 Tokomjerna metoda (HFM)

HFM se temelji na mjerenju gustoće toplinskog toka pomoću tokomjera i temperatura unutarnjeg i vanjskog zraka pomoću termočlanaka.

Mjerenje toplinskog toka tokomjerom se zasniva na linearnoj zavisnosti induciranog napona i toplinskog toka koji prođe kroz površinu tokomjera.

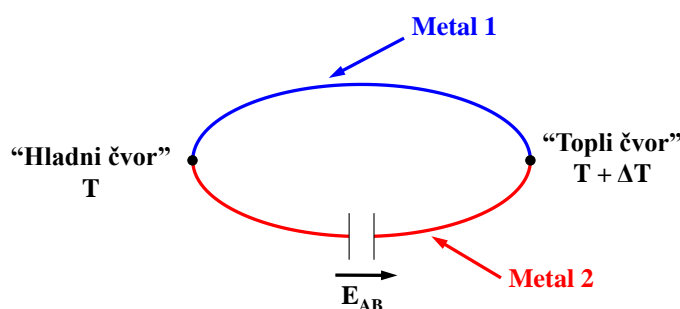
Engleski fizičar James Prescott Joule je proučavanjem različitih oblika energije ustanovio da se mehanička, električna i toplinska energija mogu međusobno pretvarati jedna u drugu. Joule je početkom 1840-ih ustanovio ovisnost električne struje i topline te je po njemu ta ovisnost nazvana Jouleova toplina. Nedugo nakon toga je ustanovio ovisnost mehaničke energije i topline te je na taj način pridonio dokazivanju zakona očuvanja energije. Zbog svog revolucionarnog rada u području termodinamike po njemu je nazvana osnovna mjerna jedinica rada, energije i topline – džul (J).

Jouleovom toplinom se naziva toplina koja nastaje propuštanjem električne struje kroz vodič, a nastaje zbog otpora samog vodiča prolasku električne struje. Joule je ustanovio da je količina toplinske energije Q proporcionalna umnošku električnog otpora vodiča R i kvadratu jakosti struje I . Ta ovisnost je nazvana Jouleovim zakonom:

$$Q = I^2 \cdot R \quad (122)$$

Iz Jouleovog otkrića su proizašla tri termoelektrična efekta.

Prvi termoelektrični efekt otkrio je njemački fizičar Thomas Johann Seebeck 1821. godine. On je opisao pojavu prema kojoj se u strujnom krugu sastavljenom od dva različita vodiča čiji se spojevi nalaze na različitim temperaturama inducira električni napon. To saznanje je omogućilo izravno pretvaranje temperaturne razlike u električnu struju te je doprinijelo otkriću prvog instrumenta za mjerenje temperature, tj. prvog termoelementa.

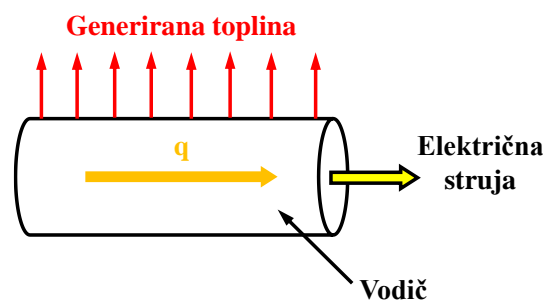


Slika 29: Shema rada termoelementa

Drugi termoelektrični efekt otkrio je 1834. godine francuski fizičar i meteorolog Jean Charles Athanase Peltier. Iako je po zanimanju bio urar, njegov rad se bazirao na istraživanju termoelektriciteta, elektromagnetizma i atmosferskog elektriciteta. Drugi termoelektrični efekt, koji se po njemu zove Peltierov efekt, govori o pojavi apsorpcije, odnosno emisije topline kod

spoja dva različita vodiča u strujnom krugu kojim prolazi električna struja. Apsorpcija, tj. emisija, ovise o smjeru struje, utrošenoj i proizvedenoj toplini (Peltierovom koeficijentu) te o vrsti materijala korištenog za proizvodnju vodiča i temperaturi hladnijeg dijela. U slučaju vodiča Peltierov efekt je zanemariv te do izražaja dolazi kod poluvodiča kod kojih električna vodljivost ovisi o temperaturi poluvodiča. Ako se sagleda obrat Peltierovog efekta, tj. da se grijanjem, odnosno hlađenjem, u strujnom krugu može proizvesti električna energija, tada se dobiva već spomenuti Seebackov efekt.

Posljednji termoelektrični efekt otkrio je lord Kelvin, punim imenom William Thomson, koji je po njemu nazvan Thomsonov efekt. Prema tom efektu se kod vodiča koji na krajevima imaju različite temperature inducira električna struja koja može teći od hladnijeg prema toplijem dijelu vodiča – pozitivan Thomsonov efekt, ili od toplijeg prema hladnijem mjestu – negativni Thomsonov efekt.



Slika 30: Thomsonov efekt

U praksi se gore spomenuti efekti koriste za mjerenje toplinskog toka u specijaliziranim sensorima koji sadrže termoelemente spojene u seriju. Ti senzori se nazivaju tokomjerima te se, između ostalog, koriste i za određivanje U-vrijednosti. U-vrijednost je definirana kao omjer toplinskog toka podijeljenog s površinom i temperaturnom razlikom između dva okoliša koja razdvajaju element kod stacionarnog provođenja topline. U-vrijednost je prema tome moguće odrediti mjerenjem toplinskog toka tokomjerom ili kalorimetrom uz istovremeno mjerenje temperature. Međutim, u praksi je stacionarno provođenje topline teško postići, pogotovo ako je riječ o terenskim mjerenjima. Postoji više metoda kojima se mogu postići kvazi-stacionarni uvjeti okoliša, a to su:

- 1) Korištenjem metode vruće komore u laboratoriju.
- 2) Pretpostavljanjem da je srednja vrijednost za dovoljno dugačko mjerenje jednaka stacionarnoj U-vrijednosti. Ova pretpostavka je valjanja u slučaju:

- a. Kada su materijalne karakteristike nepromjenjive u vremenu za različitu nametnutu razliku u temperaturi.
 - b. Kada je količina akumulirane topline zanemariva u odnosu na toplinski tok koji prođe kroz element. Ova pretpostavka se najčešće koristi u praksi što vodi do dugačkih mjerenja i nenamjernih, ali u nekim slučajevima velikih, grešaka u određenoj U-vrijednosti.
- 3) Korištenjem dinamičkih metoda proračuna koje u obzir uzimaju varijacije toplinskog toka i temperature tijekom mjerenja.

Iako se ovom metodom može odrediti U-vrijednost elemenata vanjske ovojnice zgrade, ona ne može zamijeniti U-vrijednost dobivenu metodom vruće komore u laboratorijskim uvjetima. Međutim, u slučaju kada slojevi elemenata nisu poznati, što je čest slučaj kod energetske obnove, tada terenske metode predstavljaju jedini način određivanja U-vrijednosti.

Odabir lokacije za postavljanje tokomjera:

Prije postavljanja tokomjera i termočlanaka potrebno je metodom ICT provjeriti površinu zbog prisustva toplinskih mostova, pukotina i sličnih uzroka poremećaja 1D toplinskog toka. Površina na koju se postavlja tokomjer se odabire na način da se odabere strana okoliša kod koje su promjene u temperaturi manje izražene što je u najčešćem slučaju unutarnja površina. Tokomjeri ne bi trebali biti postavljeni na mjestu gdje postoji izravan utjecaj zračenja od grijanja te propuha od ventilacije ili hlađenja. Vanjska površina bi trebala biti zaštićena od kiše, snijega, direktnog Sunčevog zračenja. Zaštitu od vanjskih utjecaja je moguće postići ili pokrivanjem vanjske površine ili odabirom elemenata koji se nalaze na određenim stranama svijeta (istok ili sjever) te izbjegavanjem mjerenja kod ekstremnih vremenskih uvjeta što je u praksi i najčešće korištena metoda. Termočlanci bi trebali biti postavljeni što bliže tokomjeru. Unutarnji termočlanak se postavlja neposredno uz tokomjer, a vanjski u ravnini tokomjera na vanjskoj površini kako bi se umanjio utjecaj pogreške mjerenja temperature zbog razlike u visini u odnosu na tokomjer. Termočlanci se postavljaju ili lijepljenjem na površinu, u slučaju određivanja toplinskog otpora elementa, ili na način da mjere temperaturu zraka neposredno uz površinu elementa, u slučaju određivanja U-vrijednosti. Prije samog mjerenja potrebno je:

- 1) Definirati tip elementa (teška ili lagana konstrukcija, unutarnja, vanjska izolacija ili neizoliran element) zbog ograničenosti korištenja HFM metode u slučaju teških elemenata.

- 2) Izmjeriti unutarnju i vanjsku temperaturu zraka (kako bi se utvrdila lokacija postavljanja tokomjera).
- 3) Metodu koja će se koristiti za analizu izmjerenih veličina pošto ona direktno utječe na trajanje mjerenja.

Minimalno trajanje mjerenja je 72 sata (3 dana) ako je temperatura u okolini tokomjera stabilna. U protivnom trajanje mjerenja može biti duže od 7 dana. Završetak mjerenja se određuje analiziranjem izmjerenih veličina tijekom mjerenja uz unaprijed definiran kriterij stabilnosti.

Vrijeme uzorkovanja podataka ovisi o metodi mjerenja: 0,5 do 1 sat za metodu srednje vrijednosti te manje od 0,5 h za dinamičku metodu. Unutar vremena uzorkovanja se očitana veličina definira kao srednja vrijednost više mjerenja.

Metoda srednje vrijednosti

Kod ove metode se pretpostavlja da je U-vrijednost jednaka omjeru srednje vrijednosti gustoće toplinskog toka i srednje vrijednosti razlike temperature između unutarnjeg i vanjskog okoliša.

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})} \quad (123)$$

Kada se U-vrijednost odredi u svakom trenutku iz izmjerenih gustoća toplinskih tokova i temperatura, dobiva se funkcija U-vrijednosti koja se asimptotski približava konačnoj vrijednosti. Tako dobivena U-vrijednost je blizu stvarne U-vrijednosti u slučaju kada:

- Su temperatura i relativna vlažnosti u okolinu tokomjera približno jednake na početku i kraju mjerenja.
- Tokomjer nije izložen direktnom Sunčevom zračenju.
- Su toplinski otpori homogenih slojeva elementa nepromijenjeni tijekom mjerenja.

U slučaju elemenata s laganom nosivom konstrukcijom, koji imaju specifičnu toplinu po jediničnoj površini manju od 20 kJ/(m² K), preporuča se analiziranje podataka koji su prikupljeni noću (1 sat nakon sumraka do izlaska sunca). Kada U-vrijednost dobivena tijekom tri noći odstupa za manje od ±5 % jedna od druge tada je mjerenje završeno.

Za teže elemente koji imaju specifičnu toplinu po jediničnoj površini veću od 20 kJ/(m² K), trajanje mjerenja je definirano kao višekratnik od 24 sata, a kraj mjerenja je definiran kad se ispune sljedeći kriteriji:

- Ukupno trajanje mjerenja je duže od 72 sata.
- U-vrijednost ($1/R_{24}$) izračunata na kraju mjerenja ne odstupa za više od $\pm 5\%$ od vrijednosti izračunate 24 sata prije kraja mjerenja.
- U-vrijednost izračunata nakon $2/3$ trajanja mjerenja ($1/R_{1/3}$; zaokružene na cijeli dan) ne odstupa za više od $\pm 5\%$ od U-vrijednosti dobivene u zadnje $2/3$ trajanja mjerenja ($1/R_{2/3}$).
- Toplina akumulirana u elementu je manja od $\pm 5\%$ od toplinskog toka kroz element tijekom mjerenja.

Optimalni period je određen na način da vrijednosti $R_{2/3}$ i R_{24} budu manji od 5% ako je to moguće, a u slučaju da kriterij nije zadovoljen određen je period za prvu vrijednost $R_{2/3}$ i R_{24} koja je veća od 5% . Ovaj postupak je implementiran u programskom paketu Mathematica (Slika 31).

```
Avg[q1_, Ti1_, Te1_, n_] := Module[{ },
  q = q1[[1 ;; n]];
  Ti = Ti1[[1 ;; n]];
  Te = Te1[[1 ;; n]];

  N3d = If[n ≤ 433, 145, 433];
  UTable = Table[0, {i, 1, n}, {j, 1, n}];
  RTable = Table[0, {i, 1, n}, {j, 1, n}];
  RTableLast24 = Table[0, {i, 1, n}, {j, 1, n}];
  DT = Table[0, {i, 1, n}, {j, 1, n}];
  R5Perc = Table[0, {i, 1, n}, {j, 1, n}];
  RFirst23 = Table[0, {i, 1, n}, {j, 1, n}];
  RLast23 = Table[0, {i, 1, n}, {j, 1, n}];
  R5Perc23 = Table[0, {i, 1, n}, {j, 1, n}];
  ListRange = Table[0, {i, 1, n}, {j, 1, n}];

  For[i = 1, i ≤ n - N3d, i++,
    For[k = 0, k ≤ n, k++,
      qAvg = q[[i ;; i + N3d + k]];
      TiAvg = Ti[[i ;; i + N3d + k]];
      TeAvg = Te[[i ;; i + N3d + k]];
      DT[[i, k + 1]] = IntegerPart[(N3d + k) * 10 / (24 * 60)];
      UAvg2 = Mean[qAvg] / (Mean[TiAvg] - Mean[TeAvg]);
      UTable[[i, k + 1]] = Abs[UAvg2];
      RTable[[i, k + 1]] = 1 / UAvg2;
      RTableLast24[[i, k + 1]] =
```

- a) Početak funkcije

```

1 / (Mean[q[[i ;; i + N3d + k - 144]]] /
(Mean[Ti[[i ;; i + N3d + k - 144]]] - Mean[Te[[i ;; i + N3d + k - 144]]]));
R5Perc[[i, k + 1]] = Abs[(RTable[[i, k + 1]] - RTableLast24[[i, k + 1]]) / RTable[[i, k + 1]]];
RFirst23[[i, k + 1]] =
1 / (Abs[Mean[q[[i ;; i + ((1 / 3) * DT[[i, k + 1]] * 24 * 60 / 10)]]] /
Abs[(Mean[Ti[[i ;; i + ((1 / 3) * DT[[i, k + 1]] * 24 * 60 / 10)]]] -
Mean[Te[[i ;; i + ((1 / 3) * DT[[i, k + 1]] * 24 * 60 / 10)]]]));
RLast23[[i, k + 1]] =
1 / (Abs[Mean[q[[i ;; i + ((2 / 3) * DT[[i, k + 1]] * 24 * 60 / 10)]]] /
Abs[(Mean[Ti[[i ;; i + ((2 / 3) * DT[[i, k + 1]] * 24 * 60 / 10)]]] -
Mean[Te[[i ;; i + ((2 / 3) * DT[[i, k + 1]] * 24 * 60 / 10)]]]));
R5Perc23[[i, k + 1]] = Abs[(RLast23[[i, k + 1]] - RFirst23[[i, k + 1]]) / RLast23[[i, k + 1]]];
ListRange[[i, k + 1]] = {i, i + N3d + k};
If[i + N3d + k ≥ n, Break[]];
];
];

UTable = DeleteCases[UTable, 0, Infinity];
RTable = DeleteCases[RTable, 0, Infinity];
RTableLast24 = DeleteCases[RTableLast24, 0, Infinity];
R5Perc = DeleteCases[R5Perc, 0, Infinity];
RFirst23 = DeleteCases[RFirst23, 0, Infinity];
RLast23 = DeleteCases[RLast23, 0, Infinity];
R5Perc23 = DeleteCases[R5Perc23, 0, Infinity];
DT = DeleteCases[DT, 0, Infinity];
ListRange = DeleteCases[ListRange, 0, Infinity];
- ]

```

- b) Nastavak funkcije

- Slika 31: Funkcija za određivanje optimalnog perioda mjerenja metodom srednje vrijednosti

U slučaju da navedeni kriteriji nisu zadovoljeni potrebno je raditi korekciju toplinskog toka na toplinu akumuliranu u elementu. Međutim, ovaj postupak pretpostavlja da su slojevi unutar elementa poznati kao i njihove materijalne karakteristike što je istinito kod novijih zgrada, a kod starih zgrada zahtjeva korištenje razornih metoda u cilju određivanja slojeva unutar elementa. Pošto bi u realnom slučaju bilo potrebno poznavati materijalne karakteristike ugrađenih slojeva, te radi toga, uništavanje veće površine zida, takvo nerazorno mjerenje je u praksi veoma teško provesti.

Pogreška mjerenja:

Pogreška, tj. točnost, aproksimacije U-vrijednosti ovisi o:

- Kvaliteti kalibracije tokomjera i termočlanaka.
- Sustavu za bilježenje podataka (mjerenju napona).

- Prionjivosti tokomjera na promatranu površinu.
- Poremećaju toplinskog toka na površini zbog prisustva tokomjera.
- Varijaciji toplinskog toka i temperature tijekom mjerenja. Ova pogreška najviše doprinosi konačnoj U-vrijednosti te može iznositi i preko 10 %. Smanjenje ove pogreške je moguće povećanjem perioda mjerenja, smanjenju varijacije temperature unutarnjeg zraka na minimum ili korištenjem dinamičke metode proračuna.
- Razlici temperature zraka i prividne reflektirane temperature / srednje temperature zračenja.

Donja granica greške mjerenja se zatim definira kao korijen kvadrata pojedinih izvora pogreške, a gornja granica kao suma pojedinih izvora pogreške mjerenja.

$$ERR_{dg} = \sqrt{\sum_{i=1}^n ERR_i [\%]} \quad (124)$$

$$ERR_{gg} = \sum_{i=1}^n ERR_i [\%]$$

Dinamička metoda proračuna:

Za razliku od metode srednje vrijednosti koja je ograničena na stacionarno provođenje topline, dinamička metoda se može koristiti i u nestacionarnim uvjetima, tj. u uvjetima kada postoji velika razlika u temperaturi i toplinskom toku tijekom mjerenja.

Dinamička metoda se bazira na rješavanju jednadžbe provođenja topline bez poznavanja slojeva i materijalnih karakteristika elemenata vanjske ovojnice zgrade. Element se aproksimira s U-vrijednosti te n vremenskih konstanti τ . Nepoznati parametri ($U, \tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_n$) se dobivaju nekom od metoda za obradbu eksperimentalnih podataka numeričke matematike i statistike kao što je metoda najmanjih kvadara (eng. „*Least Square Method*“).

Pretpostavka dinamičke metode je da je gustoća toplinskog toka q u trenutku j funkcija temperature u tom trenutku te svim prijašnjim trenucima.

$$\begin{aligned}
 q_j = & U \cdot (T_{I,j} - T_{E,j}) + K_1 \cdot \dot{T}_{I,j} - K_2 \cdot \dot{T}_{E,j} \\
 & + \sum_n P_n \cdot \sum_{k=j-p}^{i-1} T_{I,k} \cdot (1 - \beta_n) \cdot \beta_n \cdot (j - k) \\
 & + \sum_n Q_n \cdot \sum_{k=j-p}^{i-1} T_{E,k} \cdot (1 - \beta_n) \cdot \beta_n \cdot (j - k)
 \end{aligned} \tag{125}$$

Gdje su K_1, K_2, P_n i Q_n dinamičke karakteristike zida bez fizikalnog značenja, a indeks i predstavlja vremenski korak ($i = 1$ do N). U izrazu (125) p predstavlja podskup točaka korištenih za numeričku integraciju. Varijable β_n su eksponencijalne funkcije vremenske konstante τ_n . $T_{I,j}$ i $T_{E,j}$ su vremenske derivacije funkcije temperature unutarnjeg i vanjskog zraka:

$$\begin{aligned}
 \dot{T}_{I,j} &= \frac{(T_{I,j} - T_{I,j-1})}{\Delta t} \\
 \dot{T}_{E,j} &= \frac{(T_{E,j} - T_{E,j-1})}{\Delta t}
 \end{aligned} \tag{126}$$

Gdje je Δt vrijeme uzorkovanja, tj. vremenski korak između dva mjerenja.

Ako se odabere m vremenskih konstanti ($\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m$), tada je potrebno pronaći $2m + 3$ nepoznata parametra:

$$U, K_1, K_2, P_1, P_2, Q_2, \dots, P_m, Q_m \tag{127}$$

Izraz (127) se raspisuje $2m + 3$ puta za $2m + 3$ vremenska koraka te se tako dobiva sustav jednadžbi čijim se rješavanjem dobivaju nepoznati parametri. Prvo rješenje tog sustava jednadžbi je U -vrijednost elementa. Za adekvatnu aproksimaciju veze između toplinskog toka q_j i temperature unutarnjeg i vanjskog zraka T_I i T_E odabiru se tri ($m = 3$) vremenske konstante τ uz uvjet da je $\tau_1 = r \cdot \tau_2 = r^2 \cdot \tau_3$. Dobiveni sustav jednadžbi je predefiniran te nema eksplicitno rješenje:

$$\{q\} = [X] \cdot \{Z\} \tag{128}$$

Gdje je $\{q\}$ vektor od M izmjerenih gustoća toplinskog toka, $[X]$ je pravokutna matrica s M redova i $2m + 3$ stupca, a $\{Z\}$ je vektor s $2m + 3$ elementa koji predstavljaju nepoznate parametre. Pošto je $[X]$ pravokutna matrica njen inverz se ne može pronaći direktno. Drugim riječima, sustav jednadžbi (128) predstavlja predefiniran linearni sustav jednadžbi koji je moguće riješiti metodom najmanjih kvadrata. Inverz pravokutne matrice može se pronaći koristeći Moore-Penroseov pseudoinverz:

$$\begin{aligned} [X]^+ &= ([X]^H \cdot [X])^{-1} \cdot [X]^H \\ [X]^+ &= ([X]^T \cdot [X])^{-1} \cdot [X]^T \end{aligned} \quad (129)$$

Gdje je $[X]^H$ kompleksno konjugirana transponirana matrica čiji su elementi realni brojevi. Uvrštavanjem izraza (129) u izraz (128) dobiva se aproksimacija $\{Z\}^*$ vektora $\{Z\}$, a za svaku aproksimaciju vektora $\{Z\}$ računa se aproksimacija $\{q\}^*$ vektora $\{q\}$.

$$\{Z\}^* = ([X]^T \cdot [X])^{-1} \cdot [X]^T \cdot \{q\} \quad (130)$$

Postupak dinamičke metode (Slika 32) je dakle sljedeći:

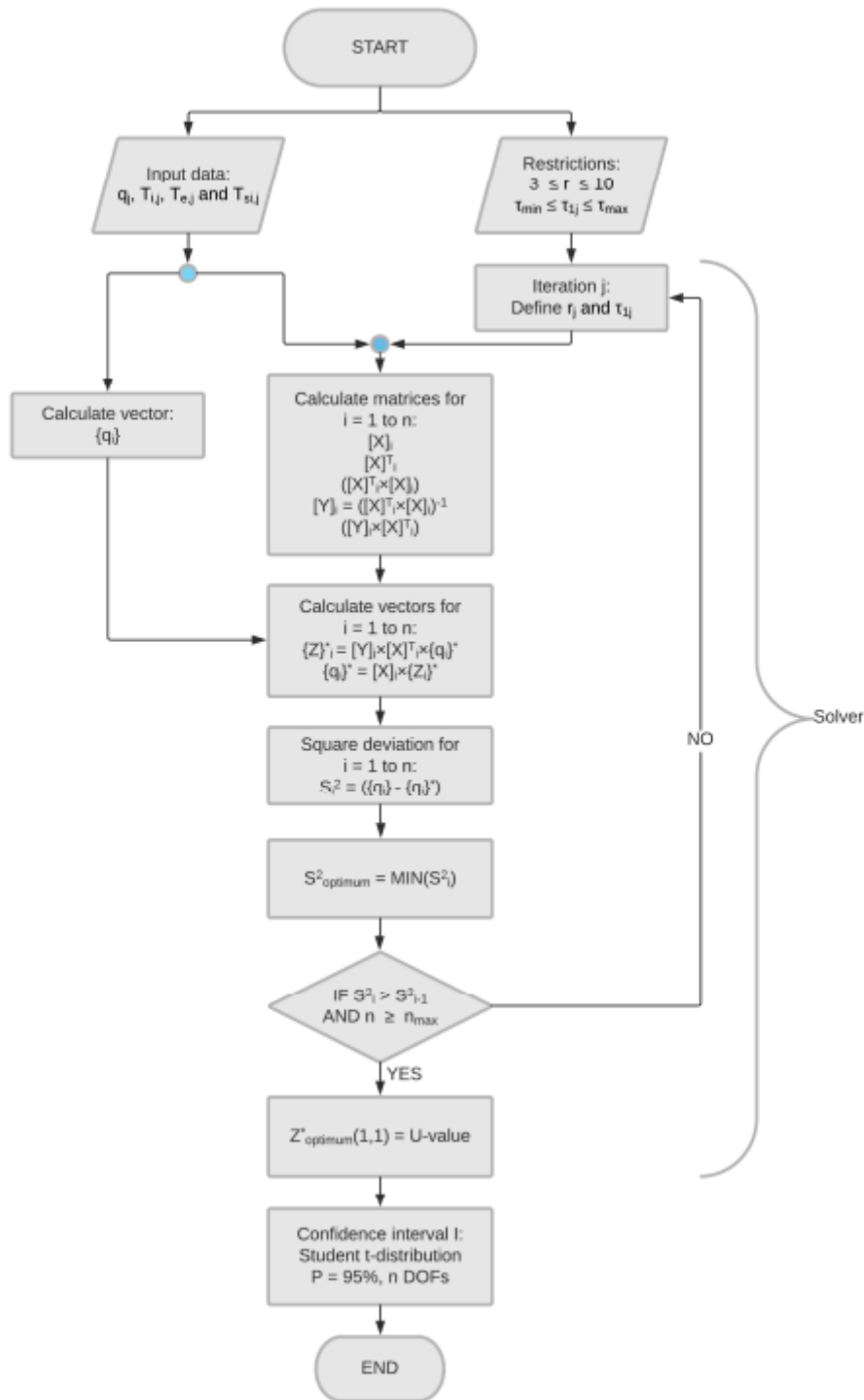
- 1) Odabire se broj vremenskih konstanti ($1 \leq m \leq 3$).
- 2) Odabire se razmak između vremenskih konstanti r ($3 \leq r \leq 10$) tako da je ($\tau_1 = r \cdot \tau_2 = r^2 \cdot \tau_3$).
- 3) Odabire se broj točaka M za sustav jednažbi ($2 \cdot m + 3 \leq M \leq N$).
- 4) Izračunavaju se minimalne i maksimalne vrijednosti vremenske konstante τ_1 ($\Delta t \leq \tau_1 \leq p \cdot \Delta t/2$).
- 5) Izračunava se vektor $\{Z\}^*$ preko izraza (130) i vektor $\{q\}^*$.

$$\{q\}^* = [X] \cdot \{Z\}^* \quad (131)$$

- 6) Izračunava se ukupno kvadratno odstupanje između vektora $\{q\}$ i $\{q\}^*$.

$$S^2 = (\{q\} - \{q\}^*)^2 = \sum_{i=1}^n (q_i - q_i^*)^2 \quad (132)$$

- 7) Ponavljanjem koraka 5 i 6 dobiva se minimalno kvadratno odstupanje S_{min}^2 .
- 8) Vektor $\{Z\}^*$ dobiven za minimalno kvadratno odstupanje S_{min}^2 je najbolja aproksimacija vektora $\{Z\}$. Prvi element tog vektora Z_1 je najbolja aproksimacija U-vrijednosti.



Slika 32: Dijagram toka dinamičke metode [85]

Ako je vremenska konstanta τ_1 veća od maksimalne vrijednosti $\tau_{max} = p \cdot \Delta t / 2$ za izračunati vektor $\{Z\}^*$, tada je odabrani broj točaka za sustav jednadžbi neadekvatan. U tom slučaju potrebno je povećati ili smanjiti broj jednadžbi M i odabrati novi razmak r između vremenskih konstanti τ .

Nadalje, potrebno je odrediti nesigurnost u aproksimiranu U-vrijednost:

$$I = \sqrt{\frac{S_{min}^2 \cdot Y(1,1)}{(M - 2 \cdot m - 4)}} \cdot F(P, M - 2 \cdot m - 5) \quad (133)$$

$$[Y] = ([X]^T \cdot [X]^{-1})$$

Gdje je $Y(1,1)$ prvi element matrice $[Y]$, F interval pouzdanosti Studentove t raspodjele, P je vjerojatnost ($P = 0,95$) i $(M - 2 \cdot m - 5)$ su stupnjevi slobode. U slučaju kada je I manji od 5 % od aproksimirane U-vrijednosti dobivene dinamičkom metodom, tada je U-vrijednost bliska stvarnoj vrijednosti.

Algoritam (Slika 33) dinamičke metode je implementiran u programskom paketu Mathematica.

```

Dyn[qst_, Tist_, Test_, m_, r_, M_, kk_: 0] := Module[{n},
  n = Length[qst];
  q = qst[[1 ;; n]];
  Ti = Tist[[1 ;; n]];
  Te = Test[[1 ;; n]];
  dt = 600;

  NN = Length[q];
  (*m=1; (*1 do 3*) *)
  (*r=3; (*3 do 10*) *)
  (*M=200; (*15 do 40*) *)
  Mmin = 2 * m + 3;
  Mmax = NN;
  p = NN - M;
  tau1min = dt / 60;
  tau1max = p * dt / 120;
  tauu[n_] := tau1 / (r^(n - 1));
  beta[n_] := Exp[-(dt / 60) / tauu[n]];

  X = Table[0, {i, 1, M}, {j, 1, 2 * m + 3}];
  For[i = NN - M + 1, i ≤ NN, i++,
    X[[i - (NN - M), 1]] = Ti[[i]] - Te[[i]];
    X[[i - (NN - M), 2]] = (Ti[[i]] - Ti[[i - 1]]) / (dt / 60);
    X[[i - (NN - M), 3]] = (Te[[i]] - Te[[i - 1]]) / (dt / 60);
    For[k = 1, k ≤ m, k++,
      X[[i - (NN - M), 2 * k + 2]] = Sum[Ti[[j]] * (1 - beta[k]) * beta[k] * (i - j), {j, 1, i - 1}];
      X[[i - (NN - M), 2 * k + 3]] = Sum[Te[[j]] * (1 - beta[k]) * beta[k] * (i - j), {j, 1, i - 1}];
    ]
  ];

```

a) Početak funkcije

```

qM = q[ [NN - M + 1 ;; NN] ];
Smin[tau1_] := Module[{tau = tau1},
  XX = X /. tau1 -> tau;
  ZT = Inverse[Transpose[XX].XX].Transpose[XX].qM // Quiet;
  qZ = XX.ZT;
  S2 = Sum[(q[[j]] - qZ[[j]])^2, {j, 1, M}];
  S2
];

Smin1 = Table[{tau, Smin[tau]}, {tau, tau1min, tau1max, 60}];
Smin1min = Min[Smin1[ [All, 2] ]];
position = Position[Smin1[ [All, 2] ], Smin1min][ [1, 1] ];
tauxmin = Smin1[ [position, 1] ];
XX = X /. tau1 ->iauxmin;
ZT = Inverse[Transpose[XX].XX].Transpose[XX].qM // Quiet;
UDyn = ZT[ [1] ];
Y = Inverse[Transpose[XX].XX] // Quiet;
Y[ [1, 1] ];
Iconf = Sqrt[Smin1min * Y[ [1, 1] ] / (M - 2 * m - 4)] *
  InverseCDF[StudentTDistribution[M - 2 * m - 5], 1 - 0.9 / 2];
Iconf < Abs[0.05 * UDyn];
If[kk == 0,
  UAvg = Umin3HFM1,
  UAvg = Umin3ICTL
];

{Smin1min,iauxmin, Y[ [1, 1] ], Iconf, Iconf < Abs[0.05 * UDyn], UAvg, UDyn, Umin, Umax, M}
]

```

b) Nastavak funkcije

Slika 33: Dio algoritma za izračun U-vrijednosti metodom najmanjih kvadrata [85]

Iako se dinamička metoda može koristiti u uvjetima nestacionarnog provođenja topline in-situ, njena primjena je u praksi ograničena zbog kompleksnosti korištenja u odnosu na metodu srednje vrijednosti. Međutim, u ovom radu će se prikazati proračun U-vrijednosti korištenjem metode srednje vrijednosti i dinamičke metode iz toplinskog toka dobivenog preko metode infracrvene termografije.

3.5.3 Metoda infracrvene termografije

Slika 34 prikazuje princip mjerenja metodom infracrvene termografije (Slika 34). Infracrveno zračenje koje detektira kamera je jednako:

$$W_{tot} = \varepsilon \cdot W_{obj} + (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot W_{refl} + (1 - \tau) \cdot W_{atm} \quad (134)$$

Gdje je W_{obj} energija emitirana s promatrane površine u Jouleima, W_{refl} energija emitirana sa svih površina u okolini u Jouleima i W_{atm} je energija emitirana iz atmosfere u Jouleima.

U ovom radu će se pretpostaviti da je koeficijent transmisije atmosfere jednak 0,99; tj. $\tau = 0.99$. Postupak određivanja transmisije atmosfere u ovisnosti o udaljenosti kamere i relativnoj vlažnosti je prikazan u poglavlju 5.1.2.1. Nadalje, kako bi se odredio toplinski tok koji iz okoline dođe na promatranu površinu i obrnuto primijenit će se sljedeći algoritam:

- 1) Iz snimljenih termograma će se očitati temperatura površine za $\varepsilon = 1$.
- 2) Iz snimljenih termograma će se očitati temperatura aluminijske folije za $\varepsilon = 1$.
- 3) Iz određenih temperatura površine (T_{si}) i aluminijske folije (T_{refl}) će se primjenom Stefan-Boltzmannovog zakona odrediti toplinski tokovi W_{obj} i W_{refl} .

$$\begin{aligned} W_{tot,1} = W_{obj,1} &= \sigma \cdot T_{si}^4 \\ W_{tot,2} = W_{obj,2} &= \sigma \cdot T_{refl}^4 \end{aligned} \quad (135)$$

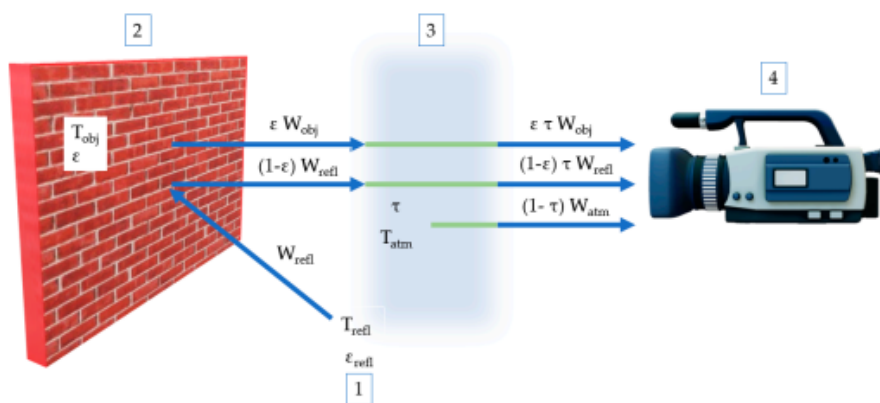
- 4) Iz izraza (136) se odredi toplinski tok:

$$W_{tot} = \varepsilon \cdot W_{tot,1} + (1 - \varepsilon) \cdot W_{tot,2} \quad (136)$$

- 5) Odredi se gustoća toplinskog toka q_{ICT} .

$$q_{ICT} = W_{tot} - W_{tot,2} = \varepsilon \cdot (W_{tot,1} - W_{tot,2}) \quad (137)$$

Gustoća toplinskog toka q_{ICT} predstavlja dio toplinskog toka koji se zračenjem izmjeni između promatrane površine i okoline i obrnuto.



Slika 34: Princip mjerenja metodom infracrvene termografije: (1) okolina, (2) mjerena površina, (3) okoliš, (4) IC kamera

Na emisivnost površine najviše utječe stvarna temperatura površine, valna duljina elektromagnetskog vala te kut pod kojim se kamerom promatra površina. Kut nagiba kamere prema površini je bitan zbog Narcisovog efekta – kamera vidi svoj odraz u promatranoj površini. Kod elemenata na vanjskoj ovojnici zgrade je uglavnom riječ o površinama s visokom emisivnosti (od 0,9 do 0,95) i temperaturama od -10 do 50 °C pa je promjena u emisivnosti s

temperaturom zanemariva. Prema tome, kod određivanja U-vrijednosti, emisivnost se može uzeti kao konstanta vrijednost tijekom cijelog mjerenja.

Nadalje, površine s visokom emisivnosti emitiraju veću količinu infracrvenog zračenja, a reflektiraju manji dio zračenja iz okoline. Zbog niskog koeficijenta refleksije, ove su površine bolje za pouzdano određivanje površinske temperature metodom infracrvene termografije. Ako površine imaju nizak koeficijent emisivnosti, tada reflektiraju veću količinu zračenja iz okoline. Prozirne površine u vidljivom dijelu elektromagnetskog spektra (npr. prozori) ponašaju se kao reflektori točkastog izvora infracrvenog zračenja, što otežava mjerenje njihove površinske temperature pomoću metode infracrvene termografije. Staklene površine predstavljaju problem tijekom mjerenja prividne reflektirane temperature zbog njihove visoke izloženosti izravnoj Sunčevoj svjetlosti. U praksi je prije određivanja površinske temperature pomoću IC kamere potrebno je znati sljedeće parametre:

- Emisivnost površine
- Prividnu reflektiranu temperaturu
- Temperaturu zraka
- Relativnu vlažnost zraka
- Udaljenost između promatrane površine i kamere

Međutim, u ovom radu će se zanemariti svi parametri osim emisivnosti površine, reflektirane prividne temperature i transmisije atmosfere zbog njihovog malog doprinosa stvarnoj površinskoj temperaturi. U praksi je pretpostavka nepromijenjenosti reflektirane prividne temperature opravdana pošto se IC kamera koristi za kvalitativno otkrivanje i lociranje mjesta povećanog ili smanjenog toplinskog toka, tj. više/nije površinske temperature. Pošto je reflektirana prividna temperatura parametar koji poslije emisivnosti najviše utječe na stvarnu temperaturu površine, njeno kontinuirano mjerenje je nužno kako bi se što bolje odredio stvarni toplinski tok koji se s površine izmjeni s okolinom.

3.6 Prednosti i ograničenja metode HFM

Prednosti metode HFM su što ju je moguće koristiti i u laboratoriju i na terenu zbog njene preciznosti mjerenja i nedestruktivnosti. Metoda je korisna za brzu procjenu energetske učinkovitosti elemenata vanjske ovojnice zgrade [86]. Metodu je moguće koristiti neovisno o veličini i tipu uzorka [24,87].

Iako je metoda HFM pouzdana, rezultat mjerenja daje U-vrijednost koja ne predstavlja nužno cijelu površinu pošto je mjerenje provedeno na površini mjerača gustoće toplinskog toka. Mjerenje je moguće provesti u više točaka na površini zida, ali to zahtjeva korištenje više tokomjera. Odabir točne lokacije postavljanja senzora u praksi može biti teško pošto izgled površine nužno ne predstavlja presjek elementa, pogotovo ne u vidljivom dijelu elektromagnetskog spektra [88]. Metoda je ovisna o kalibraciji i točnosti mjerne opreme, pogotovo tokomjera te je osjetljiva na vremenske uvjete, pogotovo na Sunčevo zračenje što ograničava vrijeme korištenja metode te orijentaciju elemenata na vanjskoj ovojnici zgrade [83,89–92]. Toplinska masa je još jedan parametar koji ograničava korištenje metode. U slučaju teških građevinskih elemenata metoda HFM ne daje pouzdane rezultate [86,92–95]. Kako bi se ostvarila prihvatljiva točnost mjerenja za teške građevinske elemente vrijeme trajanja mjerenja bi trebalo biti preko 7 dana [83,85,90,92].

3.7 Prednosti i ograničenja metode ICT

Za razliku od metode HFM, ICT je beskontaktna metoda pa se njenim korištenjem ne remeti distribucija toplinskog toka na površini [24,32,96]. Metoda ICT se može također koristiti u laboratoriju te na terenu. Oprema je lagana za nošenje što dodatno olakšava mjerenje, a moguće ju je koristiti sa stalkom i tronošcem. Nadalje, za razliku od metode HFM, metoda ICT daje sliku cijele površine što dopušta odabir reprezentativnog dijela površine za koji se može odrediti toplinski tok te iz njega U-vrijednost elementa.

Zbog svoje prirode korištenja metoda ICT je vrlo ovisna o karakteristikama površine elementa koji se promatra (emisivnosti i koeficijentu refleksije) te o uvjetima okoliša (Sunčevom zračenju, temperaturi zraka, relativnoj vlažnosti zraka, itd.), o okruženju u kojem se promatrana površina nalazi (prividnoj reflektiranoj temperaturi) te o udaljenosti kamere od promatrane površine (utjecaj atmosfere) [24,85,87,97,98]. Kako bi se odredila temperatura površine potrebno je znati sve navedene parametre. Nadalje, potrebno je imati stručna znanja vezana uz prijenos topline zračenjem te znanja o prijenosu fluida po površini.

Kako bi se što bolje procijenio toplinski tok strujanjem uz metodu ICT potrebno je mjeriti i brzinu strujanja zraka kako bi se odredio režim strujanja po površini (koeficijent plošnog prijelaza topline strujanjem) te eliminirao utjecaj strujanja na izmjerenu temperaturu. Te koeficijente je nekada teško odrediti što dodatno komplicira mjerenje. Duljina mjerenja metodom ICT se smanjuje u odnosu na metodu HFM [24,87].

Još jedan veliki nedostatak HFM metode je cijena pogotovo što mjerenje zahtjeva korištenje više mjernih uređaja kako bi se dobila što bolja slika prijenosa topline preko promatrane površine.

3.8 Zaključak

ICT metoda pruža brojne prednosti u odnosu na tradicionalnu metodu mjerenja koeficijenta prolaska topline, kao što je HFM metoda. ICT je beskontaktna metoda koja ne remeti distribuciju toplinskog toka po površini i može se primijeniti kako u laboratorijskim uvjetima, tako i na terenu. Oprema za ICT je jednostavno prenosiva, što olakšava njezinu primjenu.

Metoda ICT omogućuje dobivanje šire slike prilikom određivanja toplinskog toka i nije ograničena na unaprijed definirane lokacije mjerenja. Međutim, postoje određeni nedostaci metode ICT. Ona je osjetljiva na karakteristike površine (koeficijent emisivnosti i refleksije površine), atmosferske uvjete (zračenje, temperatura i relativna vlažnost zraka) te okoliš u kojem se površina nalazi (prividna reflektirana temperatura i strujanje zraka po površini). Također, primjena metode ICT zahtijeva stručno znanje kako bi se osigurala kvalitetna i pouzdana primjena.

Iako je metoda ICT novost u području određivanja koeficijenta prolaska topline, donosi značajne prednosti. Mogućnost mjerenja koeficijenta prolaska topline više građevinskih elemenata s jednom infracrvenom kamerom olakšava kontrolu kvalitete i procjenu toplinskih gubitaka u zgradama koje se planiraju energetske obnoviti.

Pregledom literature utvrđeni su nedostaci metode ICT te se kao glavni nedostaci navode ograničenost korištenja u ljetnim mjesecima i nedostatak dinamičkih metoda korištenih za analizu izmjerenih podataka. Određena istraživanja su se fokusirala i na određivanje toplinskih gubitaka mjesta na vanjskoj ovojnici zgrade gdje se toplinski tok ne može nužno pretpostaviti jednodimenzionalnim. U tim slučajevima se metoda ICT pokazala kao jedina metoda koju je u tom slučaju moguće koristiti. Istraživanje u sklopu ovog doktorskog rada fokusirat će se na određivanju U-vrijednosti u ljetnim i zimskim mjesecima za neizolirani i izolirani zid u laboratorijskim i stvarnim uvjetima okoliša.

4 Eksperimentalni rad

U ovom poglavlju prikazat će se postav opreme za eksperimentalno ispitivanje, popis mjerne opreme te popis uzoraka korištenih u laboratorijskom i terenskom ispitivanju.

4.1 Mjerna oprema i mjerene veličine

Nakon intenzivnog pregleda literature ustanovljeni su najbitniji parametri koji opisuju prijenos topline s površine na okoliš i obrnuto. Shodno tome je izabrana oprema kojom će se mjeriti pojedini parametri (Tablica 7).

Tablica 7: Mjereni parametri i mjerni uređaji

Mjereni parametar	Oznaka mjerene veličine	Mjerna jedinica	Mjerni uređaj
Površinska temperatura	T_{si}	°C/K	Infracrvena kamera
Površinska temperatura	T_{pov}	°C/K	Termočlanak
Prividna reflektirana temperatura	T_{refl}	°C/K	Infracrvena kamera
Srednja temperatura zračenja	T_{mrt}	°C/K	Globus termometar
Brzina strujanja zraka na unutarnjoj površini	v	m/s	Termo-anemometar
Temperatura vanjskog zraka	T_e	°C/K	Termočlanak
Temperatura unutarnjeg zraka	T_i	°C/K	Termočlanak
Globalno Sunčevo zračenje	E_{gh}	W/m ²	Piranometar
Gustoća toplinskog toka na unutarnjoj površini	q_{HFEM}	W/m ²	Tokomjer

Infracrvena kamera korištena u ovom radu je FLIR P640 (Slika 35). Valno područje koje pokriva ova kamera spada u dugovalno infracrveno zračenje s valnom duljinom od 7,5 do 13 μ m. Kamera koristi mikrobolometar koji je sastavljen od matrice detektora veličine 640 \times 480, tj. ukupno 307200 detektora). Kamera ima mogućnost korištenja uskolutne (24 °) i širokolutne (45 °) leće. Tablica 8 prikazuje karakteristike IC kamere.

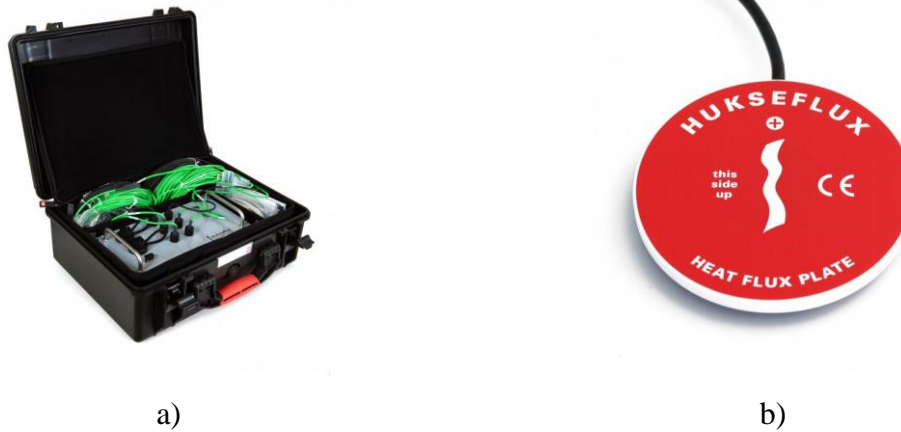


Slika 35: Infracrvena kamera [99]

Tablica 8: Karakteristike IC kamere [100]

Opis karakteristike	Vrijednost
Model	FLIR P640
Spektralni raspon	7,5 – 13 μm
Razlučivost IC detektora	640 \times 480 piksela
Vidno polje (FOV)	24° \times 18° 45° \times 34°
Minimalna fokalna udaljenost	0,3 m za leću 24° 0,2 m za leću 45°
Prostorna razlučivost	0,65 mrad za leću 24° 1,3 mrad za leću 45°
Temperaturna razlučivost (NETD)	60 mK pri 30 °C
Frekvencija obnove slike	30 Hz
Točnost mjerenja	± 2 °C ili ± 2 % od očitavanja
Temperaturni opseg	-40 °C do 120 °C 0 °C do 500 °C 300 °C do 2000 °C

Za mjerenje gustoće toplinskog toka korišteni su tokomjeri HFP01 (Slika 36b) koji dolaze u sklopu sustava za određivanje U-vrijednosti TRSYS01 (Slika 36a). Princip rada tokomjera opisan je u poglavlju 3.5.2.



Slika 36: Sustav za mjerenje gustoće toplinskog toka TRSYS01 [101]

Tablica 9: Karakteristike tokomjera [102]

Opis karakteristike	Vrijednost
Model	TRSYS01 heat flux measuring system
Broj ispitnih lokacija	2
Duljine kablova	Lokacija 1: 10 m Lokacija 2: 20 m
Temperaturno područje mjerenja	-30 do +70 °C
Mjerna nesigurnost	± 3 % (k=2)
Minimalna duljina mjerenja	72 sata
Rezolucija senzora za mjerenje toplinskog toka	0.02 W/m ²

Za mjerenje dodatnih parametara korišteni su sljedeći mjerni uređaji:

- Globus termometar (Slika 37) za mjerenje srednje temperature zračenja. Tablica 10 prikazuje karakteristike globus termometra.
- Termoanemometar (Slika 38) za mjerenje brzine strujanja zraka po unutarnjoj površini. Tablica 11 prikazuje karakteristike termoanemometra.
- Površinski termočlanak (Slika 39) za kontrolu mjerenja infracrvene kamere. Tablica 12 prikazuje karakteristike površinskog termočlanka.
- Piranometar (Slika 40) za mjerenje intenziteta Sunčevog zračenja na vanjskoj površini. Tablica 13 prikazuje karakteristike piranometra.



Slika 37: Globus termometar [103]

Tablica 10: Karakteristike globus termometra [104]

Opis karakteristike	Vrijednost
Model	Globe thermometer (Pt100 4L)
Točnost mjerenja	Klasa B
Senzor temperature	Pt100
Promjer	150 mm
Temperaturno područje mjerenja	-50 do 200 °C
Duljina kabela	3 m



Slika 38: Termoanemometar [103]

Tablica 11: Karakteristike termoanemometra [105]

Opis karakteristike	Vrijednost
Model	FVAD 35 TH4Kx
Područje primjene	0,08 do 2 m/s

Rezolucija	0,001 m/s
Vrijeme odaziva	< 1,5 s
Točnost mjerenja	$\pm 0,04$ m/s + 1 % izmjerene veličine
Temperaturna kompenzacija	0 do 50 °C
Kompenzacija tlaka zraka	700 do 1100 mbar
Temperaturno područje mjerenja	-20 do 70 °C
Točnost mjerenja temperature	$\pm 0,7$ °C od 0 do 50 °C i > 0,5 m/s
Područje mjerenja tlaka zraka	700 do 1100 mbar
Točnost mjerenja tlaka zraka	$\pm 2,5$ mbar (na 23 °C \pm 5 K)



Slika 39: Površinski termočlanak [103]

Tablica 12: Karakteristike površinskog termočlanka [106]

Opis karakteristike	Vrijednost
Model	NiCr-Ni sensor FTA 109 P
Točnost mjerenja	NiCr-Ni class 2
Senzor temperature	NiCr-Ni
Temperaturno područje mjerenja	-50 do 500 °C
Promjer mjerne glave	15 mm
T₉₀:	1 s
Kabel	1.5 m FEP/silicone thermal line
Primjena	Mjerenje površinske temperature



Slika 40: Piranometar [101]

Tablica 13: Karakteristike piranometra [107]

Opis karakteristike	Vrijednost
Model	SRA01
Mjerni raspon	0 do 2000 W/m ²
Osjetljivost	15 × 10 ⁻⁶ V/(W/m ²)
Spektralni raspon	0,285 – 3 μm

Za prikupljanje podataka korišteni su datalogeri ALMEMO® 2890-9 i CR300 (Slika 41). Nadalje, za prikupljanje podataka korišteni su računalni programi ALMEMO Cotrol i LoggerNet. Uprosječivanje uzoraka je postavljeno na 1 minutu, tj. svi rezultati, osim termograma, su srednja vrijednost šest mjerenja u jednoj minuti.



a)



b)

Slika 41: Datalogeri: a) ALMEMO® 2890-9 [103] i b) CR300 [108]

4.2 Planiranje i provedba istraživanja

Za laboratorijska ispitivanja je iskorišten postojeći sustav za kondicioniranje sustava kontaktnih fasada (ETICS sustava) koji je prenamijenjen kako bi se mogao koristiti u svrhu ispitivanja provedenih u sklopu ovog rada. Postojeći sustav je sačinjen od prizmatičnog volumena (komore) čija su dvije stranice pomične te one služe za instaliranje različitih ETICS sustava. Slika 42 prikazuje uzorak zida prije njegove prenamjene za korištenje u sklopu ovog istraživanja. Postojeći zid se sastojao od AB nosive konstrukcije na koju je bio postavljen sloj toplinske izolacije od kamene vune te vanjske žbuke. Kamena vuna i žbuka su uklonjene kako bi se instalirao novi sloj toplinske izolacije. Pošto su konstrukcije na koje se postavljaju ETICS sustavi imale otvore za instaliranje prozora (Slika 42), oni su zatvoreni punim materijalom kako bi se minimizirao utjecaj strujanja zbog velike razlike u U-vrijednosti između prozora i fasadnog sustava te se na taj način dobila nosiva konstrukcija korištena za daljnja ispitivanja U-vrijednosti s različitom pozicijom toplinske izolacije (Slika 43).

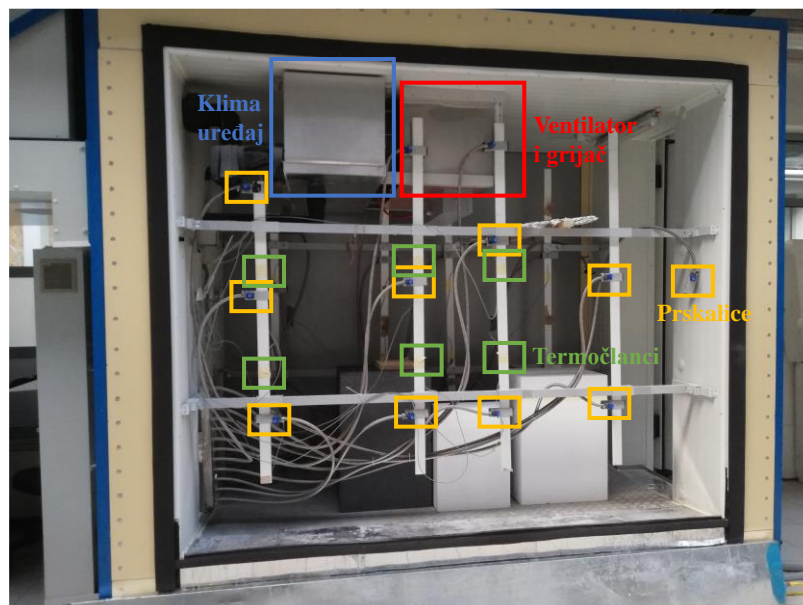


Slika 42: Postojeći uzorak za kondicioniranje ETICS sustava



Slika 43: Ispitivani uzorak

Unutrašnjost komore je korištena za simuliranje vanjskog okoliša te je moguće simulirati različite vremenske uvjete na način da se upravlja: temperaturom zraka, relativnom vlažnosti zraka, brzinom strujanja zraka (vjetra) te intenzitetom kiše (Slika 44).



Slika 44: Unutrašnjost komore i razmještaj različitih komponenti sustava za mjerenje i simulaciju vanjskog okoliša

Temperatura i relativna vlažnost se simuliraju pomoću istovremenog rada grijača, dizalice topline zrak-zrak te prskalica za vodu (Slika 44). Kiša se simulira pomoću prskalica koje su usmjerene prema ispitivanoj površini, a vjetar se simulira ventilatorom. Radom svih sustava korištenih za simuliranje uvjeta u vanjskom okolišu se upravlja putem računala. Funkcije

temperature, relativne vlažnosti, kiše i vjetra se unose u računalnom programu prije puštanja komore u rad. Unutar komore je postavljeno 12 termočlanaka zbog ujednačenja temperature zraka. Iako komora ima opciju simuliranja kiše, u sklopu ovog rada se nije razmatrao utjecaj vlažnosti vanjske površine na gustoću toplinskog toka na unutarnjoj površini. Za potrebe ispitivanja u ovom radu su se simulirali uvjeti temperatura:

- Jesen/Zima: 5 – 15 °C
- Proljeće/Ljeto: 15 – 30 °C
- Ljeto: 25 – 40 °C.

Uzorci koji su ispitivani su sljedeći:

- Armiranobetonski zid bez izolacije
- Armiranobetonski zid s izolacijom s vanjske strane
- Armiranobetonski zid s izolacijom s unutarnje strane

U slučaju laboratorijskih uzoraka se vlažnost unutar komore održavala na 60 % dok se kod terenskih uzoraka nije niti mjerila pošto se pregledom literature zaključilo da relativna vlažnost znatno ne utječe na mjerenje infracrvenom kamerom. Vrijednost relativne vlažnosti zraka se uzima u obzir prilikom određivanja transmisije atmosfere te će se u kasnijim poglavljima pokazati njen utjecaj.

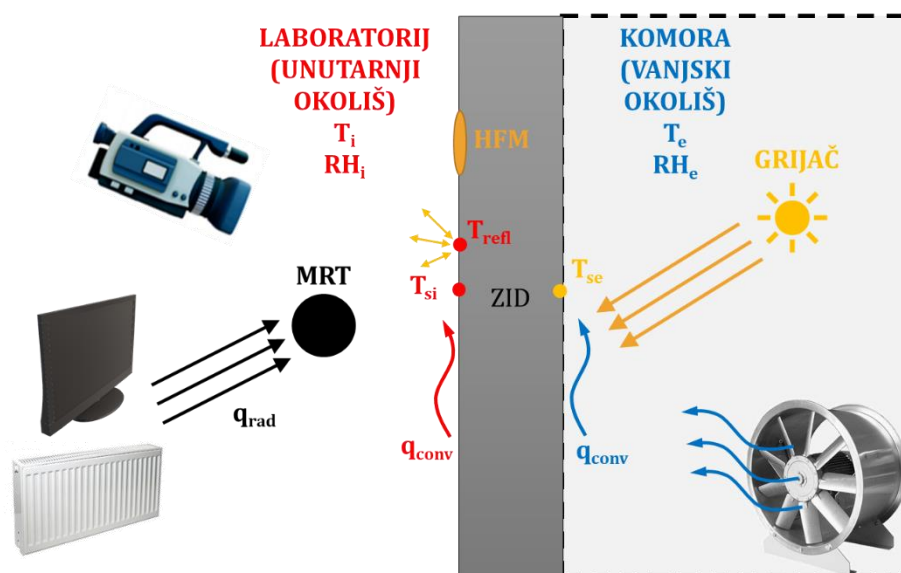
Ukupno je u laboratoriju ispitano devet uzoraka – tri različita uzorka AB zida (bez izolacije, izolacija s unutarnje strane te izolacija s vanjske strane) i tri različita uvjeta okoliša (jesen/zima, proljeće/ljeto te ljeto) (Tablica 14).

Tablica 14: Popis i oznake uzoraka

	Oznaka uzorka	Opis uzorka	Ti	Te
			°C	°C
LABORATORIJ	1K	AB zid s izolacijom s vanjske strane	20,7 – 21,6	7,6 – 18,0
	2K		19,8 – 22,3	16,8 – 32,4
	3K		21,7 – 23,2	26,3 – 41,2
	4B	AB uzorak bez izolacije	22,2 – 25,4	26,1 – 38,7
	7B		19,1 – 20,5	9,6 – 17,9
	8B		20,2 – 23,3	19,0 – 29,2
	9S		20,4 – 22,9	9,5 – 16,0

	10S	AB zid s izolacijom s unutarnje strane	20,9 – 24,1	19,6 – 29,0
	11S		23,3 – 26,0	27,9 – 38,9
TEREN	Ivanovec	Ljeto	22,2 – 24,2	6,7 – 30,7
	Lenti	Zima	19,5 – 21,7	0,0 – 14,5
	Muraszemenye	Zima	8,3 – 10,7	-1,4 – 16,1
	Mursko Središće	Zima	12,1 – 15,7	4,0 – 13,6
	Palovec	Ljeto	19,0 – 22,6	6,6 – 26,0
	Tornyszentmiklos	Zima	11,8 – 15,8	-2,0 – 16,1
	Totovec	Ljeto	19,8 – 21,0	6,7 – 27,4
	Vaspor	Zima	15,0 – 17,0	1,0 – 20,9

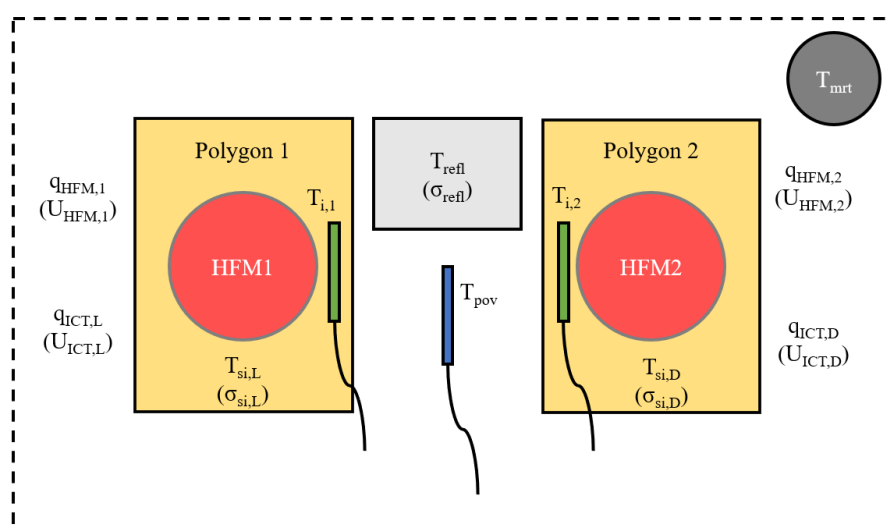
Sustav za mjerenje je postavljen na sljedeći način (Slika 45):



Slika 45: Prikaz sustava za mjerenje U-vrijednosti

Na unutarnjoj površini (površina prema laboratoriju) je odabrana ispitivana površina na koju se postavljaju dva tokomjera za mjerenje gustoće toplinskog toka, dva termočlanka za mjerenje temperature zraka u okolini površine, površinski termočlanak za mjerenje temperature zida, termoanemometar za mjerenje brzine strujanja zraka po površini u vertikalnom smjeru te globus termometar za mjerenje srednje temperature zračenja okoline (Slika 46i Slika 47a). Nadalje, u cilju određivanja površinske temperature IC kamerom na površinu je postavljena električarska traka poznate emisivnosti te zgužvana aluminijska folija preko koje se određuje prividna reflektirana temperatura okoline (Slika 47b). Na vanjskoj površini (površina unutar komore)

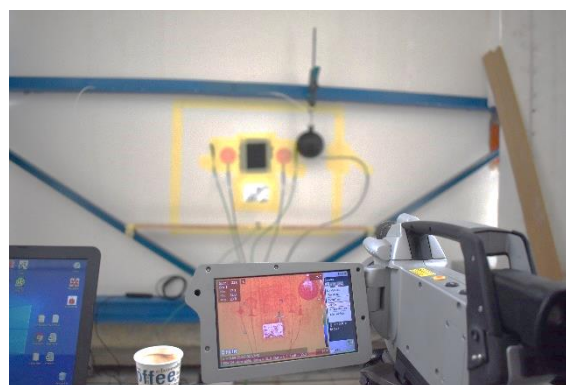
postavljena su dva termočlanka za mjerenje temperature vanjskog zraka te piranometar za mjerenje Sunčevog zračenja (Slika 47c). Pošto piranometar mjeri samo zračenje u ultraljubičastom dijelu elektromagnetskog spektra (Tablica 13), u slučaju laboratorijskog mjerenja mjerenje piranometrom nije dalo nikakve rezultate pošto grijač unutar komore emitira isključivo infracrveno zračenje. Pošto je konačni cilj mjerenja odrediti U-vrijednost, koja je koeficijent koji opisuje sustav u stacionarnim uvjetima okoline, potrebno je promatranu površinu izolirati od svog dodatnog zračenja i strujanja koja prividno utječu na mjerene toplinske tokove. Zbog smanjenja utjecaja dodatnog zračenja iz okoline na promatranu površinu postavljena je horizontalna i bočna zaštita (Slika 48).



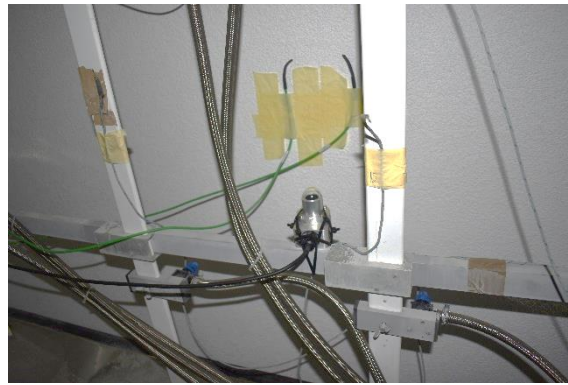
Slika 46: Shema postavljanja mjerne opreme na unutarnjoj površini zida



a)

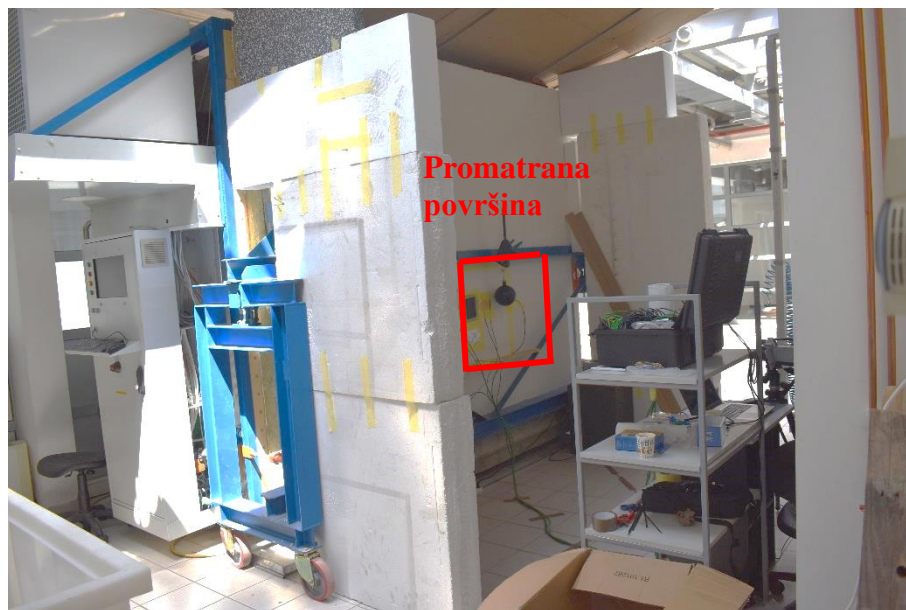


b)



c)

Slika 47: Sustav za mjerenje: a) i b) površina prema laboratoriju, c) površina unutar komore



Slika 48: Zaštita promatrane površine od zračenja okoline

Tablica 15 – Tablica 17 prikazuju svojstva materijala te proračunske vrijednosti koeficijenta prolaska topline (U-vrijednosti) uzoraka zidova ispitivanih u laboratoriju.

Tablica 15: Koeficijent prolaska topline za armiranobetonski zid bez izolacije (4B, 7B i 8B)

Sloj	Materijal	Debljina	Spec. toplinski kapacitet	Gustoća	Toplinska provodljivost
		d [cm]	c_p [J/(kg K)]	ρ [kg/m ³]	λ [W/(m K)]
1	Armirani beton	13,5	1000	2400 – 2500	2,00 – 2,60
Koeficijent prolaska topline					

Unutarnji plošni otpor prolaska topline:	$R_{si} = 0,13$	$(m^2 K)/W$
Vanjski plošni otpor prolaska topline:	$R_{se} = 0,04$	$(m^2 K)/W$
Toplinski otpor homogenih slojeva izraza (114):	$R_d = 0,052 - 0,068$	$(m^2 K)/W$
Koeficijent prolaska topline:	$U = 4,20 - 4,50$	$W/(m^2 K)$

Tablica 16: Proračunski koeficijent prolaska topline za armiranobetonski s izolacijom s vanjske strane (1K, 2K i 3K)

Sloj	Materijal	Debljina	Spec. toplinski kapacitet	Gustoća	Toplinska provodljivost
		d [cm]	c_p [J/(kg K)]	ρ [kg/m ³]	λ [W/(m K)]
1	Armirani beton	13,5	1000	2400 – 2500	2,00 – 2,60
2	Mineralna vuna	16,0	1030	10 – 200	0,035 – 0,050
Koeficijent prolaska topline					
Unutarnji plošni otpor prolaska topline:			$R_{si} = 0,13$	$(m^2 K)/W$	
Vanjski plošni otpor prolaska topline:			$R_{se} = 0,04$	$(m^2 K)/W$	
Toplinski otpor homogenih slojeva izraza (114):			$R_d = 3,92 - 4,81$	$(m^2 K)/W$	
Koeficijent prolaska topline:			$U = 0,21 - 0,29$	$W/(m^2 K)$	

Tablica 17: Proračunski koeficijent prolaska topline za armiranobetonski s izolacijom s unutarnje strane (9S, 10S i 11S)

Sloj	Materijal	Debljina	Spec. toplinski kapacitet	Gustoća	Toplinska provodljivost
		d [cm]	c_p [J/(kg K)]	ρ [kg/m ³]	λ [W/(m K)]
1	EPS	16,0	1260	12 – 30	0,032 – 0,042
2	Armirani beton	13,5	1000	2400 – 2500	2,00 – 2,60

Koeficijent prolaska topline		
Unutarnji plošni otpor prolaska topline:	$R_{si} = 0,13$	$(m^2 K)/W$
Vanjski plošni otpor prolaska topline:	$R_{se} = 0,04$	$(m^2 K)/W$
Toplinski otpor homogenih slojeva izraza (114):	$R_d = 3,86 - 5,07$	$(m^2 K)/W$
Koeficijent prolaska topline:	$U = 0,20 - 0,26$	$W/(m^2 K)$

Drugi dio ispitivanja se odnosi na određivanje toplinskih gubitaka kroz elemente vanjske ovojnice zgrade u realnim uvjetima, tj. na terenu. Terenska ispitivanja su provedena na četiri obiteljske kuće u Hrvatskoj i četiri obiteljske kuće u Mađarskoj. Kod terenskih mjerenja se radilo o kućama u korištenju te nije bilo moguće u potpunosti eliminirati utjecaj ljudi na mjerenje. Oznake ispitanih uzoraka su nazvane prema gradovima na kojima je ispitivanje provedeno:

- Ivanovec
- Lenti
- Muraszemenye
- Mursko Središće
- Palovec
- Tornyszentmiklos
- Totovec
- Vaspor

Tablica 18 – Tablica 25 prikazuju svojstva materijala te proračunske vrijednosti koeficijenta prolaska topline (U-vrijednosti) uzoraka zidova ispitivanih na terenu. Pošto u slučaju terenskih ispitivanja nisu poznate stvarne karakteristike ugrađenih materijala, one su dane unutar pretpostavljenih granica te su uzete iz Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama [1].

Tablica 18: Proračunski koeficijent prolaska topline za Ivanovec

Sloj	Materijal	Debljina	Spec. toplinski kapacitet	Gustoća	Toplinska provodljivost
		d [cm]	c_p [J/(kg K)]	ρ [kg/m ³]	λ [W/(m K)]
1	3.04 - vapneno-gipsana žbuka (1400)	3,00	1000	1400	0,700
2	1.11 - šuplji blokovi od gline (800)	19,00	900	800 – 1100	0,390 – 0,480
3	7.01 mineralna vuna (MW) prema HRN EN 13162)	5,00	1030	10 – 200	0,035 – 0,050
4	Saćasta i šuplja opeka (1200)	12,00	900	1200	0,550
5	3.04 - vapneno-gipsana žbuka (1400)	3,00	1000	1400	0,700
Koeficijent prolaska topline					
Unutarnji plošni otpor prolaska topline:				$R_{si} = 0,13$	(m ² K)/W
Vanjski plošni otpor prolaska topline:				$R_{se} = 0,04$	(m ² K)/W
Toplinski otpor homogenih slojeva izraza (114):				$R_d = 1,70 - 2,22$	(m ² K)/W
Koeficijent prolaska topline:				$U = 0,42 - 0,53$	W/(m ² K)

Tablica 19: Proračunski koeficijent prolaska topline za Lenti

Sloj	Materijal	Debljina	Spec. toplinski kapacitet	Gustoća	Toplinska provodljivost
		d [cm]	c_p [J/(kg K)]	ρ [kg/m ³]	λ [W/(m K)]
1	3.03 - vapneno-	2,00	1000	1800	1,000

	cementna žbuka (1800)				
2	1.02 – puna opeka od gline (1600)	38,00	900	1600 – 1800	0,680 – 0,810
3	3.03 - vapneno- cementna žbuka (1800)	2,00	1000	1800	1,000
4	7.02 – ekspandirani polistiren	8,00	1260	12 – 30	0,032 – 0,042
5	3.16 – silikatna žbuka	0,50	1000	1800	0,90
Koeficijent prolaska topline					
Unutarnji plošni otpor prolaska topline:				$R_{si} = 0,13$	$(m^2 K)/W$
Vanjski plošni otpor prolaska topline:				$R_{se} = 0,04$	$(m^2 K)/W$
Toplinski otpor homogenih slojeva izraza (114):				$R_d = 2,97 – 3,65$	$(m^2 K)/W$
Koeficijent prolaska topline:				$U = 0,26 – 0,32$	$W/(m^2 K)$

Tablica 20: Proračunski koeficijent prolaska topline za Muraszemenye

Sloj	Materijal	Debljina	Spec. toplinski kapacitet	Gustoća	Toplinska provodljivost
		d [cm]	c_p [J/(kg K)]	ρ [kg/m ³]	λ [W/(m K)]
1	3.03 - vapneno- cementna žbuka (1800)	2,00	1000	1800	1,000
2	1.02 – puna opeka od gline (1600)	38,00	900	1600 – 1800	0,680 – 0,810
3	3.03 - vapneno- cementna žbuka (1800)	2,00	1000	1800	1,000
Koeficijent prolaska topline					

Unutarnji plošni otpor prolaska topline:	$R_{si} = 0,13$	$(m^2 K)/W$
Vanjski plošni otpor prolaska topline:	$R_{se} = 0,04$	$(m^2 K)/W$
Toplinski otpor homogenih slojeva izraza (114):	$R_d = 0,51 - 0,60$	$(m^2 K)/W$
Koeficijent prolaska topline:	$U = 1,30 - 1,47$	$W/(m^2 K)$

Tablica 21: Proračunski koeficijent prolaska topline za Mursko Središće

Sloj	Materijal	Debljina	Spec. toplinski kapacitet	Gustoća	Toplinska provodljivost
		d [cm]	c_p [J/(kg K)]	ρ [kg/m ³]	λ [W/(m K)]
1	3.04 - vapneno-gipsana žbuka (1400)	2,50	1000	1400	0,700
2	1.02 – puna opeka od gline (1600)	29,00	900	1600 – 1800	0,680 – 0,810
Koeficijent prolaska topline					
Unutarnji plošni otpor prolaska topline:		$R_{si} = 0,13$		$(m^2 K)/W$	
Vanjski plošni otpor prolaska topline:		$R_{se} = 0,04$		$(m^2 K)/W$	
Toplinski otpor homogenih slojeva izraza (114):		$R_d = 0,39 - 0,46$		$(m^2 K)/W$	
Koeficijent prolaska topline:		$U = 1,59 - 1,79$		$W/(m^2 K)$	

Tablica 22: Proračunski koeficijent prolaska topline za Palovec

Sloj	Materijal	Debljina	Spec. toplinski kapacitet	Gustoća	Toplinska provodljivost
		d [cm]	c_p [J/(kg K)]	ρ [kg/m ³]	λ [W/(m K)]
1	3.03 - vapneno-cementna žbuka (1800)	2,00	1000	1800	1,000

2	1.02 – puna opeka od gline (1600)	38,00	900	1600 – 1800	0,680 – 0,810
3	3.03 - vapneno-cementna žbuka (1800)	2,00	1000	1800	1,000
Koeficijent prolaska topline					
Unutarnji plošni otpor prolaska topline:			$R_{si} = 0,13$	$(m^2 K)/W$	
Vanjski plošni otpor prolaska topline:			$R_{se} = 0,04$	$(m^2 K)/W$	
Toplinski otpor homogenih slojeva izraza (114):			$R_d = 0,51 - 0,60$	$(m^2 K)/W$	
Koeficijent prolaska topline:			$U = 1,30 - 1,47$	$W/(m^2 K)$	

Tablica 23: Proračunski koeficijent prolaska topline za Tornyszentmiklos

Sloj	Materijal	Debljina	Spec. toplinski kapacitet	Gustoća	Toplinska provodljivost
		d [cm]	c_p [J/(kg K)]	ρ [kg/m ³]	λ [W/(m K)]
1	3.03 - vapneno-cementna žbuka (1800)	2,00	1000	1800	1,000
2	1.02 – puna opeka od gline (1600)	38,00	900	1600 – 1800	0,680 – 0,810
3	3.03 - vapneno-cementna žbuka (1800)	2,00	1000	1800	1,000
Koeficijent prolaska topline					
Unutarnji plošni otpor prolaska topline:			$R_{si} = 0,13$	$(m^2 K)/W$	
Vanjski plošni otpor prolaska topline:			$R_{se} = 0,04$	$(m^2 K)/W$	
Toplinski otpor homogenih slojeva izraza (114):			$R_d = 0,51 - 0,60$	$(m^2 K)/W$	
Koeficijent prolaska topline:			$U = 1,30 - 1,47$	$W/(m^2 K)$	

Tablica 24: Proračunski koeficijent prolaska topline za Totovec

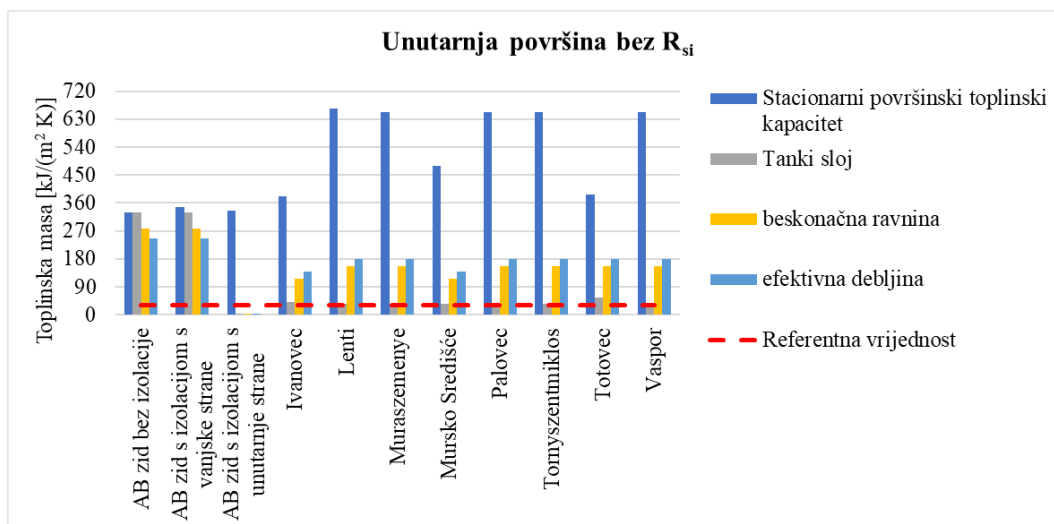
Sloj	Materijal	Debljina	Spec. toplinski kapacitet	Gustoća	Toplinska provodljivost
		d [cm]	c_p [J/(kg K)]	ρ [kg/m ³]	λ [W/(m K)]
1	3.03 - vapneno-cementna žbuka (1800)	3,00	1000	1800	1,000
2	1.08 - šuplji blokovi od gline (1100)	29,00	900	800 – 1100	0,390 – 0,480
3	3.03 - vapneno-cementna žbuka (1800)	4,00	1000	1800	1,000
4	3.12 - toplinsko-izolacijska žbuka (400)	4,00	1000	250 – 400	0,080 – 0,110
Koeficijent prolaska topline					
Unutarnji plošni otpor prolaska topline:				$R_{si} = 0,13$	(m ² K)/W
Vanjski plošni otpor prolaska topline:				$R_{se} = 0,04$	(m ² K)/W
Toplinski otpor homogenih slojeva izraza (114):				$R_d = 1,02 - 1,29$	(m ² K)/W
Koeficijent prolaska topline:				$U = 0,68 - 0,84$	W/(m ² K)

Tablica 25: Proračunski koeficijent prolaska topline za Vaspur

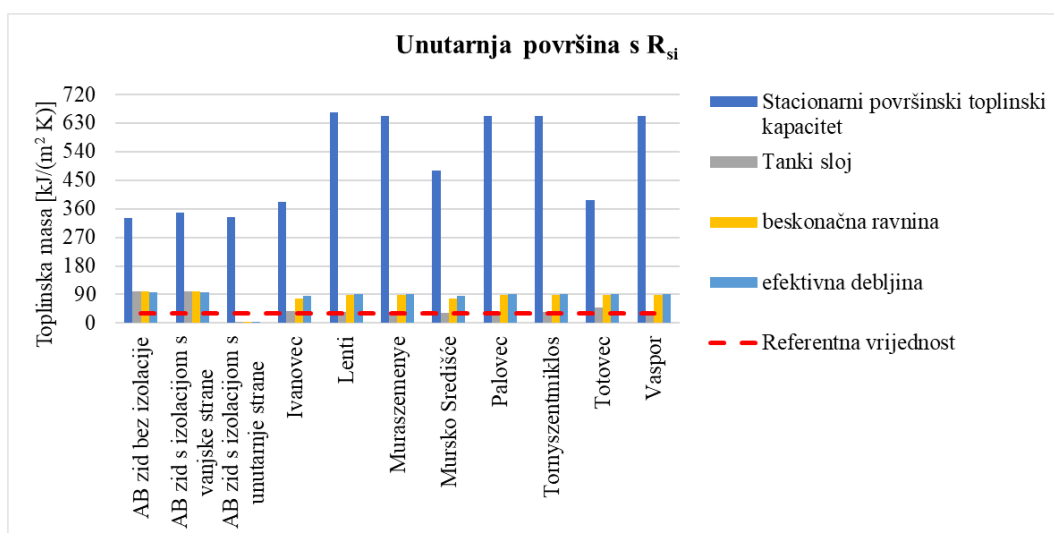
Sloj	Materijal	Debljina	Spec. toplinski kapacitet	Gustoća	Toplinska provodljivost
		d [cm]	c_p [J/(kg K)]	ρ [kg/m ³]	λ [W/(m K)]
1	3.03 - vapneno-cementna žbuka (1800)	2,00	1000	1800	1,000

2	1.02 – puna opeka od gline (1600)	38,00	900	1600 – 1800	0,680 – 0,810
3	3.03 - vapneno-cementna žbuka (1800)	2,00	1000	1800	1,000
Koeficijent prolaska topline					
Unutarnji plošni otpor prolaska topline:				$R_{si} = 0,13$	$(m^2 K)/W$
Vanjski plošni otpor prolaska topline:				$R_{se} = 0,04$	$(m^2 K)/W$
Toplinski otpor homogenih slojeva izraza (114):				$R_d = 0,51 – 0,60$	$(m^2 K)/W$
Koeficijent prolaska topline:				$U = 1,30 – 1,47$	$W/(m^2 K)$

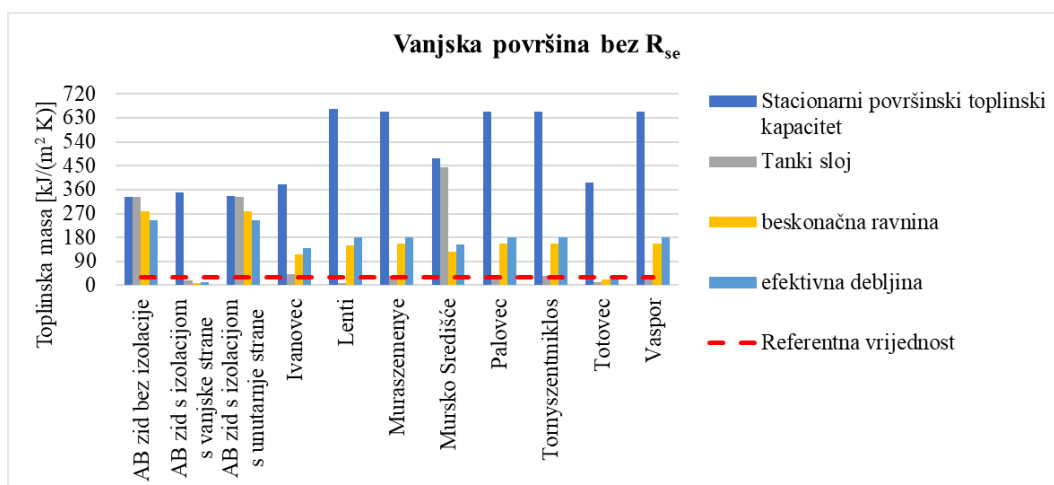
Slika 49 – Slika 52 prikazuju toplinske mase uzoraka određene prema postupku opisanom u normi HRN EN ISO 13786 [109] za slučajeve: stacionarnog površinskog toplinskog kapaciteta, tankog sloja, beskonačne ravnine i efektivne debljine. Površinski kapaciteti su određeni za unutarnju i vanjsku površinu s i bez utjecaja strujanja i zračenja po površini. Pošto nisu poznate debljine ugrađenih slojeva, potrebno je pretpostaviti debljine slojeva, tj. dubinu penetracije toplinskog vala. Prema normi HRN EN ISO 13786 to je moguće napraviti pretpostavljanjem dubine penetracije toplinskog vala i to na način da se pretpostavi: tanki sloj ili efektivna dubina penetracije. Nadalje, toplinsku masu je moguće odrediti na način da se površinski toplinski kapacitet odredi za stacionarne rubne uvjete na površini (stacionarni površinski toplinski kapacitet). U slučaju kada se pretpostavlja da je debljina zida veća od dvostruke penetracijske dubine toplinskog vala tada se zid može smatrati beskonačnim medijem te je površinski toplinski kapacitet određen za beskonačnu ravninu. Referentna vrijednost od $30 \text{ kJ}/(m^2 \text{ K})$ je uzeta iz norme HRN EN ISO 9869-1 [83]. Pošto su toplinske mase veće od referentne vrijednosti za sve uzorke, elementi vanjske ovojnice zgrade ispitivani u ovom istraživanju se smatraju toplinski teškim elementima te je primjenjivost metode HFM ograničena. Ovo ograničenje je moguće zaobići produljenjem vremena mjerenja što je u ovom radu i napravljeno. Međutim, akumulacija topline u elementima je značajna, pogotovo na dinamičku metodu proračuna kod koje se povećanjem mjernih točaka eksponencijalno povećava vrijeme analize pa je u poglavlju 6.3.1.2 pokazano da je ta metoda u slučaju teških građevnih elemenata neprimjenjiva.



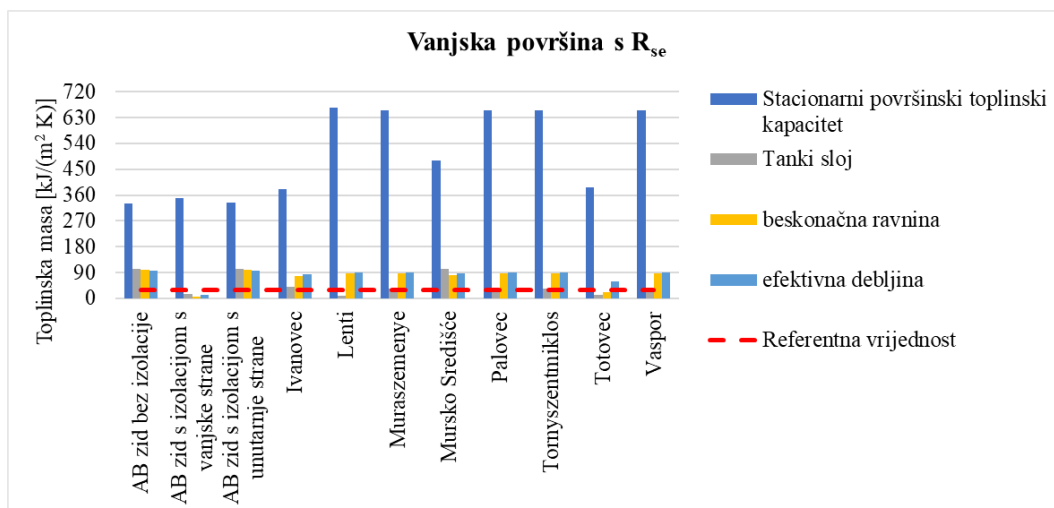
Slika 49: Toplinska masa uzoraka za unutarnju površinu bez plošnog prijelaza topline



Slika 50: Toplinska masa uzoraka za unutarnju površinu s plošnim prijelazom topline

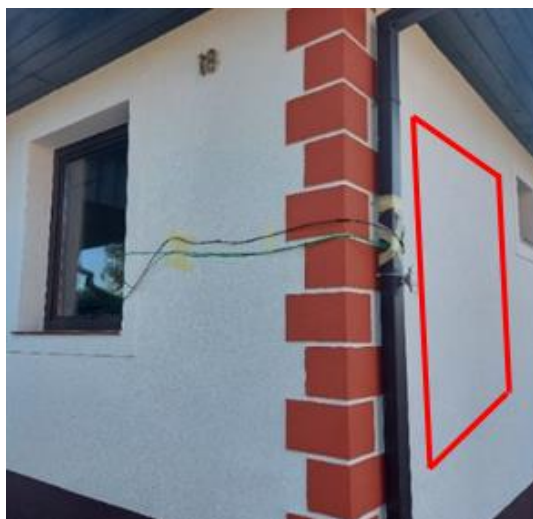


Slika 51: Toplinska masa uzoraka za vanjsku površinu bez plošnog prijelaza topline



Slika 52: Toplinska masa uzoraka za vanjsku površinu s plošnim prijelazom topline

Slika 53 i Tablica 26 prikazuje sustav za mjerenje U-vrijednosti metodama HFM i ICT postavljenom na unutarnju površinu te izgled vanjske površine promatranog elementa vanjske ovojnice zgrade. U Prilogu 1 su prikazani tlocrti obiteljskih kuća te orijentacije ispitivanih zidova.



a) Ivanovec



b) Lenti



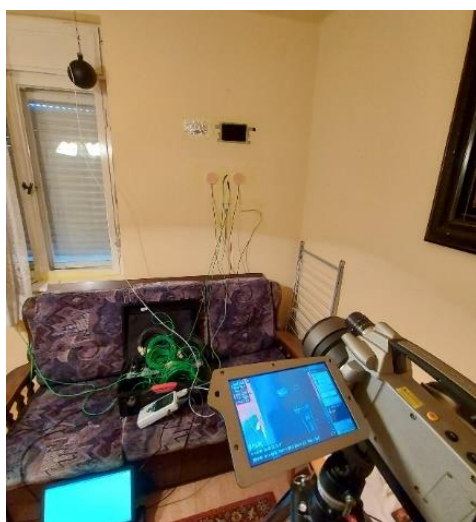
c) Murszemenye



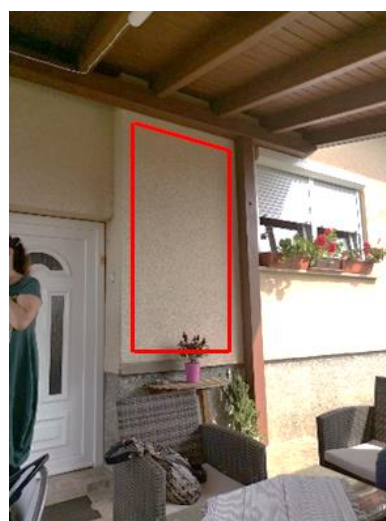
d) Mursko Središće



e) Palovec



f) Tornyszentmiklos



g) Totovec


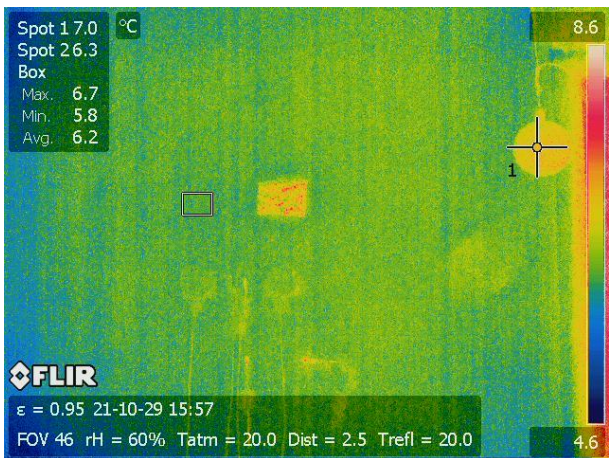
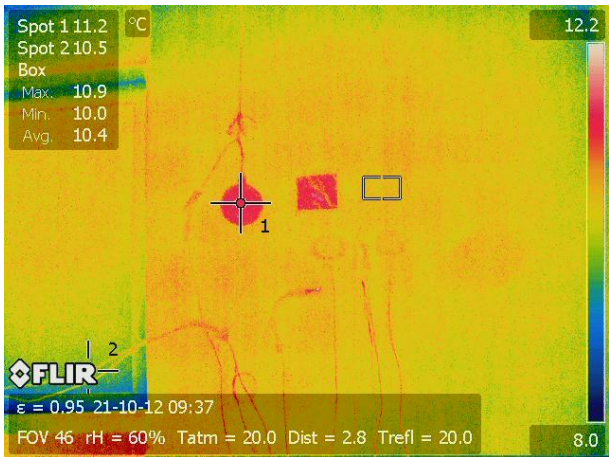


h) Vapori

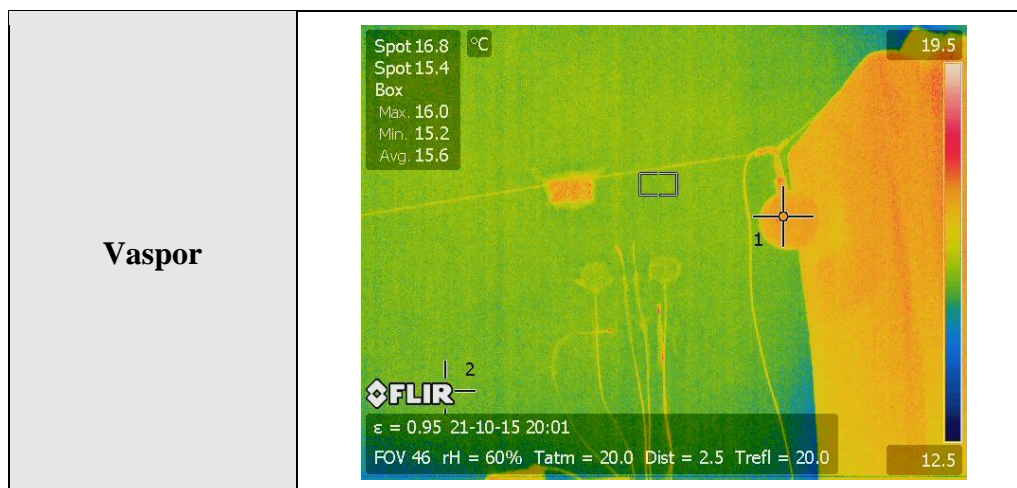
Slika 53: Prikaz postavljenog mjerenja i mjerenih površina (crvenom bojom je na vanjskoj površini zida prikazana mjerena površina)

Tablica 26: Prikaz snimljenih termograma ispitivane površine

Oznaka uzorka	Termogram
Ivanovec	<p>Spot 1 21.8 °C Spot 2 21.8 Box Max. 22.5 Min. 21.4 Avg. 21.9</p> <p>FLIR ε = 0.95 21-09-14 01:26 FOV 46 rH = 60% Tatm = 20.0 Dist = 2.3 Trefl = 20.0</p>

<p>Lenti</p>	
<p>Muraszemenye</p>	
<p>Mursko Središće</p>	

<p>Palovec</p>	
<p>Tornyszentmiklos</p>	
<p>Totovec</p>	



Tablica 27 prikazuje dimenzije ispitivanog elementa vanjske ovojnice zgrade, udaljenost kamere od površine te najbližu udaljenost toplinskog mosta od promatranog dijela površine.

Tablica 27: Parametri određeni prije početka mjerenja

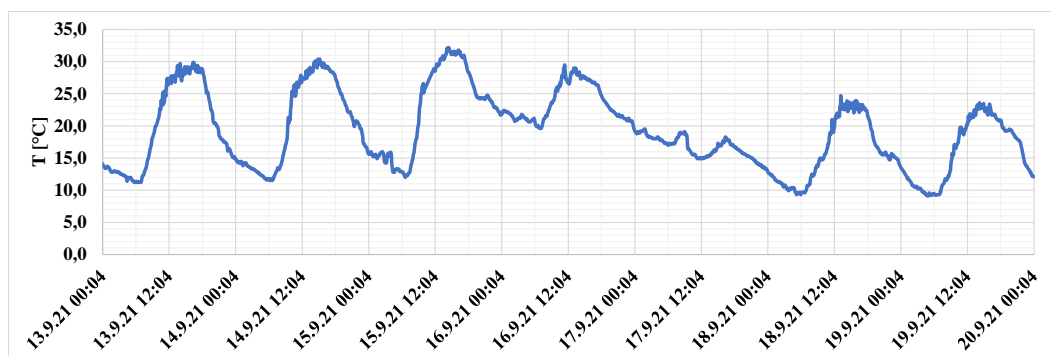
Oznaka uzorka	Orijentacija	Bruto dimenzije površine b × h [cm]	Udaljenost kamere [cm]	Najbliža udaljenost toplinskog mosta [cm]
AB zid	–	290 × 277	180	50
AB zid s izolacijom s vanjske strane	–	290 × 277	180	50
AB zid s izolacijom s unutarnje strane	–	290 × 277	180	50
Ivanovec	S	150 × 250	200	50
Lenti	I	200 × 250	250	50
Muraszemenye	Z	200 × 250	200	50
Mursko Središće	S	175 × 252	208	60
Palovec	J	305 × 256	164	95
Tornyszentmiklos	J	200 × 250	200	50
Totovec	Z	150 × 250	230	30
Vaspor	S	450 × 350	250	60

Tablica 28 prikazuje trajanje ispitivanja za sve ispitivane uzorke. Trajanje ispitivanja prema normi HRN EN ISO 9869-1 [83] iznosi minimalno 72 sata. Jedini uzorak koji ne zadovoljava taj kriterij je uzorak 4B zbog nestanka struje tijekom mjerenja. Broj izmjerenih točaka (Tablica 28) je broj 10-minutnih mjerenja napravljenih unutar početka i kraja ispitivanja.

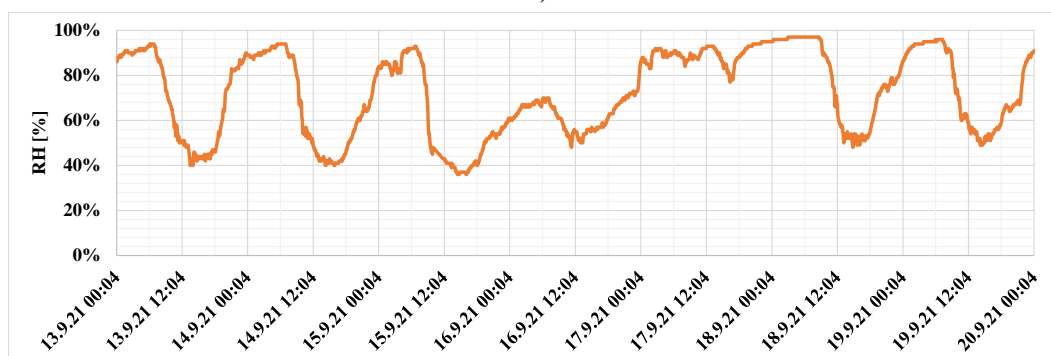
Tablica 28: Trajanje ispitivanja

Oznaka uzorka	Početak [dd. mm. yyyy. hh:mm]	Kraj [dd. mm. yyyy. hh:mm]	Trajanje [h]	Broj izmjerenih točaka
1K	13. 12. 2021. 16:02	17. 12. 2021. 9:12	89	420
2K	3. 1. 2022. 15:12	9. 1. 2022. 7:23	136	822
3K	13. 1. 2022. 12:41	19. 1. 2022. 6:32	138	830
4B	26. 1. 2022. 12:56	1. 2. 2022. 7:57	139	837
7B	21. 2. 2022. 11:00	27. 2. 2022. 5:21	138	833
8B	28. 2. 2022. 11:18	3. 3. 2022. 6:58	68	409
9S	10. 3. 2022. 9:41	16. 3. 2022. 8:52	143	855
10S	16. 3. 2022. 13:21	22. 3. 2022. 3:32	134	808
11S	23. 3. 2022. 14:42	29. 3. 2022. 5:02	134	809
Ivanovec	13. 9. 2021. 16:56	19. 9. 2021. 8:27	136	816
Lenti	16. 11. 2021. 17:18	22. 11. 2021. 11:19	138	824
Muraszemenye	29. 10. 2021. 9:47	4. 11. 2021. 00:18	135	804
Mursko Središće	6. 10. 2021. 16:32	12. 10. 2021. 9:23	137	817
Palovec	23. 9. 2021. 13:44	30. 9. 2021. 8:55	163	976
Tornyszentmiklos	22. 10. 2021. 10:14	28. 10. 2021. 9:55	144	858
Totovec	7. 9. 2021. 16:42	13. 9. 2021. 5:33	133	792
Vaspor	15. 10. 2021. 10:53	21. 10. 2021. 5:03	138	825

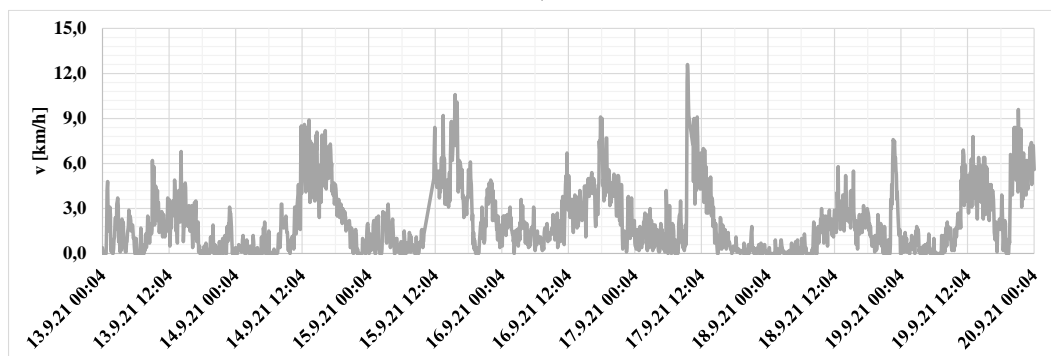
Slika 54 – Slika 61 prikazuju stvarne vremenske uvjete u periodima ispitivanja na terenu.



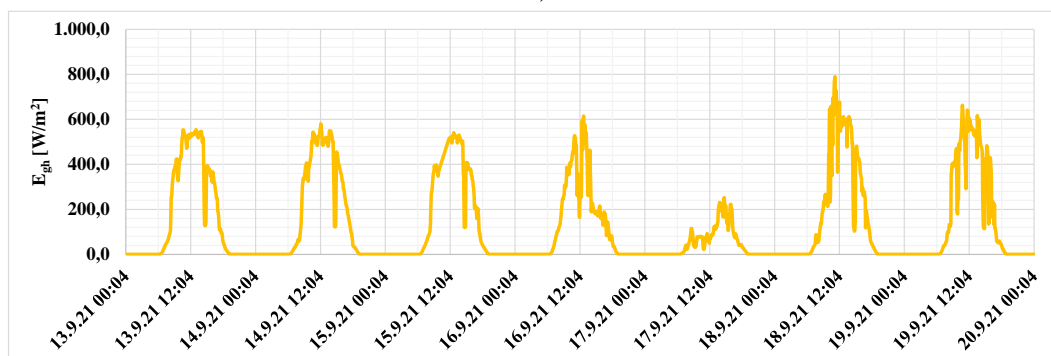
a)



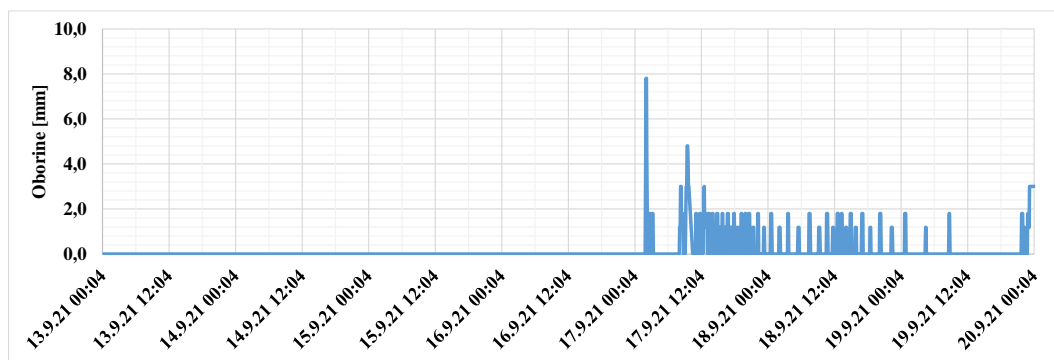
b)



c)

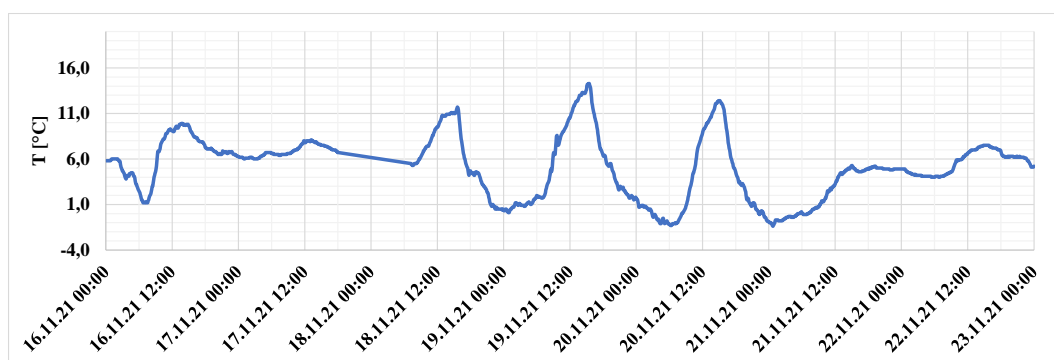


d)

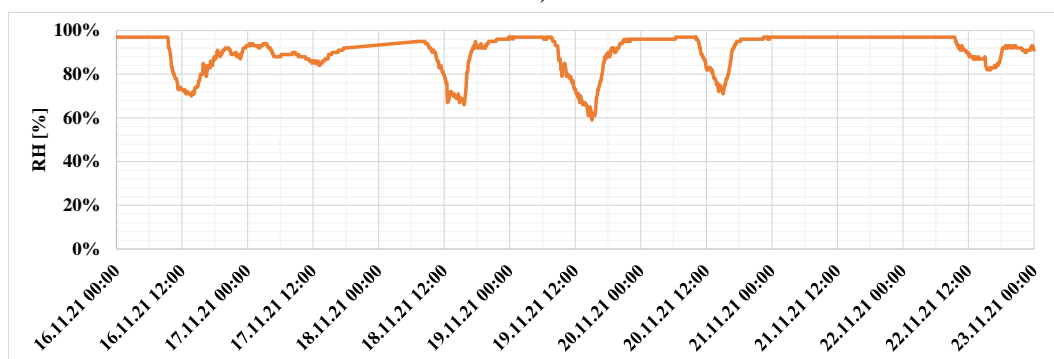


e)

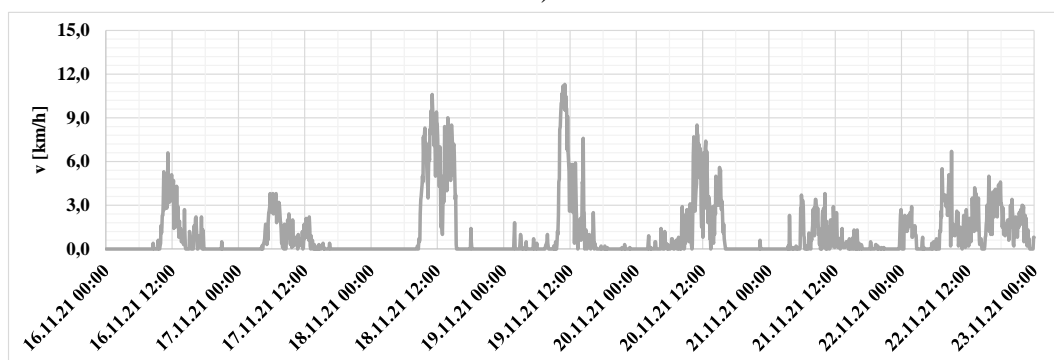
Slika 54: Podaci vremenske prognoze za Ivanovec: a) Temperatura zraka, b) Relativna vlažnost zraka, c) Brzina vjetrova, d) Sunčevo zračenje i e) Količina oborina (podaci preuzeti s [110])



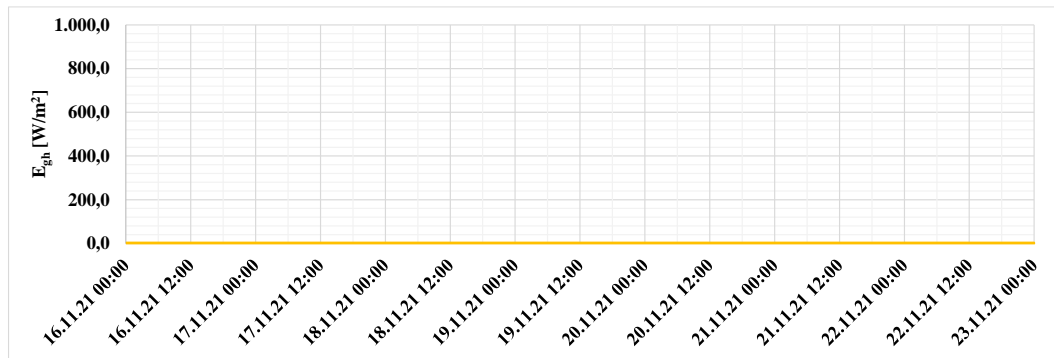
a)



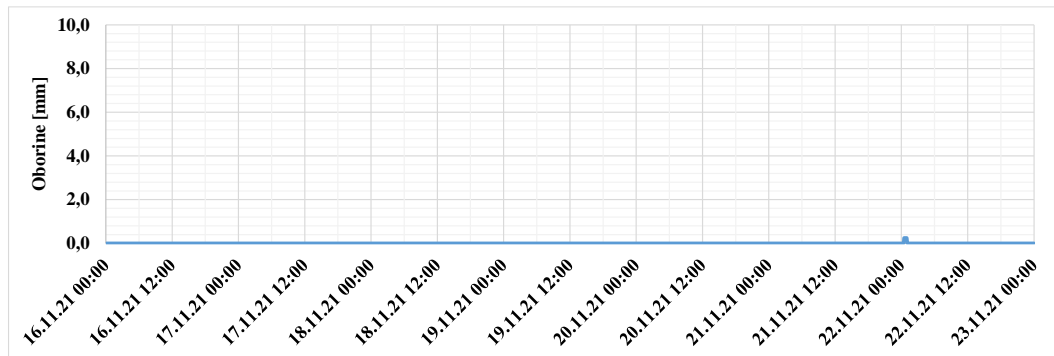
b)



c)

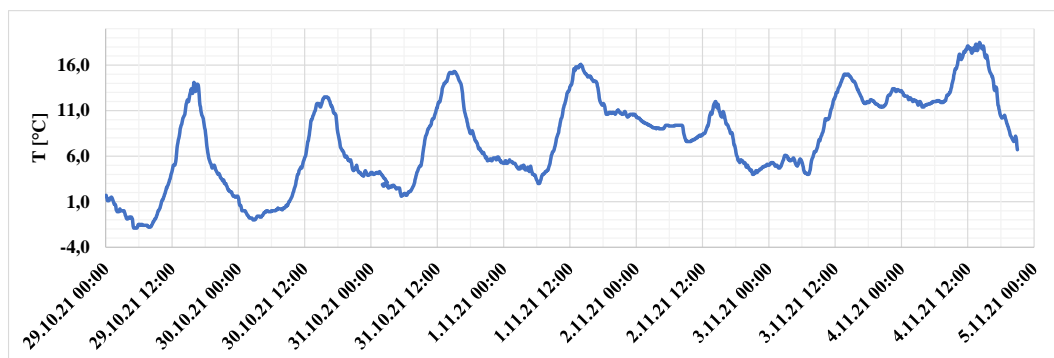


d)

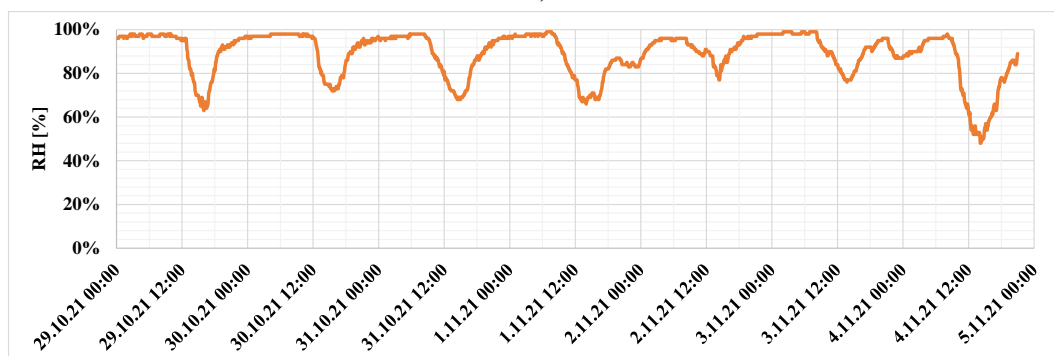


e)

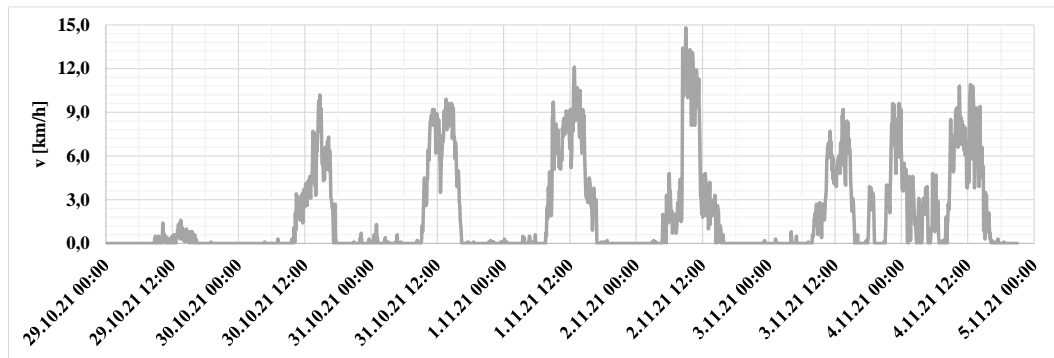
Slika 55: Podaci vremenske prognoze za Lenti: a) Temperatura zraka, b) Relativna vlažnost zraka, c) Brzina vjetra, d) Sunčevo zračenje i e) Količina oborina (podaci preuzeti s [110])



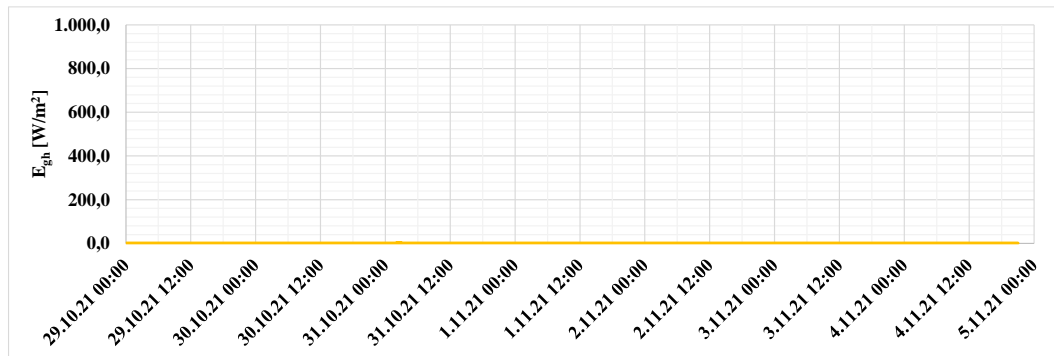
a)



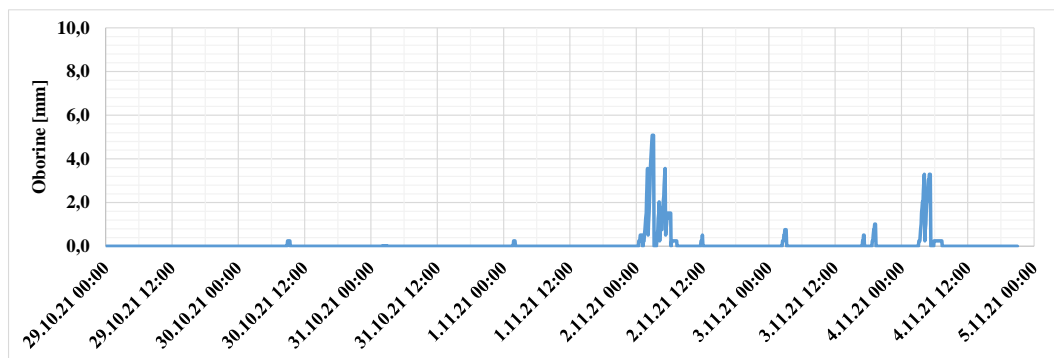
b)



c)

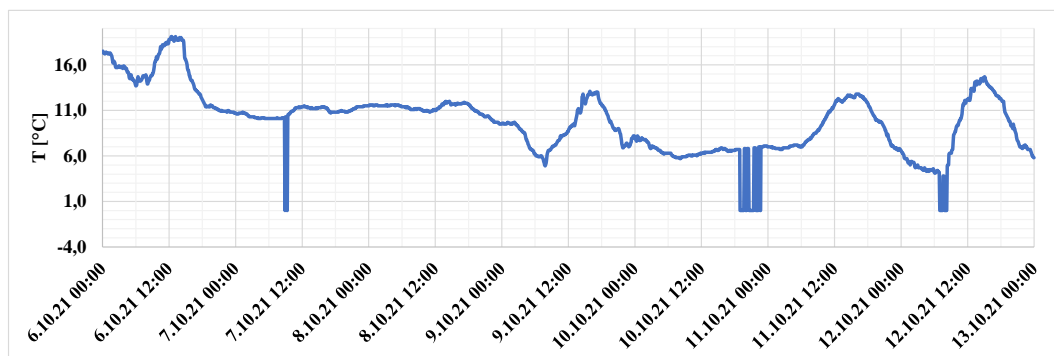


d)

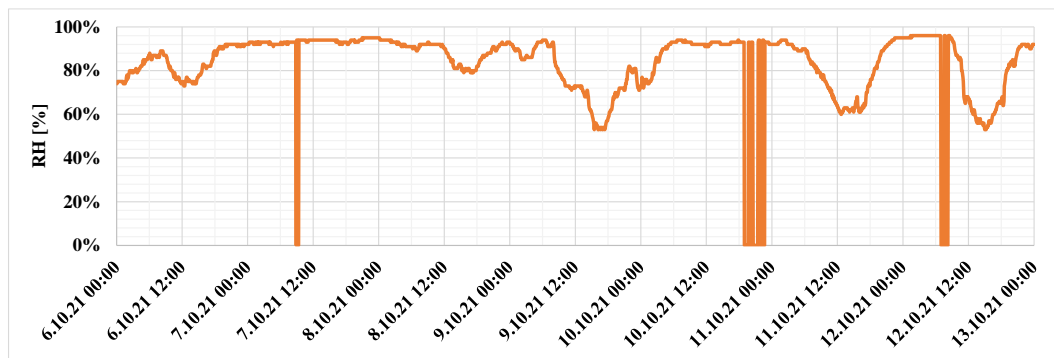


e)

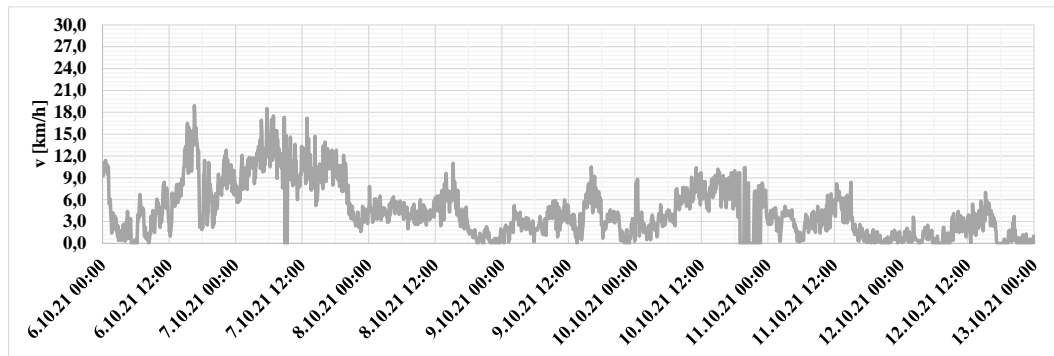
Slika 56: Podaci vremenske prognoze za Muraszemenye: a) Temperatura zraka, b) Relativna vlažnost zraka, c) Brzina vjetera, d) Sunčevo zračenje i e) Količina oborina (podaci preuzeti s [110])



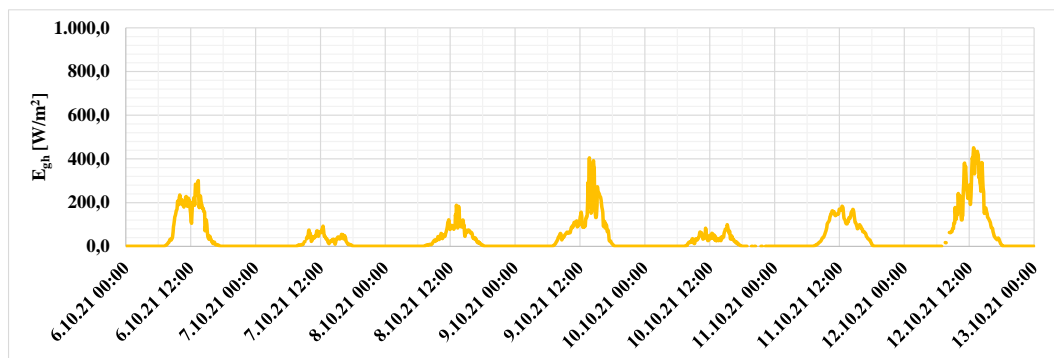
a)



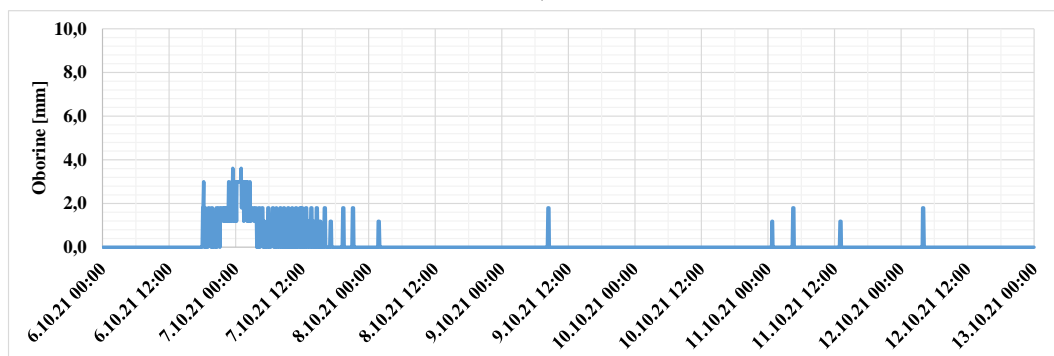
b)



c)

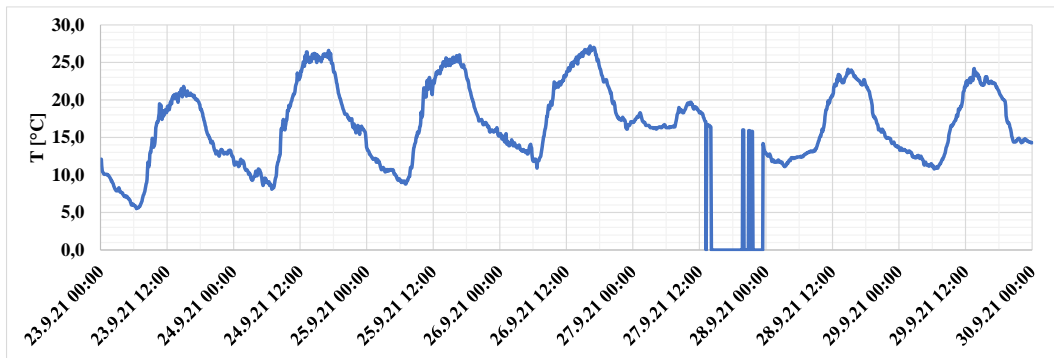


d)

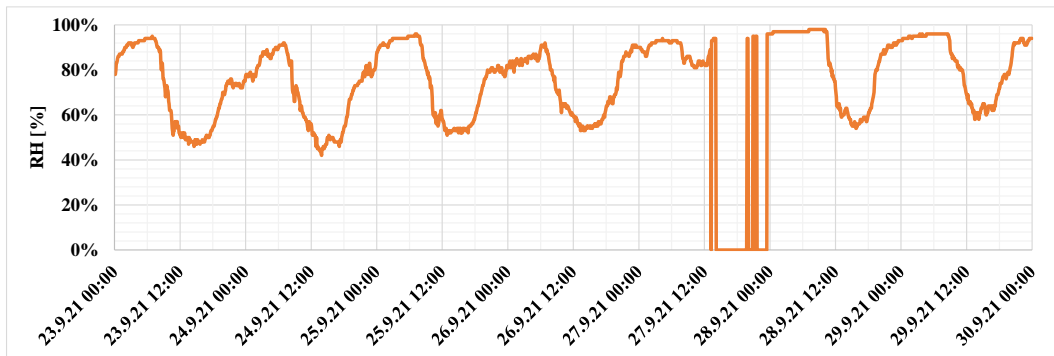


e)

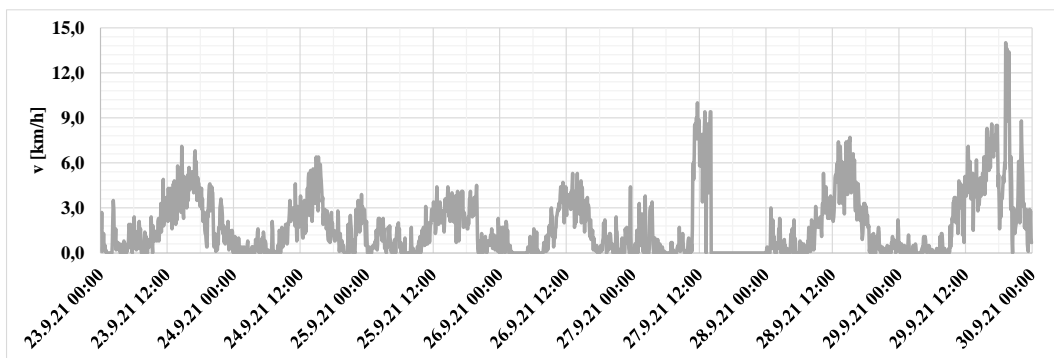
Slika 57: Podaci vremenske prognoze za Mursko Središće: a) Temperatura zraka, b) Relativna vlažnost zraka, c) Brzina vjetra, d) Sunčevo zračenje i e) Količina oborina (podaci preuzeti s [110])



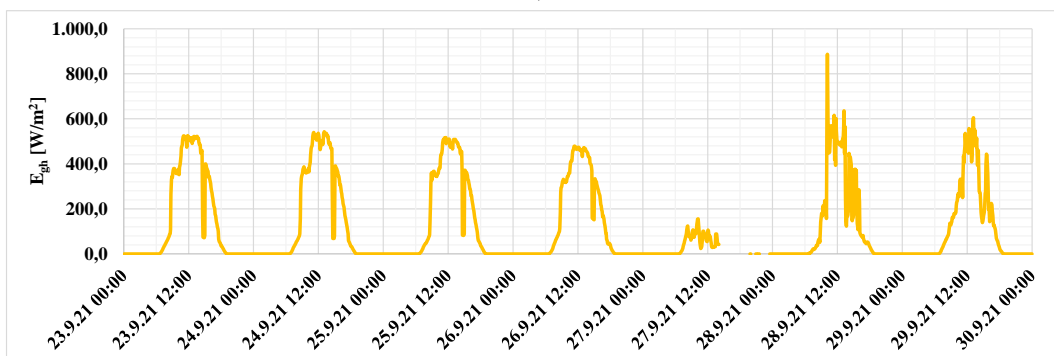
a)



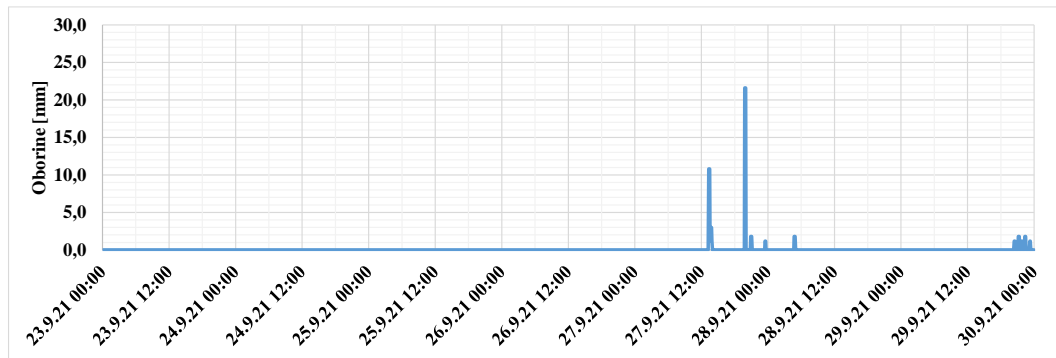
b)



c)

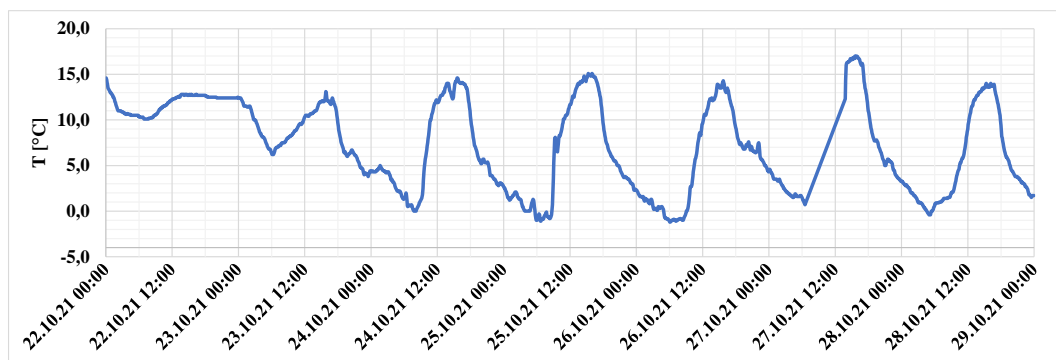


d)

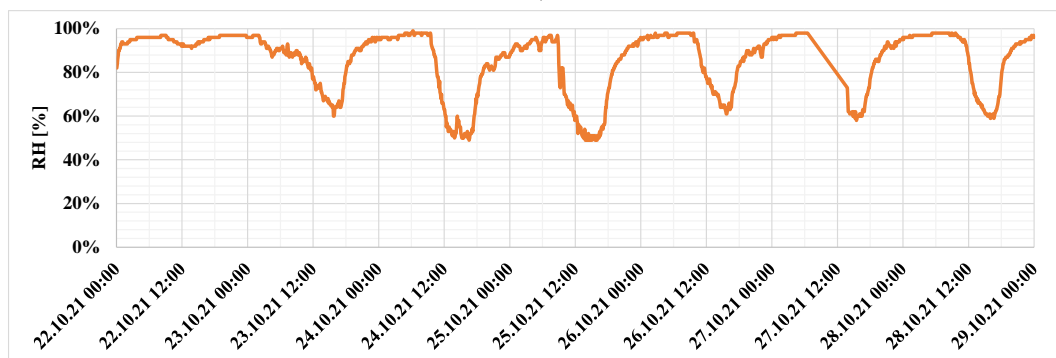


e)

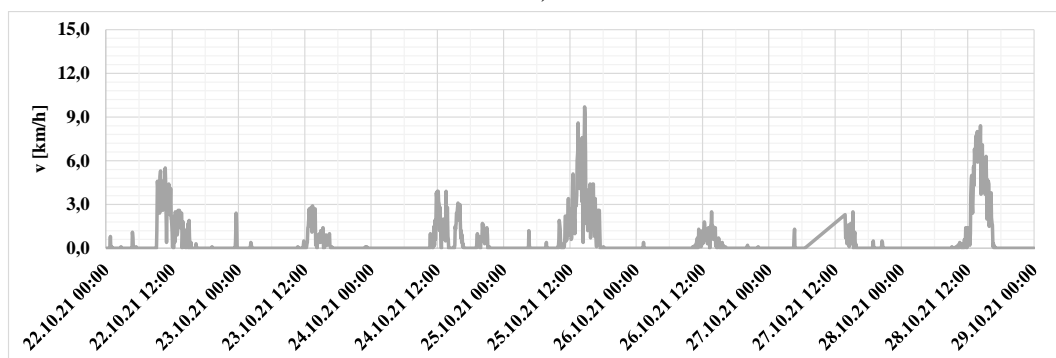
Slika 58: Podaci vremenske prognoze za Palovec: a) Temperatura zraka, b) Relativna vlažnost zraka, c) Brzina vjeta, d) Sunčevo zračenje i e) Količina oborina (podaci preuzeti s [110])



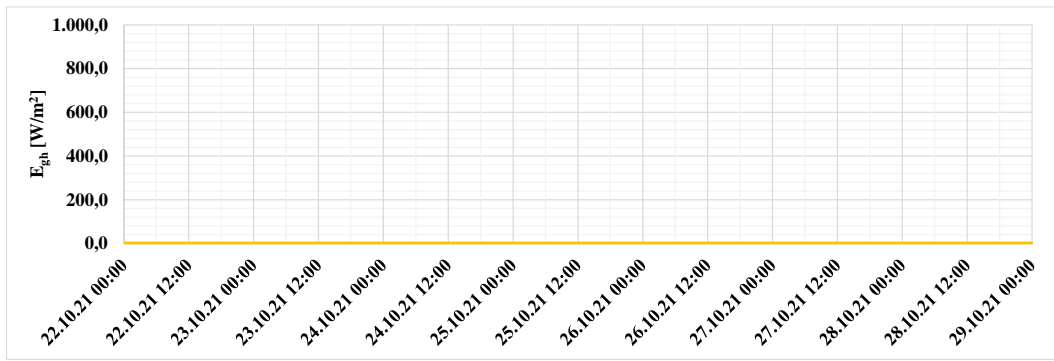
a)



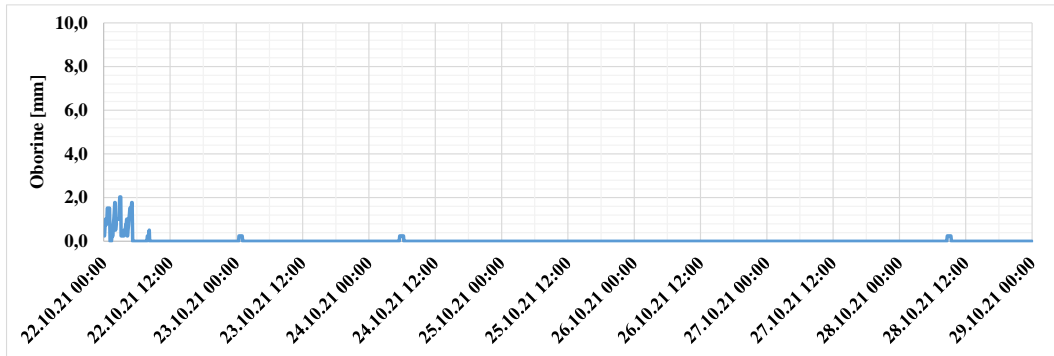
b)



c)

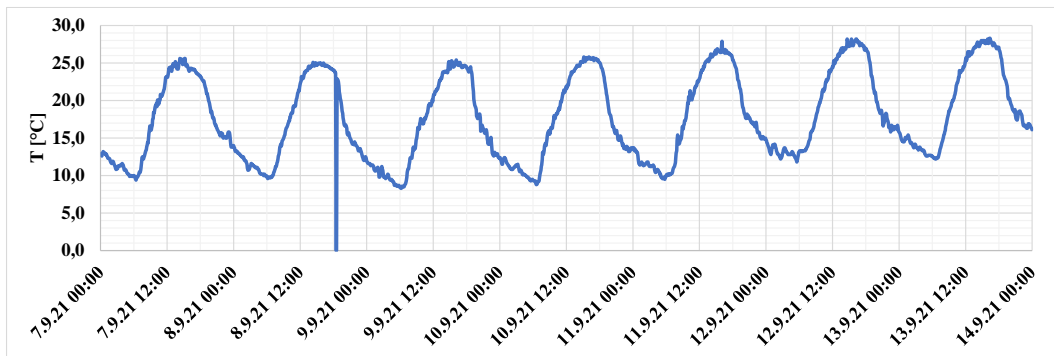


d)

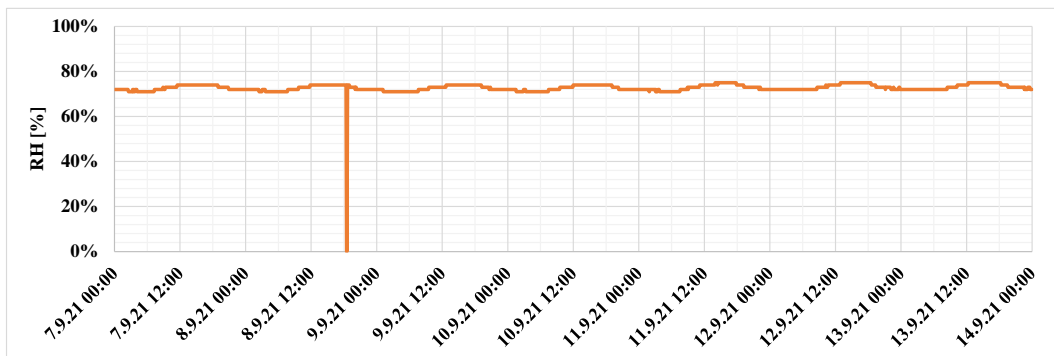


e)

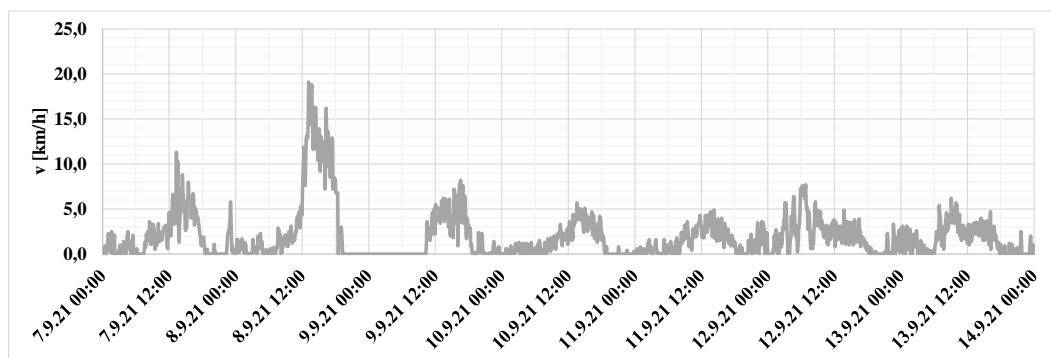
Slika 59: Podaci vremenske prognoze za Tornyszentmiklos: a) Temperatura zraka, b) Relativna vlažnost zraka, c) Brzina vjetra, d) Sunčevo zračenje i e) Količina oborina (podaci preuzeti s [110])



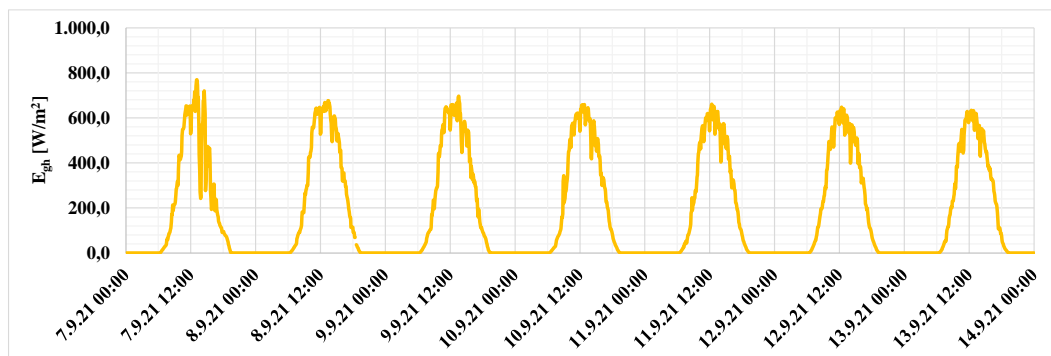
a)



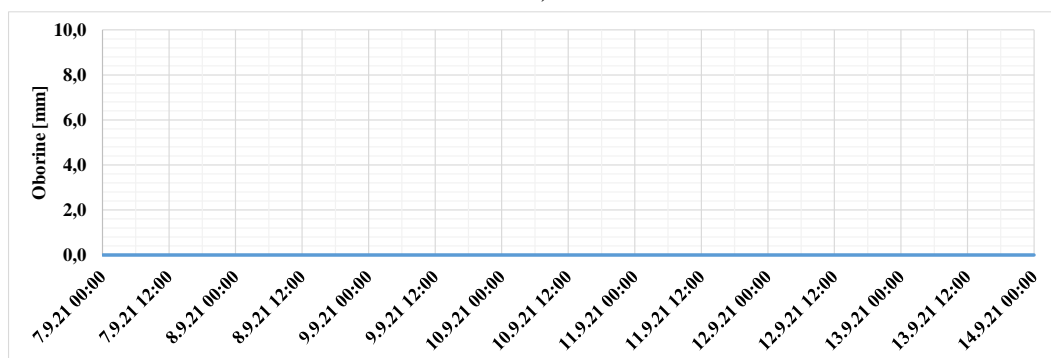
b)



c)

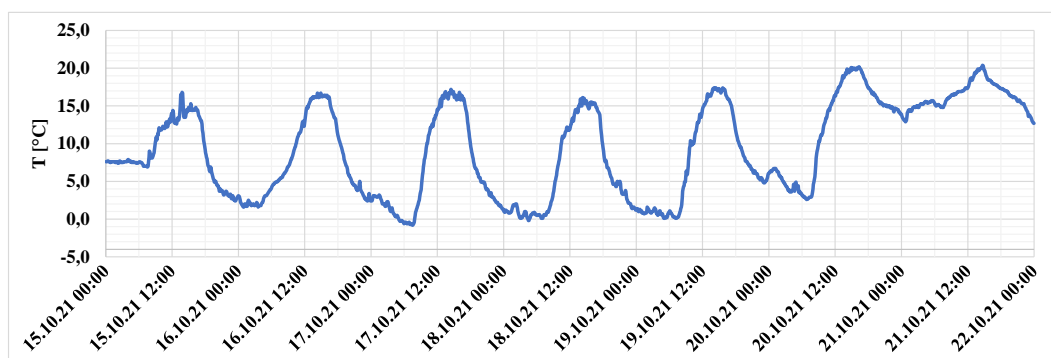


d)

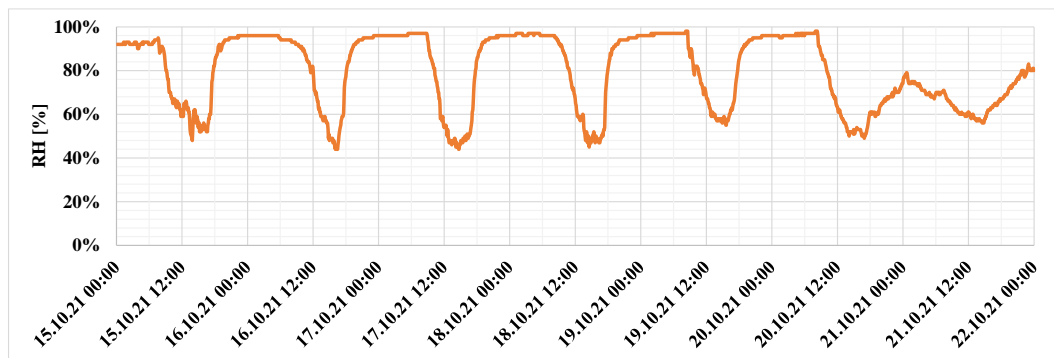


e)

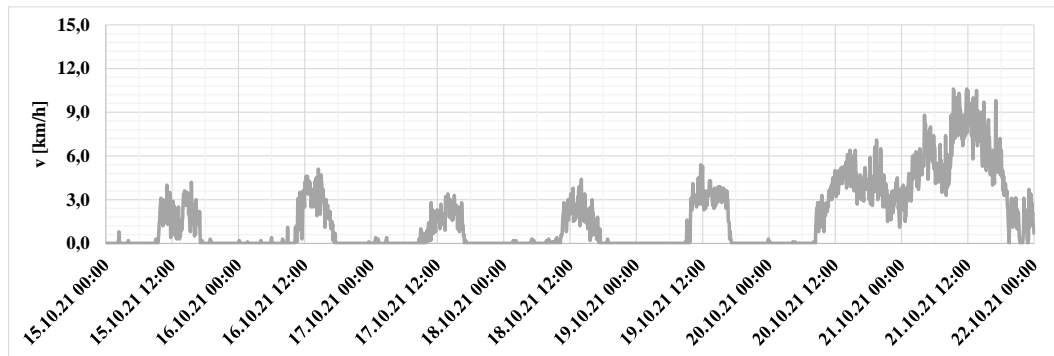
Slika 60: Podaci vremenske prognoze za Totovec: a) Temperatura zraka, b) Relativna vlažnost zraka, c) Brzina vjetera, d) Sunčevo zračenje i e) Količina oborina (podaci preuzeti s [110])



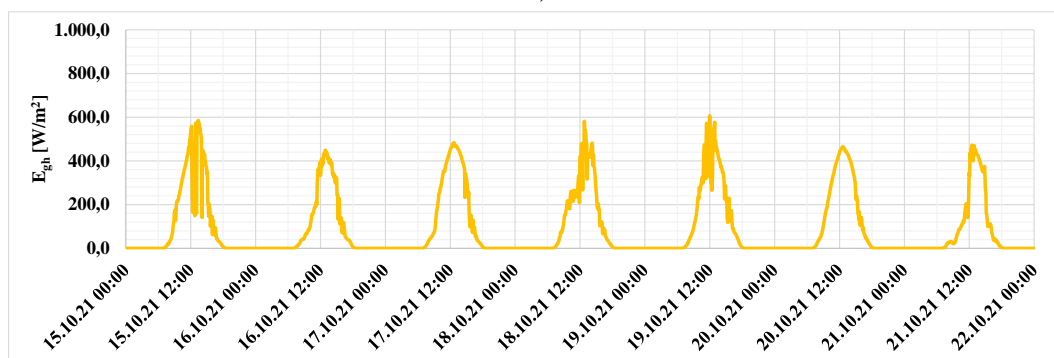
a)



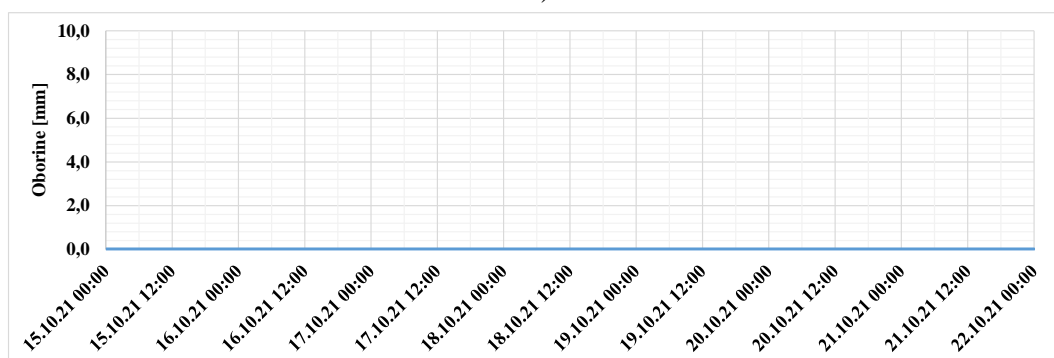
b)



c)



d)



e)

Slika 61: Podaci vremenske prognoze za Vaspov: a) Temperatura zraka, b) Relativna vlažnost zraka, c) Brzina vjeta, d) Sunčevo zračenje i e) Količina oborina (podaci preuzeti s [110])

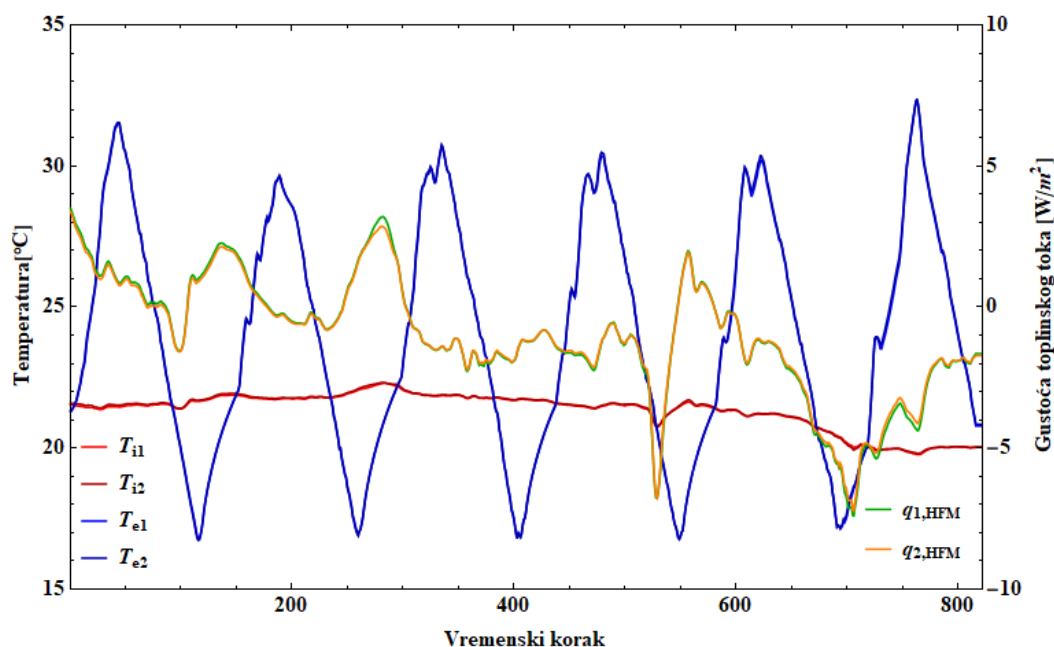
5 Metodologija

U nastavku će se prikazati postupak izračuna U-vrijednosti metodama HFM i ICT. Sve slike koje se odnose na ispitivanje biti će prikazane za uzorak 2K (AB zid s toplinskom izolacijom s vanjske strane – za prijelazno razdoblje).

5.1 Ulazni parametri

5.1.1 HFM

Mjerenje HFM-om se svodi na određivanje temperature unutarnjeg i vanjskog zraka termočlancima te određivanje toplinskog toka tokomjerom. Slika 62 prikazuje rezultate mjerenja za uzorak 2K.

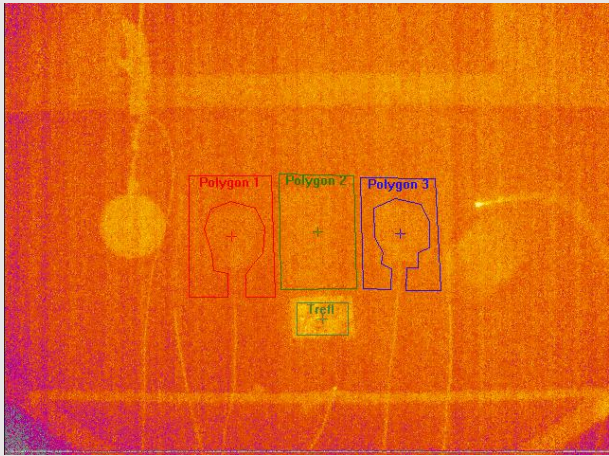
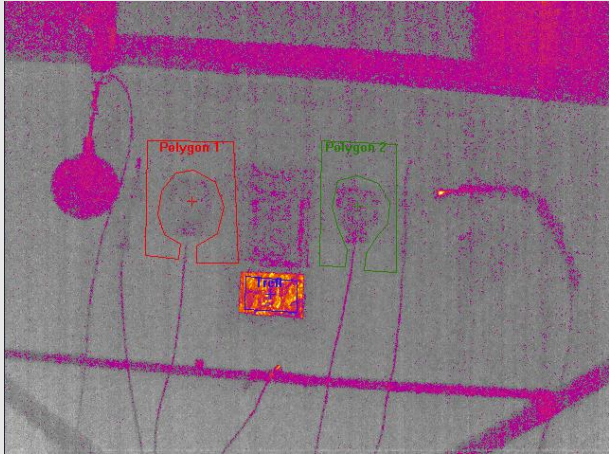



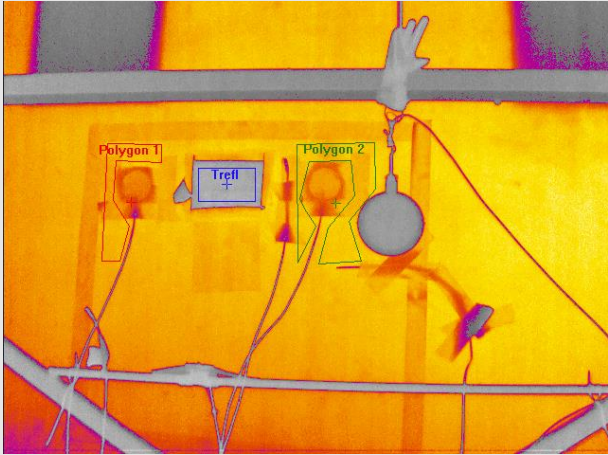
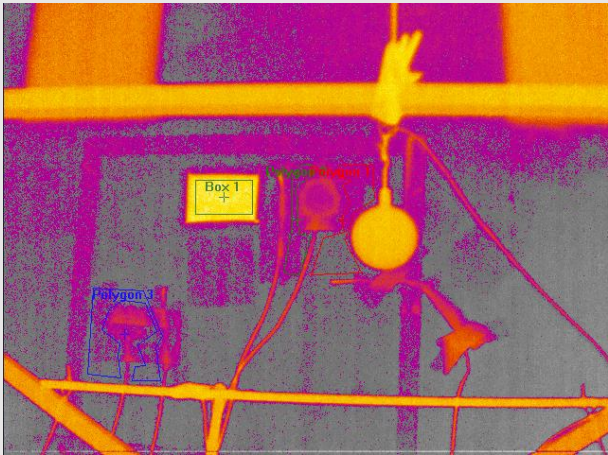
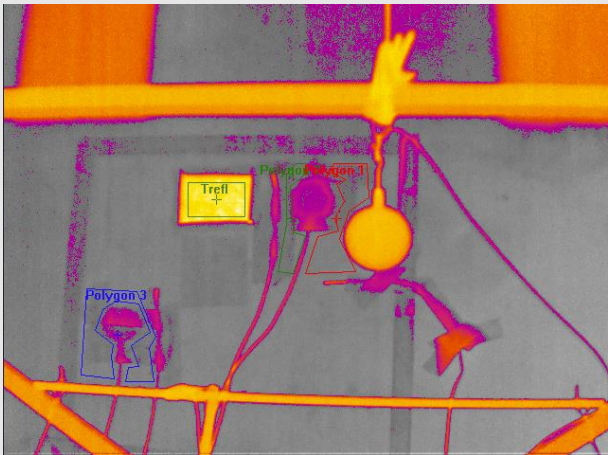
Slika 62: Rezultati mjerenja HFM-a (unutarnja i vanjska temperatura zraka i toplinski tokovi)


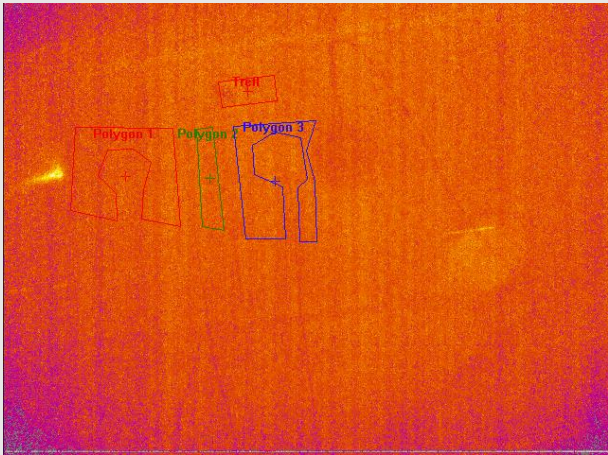
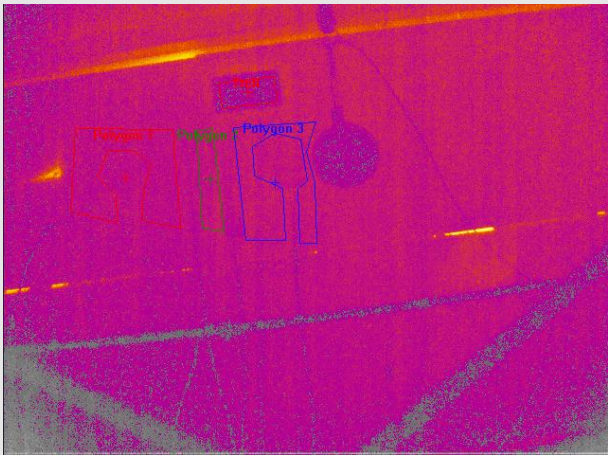
5.1.2 ICT



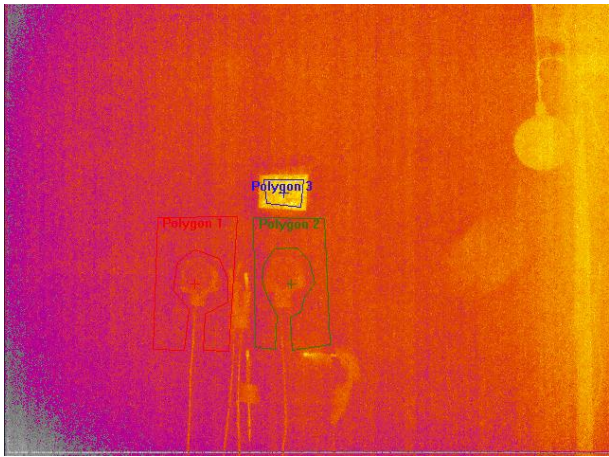
Mjerenje ICT-om se svodi na određivanje prividne reflektirane temperature te površinske temperature promatrane površine. Slika 63 prikazuje lokacije očitavanja prividne reflektirane i površinske temperature za sve ispitane uzorke. Slika 64 prikazuje rezultate mjerenje metodom ICT kao i standardno odstupanje izmjerenih temperatura od srednje vrijednosti unutar poligona (Slika 63). Poligoni „Polygon 1“ i „Polygon 3“ predstavljaju površinu uzorka oko tokomjera dok, „Polygon 2“ predstavlja površinu između tokomjera koja je dodijeljena i lijevom i desnom tokomjeru korištenom u metodi HFM te se na taj način odredilo standardno odstupanje

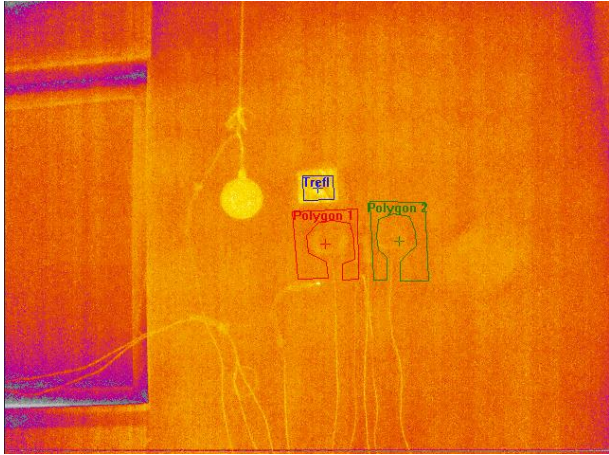
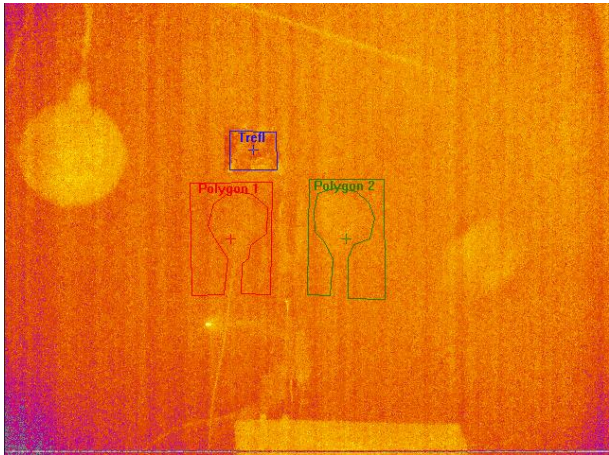

temperature po površini elementa kako bi se pokazala neizotermnost unutarnje površine zida (Slika 63). Poligon „Trefl“ predstavlja područje određivanja prividne reflektirane temperature i njenog odstupanja po površini poligona.

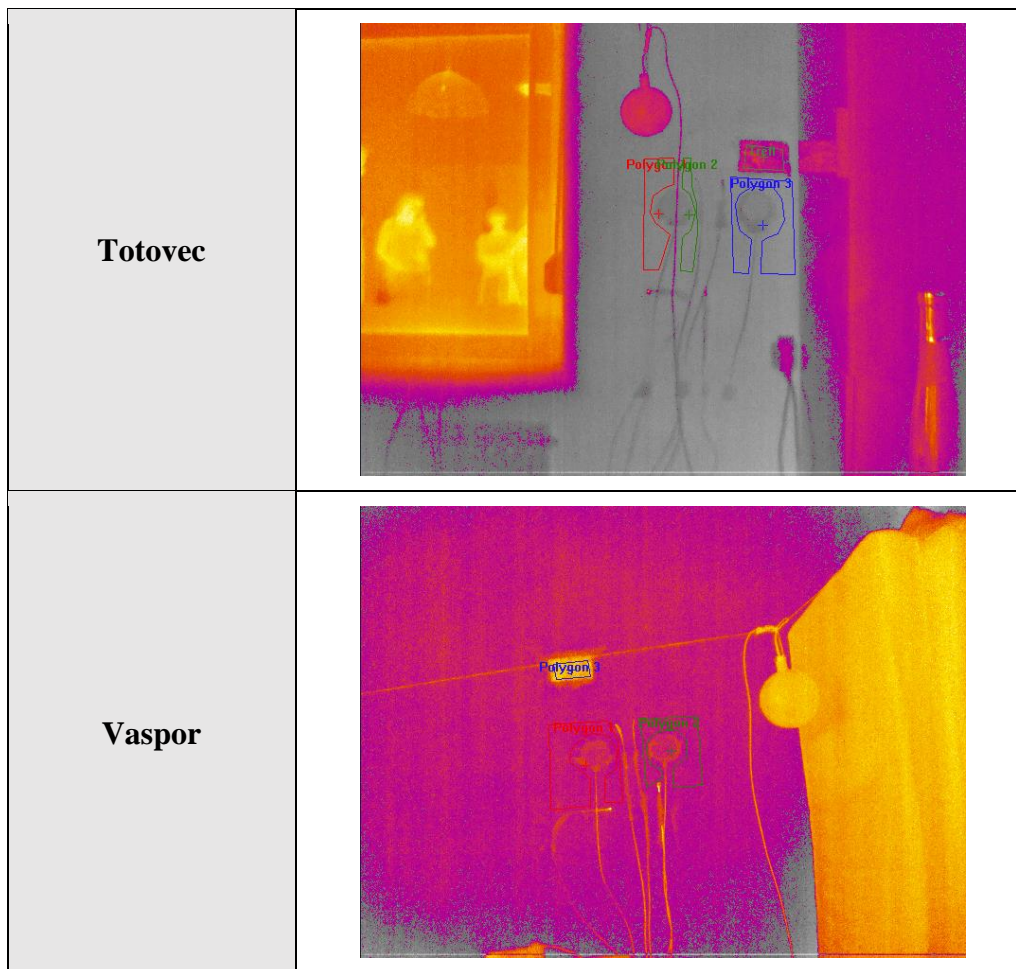
Oznaka uzorka	Termogram
1K	
2K	
3K	

<p>4B</p>	 <p>An infrared thermal image of a wall. A hand is visible at the top center. Three annotations are present: a red polygon labeled 'Polygon 1' on the left, a blue rectangle labeled 'Trefl' in the center, and a green polygon labeled 'Polygon 2' on the right. The background is a mix of yellow and orange, indicating temperature variations.</p>
<p>7B</p>	 <p>An infrared thermal image of a wall. A hand is visible at the top center. Three annotations are present: a yellow rectangle labeled 'Box 1' in the upper center, a red polygon labeled 'Polygon 1' on the right, and a blue polygon labeled 'Polygon 3' on the left. The background is a mix of yellow and orange.</p>
<p>8B</p>	 <p>An infrared thermal image of a wall. A hand is visible at the top center. Three annotations are present: a yellow rectangle labeled 'Trefl' in the upper center, a red polygon labeled 'Polygon 1' on the right, and a blue polygon labeled 'Polygon 3' on the left. The background is a mix of yellow and orange.</p>

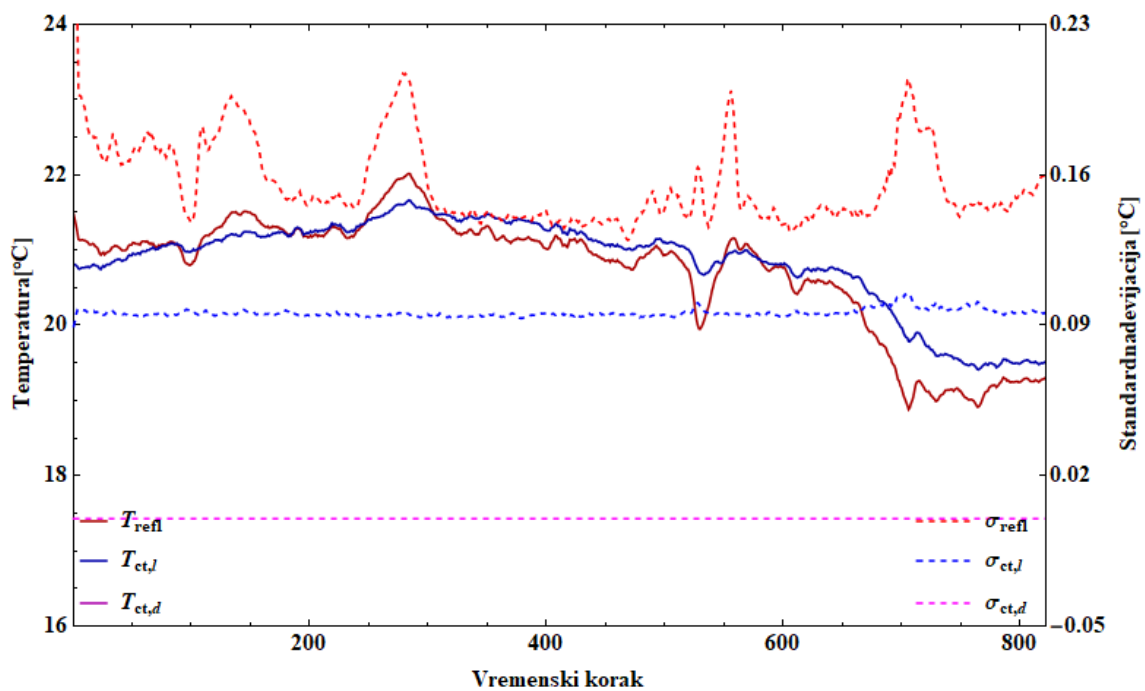
<p>9S</p>	
<p>10S</p>	
<p>11S</p>	

<p>Ivanovec</p>	
<p>Lenti</p>	
<p>Muraszemenye</p>	

<p>Mursko Središće</p>	
<p>Palovec</p>	
<p>Tornyszentmiklos</p>	



Slika 63: Lokacije mjerenja ICT



Slika 64: Rezultati mjerenja ICT-om (prividna reflektirana temperatura T_{refl} , temperatura zida $T_{ct,1}$ i $T_{ct,2}$; i standardna devijacija σ_{refl} , $\sigma_{ct,1}$ i $\sigma_{ct,2}$) za slučaj 2K

5.1.2.1 Transmisija atmosfere

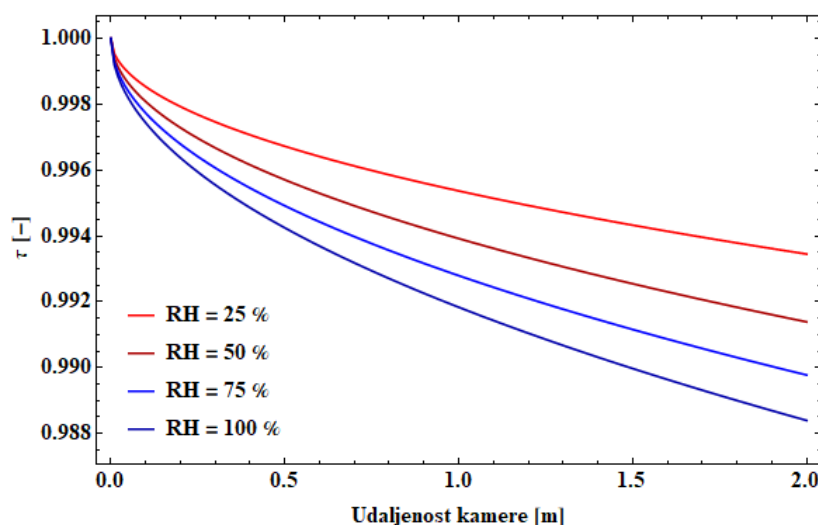
Mjerenje zračenja metodom infracrvene termografije se svodi na određivanje zračenja okoline prema predmetu koji se promatra (prividna reflektirana temperatura), određivanje emisivnosti promatrane površine ε (uspoređivanjem s predmetom poznate emisivnosti) te utjecaja atmosfere (određivanju koeficijenta transmisije atmosfere τ između promatranog predmeta i kamere). Koeficijent transmisije atmosfere ovisi o sastavu zraka, tj. plinovima koji se nalaze u zraku, temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka. U ovom radu će se koristiti pojednostavljeni proračun određivanja koeficijenta τ čiji je algoritam prihvaćen u većini računalnih programa za naknadnu obradu termograma. Proračun prikazan u nastavku je primjenjiv za dugovalno infracrveno zračenje valnih duljina između 7,5 i 13 μm [111].

$$\omega(RH, T_{atm}) = RH \cdot e^{(h_1 \cdot T_{atm}^3 + h_2 \cdot T_{atm}^2 + h_3 \cdot T_{atm} + h_4)} \quad (138)$$

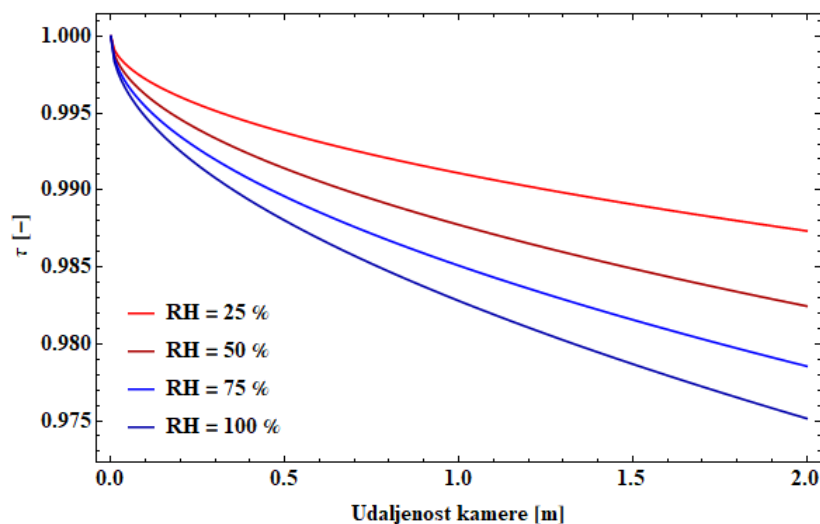
$$\tau(d, T_{atm}, \omega) = K_{atm} \cdot e^{[-\sqrt{d} \cdot (a_1 + b_1 \cdot \sqrt{\omega})]} + (1 - K_{atm}) \cdot e^{[-\sqrt{d} \cdot (a_2 + b_2 \cdot \sqrt{\omega})]} \quad (139)$$

Gdje je ω koeficijent koji procjenjuje sadržaj vodene pare u zraku, T_{atm} je temperatura zraka u $^{\circ}\text{C}$, d udaljenost kamere od promatrane površine u m, $K_{atm} = 1,9$ je koeficijent skaliranja atmosferskog prigušenja, a koeficijenti a_1, a_2, b_1, b_2 i h_1, h_2, h_3, h_4 koeficijenti uzeti iz literature za FLIR-ovu kameru ThermaCAM PM 595 LW i temperaturno područje od -40 do $+120$ $^{\circ}\text{C}$ [112].

Korištenjem izraza (138) i (139) dobiva se koeficijent transmisije atmosfere za različite udaljenosti kamere, temperature i relativne vlažnosti zraka (Slika 65 i Slika 66).



Slika 65: Transmitivnost atmosfere za $T_{atm} = 20$ $^{\circ}\text{C}$


 Slika 66: Transmittivnost atmosfere za $T_{\text{atm}} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$

U daljnjem proračunu je utjecaj atmosfere uzet s $\tau = 0,99$ koji odgovara udaljenosti kamere od otprilike dva metra (Tablica 27) od promatrane površine i relativnu vlažnost od 60 %.

5.1.2.2 Konvekcija

Najveći problem određivanja ukupnog toplinskog toka koji se s površine prenese na okoliš i obrnuto je određivanje dijela toplinskog toka koji otpada na strujanje po površini, tj. na konvekciju. Pošto je u realnim uvjetima gotovo nemoguće odrediti režim strujanja pa samim time i koeficijent plošnog prijelaza topline strujanjem h_c , određivanje koeficijenta h_c svodi se na empirijske i analitičke izraze koji aproksimiraju strujanje po površini.

Tablica 29 prikazuje modele korištene za aproksimaciju strujanja na promatranoj površini, tj. plošnog koeficijenta prijelaza topline strujanjem.

Tablica 29: Modeli korišteni za aproksimiranje strujanja na površini

Model	Izraz
ASHRAE vertikalni zid [113]	$1,31 \cdot \Delta T ^{0,33}$
Khalifa (zid udaljen od izvora topline) [114]	$2,07 \cdot \Delta T ^{0,23}$
Khalifa (Zid blizu izvora topline) [114]	$1,98 \cdot \Delta T ^{0,32}$
Khalifa (Negrijani zid) [114]	$2,30 \cdot \Delta T ^{0,24}$

Carl-Eric Hagentoft (prirodna konvekcija) [115]		$2,00 \cdot \Delta T ^{0,25}$
Carl-Eric Hagentoft (prisilna konvekcija) [115]		$6 + 4 \cdot v$
Prirodna konvekcija (pojednostavljen model) [113]		3,076
Awbi-Hatton (grijani zid) [116]		$1,684 \cdot \Delta T ^{0,293}$
Analitički modeli	1 [49]	$10^4 \leq Ra \leq 10^7 \quad Nu = 0.54 \cdot Ra^{0.25}$ $10^7 < Ra \leq 10^{11} \quad Nu = 0.15 \cdot Ra^{0.33}$
	2 [117]	$Nu = (4/3) \cdot [(Gr/4)^{0,25}] \cdot g_{Pr}$ $g_{Pr} = \frac{(0,75 \cdot Pr^{0,5})}{(0,609 + 1,221 \cdot Pr^{0,5} + 1,238 \cdot Pr)^{0,25}}$
	3 [118–120]	$10^4 \leq Ra \leq 10^9 \quad Nu = 0.59 \cdot Ra^{0.25}$ $10^9 < Ra \leq 10^{13} \quad Nu = 0.10 \cdot Ra^{0.33}$
	4 [121]	$Nu = 0,68 + \frac{(0,633 \cdot Ra^{0,25})}{\left[1 + (0,492/Pr)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{4}{9}}}$
	5 [49]	$Nu = 0,644 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33}$
	6 [121]	$Ra < 10^9$ $Nu = 0,68 + \frac{(0,633 \cdot Ra^{0,25})}{\left[1 + (0,492/Pr)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{4}{9}}}$ $Ra > 10^9$ $Nu = \left(0,825 + \frac{(0,387 \cdot Ra^{1/6})}{\left[1 + (0,492/Pr)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{8}{28}}}\right)^2$
	7 [49]	$v > 0$ $Nu = 0,664 \cdot Re^{0,50} \cdot Pr^{0,33}$ $v = 0$

		$Nu = 0,6665 \cdot Ra^{0,242}$
	8 [120]	$Ra \leq 10^9$ $Nu = 0,56 \cdot Ra^{0,25}$ $Ra > 10^9$ $Nu = 0,025 \cdot Ra^{0,40}$
Opis oznaka:		
ΔT		Apsolutna razlika temperature između ambijentalne temperature i temperature zida [°C]
v		Brzina strujanja zraka po površini [m/s]
Ra		Rayleighov broj
Re		Reynoldsov broj
Gr		Grashofov broj
Pr		Prandtlov broj

Slika 67 prikazuje algoritam koji je napisanu sklopu ovog rada za izračun karakteristika zraka potrebnih za određivanje koeficijenta plošnog prijelaza topline strujanjem h_c preuzete iz literature.

Ako se tok određen preko metode HFM uzme kao referentna vrijednost ukupnog toplinskog toka strujanjem i zračenjem, a tok određen preko metode ICT kao referentni toplinski tok koji se zračenjem izmjenjuje između okoliša i promatrane površine, tada je razlika ta dva toka utjecaj strujanja po površini. Korištenjem empirijskih i analitičkih modela (Tablica 29) za aproksimaciju toplinskog toka koji se odnosi na strujanje na površini najboljim se pokazao analitički model 8 (Tablica 29). Model je odabran na način da se gustoća toplinskog toka izračunavala za 17 različitih koeficijenata plošnog prijelaza topline strujanjem te se za svaku gustoću toplinskog toka izračunavao koeficijent korelacije između gustoće toplinskog toka određene metodom HFM. Analitički model broj 8 se pokazao najboljim u 71 % slučajeva. Uvjet za koeficijent korelacije za svih 17 modela koeficijenta plošnog prijelaza topline strujanjem je bio da je veći od 0,6. Za odabrani model minimalni koeficijent korelacije iznosi $R^2 = 0,65$.

```

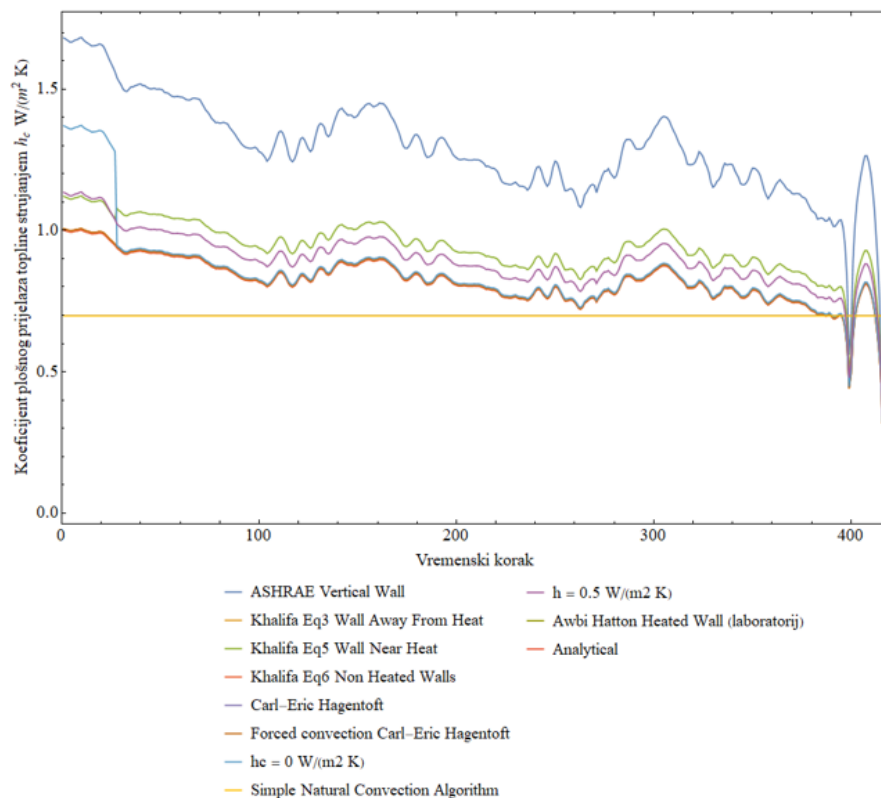
ComputAirP2[T0in2, pressure2_] :=
Module[{k02, S2, mu02, T02, k2, mu2, A2, B2, C2, D2, E2, MW2, R2, aux12, aux22, cp2, cv2,
  gamma2, Pr2, cpok2, sph2, rho2, diffus, kin},
  k02 = 2.404 / 100;
  S2 = 202.2;
  mu02 = 1.721 / 100 000;
  T02 = 273;
  k2 = k02 * ((T0in2 / T02) ^1.5) * ((T02 + S2) / (T0in2 + S2));
  (*toplinska provodljivost, W/(m K)*) (*[1]*)
  mu2 = mu02 * ((T0in2 / T02) ^1.5) * ((T02 + S2) / (T0in2 + S2));
  (*Dinamička viskoznost, kg/(m s)*) (*[2]*)
  A2 = 28 958;
  B2 = 9390;
  C2 = 3012;
  D2 = 7580;
  E2 = 1484;
  MW2 = 28.951;
  R2 = 287.189;

  aux12 = B2 * ((C2 / T0in2) / Sinh[C2 / T0in2]) ^2;
  aux22 = D2 * ((E2 / T0in2) / Cosh[E2 / T0in2]) ^2;
  cp2 = (A2 + aux12 + aux22) / MW2;
  (*Specifični toplinski kapacitet, J/(kg K)*) (*[3]*)
  cv2 = cp2 - R2; (*Specifični toplinski kapacitet, J/(kg K)*) (*[4]*)
  gamma2 = cp2 / cv2;
  (*Omjer toplinskih kapaciteta pri konstantnom tlaku i volumenu*) (*[5]*)
  Pr2 = cp2 * mu2 / k2; (*Prandtlov broj*) (*[6]*)
  cpok2 = cp2 / k2; (*[7]*)
  sph2 = cp2 * (T0in2 - 273.15); (*Specifična entalpija, J/kg*) (*[8]*)
  rho2 = pressure2 / R2 / T0in2; (*Gustoća zraka, kg/m^2*) (*[9]*)
  diffus = 1 / rho2 / cpok2; (*Difuzivnost, m^2/s*) (*[10]*)
  kin = mu2 / rho2; (*Kinematička viskoznost, m^2/s*) (*[11]*)
  {k2, mu2, cp2, cv2, gamma2, Pr2, cpok2, sph2, rho2, diffus, kin}
]

```

Slika 67: Algoritam za izračun karakteristika zraka ovisnih o temperaturi i tlaku zraka

Slika 68 prikazuje koeficijente plošnog prijelaza topline strujanjem određene korištenjem izraza iz literature (Tablica 29) za uzorak 2K.



Slika 68: Usporedba različitih modela za određivanje koeficijenta plošnog prijelaza topline strujanjem za uzorak 2K

5.1.2.3 Ambijentalna temperatura

Pod pojmom ambijentalna temperatura smatra se stvarna temperatura okoliša u kojem se nalazi promatrana površina. Analizom izmjerenih temperatura (prividne reflektirane temperature, srednje temperature zračenja, temperature zraka i površinske temperature) ustanovljeno je da je optimalna ambijentalna temperatura za izračun toplinskog toka na unutarnjoj površini metodom ICT uprosječna vrijednost temperature zraka i prividne reflektirane temperature:

$$T_{amb} = \frac{T_{refl} + T_i}{2} \quad (140)$$

Određivanje ambijentalne temperature svelo se na traženje težinskog koeficijenta između temperature unutarnjeg zraka i prividne reflektirane temperature:

$$\begin{aligned} T_{amb} &= w_{refl} \cdot T_{refl} + w_i \cdot T_i \\ w_{refl} + w_i &= 1 \end{aligned} \quad (141)$$

Gdje su w_{refl} i w_i težinski koeficijenti za prividnu reflektiranu temperaturu i temperaturu unutarnjeg zraka.

U programskom paketu Mathematica je napisana funkcija koja je varirala težinske koeficijente za svih 18 slučajeva (Slika 69). Tablica 30 prikazuje koeficijente korelacije između metode ICT i HFM određene korištenjem gore navedene funkcije. Koeficijenti korelacije dobiveni na ovaj način odgovaraju srednjoj vrijednosti težinskih koeficijenata $w_{refl} = w_i = 0,50$.

```

FindA[Tsi_, Ti_, Te_, qHFM_, a_, b_] := Module[{},
  Models = {"ASHRAE Vertical Wall", "Khalifa Eq3 Wall Away From Heat",
    "Khalifa Eq5 Wall Near Heat", "Khalifa Eq6 Non Heated Walls",
    "Carl-Eric Hagentoft", "Forced convection Carl-Eric Hagentoft",
    "hc = 0 W/(m2 K)", "Simple Natural Convection Algorithm",
    "Set Value", "Awbi Hatton Heated Wall (labos)", "Analytical"};
  Model = Models[[11]];
  hset = 10.3524;
  eps = 0.95;
  Treflx = TreflFilt;
  Tint1 = (a * TiFilt + b * Treflx);

  stdevL = 2 * stdev;
  stdevD = 2 * stdev;
  stdevR = 2 * stdevRef;
  Which[
    x == "1K", TmeanL = TP1; TmeanD = TP2,
    x == "2K", TmeanL = TP1; TmeanD = TP2,
    x == "3K", TmeanL = TP1; TmeanD = TP2,
    x == "4B", TmeanL = TP1; TmeanD = TP2,
    x == "7B", TmeanL = TP3; TmeanD = (TP1 + TP2) / 2,
    x == "8B", TmeanL = TP3; TmeanD = (TP1 + TP2) / 2,
    x == "9S", TmeanL = TP1; TmeanD = TP3,
    x == "10S", TmeanL = TP1; TmeanD = TP3,
    x == "11S", TmeanL = TP1; TmeanD = TP3,
    x == "Ivanovec", TmeanL = TP1; TmeanD = TP2,
    x == "Lenti", TmeanL = TP1; TmeanD = TP2,
    x == "Muraszemenye", TmeanL = TP1; TmeanD = TP2; hset = 0.5,
    x == "Mursko_Središće", TmeanL = TP1; TmeanD = TP2,
    x == "Palovec", TmeanL = TP1; TmeanD = TP2,
    x == "Tornyszentmiklos", TmeanL = TP1; TmeanD = TP2,
    x == "Totovec", TmeanL = TP1; TmeanD = TP2,
    x == "Vaspor", TmeanL = TP1; TmeanD = TP2
  ];

  qICT = qICT[Treflx, Tsi, eps, Ti, Model, hset, TMRT2];

  R2[qICT, qHFM];
]

```

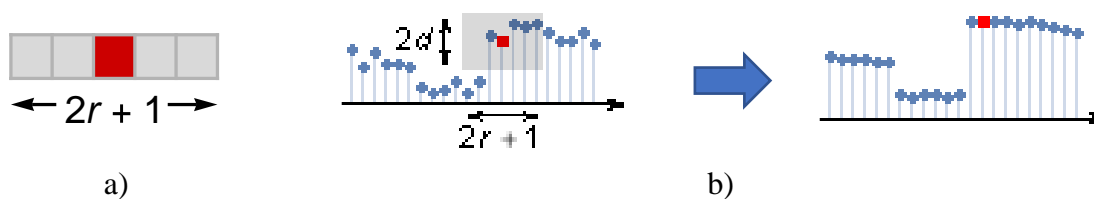
Slika 69: Funkcija za pronalaženje težinskih koeficijenata za ambijentalnu temperaturu

Tablica 30: Koeficijenti korelacije za određivanje težinskih koeficijenata za ambijentalnu temperaturu

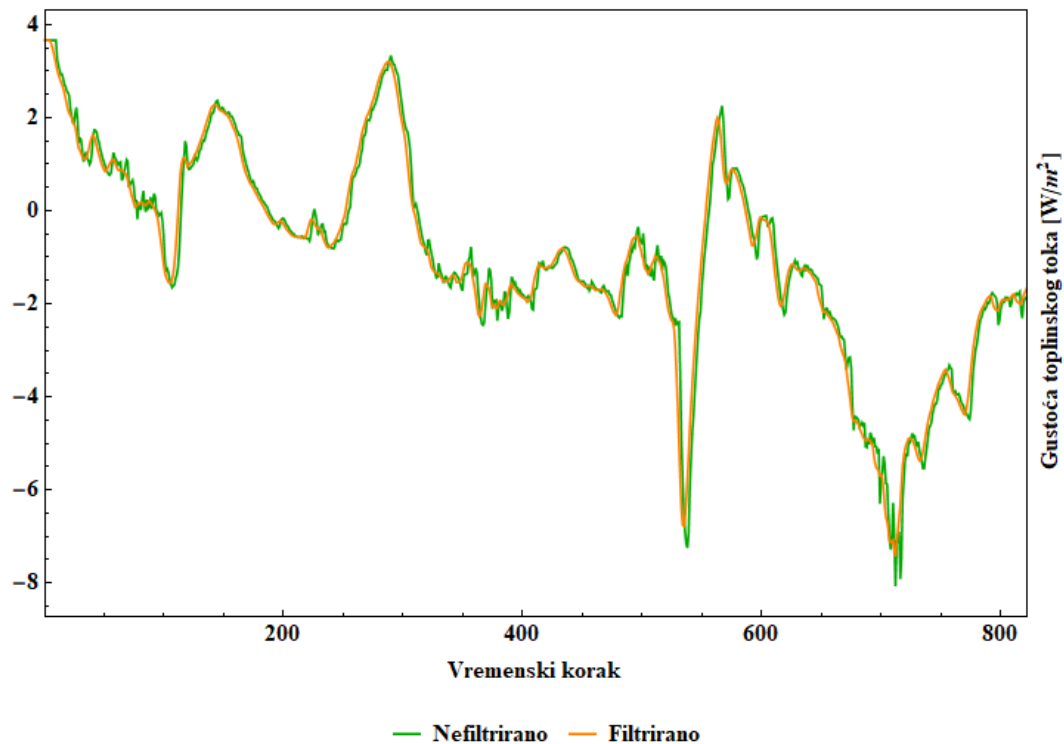
Oznaka uzorka	$R^2_{q_{ICT,L}-q_{HFM,1}}$	$R^2_{q_{ICT,D}-q_{HFM,2}}$
1K	0,874	0,778
2K	0,683	0,871
3K	0,819	0,932
4B	0,702	0,943
7B	0,988	0,641
8B	0,930	0,979
9S	-0,732	-0,105
10S	0,067	0,569
11S	-3,449	-1,454
Ivanovec	0,633	0,665
Lenti	0,970	0,961
Muraszemenye	0,445	0,903
Mursko Središće	0,315	0,246
Palovec	0,886	0,895
Tornyszentmiklos	0,906	0,855
Totovec	0,374	0,563
Vaspor	0,507	0,074

5.1.2.4 Filtriranje ulaznih parametara

Radi uklanjanja šumova i ekstremnih vrijednosti koje su rezultat slučajnih pojava, kao što su otvaranje vrata, paljenje svjetla, prolazak ljudi, itd., izmjerene veličine su filtrirane na način da je izmjerena veličina uprosječena korištenjem $(2r + 1)$ susjeda čiji iznos odstupa za manje od $r/2$ primjenom filtera u programskom paketu Mathematica („MeanShiftFilter“ – Slika 70), gdje je r broj susjeda oko promatrane točke. Slika 71 prikazuje filtrirane podatke za uzorak „2K“ primjenom navedenog filtera.



Slika 70: MeanShiftFilter [122]



Slika 71: Primjer primjene MeanShiftFiltera na toplinskom toku mjerenom HFM-om za uzorak „2K“

5.1.3 Dodatni parametri

Radi provođenja parametarske analize mjereni su dodatni parametri kao što su srednja temperatura zračenja (MRT) i globalno Sunčevo zračenje (E_{gh}). MRT je također mjereno zbog usporedbe toplinskog toka s tokom određenim korištenjem prividne reflektirane temperature. U slučaju korištenja srednje temperature zračenja dobivaju se dva do tri puta veće vrijednosti toplinskog toka nego u slučaju prividne reflektirane temperature kao što je prikazano u poglavlju 6.4.2.4. Nadalje, utjecaj globalnog Sunčevog zračenja na toplinski tok na unutarnjoj površini pokazao se zanemarivim pošto Sunčevo zračenje zagrijavanjem zida indirektno utječe na unutarnju površinsku temperaturu. Masivnost elemenata ispitanih u ovom istraživanju je dodatni razlog zanemarivanja Sunčevog zračenja. Prema normi HRN EN ISO 13786 za betonski zid i zid od opeke debljine 20 cm dobiva se efektivna dubina penetracije toplinskog vala od 0,17 m i 0,11 m za period vala od 24 h (grijanje danju i hlađenje noću). Pošto je penetracijska dubina manja od debljine zida, smatra se da uvjeti zagrijavanja vanjske površine nemaju velik utjecaj na toplinski tok na unutarnjoj površini za ispitivane uzorke elemenata vanjske ovojnice zgrade. U slučaju laganih elemenata ovaj utjecaj bi se morao uzeti u obzir. Veći utjecaj je vidljiv na termogramima zbog Sunčevog zračenja koje kroz prozirne elemente

vanjske ovojnice zgrade zagrijava unutarnju površinu. Ovaj utjecaj je smanjen zamračivanjem unutarnjeg prostora roletama, zavjesama i griljama.

5.1.4 Mjerna nesigurnost i greška mjerenja

RSS metoda (eng. „*Root Sum Square*“) je jedna od najčešće korištenih metoda za određivanje mjerne nesigurnosti. Ova metoda se primjenjuje kada se mjerna nesigurnost može izraziti kao sumu pojedinačnih doprinosa različitih izvora nesigurnosti primjenom linearnih matematičkih transformacija [123].

RSS metoda se sastoji od sljedećih koraka:

- 1) Identifikacija izvora nesigurnosti: potrebno je identificirati sve izvore nesigurnosti koji doprinose mjerenoj vrijednosti. To mogu biti instrumentalna pogreška, varijabilnost metoda, varijabilnost uzorka, i sl.
- 2) Procjena doprinosa izvora nesigurnosti: nakon identifikacije izvora nesigurnosti, potrebno je procijeniti doprinos svakog izvora pojedinačno. Ovo se može učiniti na različite načine, ovisno o prirodi izvora nesigurnosti.
- 3) Kvadratni zbroj doprinosa: nakon procjene doprinosa svakog izvora nesigurnosti, potrebno je kvadrirati svaki doprinos te odrediti njihovu sumu.
- 4) Izračunavanje RSS-a: konačni korak u RSS metodi je izračunavanje RSS-a, što je kvadratni korijen zbroja kvadrata doprinosa. Ovaj korak daje konačnu vrijednost mjere nesigurnosti.

Primjena RSS metode može biti vrlo korisna u situacijama kada je nesigurnost mjerenja posljedica više izvora nesigurnosti, a svaki izvor se može procijeniti pojedinačno. RSS metoda omogućuje konsolidaciju tih pojedinačnih procjena u jednu konačnu vrijednost nesigurnosti.

Uzimajući u obzir funkciju $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ doprinos d_i pojedinačne varijable x_i na ukupnu nesigurnost se može izraziti parcijalnom derivacijom funkcije f po varijabli x_i :

$$d_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot u_i \quad (142)$$

gdje je u_i mjerna nesigurnost varijable x_i .

Kvadratni zbroj doprinosa se može izraziti kao:

$$d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot u_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot u_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \cdot u_n\right)^2 \quad (143)$$

Konačno, RSS se može izraziti kao:

$$RSS = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot u_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot u_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \cdot u_n\right)^2} \quad (144)$$

Ovaj matematički izraz koristi parcijalne derivacije funkcije f po svakoj pojedinačnoj varijabli x_i kako bi se izrazio doprinos svake varijable pojedinačno. Kvadratni zbroj doprinosa se potom izračunava pomoću kvadriranja i zbrajanja doprinosa, a RSS se dobiva uzimanjem kvadratnog korijena kvadratnog zbroja doprinosa.

Primjenom metode RSS može se procijeniti doprinos svakog parametra na ukupnu nesigurnost mjerenja. Međutim, ako se želi odrediti koji parametar najviše utječe na mjerenu veličinu, tada je potrebno procijeniti relativni doprinos svakog parametra na mjerenu veličinu.

Relativni doprinos pojedinog parametra na mjerenu veličinu može se izraziti kao omjer doprinosa tog parametra na mjernu veličinu i ukupne nesigurnosti. Dakle, ako je d_i doprinos parametra i na ukupnu nesigurnost, a U ukupna nesigurnost, tada se relativni doprinos parametra i na mjernu veličinu može izraziti kao:

$$r_i = \left(\frac{d_i^2}{U^2}\right) \cdot 100 [\%] \quad (145)$$

gdje se d_i i U izražavaju u istim jedinicama.

Nakon što se izračunaju relativni doprinosi za sve parametre koji doprinose nesigurnosti, parametar s najvećim relativnim doprinosom se smatra najutjecajnijim parametrom.

Stoga, primjenom metode RSS, možemo odrediti ne samo doprinos svakog parametra na ukupnu nesigurnost mjerenja, već i relativni doprinos svakog parametra na mjerenu veličinu, što nam može pomoći da odredimo koji parametar najviše utječe na mjerenu veličinu.

5.1.5 Primjena metode RSS na mjerenje gustoće toplinskog toka

U slučaju metode ICT funkciju f predstavlja gustoća toplinskog toka prikazana izrazom:

$$q_{ICT} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{refl}^4 - T_{si}^4) + h_c \cdot \left(\frac{T_i + T_{refl}}{2} - T_{si}\right) \quad (146)$$

Odabrani parametri koji utječu na izmjerenu gustoću toplinskog toka su:

- Emisivnost površine ε

- Prividna reflektirana temperatura T_{refl}
- Površinska temperatura zida T_{si}
- Temperatura unutarnjeg zraka T_i
- Koeficijent plošnog prijelaza topline strujanjem h_c .

Parcijalnim deriviranjem izraza za gustoću toplinskog toka po pojedinim parametrima dobiva se:

$$\begin{aligned}\frac{\partial q_{ICT}}{\partial \varepsilon} &= \sigma \cdot (T_{refl}^4 - T_{si}^4) \\ \frac{\partial q_{ICT}}{\partial T_{refl}} &= \frac{h_c}{2} + 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{refl}^3 \\ \frac{\partial q_{ICT}}{\partial T_{si}} &= -h_c + 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{si}^3 \\ \frac{\partial q_{ICT}}{\partial T_i} &= \frac{h_c}{2} \\ \frac{\partial q_{ICT}}{\partial h_c} &= \frac{T_i + T_{refl}}{2} - T_{si}\end{aligned}\tag{147}$$

Mjerne nesigurnosti pojedinog parametra su uzete kao:

$$\begin{aligned}d\varepsilon &= 0,02 \\ dT_{refl} &= \sqrt{(0,02 \cdot T_{refl})^2 + (\sigma_{95\%, T_{refl}})^2} \\ dT_{si} &= \sqrt{(0,02 \cdot T_{si})^2 + (\sigma_{95\%, T_{si}})^2} \\ dT_i &= 0,03 \cdot T_i \\ dh_c &= 0,5\end{aligned}\tag{148}$$

Gdje su doprinosi $d\varepsilon = 0,02$ i $dh_c = 0,5$ uzeti vlastitim odabirom autora, a nesigurnost očitavanja kamere od 2 % i nesigurnost očitavanja temperature unutarnjeg zraka od 3 % uzeta od strane proizvođača kamere i termočlanka.

Konačan izraz za ukupnu mjernu nesigurnost gustoće toplinskog toka iznosi:

$$dq_{ICT} = \sqrt{\left(d\varepsilon \cdot \frac{\partial q_{ICT}}{\partial \varepsilon}\right)^2 + \left(dT_{refl} \cdot \frac{\partial q_{ICT}}{\partial T_{refl}}\right)^2 + \left(dT_{si} \cdot \frac{\partial q_{ICT}}{\partial T_{si}}\right)^2 + \left(dT_i \cdot \frac{\partial q_{ICT}}{\partial T_i}\right)^2 + \left(dh_c \cdot \frac{\partial q_{ICT}}{\partial h_c}\right)^2}\tag{149}$$

Konačno gustoća toplinskog toka q_{ICT} se može prikazati kao:

$$q_{ICT}^* = q_{ICT} \pm dq_{ICT} \quad (150)$$

5.1.6 Primjena metode RSS na određivanje U-vrijednosti

Nadalje, ako se iz izračunatog toplinskog toka određuje U-vrijednost zida, tada se primjenom metode RSS ukupna mjerna nesigurnost u izračunatu U-vrijednost određuje kao:

$$dU_{ICT} = \sqrt{\left(dq_{ICT} \cdot \frac{\partial U_{ICT}}{\partial q}\right)^2 + \left(dT_i \cdot \frac{\partial U_{ICT}}{\partial T_i}\right)^2 + \left(dT_e \cdot \frac{\partial U_{ICT}}{\partial T_e}\right)^2} \quad (151)$$

Gdje se parcijalne derivacije po pojedinim parametrima (q , T_i i T_e) određuju deriviranjem izraza (123) za U-vrijednost prema metodi srednje vrijednosti:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial q_{ICT}} &= \frac{1}{T_i - T_e} \\ \frac{\partial U}{\partial T_i} &= -\frac{q_{ICT}}{(T_i - T_e)^2} \\ \frac{\partial U}{\partial T_e} &= \frac{q_{ICT}}{(T_i - T_e)^2} \end{aligned} \quad (152)$$

Gdje se nesigurnost u vanjsku temperaturu zraka T_e određuje kao:

$$dT_e = 0,03 \cdot T_e \quad (153)$$

Nesigurnost očitavanja temperature vanjskog zraka od 3 % također je uzeta od strane proizvođača termočlanka.

Konačna U-vrijednost određena metodom ICT može se prikazati u obliku:

$$U_{ICT}^* = U_{ICT} \pm dU_{ICT} \quad (154)$$

Isti postupak za određivanje ukupne mjerne nesigurnosti vrijedi i za HFM. U tom slučaju se nesigurnost u gustoću toplinskog toka (q_{HFM}) izmjerenu tokomjerom određuje kao:

$$dq_{HFM} = 0,03 \cdot q_{HFM} \quad (155)$$

Međutim, greška mjerenja od 3 % dana od strane proizvođača tokomjera uzima u obzir samo mjernu nesigurnost očitavanja samog tokomjera, a ne uzima u obzir grešku zbog pogrešne instalacije senzora i utjecaj vanjskih uvjeta na izmjereni tok što u konačnici daje malu vrijednost mjerne nesigurnosti za sve ispitane uzorke.

6 Rezultati i analiza

6.1 Provjera valjanosti izmjerenih podataka usporedbom s numeričkim modelom

Kao kontrola mjenenog toplinskog toka i metodom HFM i ICT koristio se numerički model kojim su izračunate gustoće toplinskog toka i površinske temperature na unutarnjoj površini. Numerički model je primijenjen na laboratorijske slučajeve pošto su u tim slučajevima debljine slojeva i karakteristike ugrađenih materijala poznate kao što je prikazano u poglavlju 3.4. Nakon usporedbe izmjerenih veličina s numerički dobivenim toplinskim tokovima vrijednosti toplinskih tokova određene metodom HFM uzete su kao mjerodavne kod svih 17 uzoraka. Slika 72 prikazuje usporedbu toplinskih tokova određenih metodama ICT i HFM te njihovu usporedbu s numerički određenim toplinskim tokom te pripadajuće koeficijente korelacije između prikazanih tokova. Na y-osi je prikazan toplinski tok dok x-os prikazuje vremenske korake u periodu mjerenja (Tablica 28). Za metodu ICT minimalni iznos koeficijenta korelacije iznosi 0,291 za laboratorijski uzorak s toplinskom izolacijom s unutarnje strane „2K“ ako se odbace uzorci s toplinskom izolacijom s unutarnje strane (10S i 11S) pošto je kod tih uzoraka iznos toplinskog toka blizu nule pa je utjecaj greške mjerenja velik što se može vidjeti u poglavlju 6.4.

Oznake toplinskih tokova su sljedeće (Slika 46):

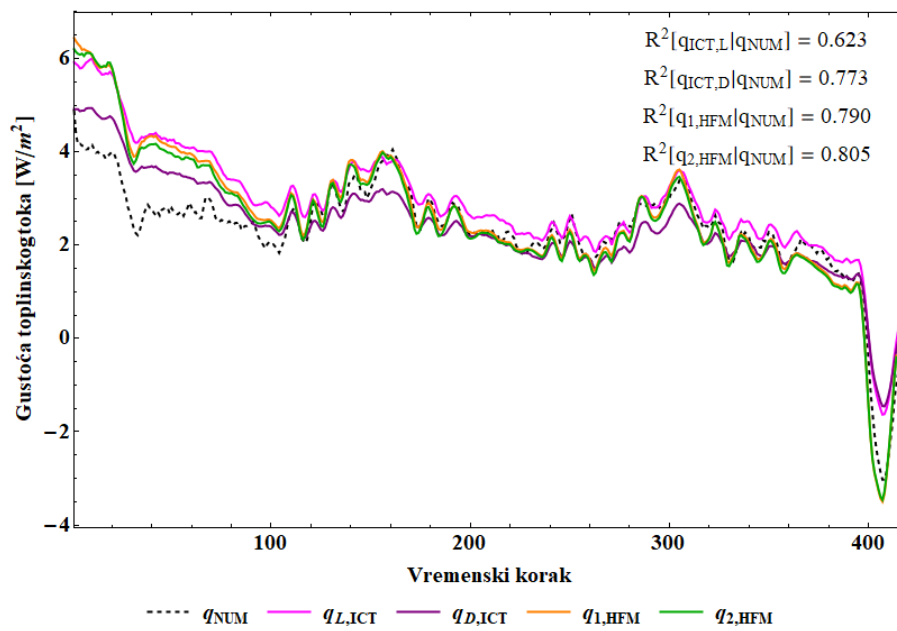
$q_{1,HFM}$ – gustoća toplinskog toka određena za lijevi tokomjer metodom HFM.

$q_{2,HFM}$ – gustoća toplinskog toka određena za desni tokomjer metodom HFM.

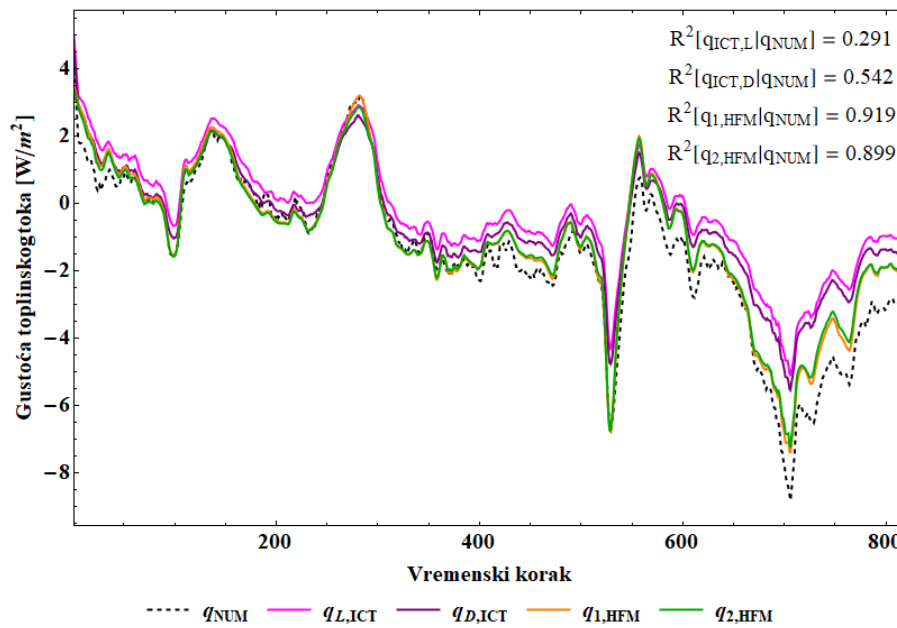
$q_{L,ICT}$ – gustoća toplinskog toka određena metodom ICT u okolini lijevog tokomjera.

$q_{D,ICT}$ – gustoća toplinskog toka određena metodom ICT u okolini desnog tokomjera.

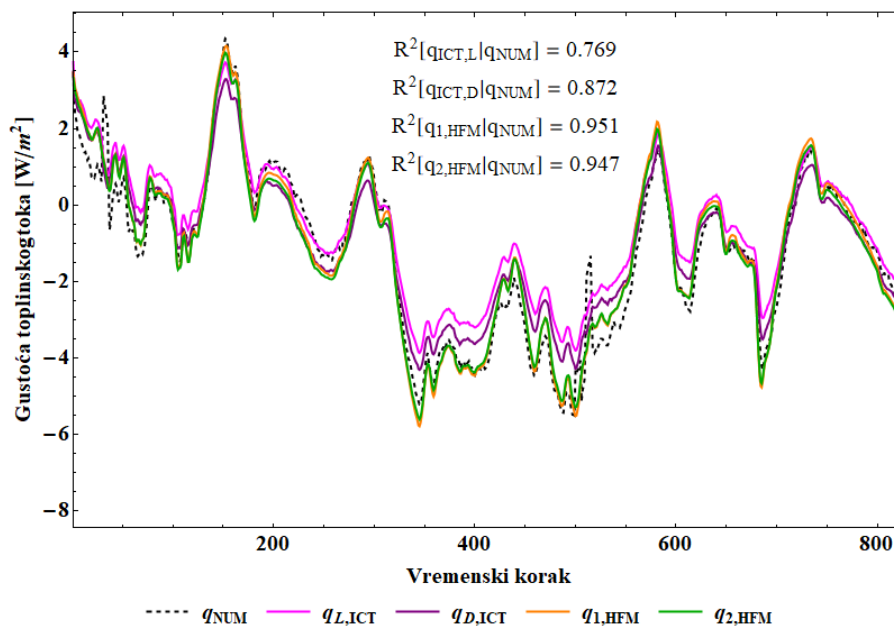
q_{NUM} – numerički određen toplinski tok na unutarnjoj površini.



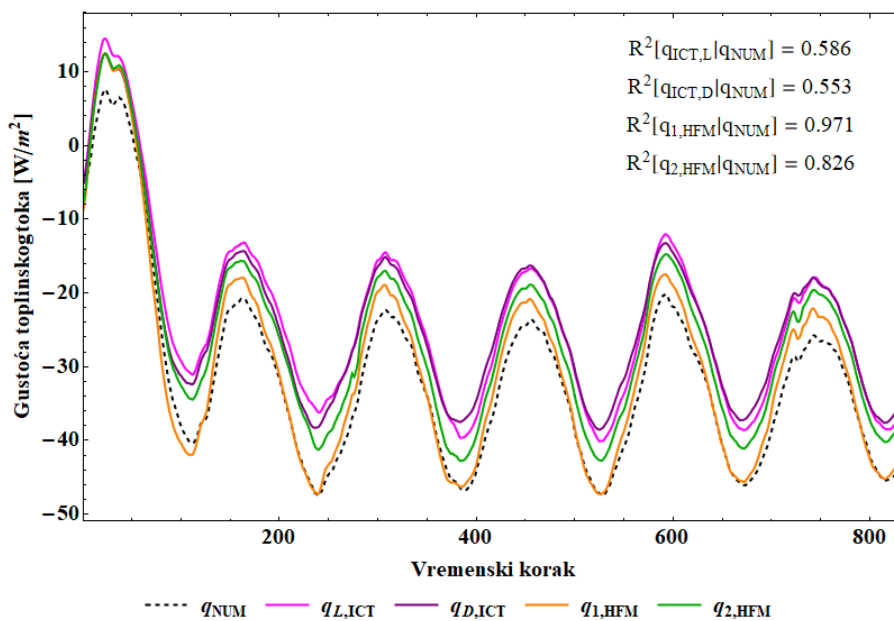
a) 1K



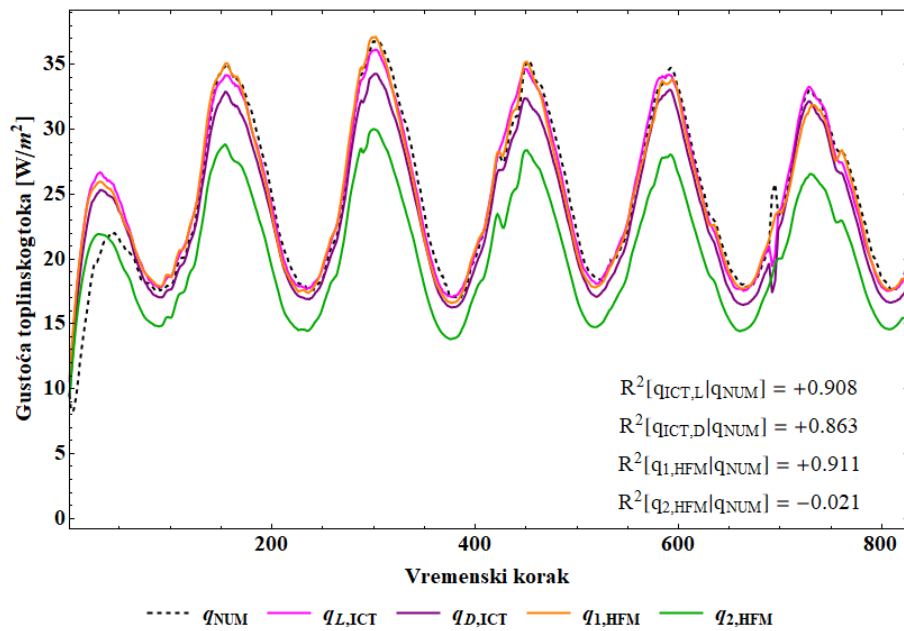
b) 2K



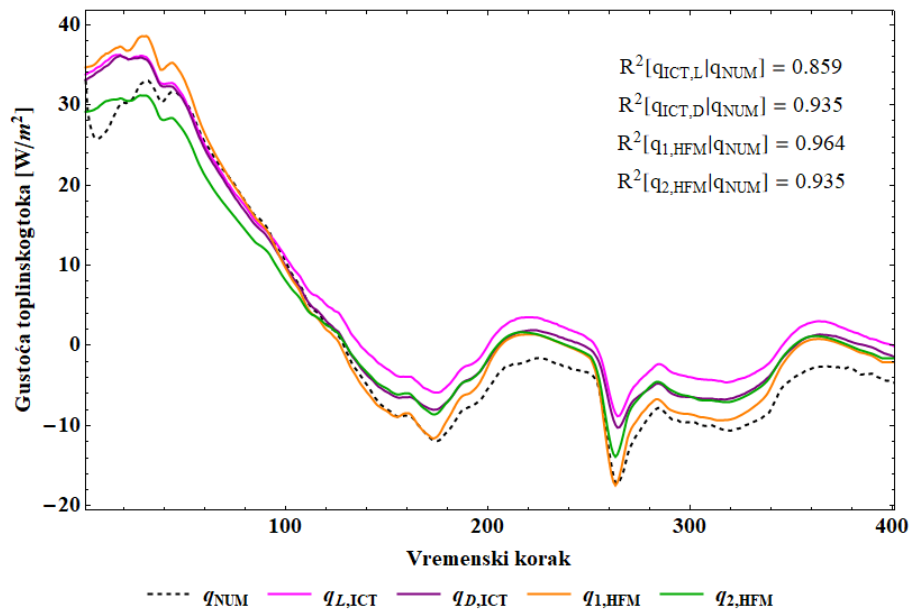
c) 3K



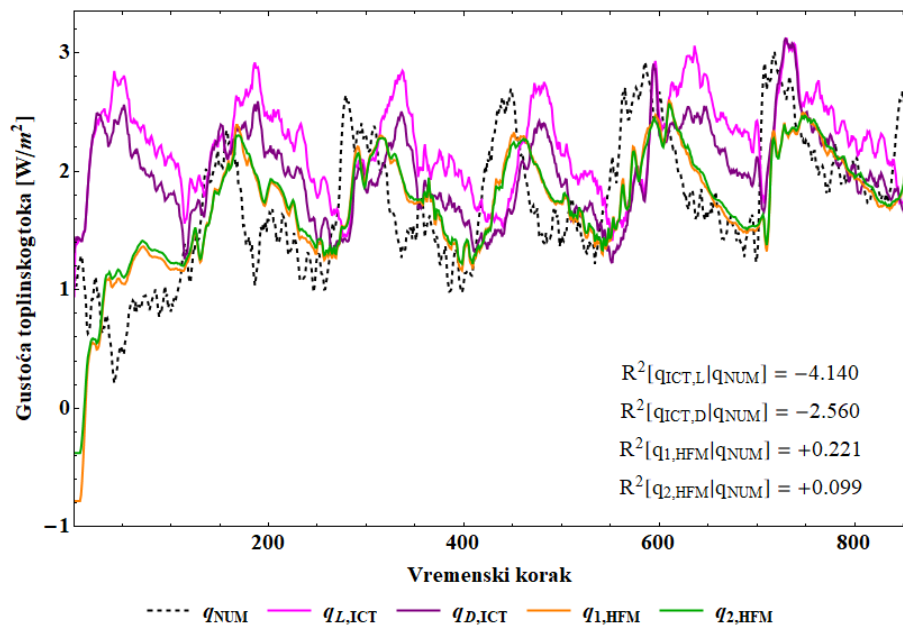
d) 4B



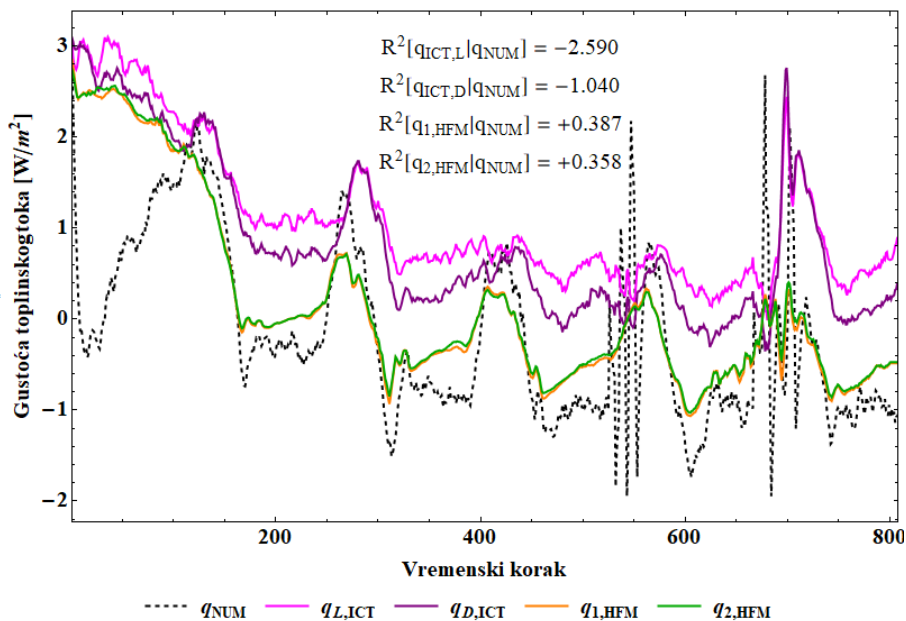
e) 7B



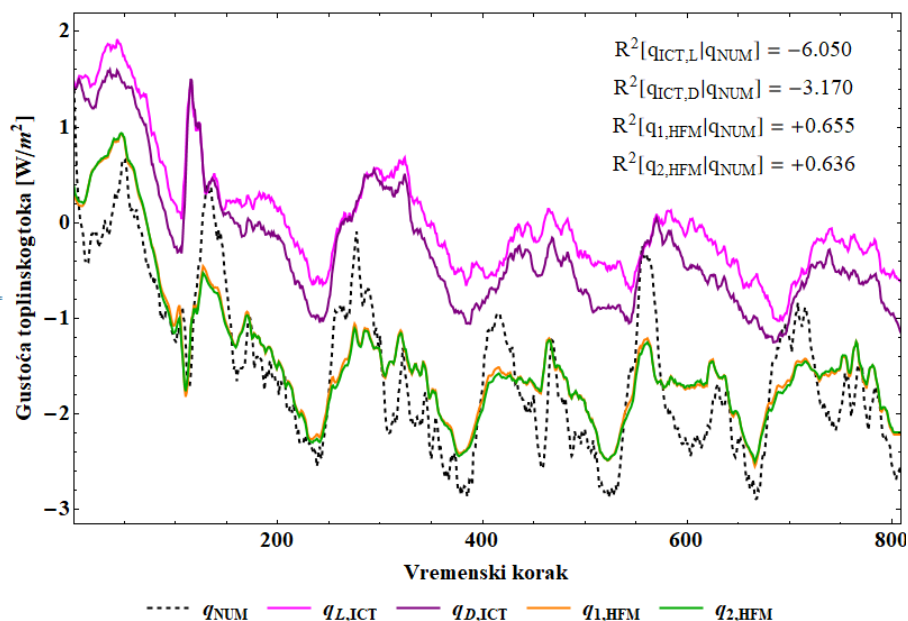
f) 8B



g) 9S



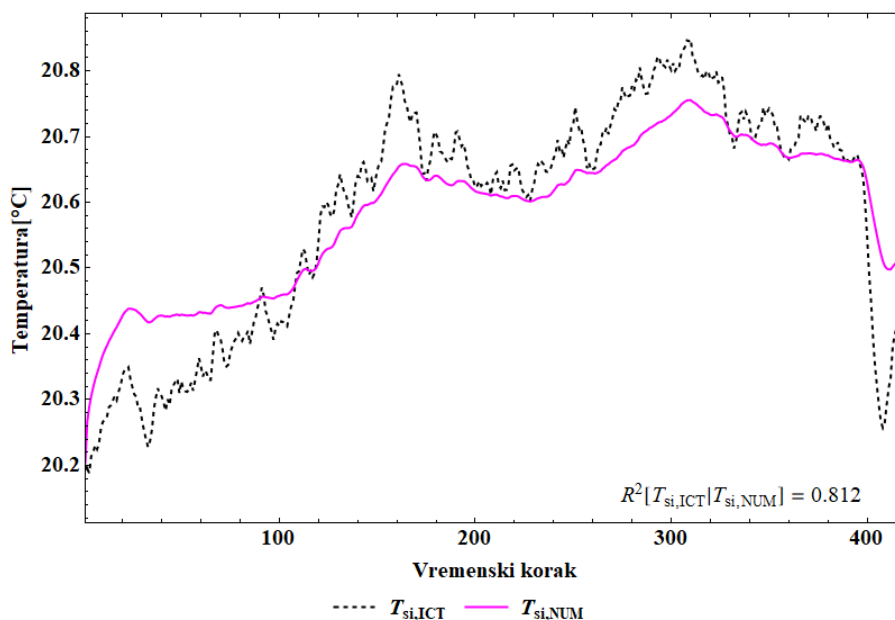
h) 10S



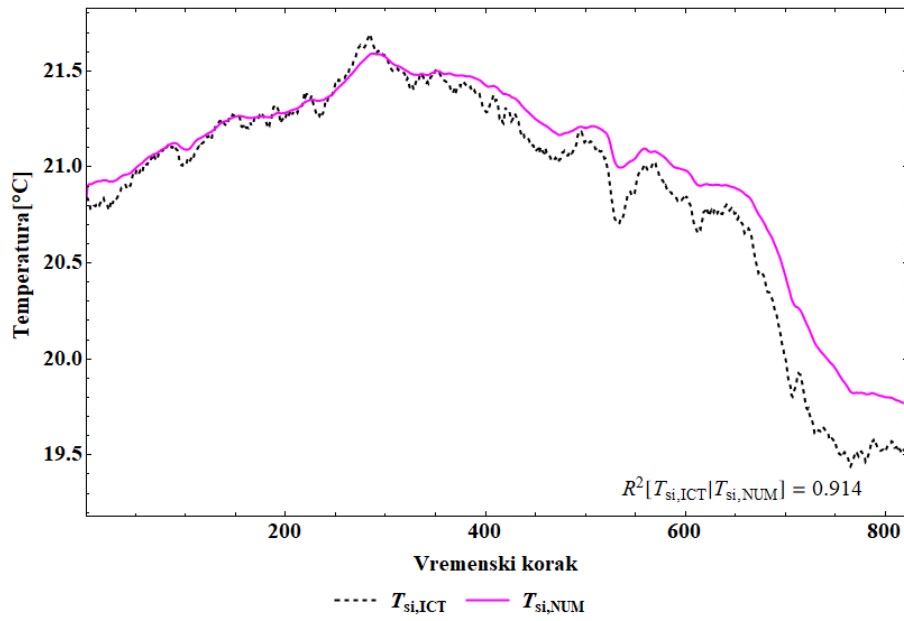
i) 11S

Slika 72: Usporedba toplinskih tokova određenih metodama ICT i HFM s numeričkim modelima

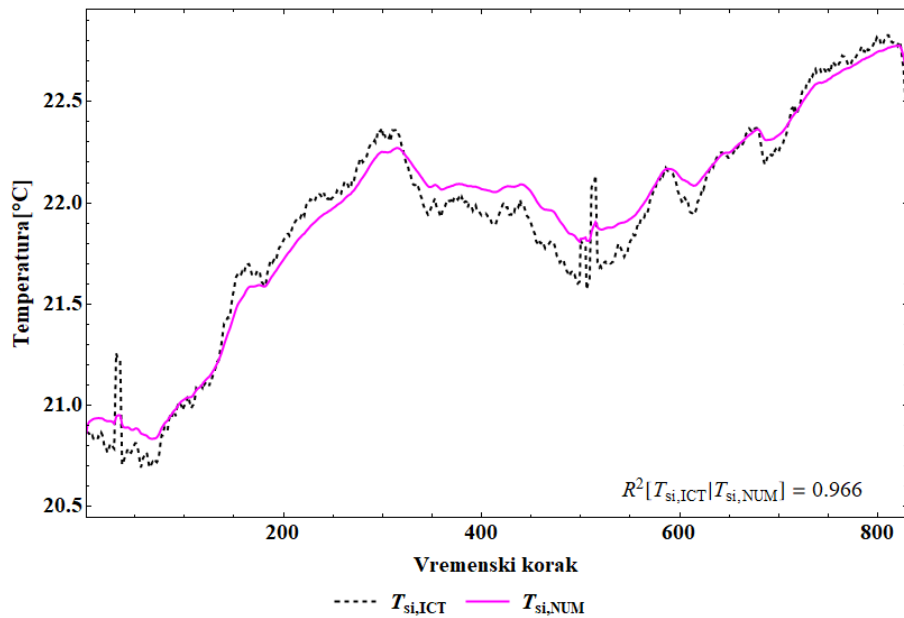
Slika 73 prikazuje usporedbu temperature na unutarnjoj površini dobivene numerički i izmjerene metodom ICT. Usporedba dobivenih temperatura daje minimalni koeficijent korelacije od 0,727 za uzorak AB zida bez izolacije „4B“ što pokazuje jako dobru korelaciju s temperaturom izmjerenom infracrvenom kamerom.



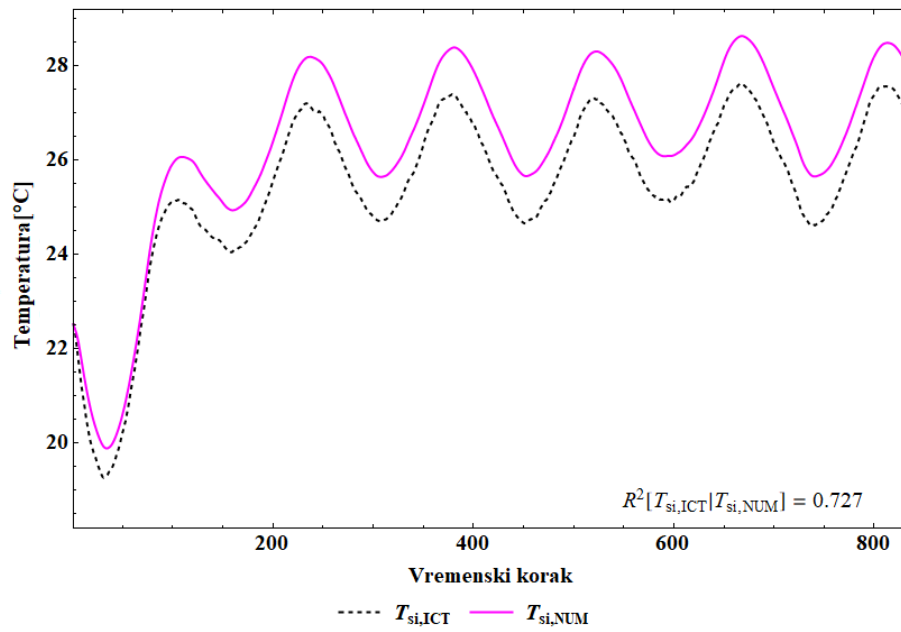
a) 1K



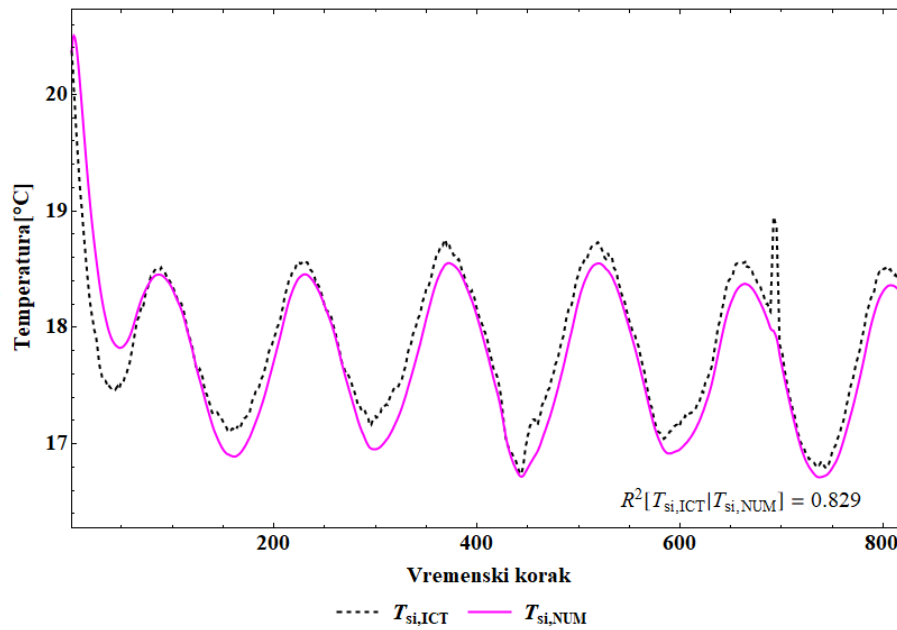
b) 2K



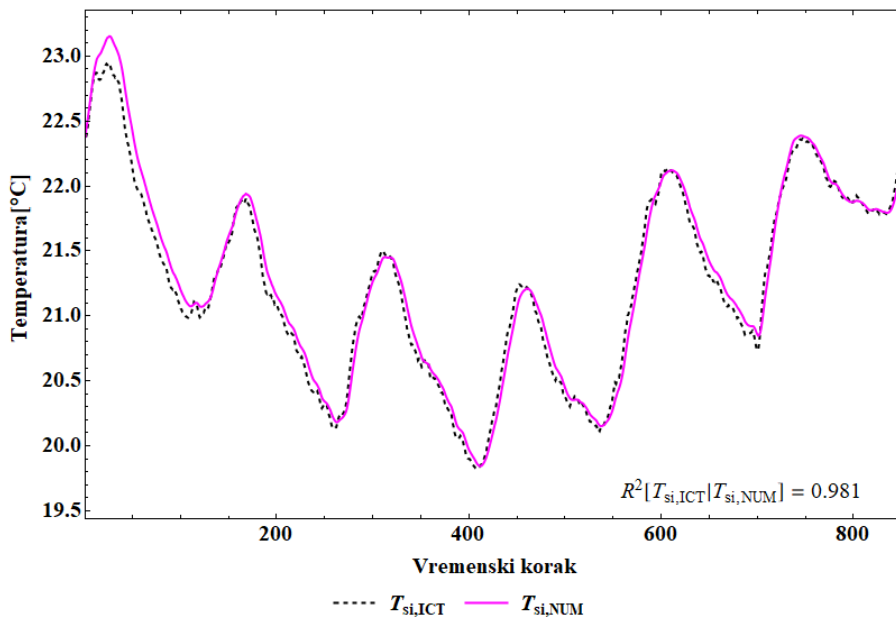
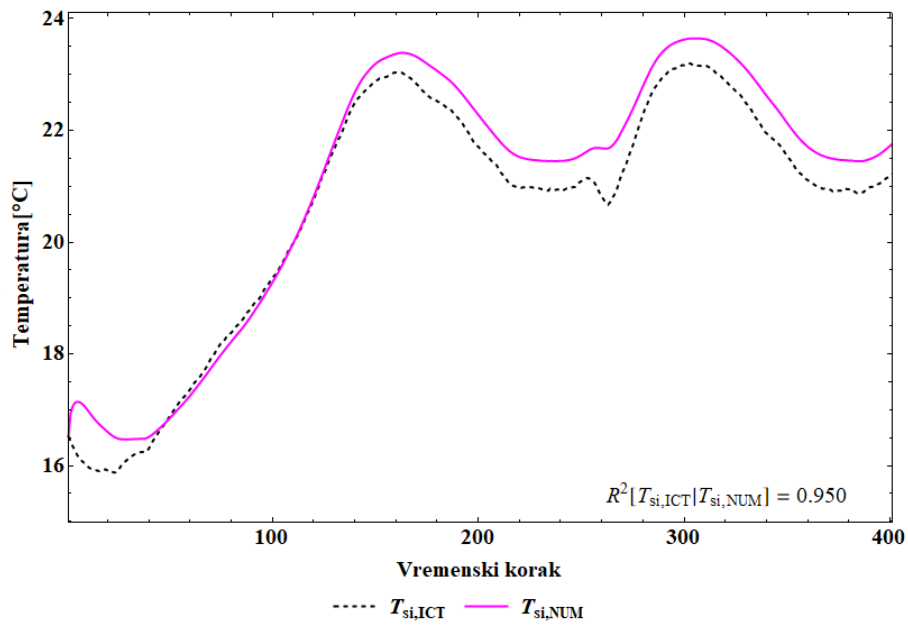
c) 3K

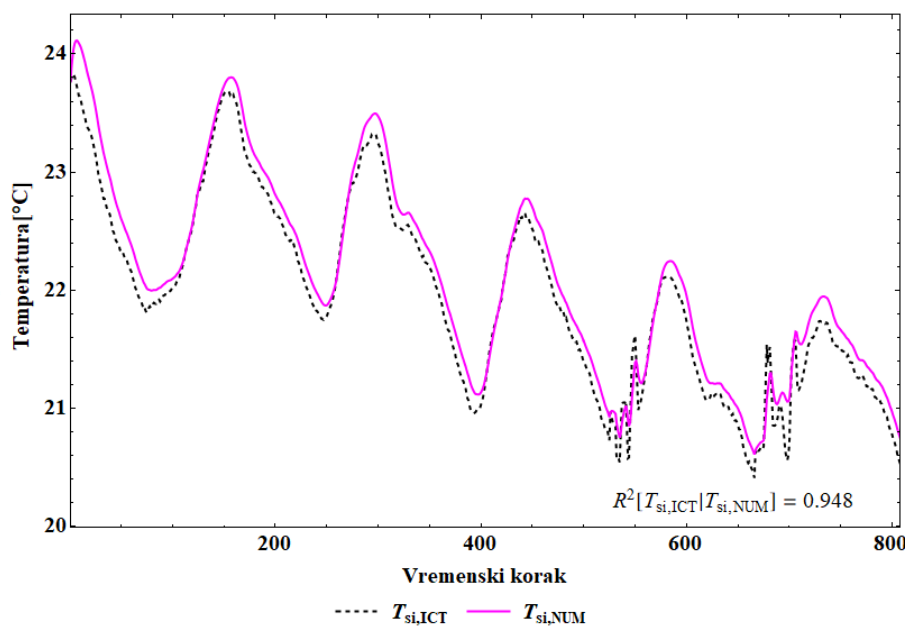


d) 4B

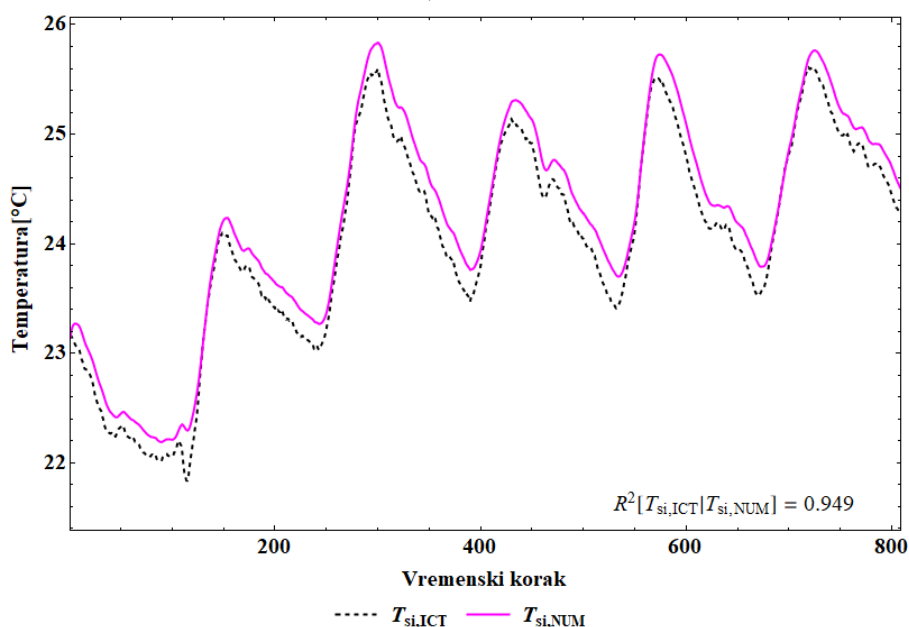


e) 7B





h) 10S



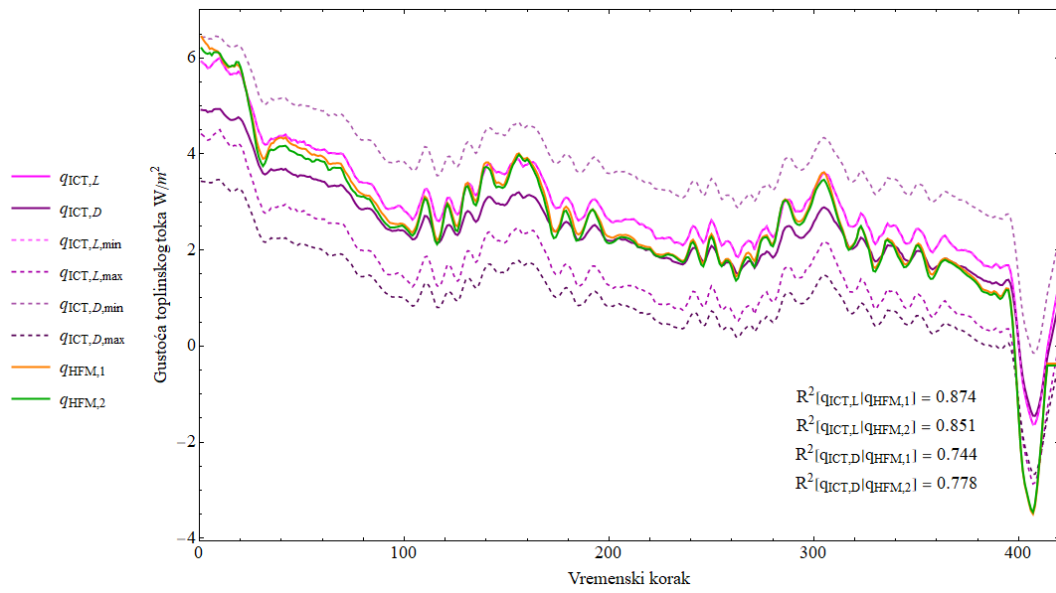
i) 11S

Slika 73: Usporedba površinske temperature na unutarnjoj površini (ICT i numerički model)

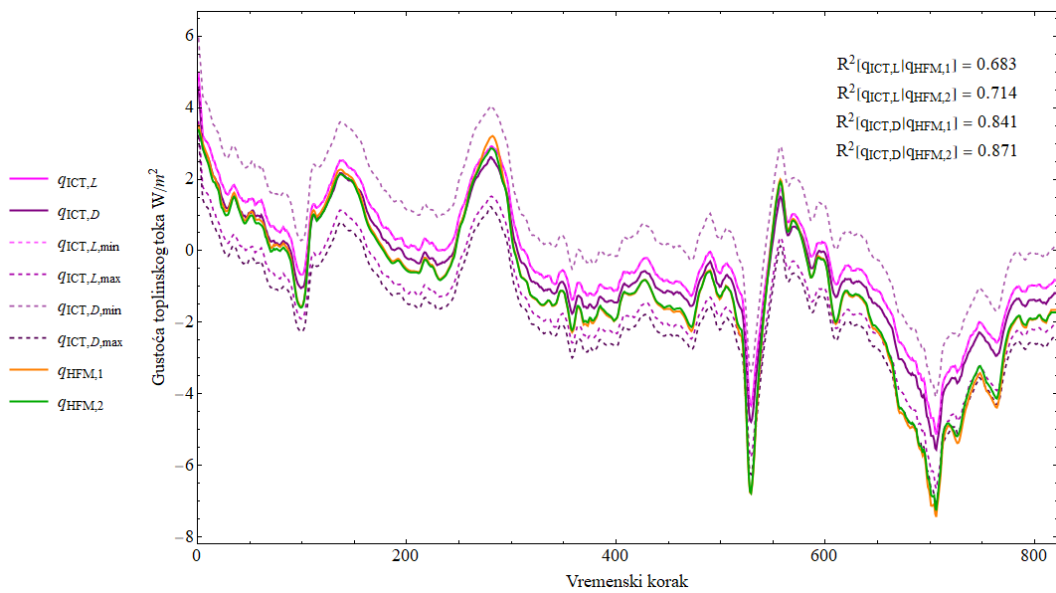
6.2 Usporedba toplinskih tokova između metoda ICT i HFM

U ovom poglavlju je prikazana usporedba toplinskih tokova između metoda ICT i HFM s pripadajućim koeficijentima korelacije između izmjerenih veličina (Slika 74). Za metodu ICT je također prikazan minimalni i maksimalni toplinski tok kao standardno odstupanje od srednje vrijednosti koji je rezultat neizoternosti površine pošto metoda ICT dopušta sagledavanje većeg dijela površine uzorka nego što je to slučaj kod HFM-a gdje se toplinski tok određuje točkasto. Najlošija korelacija se dobiva kod laboratorijskih uzoraka s izolacijom s unutarnje

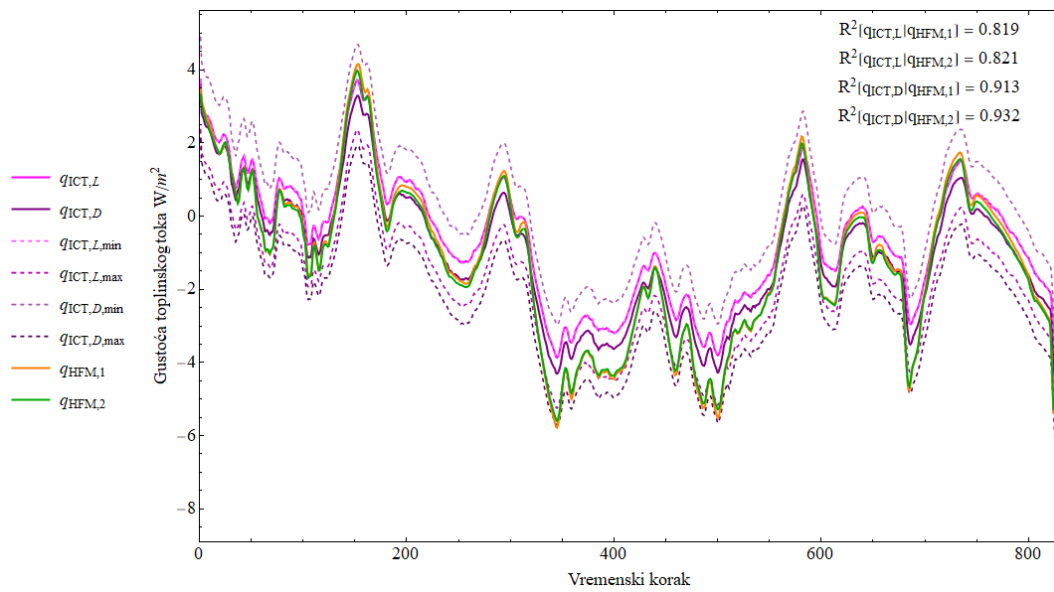
strane 10S i 11S zbog malog iznosa toplinskog toka na unutarnjoj površini kod kojih do izražaja dolazi greška očitavanja temperature infracrvenom kamerom. Kod ovih uzoraka su koeficijenti korelacije između toplinskog toka određenog metodom HFM i ICT negativni. Ostalih šest laboratorijskih uzoraka pokazuje jako dobra podudaranja između HFM-a i ICT-a s minimalnim koeficijentom korelacije od 0,641 za slučaj uzorka bez toplinske izolacije „7B“. Vrijednost koeficijenta korelacije od 0,392 dobiva se uspoređujući lijevi i desni toplinski tok dobiven metodom ICT i HFM te kao takav nije mjerodavan već je dan kako bi se pokazalo ekstremno odstupanje toplinskih tokova na maloj udaljenosti. Kod terenskih ispitivanja najlošija podudaranja su u slučajevima Muraszemenye, Mursko Središće, Totovec i Vaspor. U slučaju Muraszemenya, Vaspóra i Totovca je zbog male temperature unutarnjeg zraka (Tablica 14) te prisustva nedovoljno zabrtvljene stolarije došlo do pojačanog strujanja koje se pojednostavljenim izrazima (Tablica 29) za izračun koeficijenta h_c teško može uzeti u obzir te su potrebne zahtjevnije numeričke simulacije kako bi se odredio toplinski tok koji otpada na strujanje. Svi rezultati mjerenja za metodu HFM i ICT prikazani su u Prilogu 2. U slučaju Murskog Središća ekstremne vrijednosti toplinskog toka (Slika 74m) se metodom ICT nisu uzele u obzir zbog „rijetkog“ vremena uzorkovanja svakih 10 minuta što nije slučaj kod HFM-a koji uzorkuje mjerene veličine svaku sekundu. Nepoklapanje ekstremnih vrijednosti drastično smanjuje korelaciju između toplinskih tokova. Ovaj problem je moguće riješiti primjenom različitih filtera za uprosječenje izmjerenih veličina. Međutim, primjenom filtera se gubi stvarno ponašanje toplinskog toka na površini elementa. Daljnje istraživanje bi se trebalo, između ostalog, fokusirati i na poboljšanje postupka za snimanje termograma kojim bi se smanjio interval snimanja.



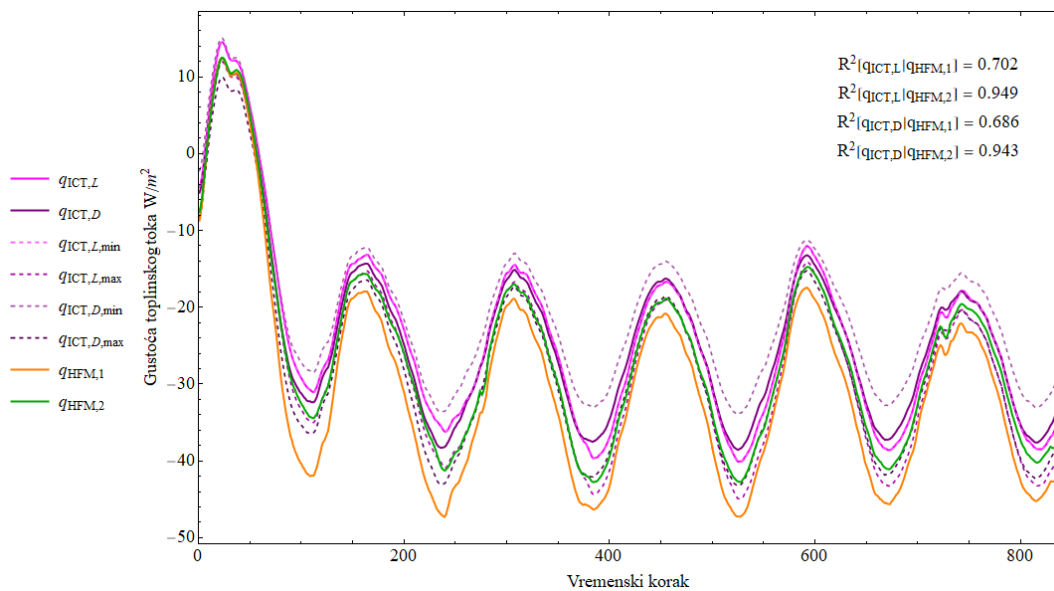
a) 1K



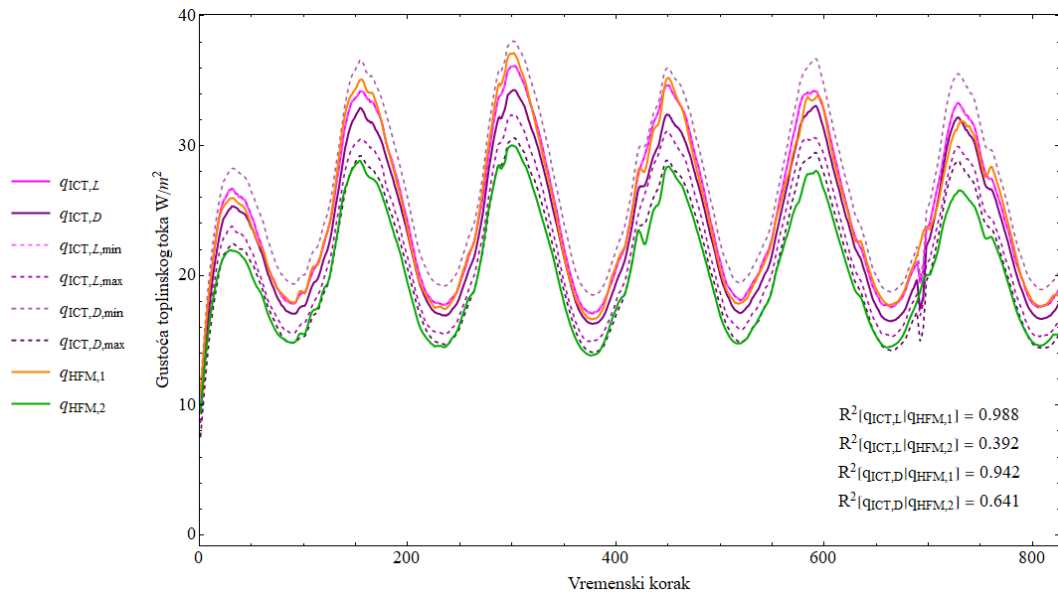
b) 2K



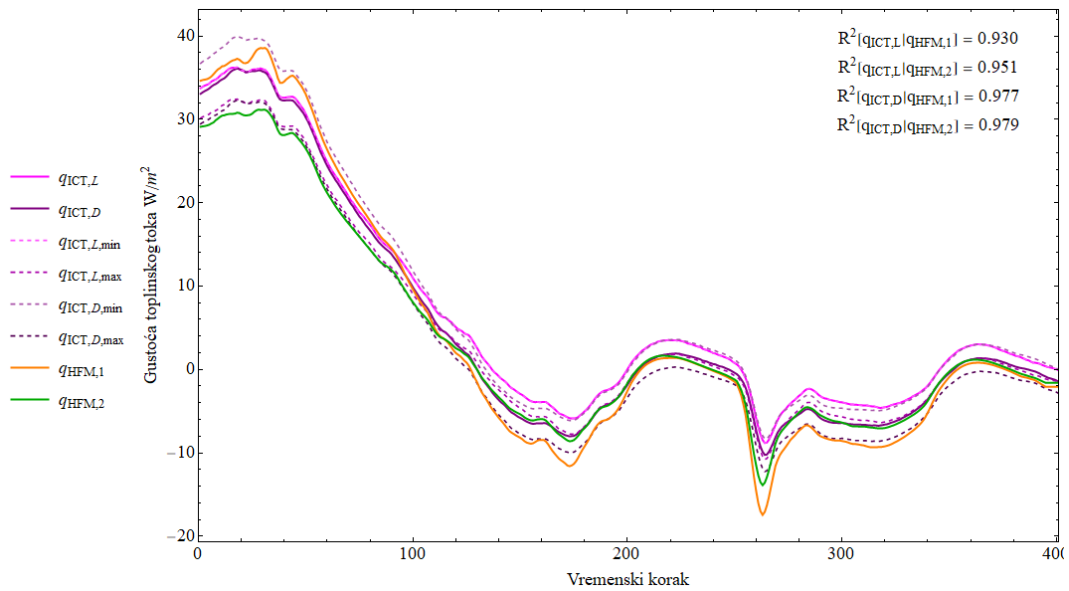
c) 3K



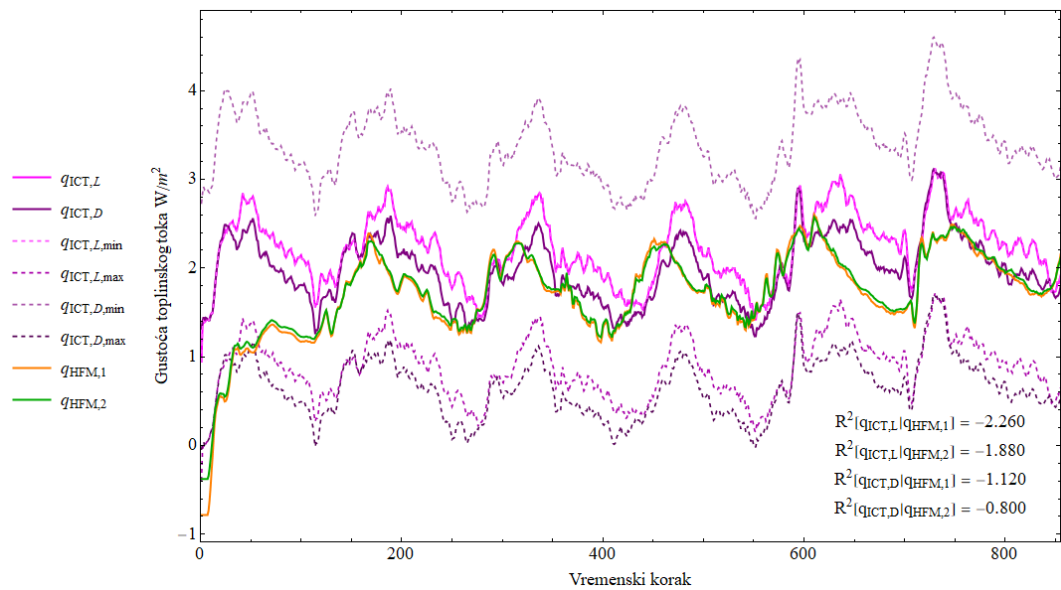
d) 4B



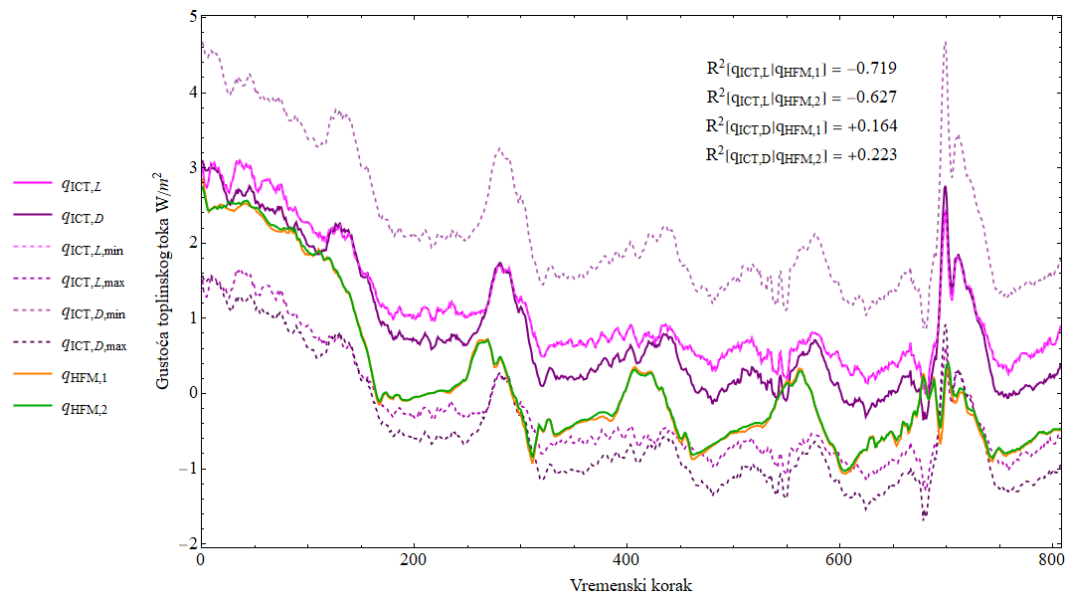
e) 7B



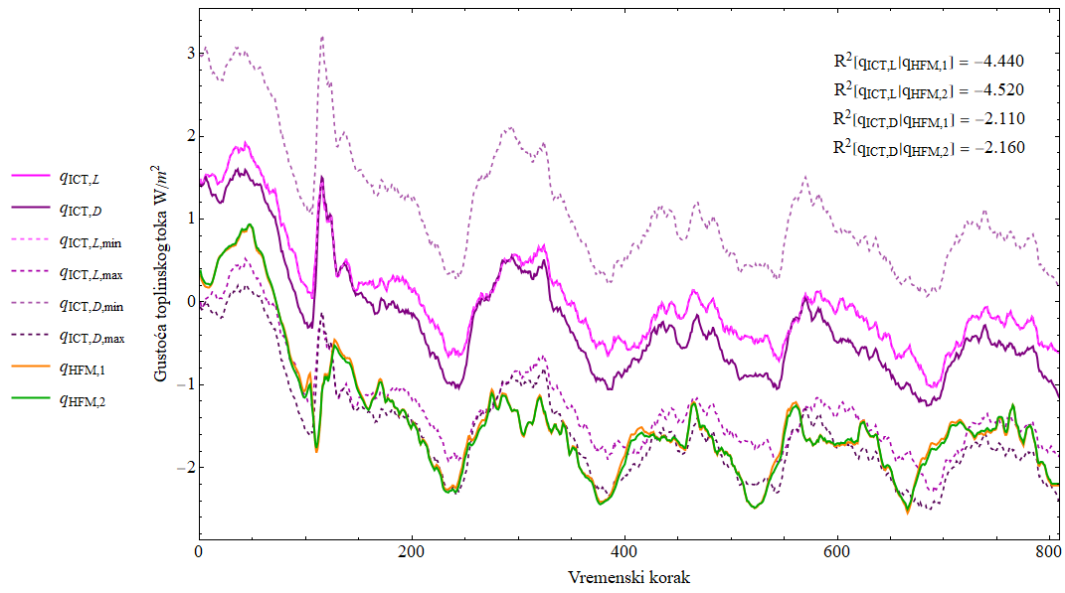
f) 8B



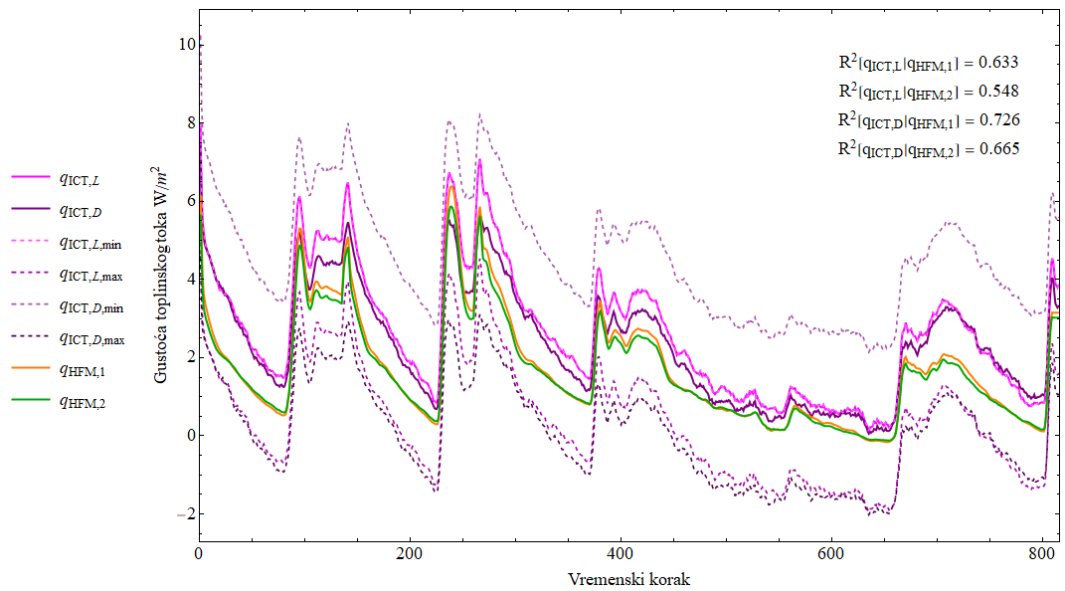
g) 9S



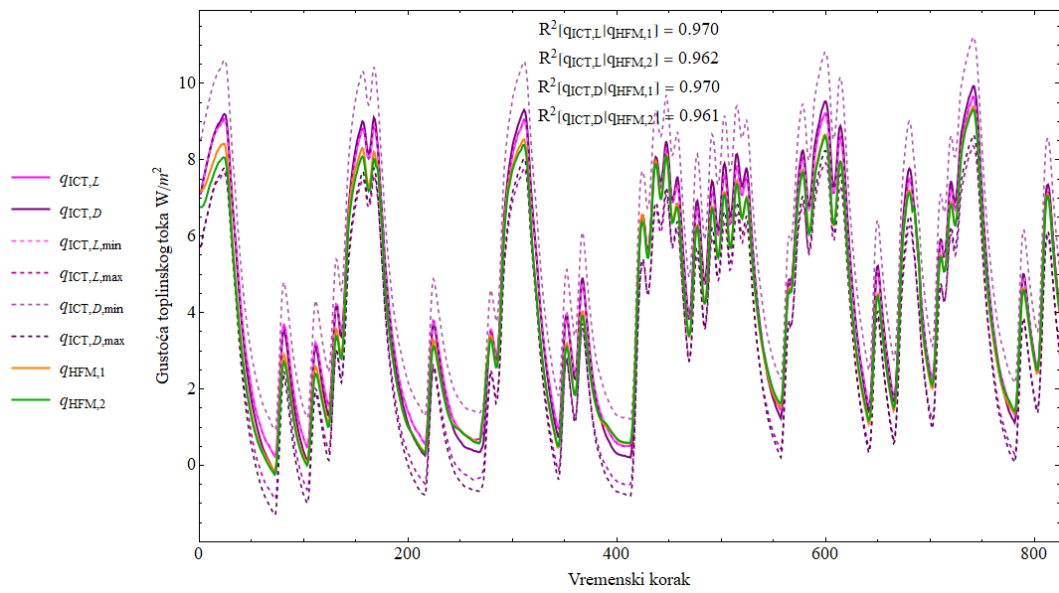
h) 10S



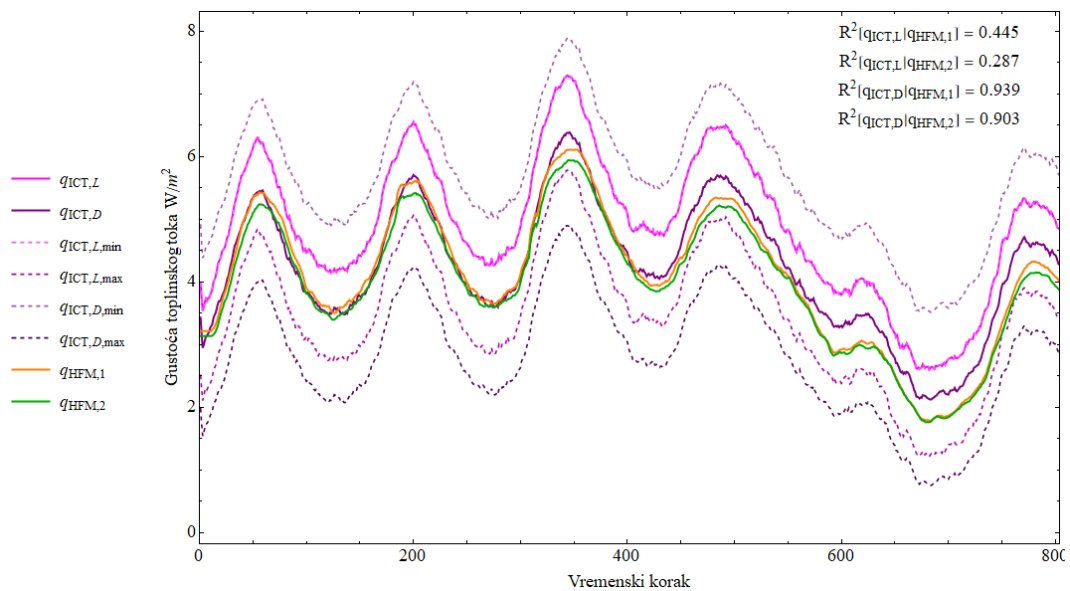
i) 11S



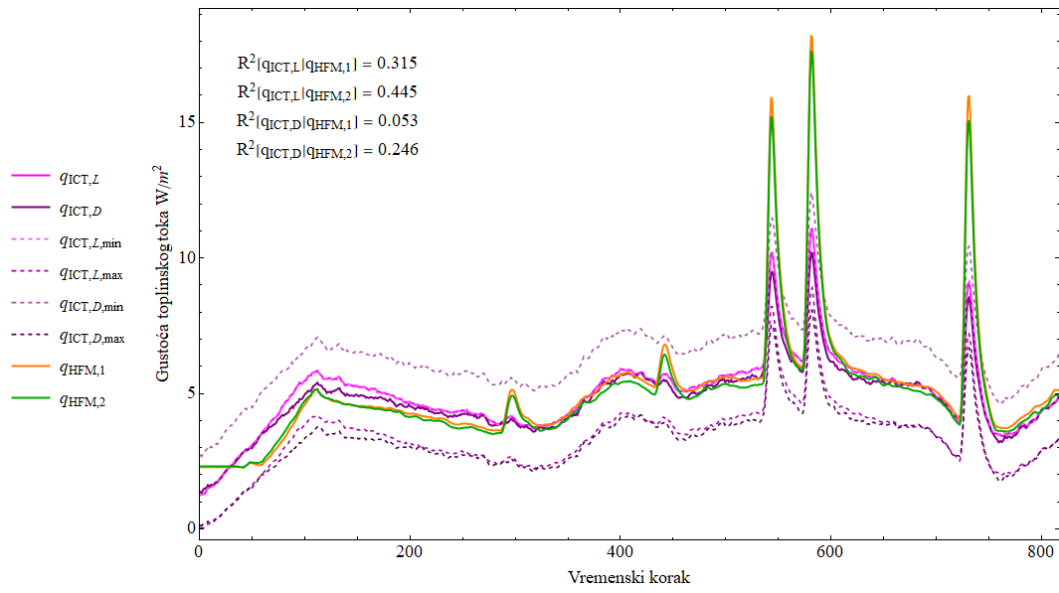
j) Ivanovec



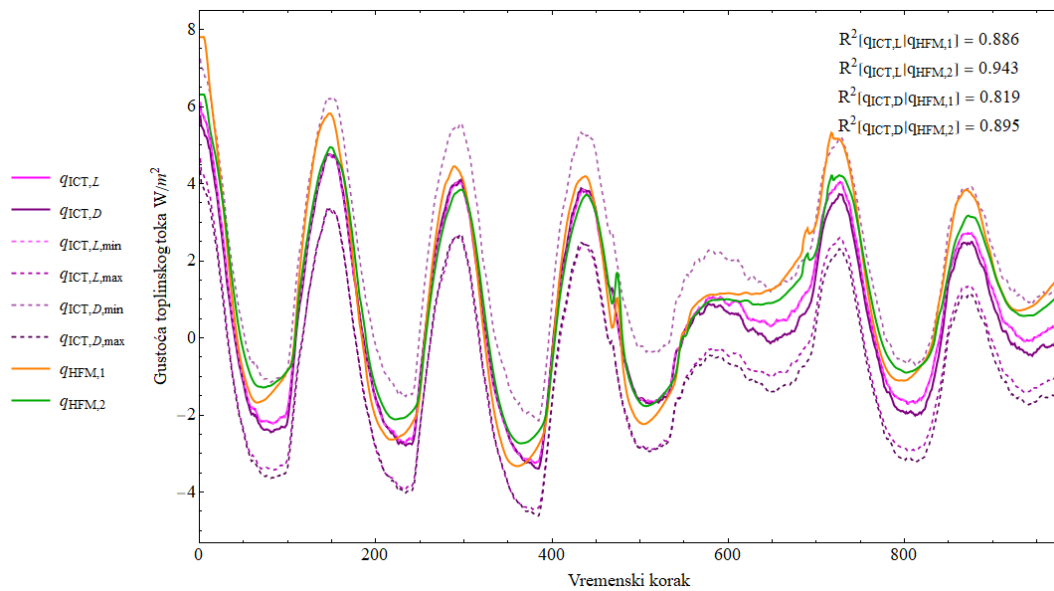
k) Lenti



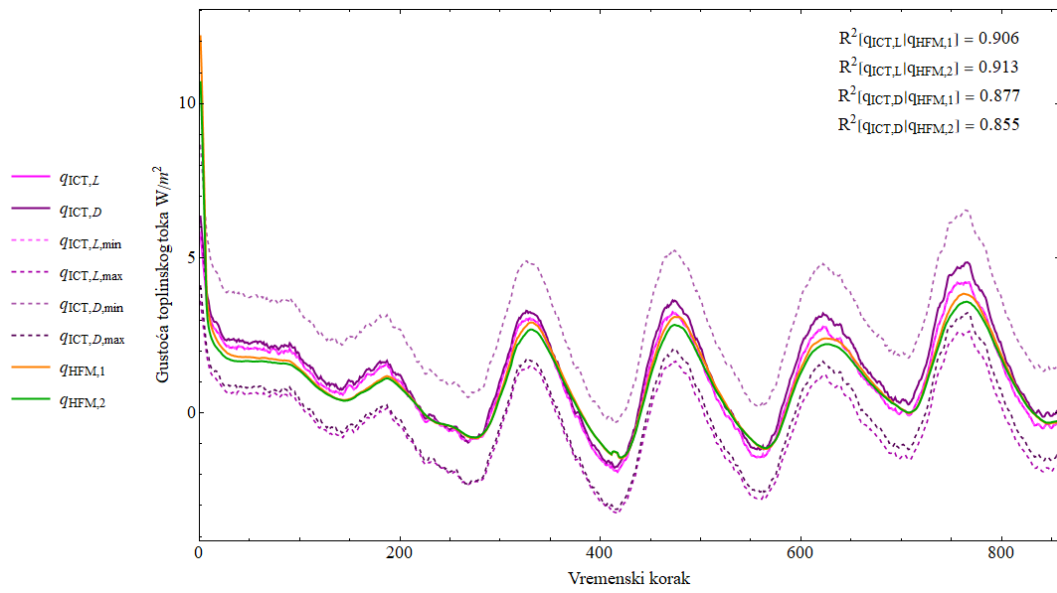
l) Muraszemenye



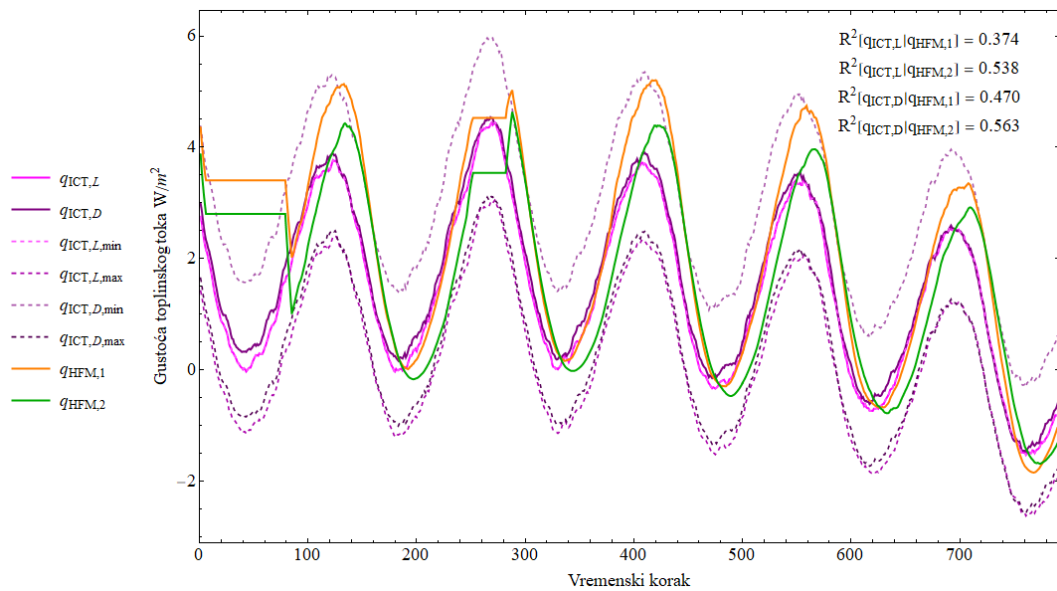
m) Mursko Središće



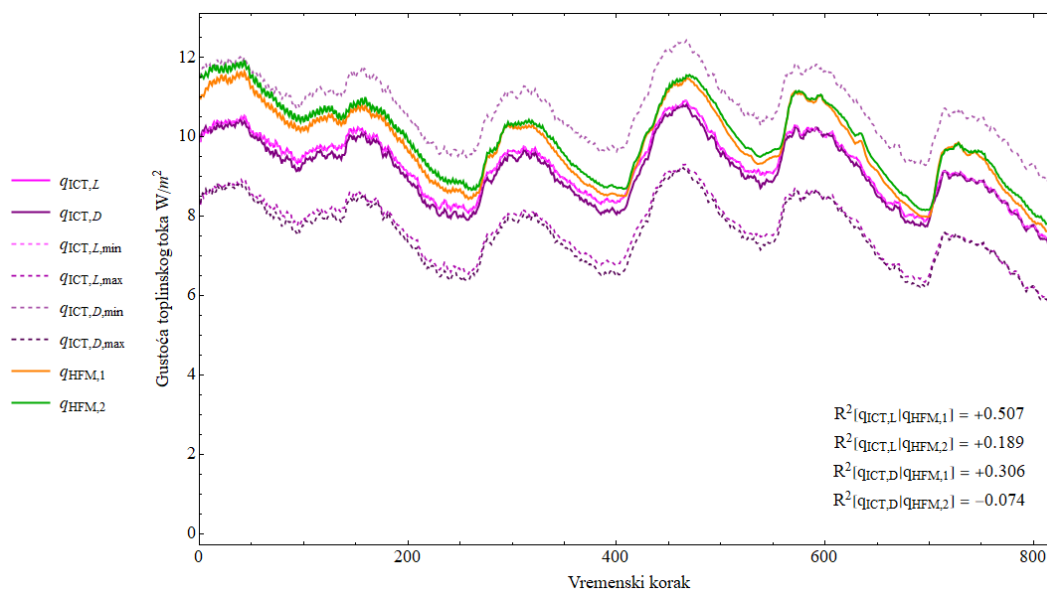
n) Palovec



o) Tornyszentmiklos



p) Totovec



q) Vapori

Slika 74: Usporedba toplinskih tokova izmjerenih metodom HFM i aproksimiranih metodom ICT

6.3 Proračun U-vrijednosti

Nakon što su se ustanovili svi parametri za adekvatnu procjenu toplinskog toka iz izmjerenih parametara metodom ICT, moguće je primijeniti metode određivanja U-vrijednosti koje vrijede i za metodu HFM. Tablica 31 prikazuje U-vrijednosti određene metodom HFM i ICT te projektne U-vrijednosti (U_p). Kod laboratorijskih uzoraka projektne U-vrijednosti se mogu uzeti kao referentne jer su karakteristike i debljine materijala poznate dok su kod terenskih mjerenja one pretpostavljene. Tablica 33 prikazuje minimalne i maksimalne U-vrijednosti određene metodom ICT koje u obzir uzimaju neizotermnost površine, tj. odstupanje površinske temperature po površini zida. Minimalne i maksimalne projektne U-vrijednosti su određene za minimalni i maksimalni interval toplinskih provodljivosti za pojedine materijale.

Tablica 32 prikazuje usporedbu U-vrijednosti određene metodom HFM ($U_{HFM,1}$ i $U_{HFM,2}$) i ICT ($U_{ICT,L}$ i $U_{ICT,D}$). Maksimalna odstupanja od projektne U-vrijednosti (U_p) određene normom HRN EN ISO 6946 [2] dogodila su se za laboratorijske uzorke s izolacijom s unutarnje strane (10S i 11S) i uzorak bez izolacije (8B – prijelazni period) te za terenske uzorke Palovec i Totovec gdje postoji problem utjecaja Sunčevog zračenja na jedan HFM tokomjer i problem strujanja zraka zbog blizine prozora, tj. velik utjecaj toplinskog toka što je vidljivo i analizom termograma i u rezultatima mjerenja danim u Prilogu 2.

Tablica 31: U-vrijednosti određene metodama ICT i HFM

Model	U_p	$U_{p,min}$	$U_{p,max}$	$U_{ICT,L}$	$U_{ICT,D}$	$U_{HFM,1}$	$U_{HFM,2}$
	[W/(m ² K)]						
1K	0,250	0,208	0,292	0,301	0,202	0,384	0,255
2K	0,250	0,208	0,292	0,184	0,330	0,418	0,404
3K	0,250	0,208	0,292	0,065	0,101	0,118	0,139
4B	4,360	4,210	4,510	3,500	2,860	4,300	3,140
7B	4,360	4,210	4,510	4,010	3,560	4,330	3,410
8B	4,360	4,210	4,510	1,150	2,310	3,800	2,530
9S	0,219	0,191	0,248	0,258	0,220	0,210	0,212
10S	0,219	0,191	0,248	0,779	0,571	0,188	0,167
11S	0,219	0,191	0,248	0,039	0,073	0,205	0,207
Ivanovec	0,477	0,418	0,535	0,957	0,872	0,666	0,658
Lenti	0,346	0,305	0,386	0,300	0,224	0,383	0,232
Muraszemenye	1,390	1,300	1,470	1,790	1,680	1,510	1,610
Mursko Središće	1,680	1,580	1,770	1,020	1,040	1,010	0,989
Palovec	1,390	1,300	1,470	0,083	0,090	0,172	0,175
Tornyszentmiklos	1,390	1,300	1,470	0,076	0,100	0,089	0,084
Totovec	1,100	1,020	1,180	0,374	0,095	0,838	0,110
Vaspor	1,390	1,300	1,470	1,180	1,230	1,140	1,180

Tablica 32 prikazuje usporedbu U-vrijednosti određenu metodama HFM i ICT za sve uzorke te relativnu grešku dU_1 i dU_2 :

$$dU_1 = \frac{|U_{ICT,L} - U_{HFM,1}|}{U_{HFM,1}} \quad (156)$$

$$dU_2 = \frac{|U_{ICT,D} - U_{HFM,2}|}{U_{HFM,2}}$$

Tablica 32: Usporedba U-vrijednosti određene metodom HFM i ICT

Model	$U_{ICT,L}$	$U_{ICT,D}$	$U_{HFM,1}$	$U_{HFM,2}$	dU_1	dU_2
	[W/(m ² K)]				%	%
1K	0,301	0,202	0,384	0,255	21,61	20,78
2K	0,184	0,33	0,418	0,404	55,98	18,32
3K	0,065	0,101	0,118	0,139	44,92	27,34

4B	3,5	2,86	4,3	3,14	18,60	8,92
7B	4,01	3,56	4,33	3,41	7,39	4,40
8B	1,15	2,31	3,8	2,53	69,74	8,70
9S	0,258	0,22	0,21	0,212	22,86	3,77
10S	0,779	0,571	0,188	0,167	314,36	241,92
11S	0,039	0,073	0,205	0,207	80,98	64,73
Ivanovec	0,957	0,872	0,666	0,658	43,69	32,52
Lenti	0,3	0,224	0,383	0,232	21,67	3,45
Muraszemenye	1,79	1,68	1,51	1,61	18,54	4,35
Mursko Središće	1,02	1,04	1,01	0,989	0,99	5,16
Palovec	0,083	0,09	0,172	0,175	51,74	48,57
Tornyszentmiklos	0,076	0,1	0,089	0,084	14,61	19,05
Totovec	0,374	0,095	0,838	0,11	55,37	13,64
Vaspor	1,18	1,23	1,14	1,18	3,51	4,24

Tablica 33: Minimalne i maksimalne U-vrijednosti određene metodom ICT (zbog neizoternosti površine)

Model	U _p	U _{p,min}	U _{p,max}	U _{ICT,L,min}	U _{ICT,L,max}	U _{ICT,D,min}	U _{ICT,D,max}
	[W/(m ² K)]						
1K	0,250	0,208	0,292	0,153	0,301	0,044	0,366
2K	0,250	0,208	0,292	0,184	0,771	0,304	0,930
3K	0,250	0,208	0,292	0,065	0,178	0,012	0,214
4B	4,360	4,210	4,510	3,500	3,950	2,500	3,230
7B	4,360	4,210	4,510	4,010	3,560	4,330	3,410
8B	4,360	4,210	4,510	1,150	2,240	0,997	3,630
9S	0,219	0,191	0,248	0,258	0,104	0,378	0,068
10S	0,219	0,191	0,248	0,314	0,779	0,537	1,750
11S	0,219	0,191	0,248	0,039	0,185	0,078	0,217
Ivanovec	0,477	0,418	0,535	0,957	0,262	1,600	0,146
Lenti	0,346	0,305	0,386	0,300	0,224	0,383	0,232
Muraszemenye	1,390	1,300	1,470	1,790	1,290	2,220	1,150
Mursko Središće	1,680	1,580	1,770	1,020	0,699	1,360	0,723
Palovec	1,390	1,300	1,470	0,000	0,083	0,178	0,371

Tornyszentmiklos	1,390	1,300	1,470	0,076	0,098	0,065	0,271
Totovec	1,100	1,020	1,180	0,374	0,095	0,838	0,110
Vaspor	1,390	1,300	,1470	1,180	0,979	1,440	1,020

Tablica 34 prikazuje prihvatljivost izmjerene U-vrijednosti metodom srednje vrijednosti dane u normi HRN EN ISO 9869-1. Vidljivo je da skoro sve U-vrijednosti zadovoljavaju kriterije dane normom HRN EN ISO 9869-1. Za metodu HFM jedini uzorci koji ne zadovoljavaju kriterij (dR_{24} i $dR_{2/3} < 5\%$) su uzorci 2K i 8B. Za metodu ICT kriterij ne zadovoljavaju uzorci 2K, 8B, 10S i 11S. Međutim, odstupanja od 11,6 i 6,39 % su uzeta kao zadovoljavajuća dok se rezultati U-vrijednosti 10S i 11S odbacuju zbog velikog utjecaja reflektivnosti površine na toplinske tokove određene metodom ICT što je pokazano u poglavlju 6.2.

Tablica 34: Prihvatljivost izračunate U-vrijednosti metodom HFM prema normi HRN EN ISO 9869-1

Model	$U_{HFM,1}$	dR_{24}	$dR_{2/3}$	$U_{HFM,2}$	dR_{24}	$dR_{2/3}$
	[W/(m ² K)]	[%]	[%]	[W/(m ² K)]	[%]	[%]
1K	0,384	0,321	0,315	0,255	0,042	0,607
2K	0,418	11,600	0,732	0,404	11,900	0,329
3K	0,118	0,111	1,35	0,139	0,268	1,650
4B	4,300	0,010	0,007	3,140	0,003	0,178
7B	4,010	0,004	0,001	3,360	0,001	0,001
8B	3,800	0,776	6,390	2,530	1,880	1,390
9S	0,210	0,001	0,053	0,212	0,009	0,071
10S	0,188	0,003	1,150	0,167	0,001	2,290
11S	0,205	0,001	0,447	0,207	0,001	0,112
Ivanovec	0,666	0,021	2,380	0,658	0,155	2,100
Lenti	0,242	0,065	0,047	0,280	0,009	0,030
Muraszemenye	1,510	0,140	0,308	1,610	0,272	0,047
Mursko Središće	1,010	0,099	0,177	0,989	0,123	0,231
Palovec	0,172	0,060	0,336	0,175	0,009	0,057
Tornyszentmiklos	0,089	0,022	0,355	0,084	0,094	0,260
Totovec	0,633	0,003	0,018	0,436	0,019	0,018
Vaspor	1,140	0,566	0,105	1,180	0,342	0,023

Tablica 35: Prihvatljivost izračunate U-vrijednosti metodom ICT prema normi HRN EN ISO 9869-1

Model	$U_{ICT,L}$	dR_{24}	$dR_{2/3}$	$U_{ICT,D}$	dR_{24}	$dR_{2/3}$
	[W/(m ² K)]	[%]	[%]	[W/(m ² K)]	[%]	[%]
1K	0,301	0,003	0,361	0,202	0,128	0,247
2K	0,184	10,300	0,314	0,330	4,210	0,693
3K	0,065	0,038	0,064	0,101	0,058	0,512
4B	3,500	0,066	0,021	2,860	0,003	0,082
7B	4,010	0,002	0,005	3,870	0,001	0,002
8B	1,150	1,630	5,530	2,310	2,210	0,966
9S	0,258	0,001	0,004	0,220	0,011	0,063
10S	0,779	26,400	0,337	0,571	27,300	3,830
11S	0,039	23,600	0,137	0,073	10,900	0,087
Ivanovec	0,957	0,098	0,060	0,872	0,062	0,190
Lenti	0,300	0,015	0,023	0,308	0,003	0,120
Muraszemenye	1,790	0,138	0,420	1,680	0,006	0,355
Mursko Središće	1,020	0,052	0,008	1,040	0,011	0,030
Palovec	0,083	0,289	0,672	0,090	0,126	0,004
Tornyszentmiklos	0,076	0,036	0,234	0,100	1,070	2,010
Totovec	0,374	0,004	0,045	0,467	0,009	0,059
Vaspor	1,180	0,015	0,914	1,230	0,000	1,110

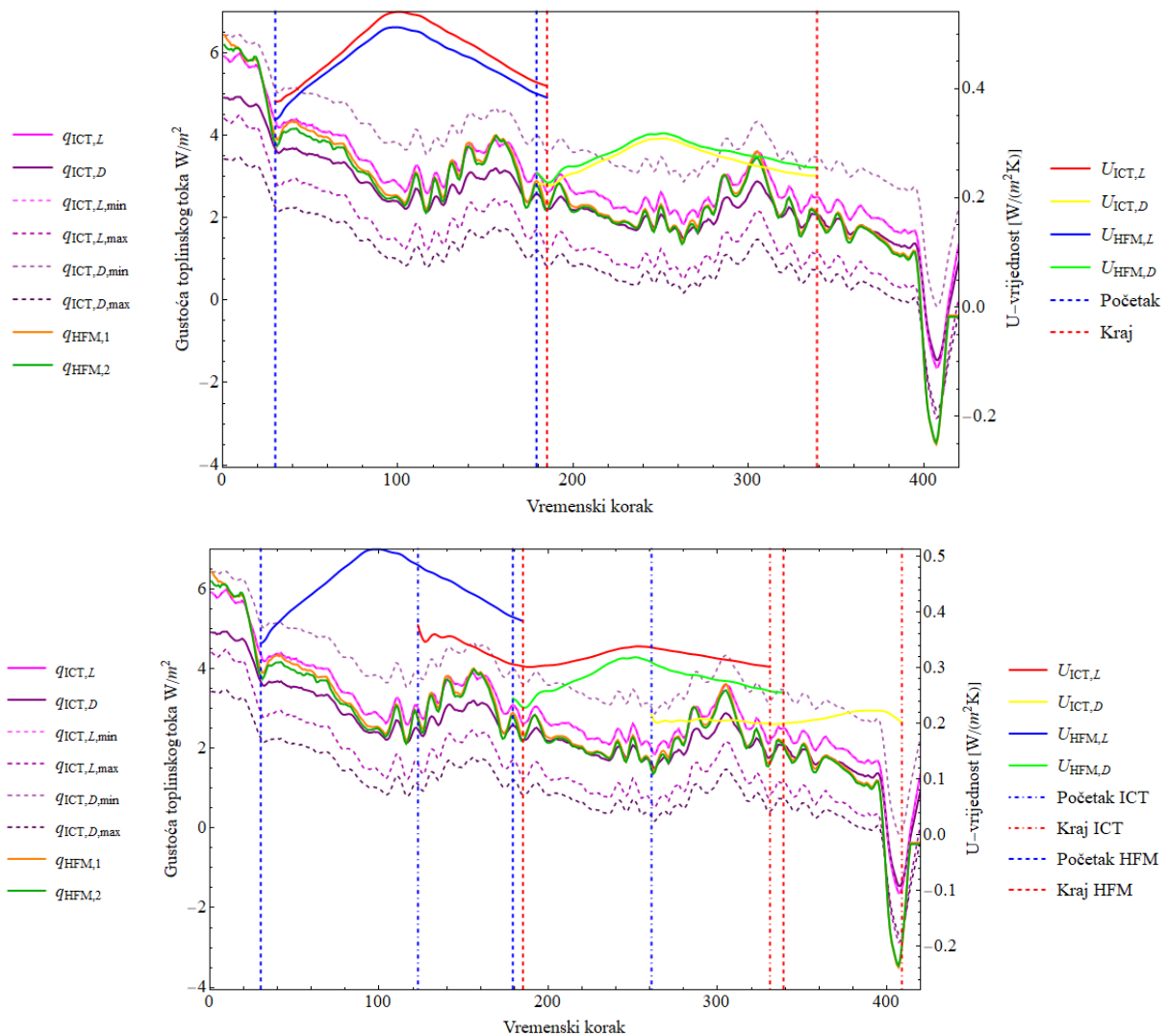
6.3.1 HFM i ICT

U ovom poglavlju će se usporediti U-vrijednosti određene metodom srednje vrijednosti za metodu HFM i ICT.

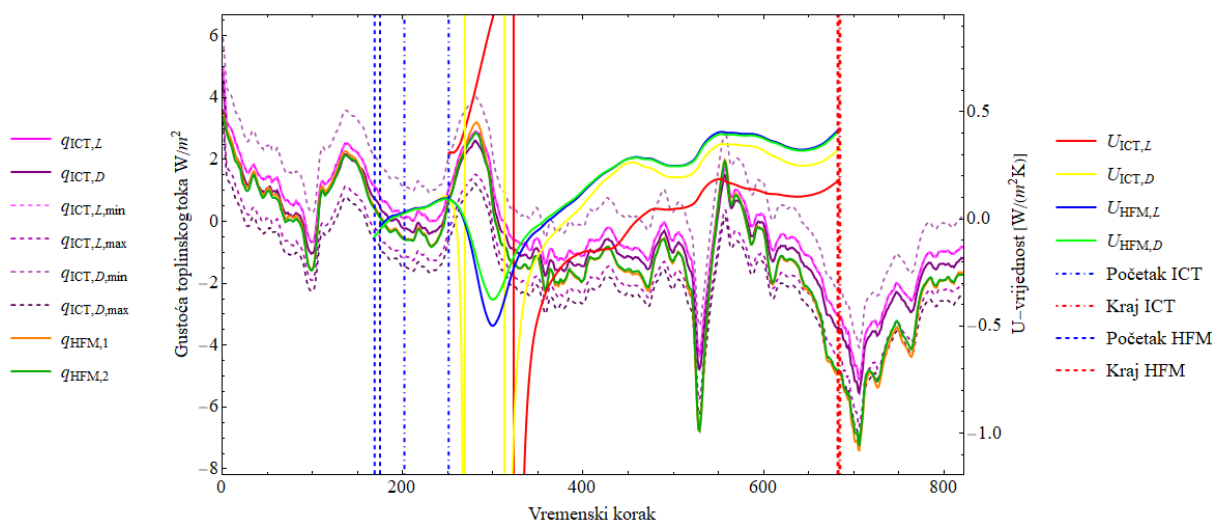
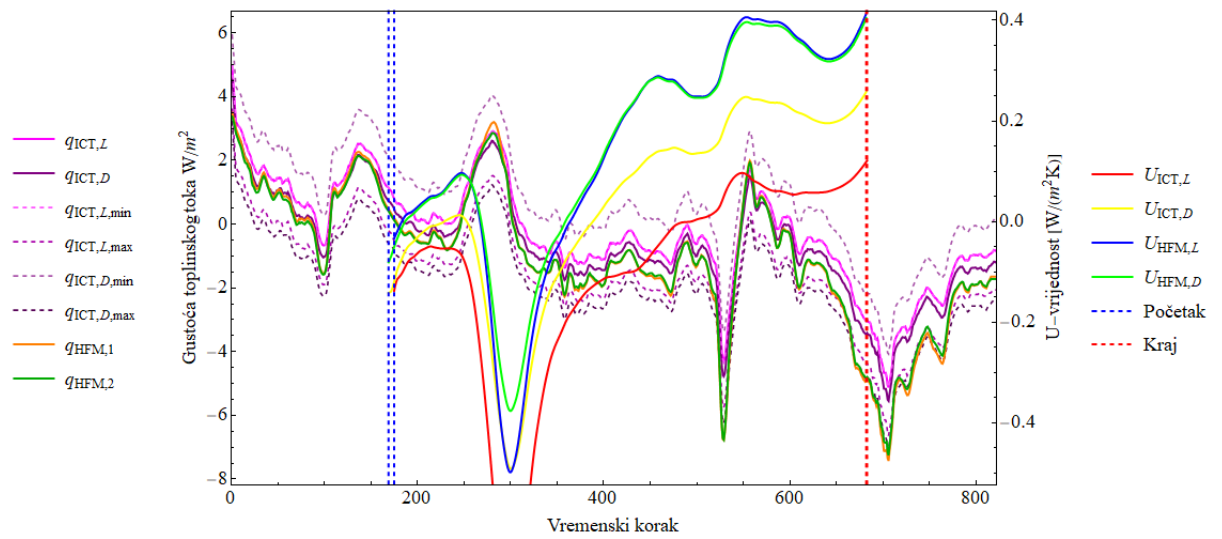
6.3.1.1 Metoda srednje vrijednosti

Slika 75 prikazuje U-vrijednosti određene metodom HFM i ICT. Na lijevoj strani grafova je dan toplinski tok, a na desnoj U-vrijednost određena za optimalni period. Optimalni period je određen na način da vrijednosti $R_{2/3}$ i R_{24} (Tablica 34 i Tablica 35) budu manji od 5 % ako je to moguće, a u slučaju da kriterij nije zadovoljen određen je period za prvu vrijednost $R_{2/3}$ i R_{24} koja je veća od 5 %. Za svaki uzorak su dana dva dijagrama. Prvi dijagram prikazuje U-vrijednost određenu za optimalni period prema mjerenju HFM i ICT pojedinačno, a drugi graf

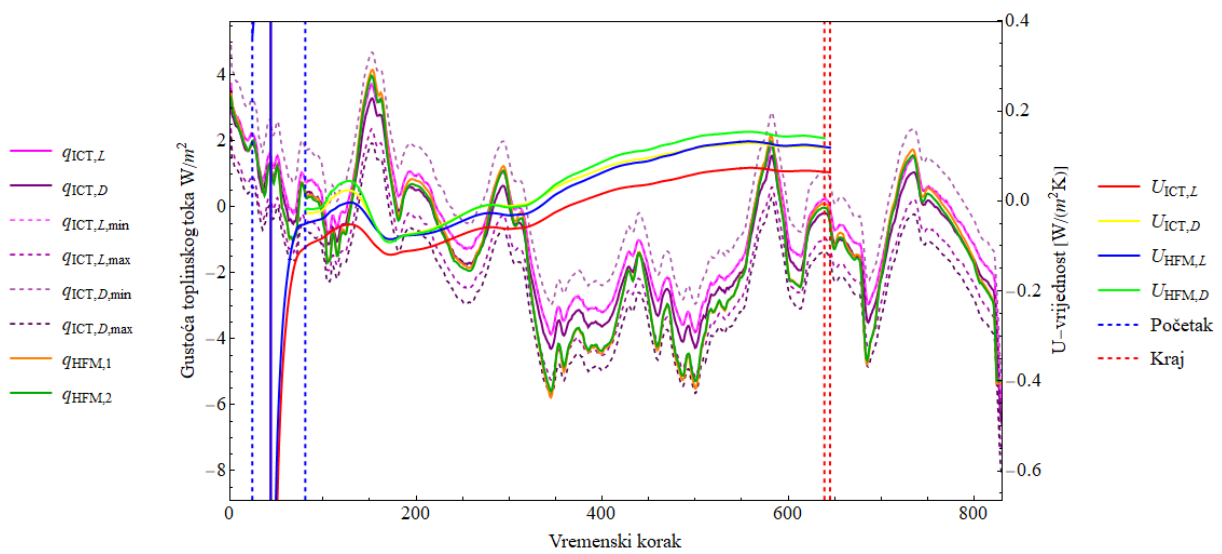
prikazuje U-vrijednost prema metodi ICT za optimalni period određen za metodu HFM. U slučaju kada funkcija U-vrijednosti određena metodom srednje vrijednosti asimptotski teži prema konstantnoj vrijednosti (crvena i žuta funkcija za metodu HFM i plava i zelena funkcija za metodu ICT) tada se prihvaća U-vrijednost određena ovom metodom i duljina trajanja mjerenja se smatra prihvatljivom. Ovaj kriterij nije zadovoljen za uzorke 2K, Ivanovec, Muraszemenye, Palovec i Vaspur, a parcijalno je zadovoljen za uzorke 1K, 8B i Mursko Središće. Prema tome, za te uzorke je potrebno produljiti trajanje ispitivanja.

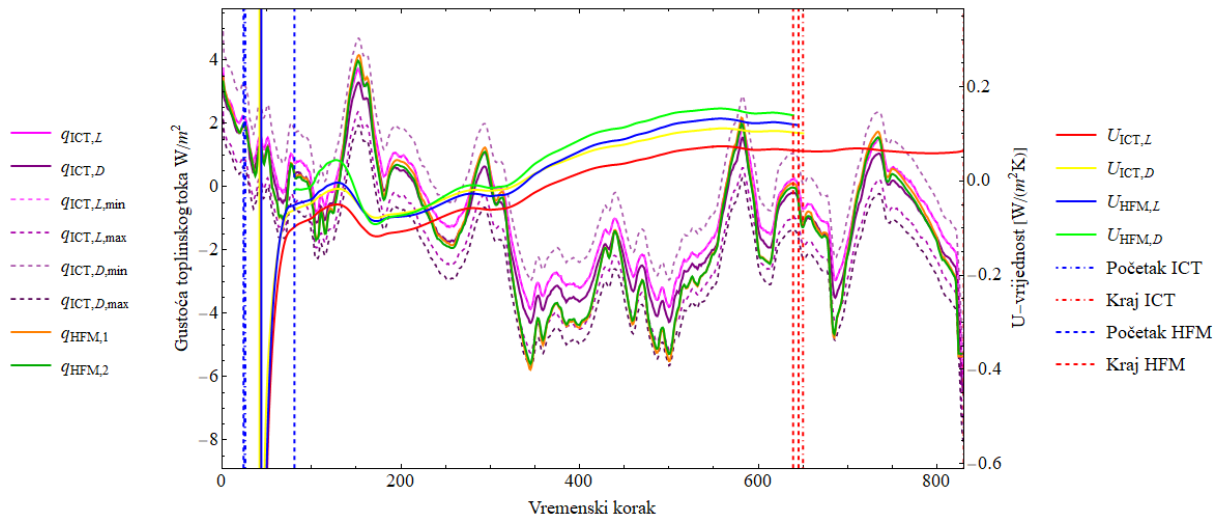


a) 1K

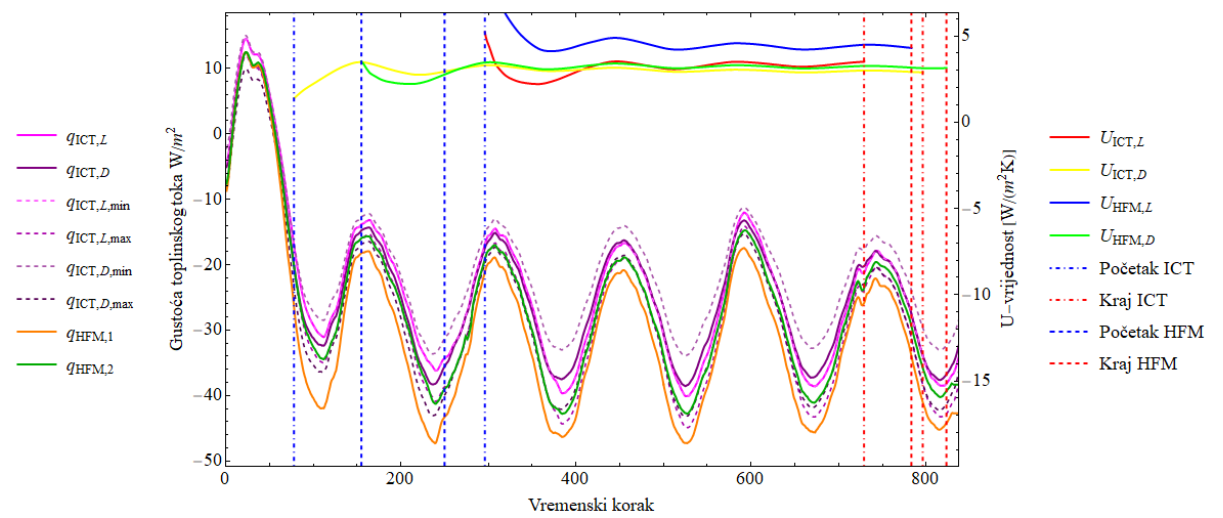
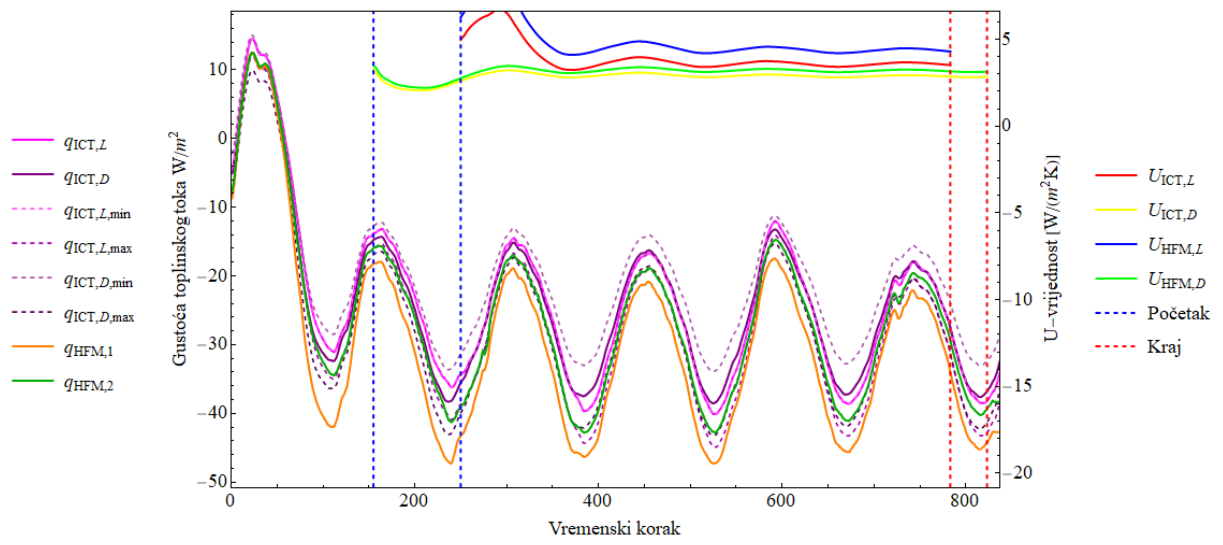


b) 2K

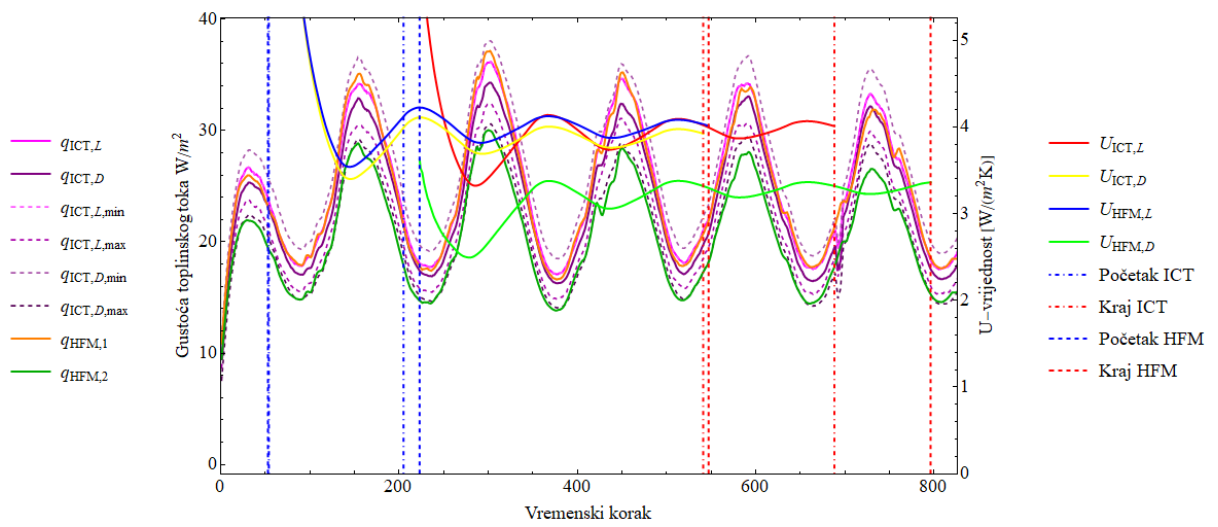
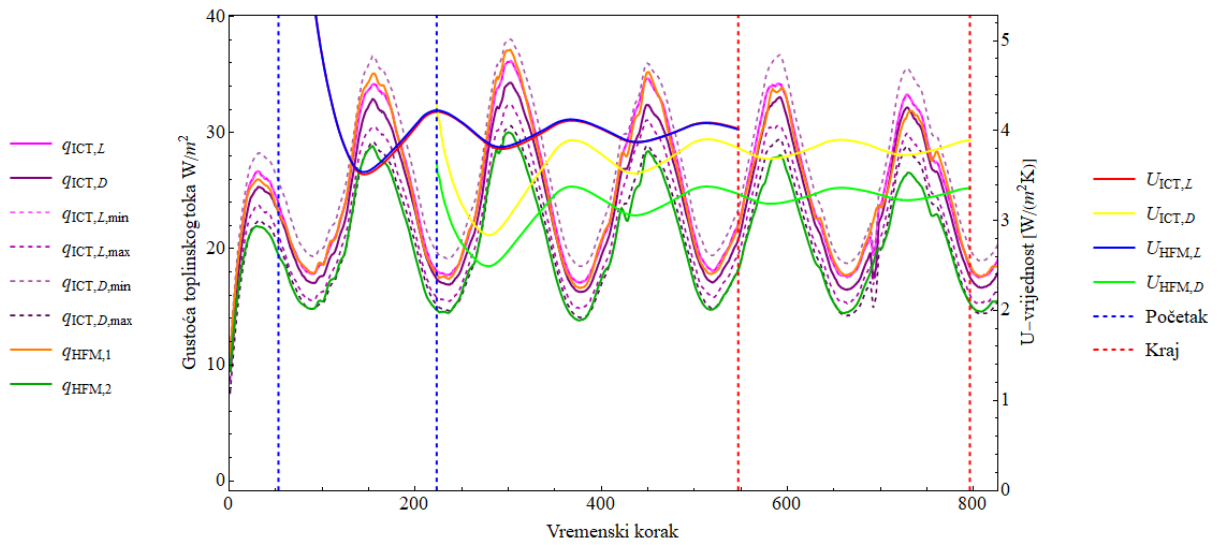




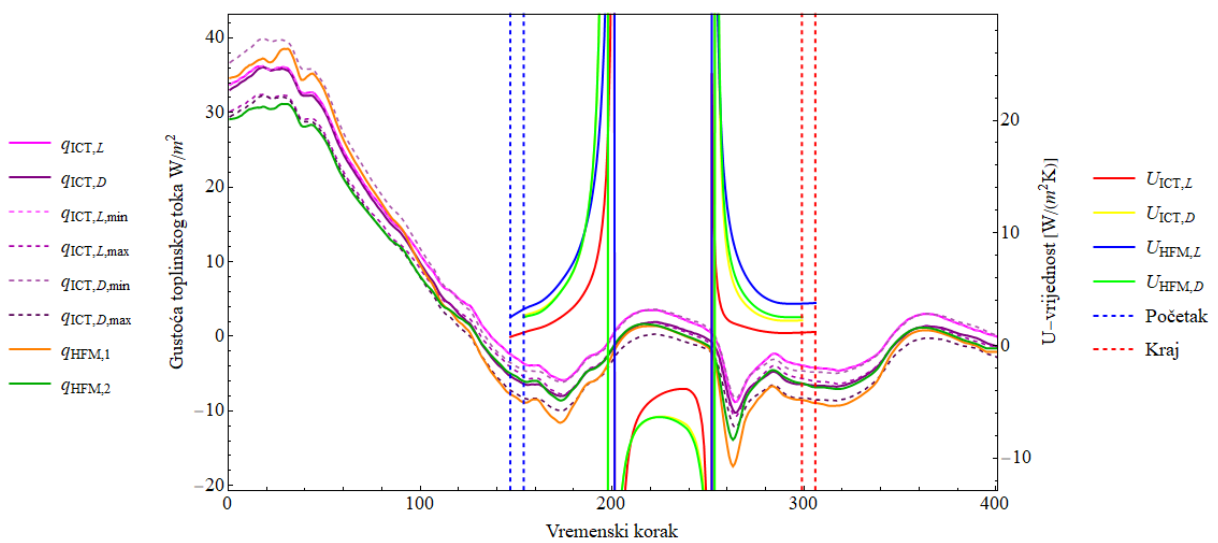
c) 3K

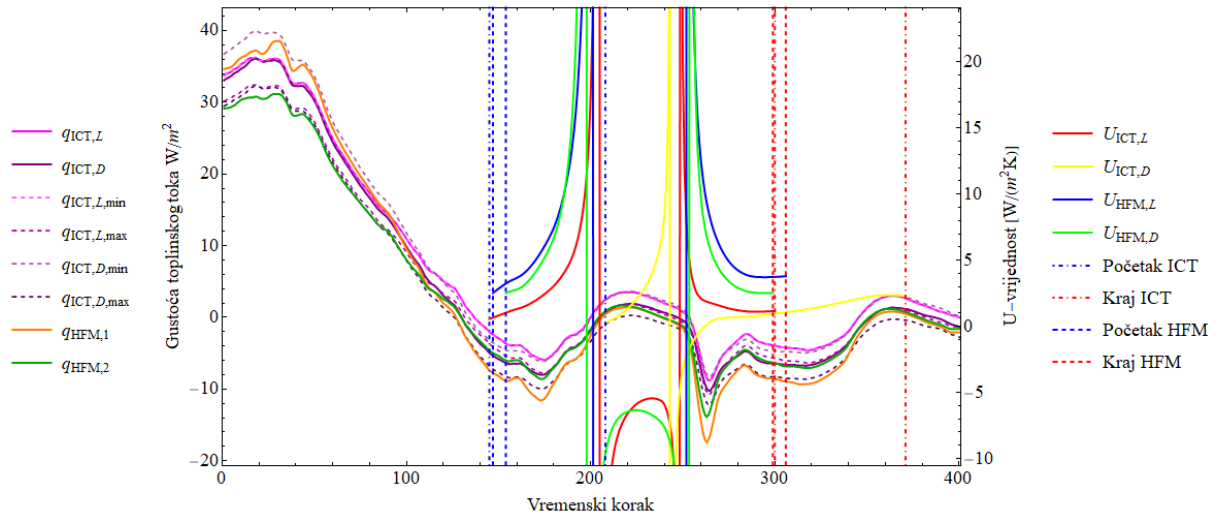


d) 4B

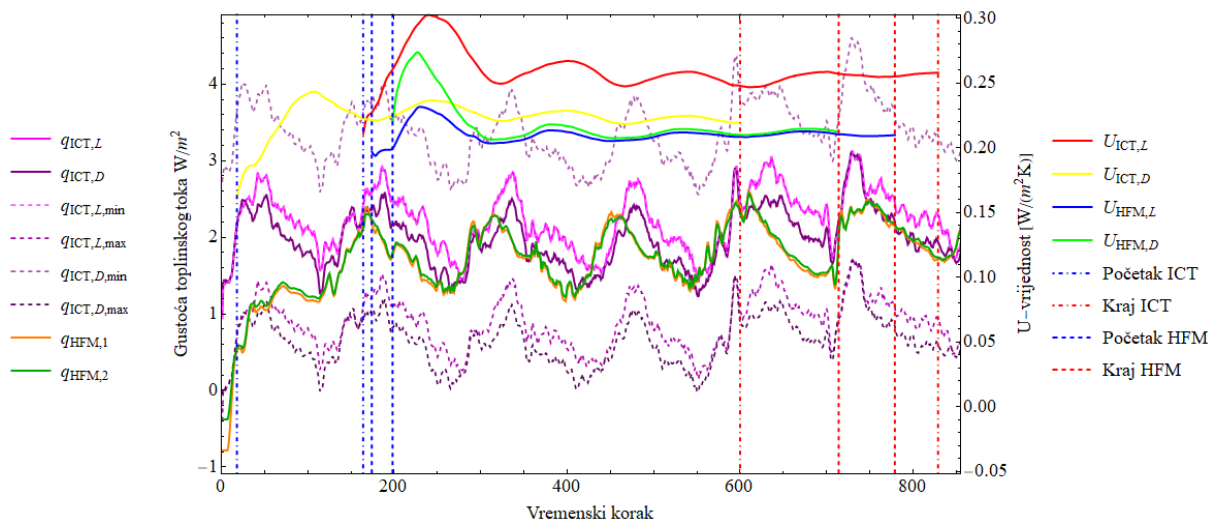
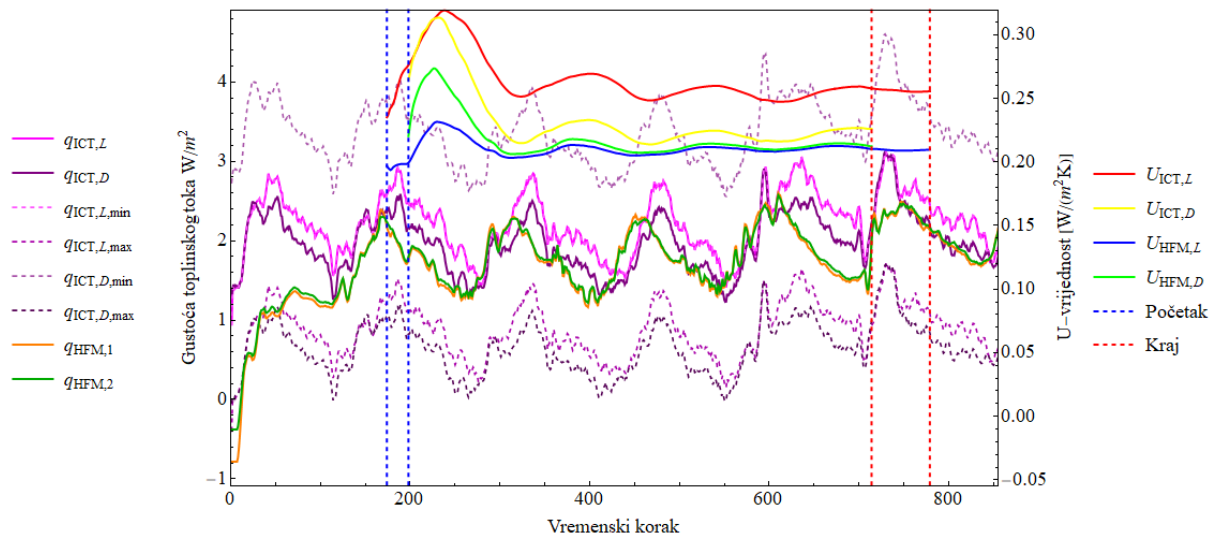


e) 7B

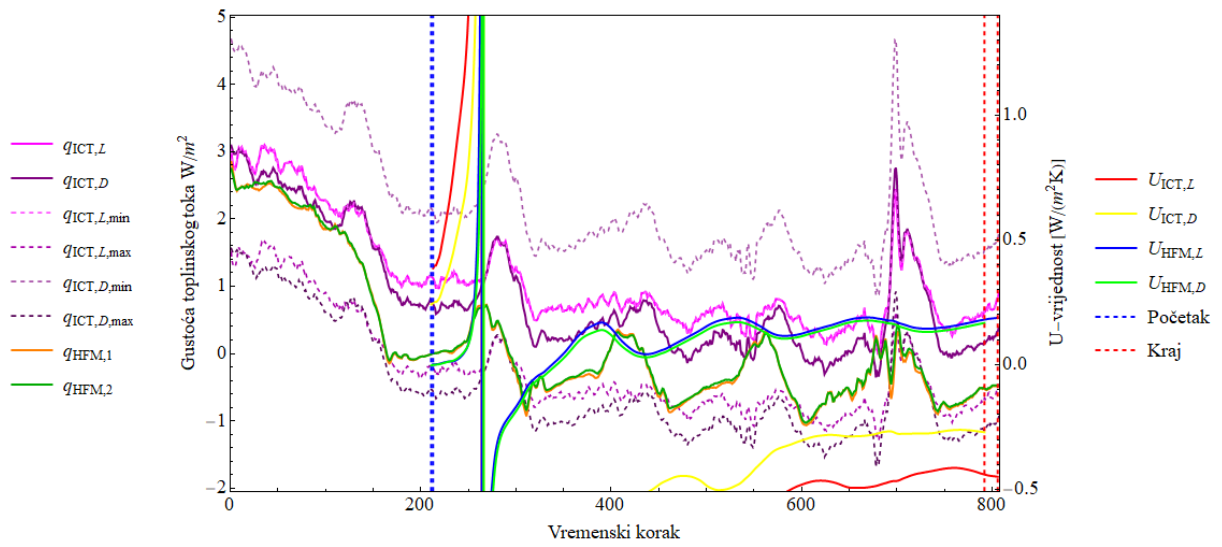




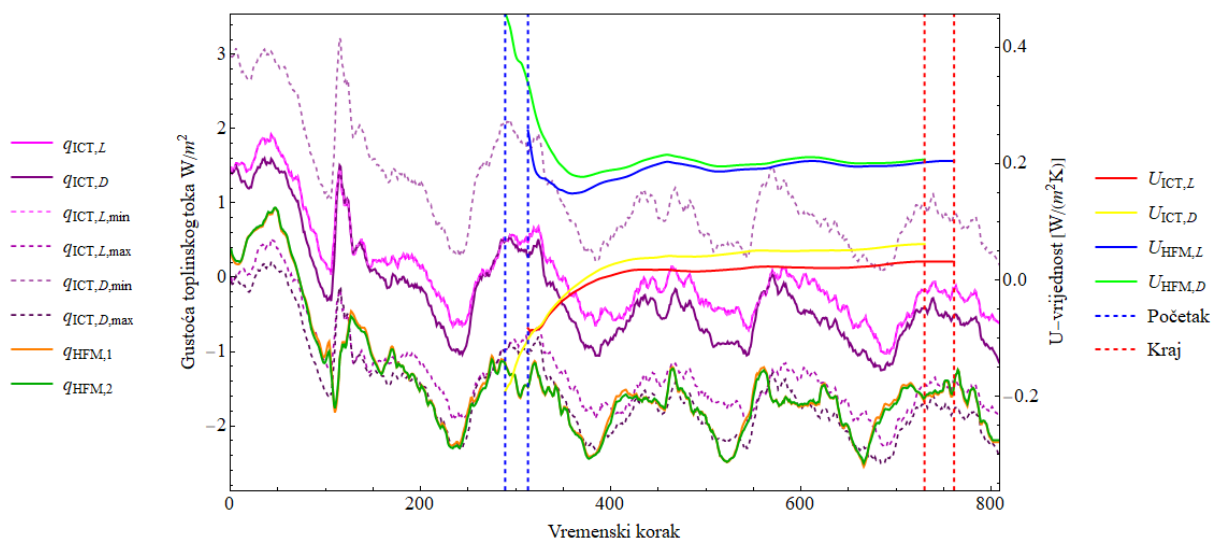
f) 8B

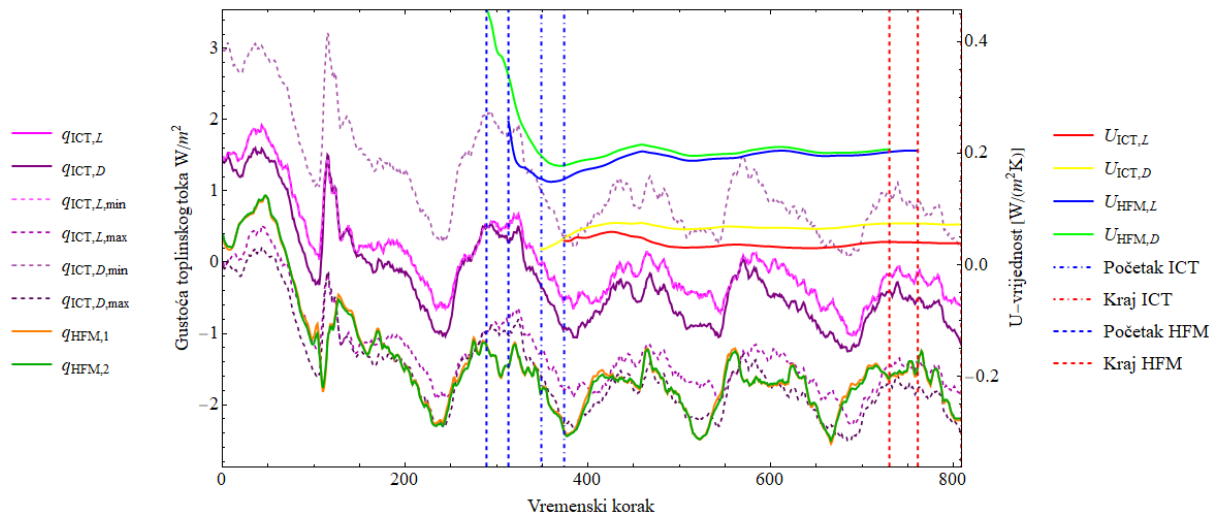


g) 9S

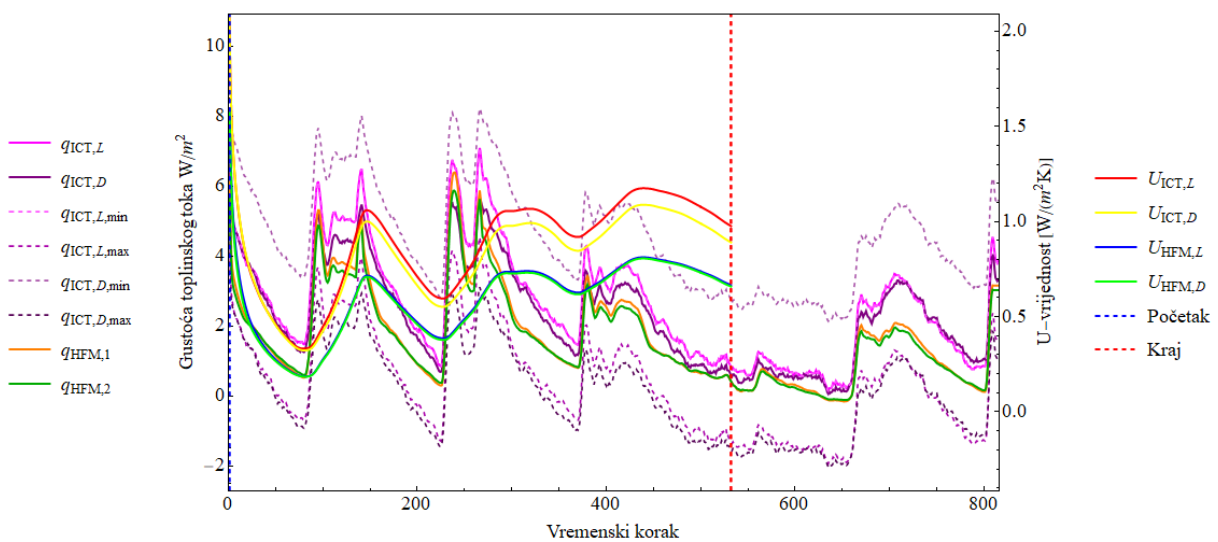


h) 10S

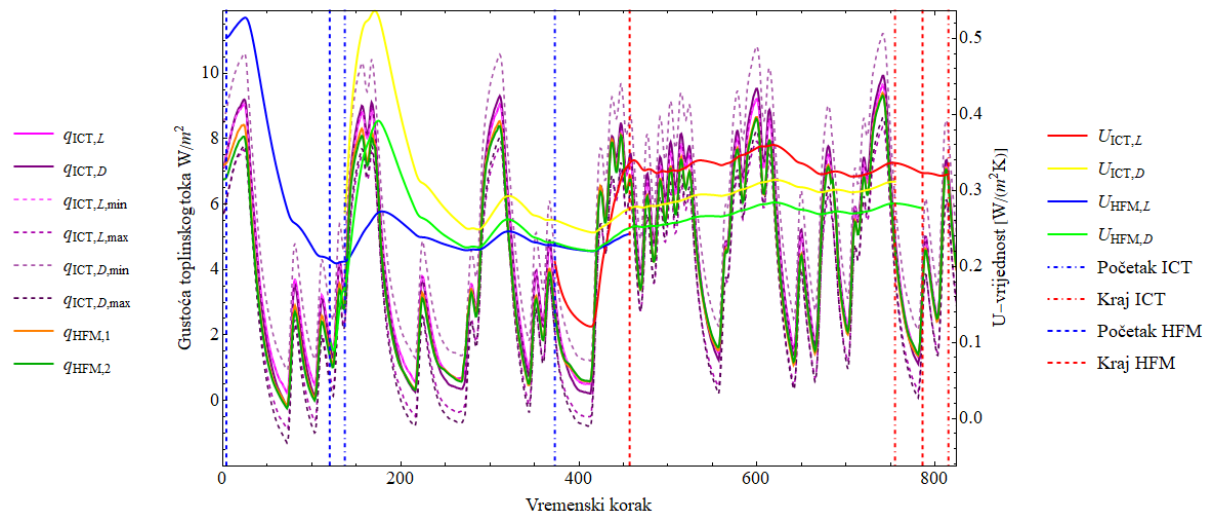
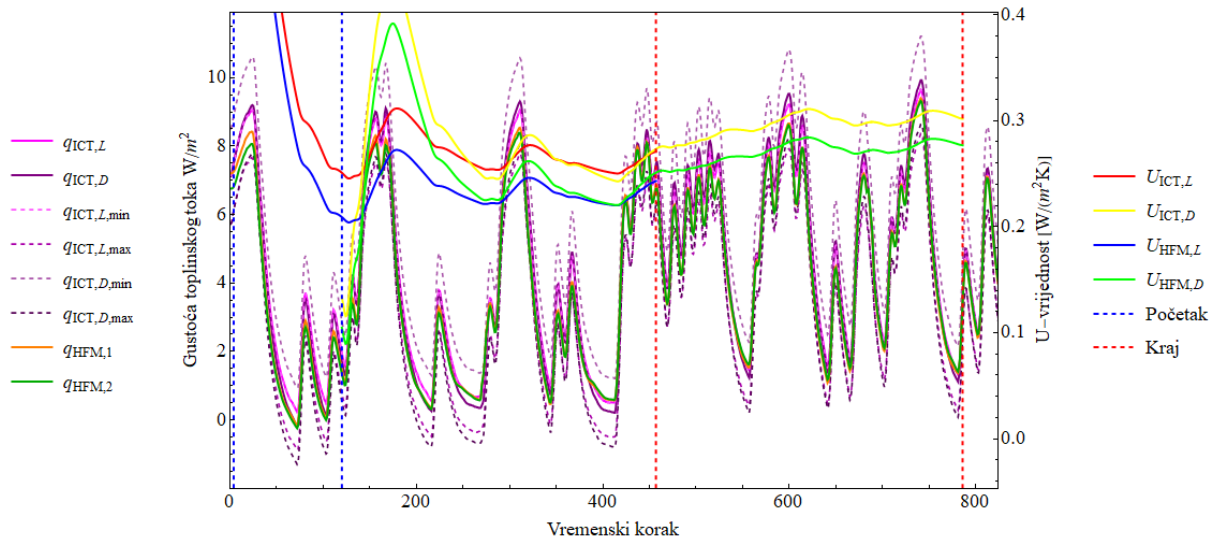




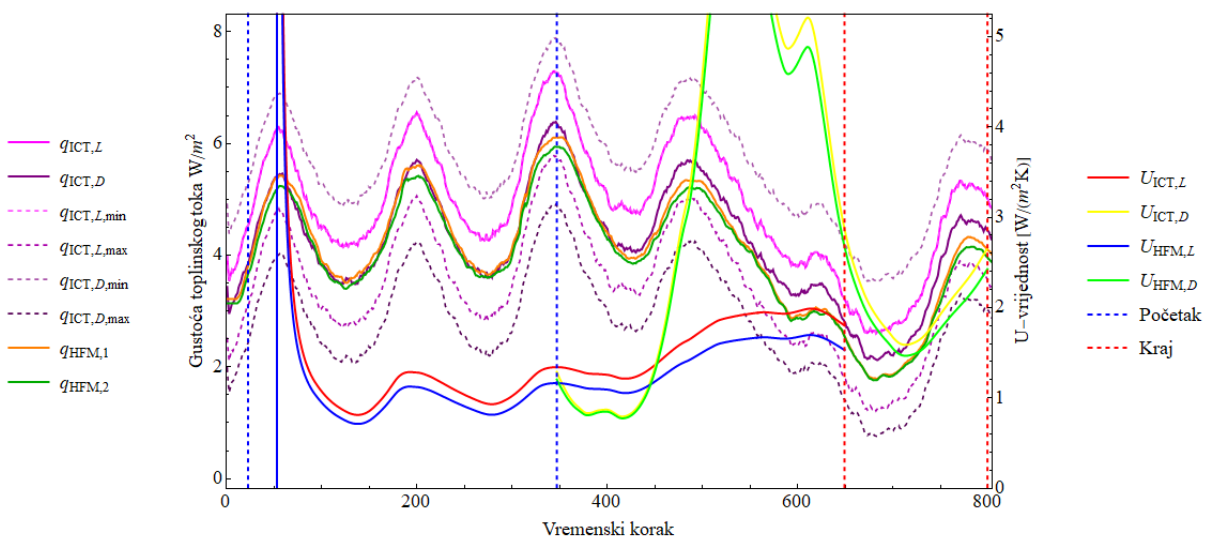
i) 11S

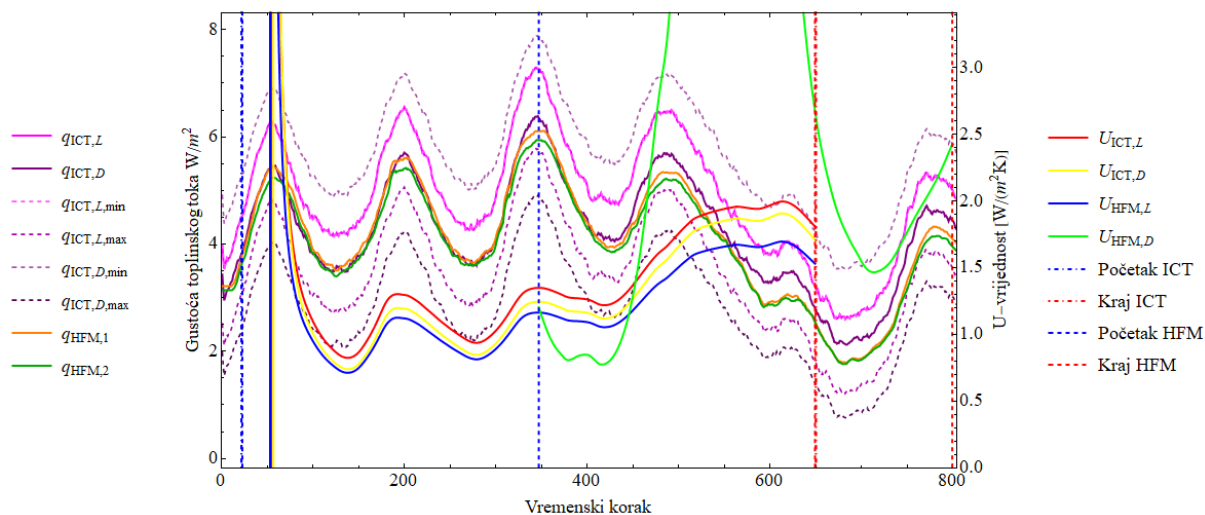


j) Ivanovec

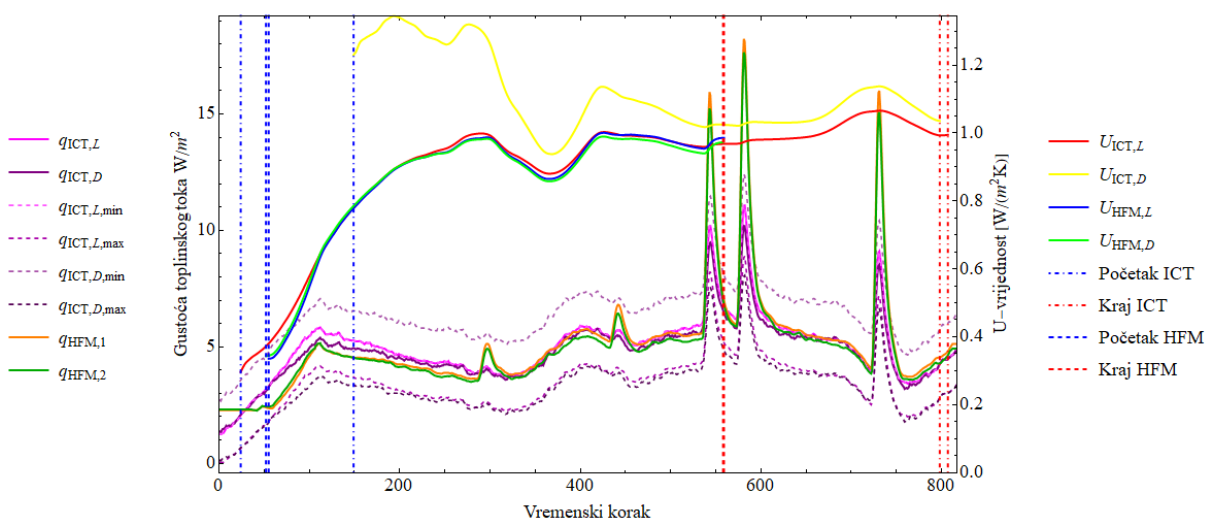
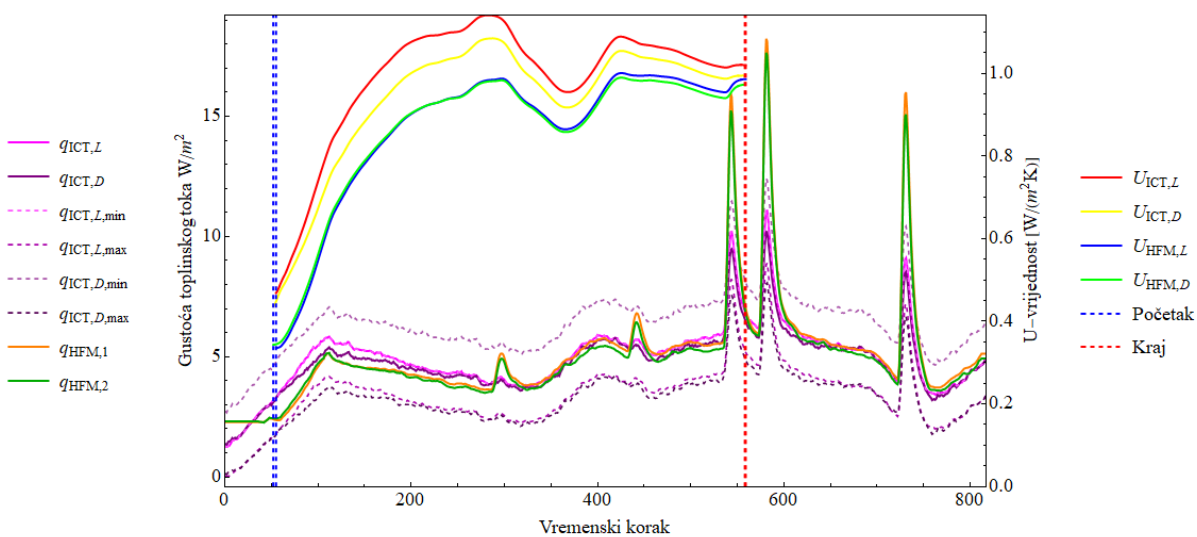


k) Lenti

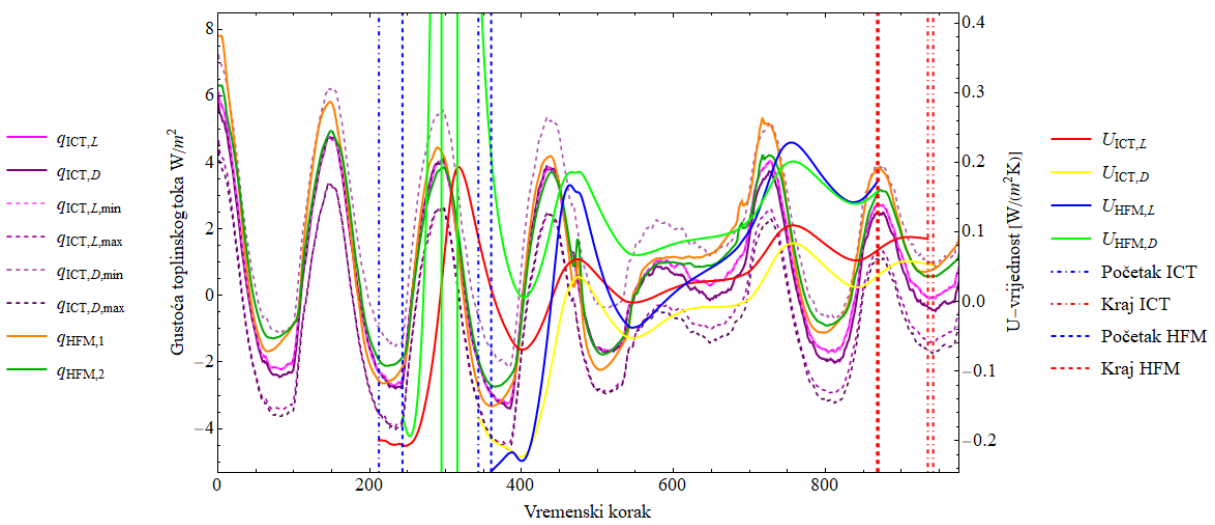
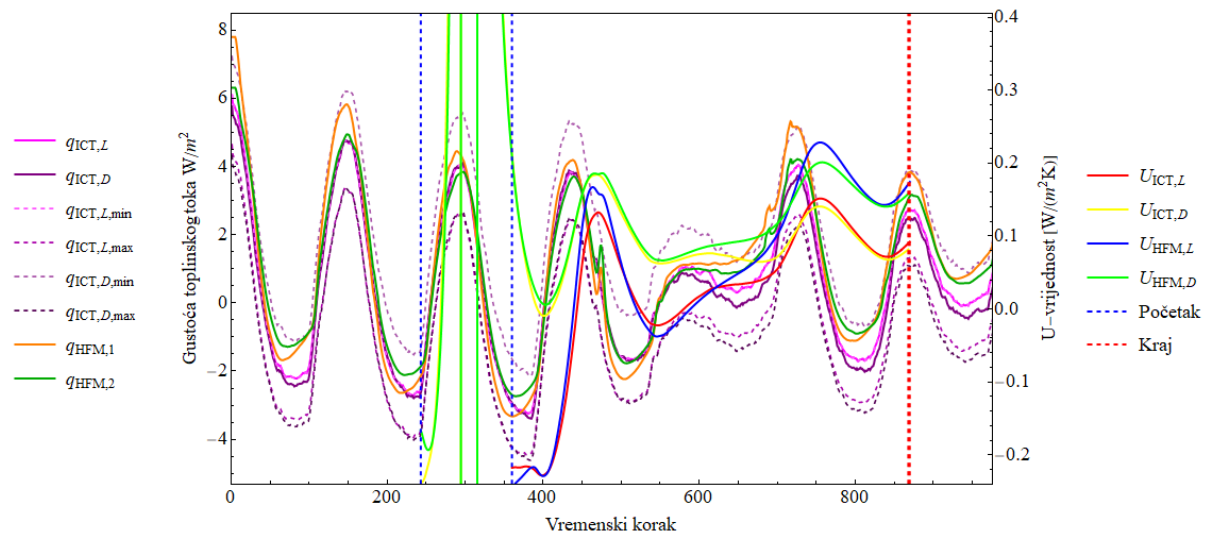




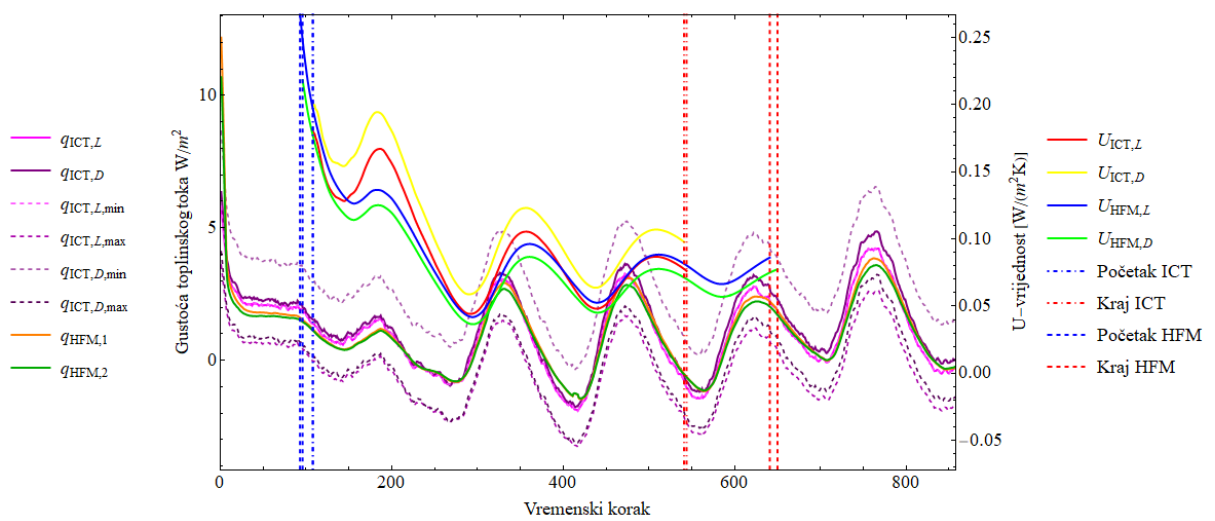
l) Muraszemeye

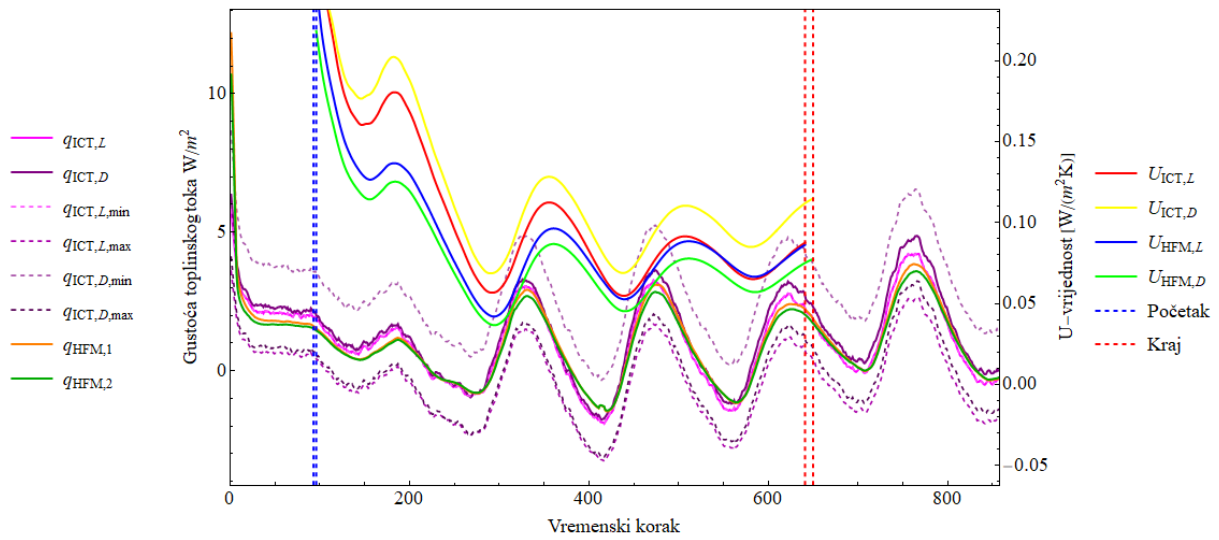


m) Mursko Središće

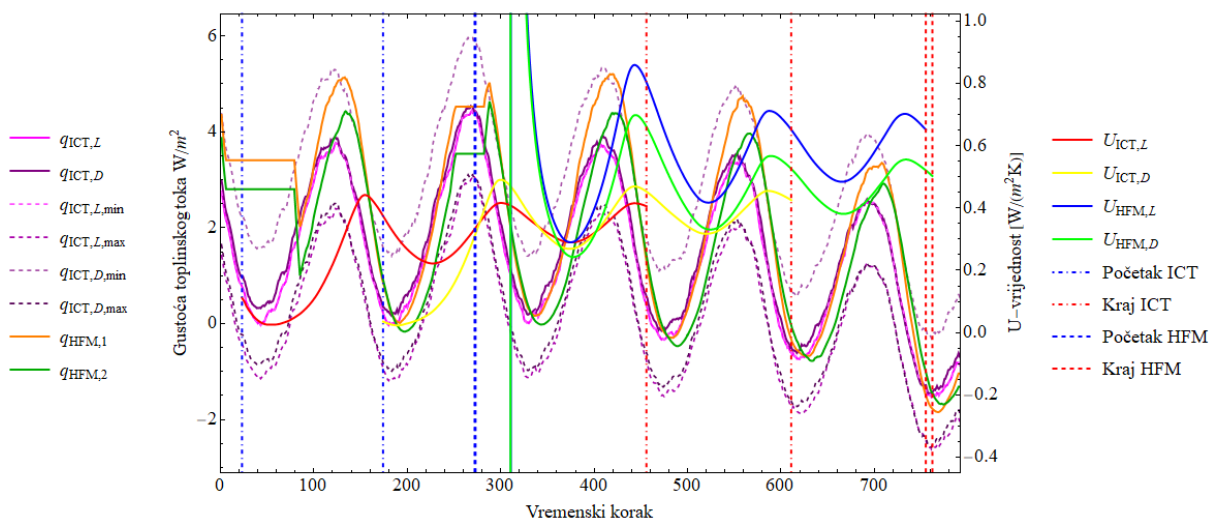
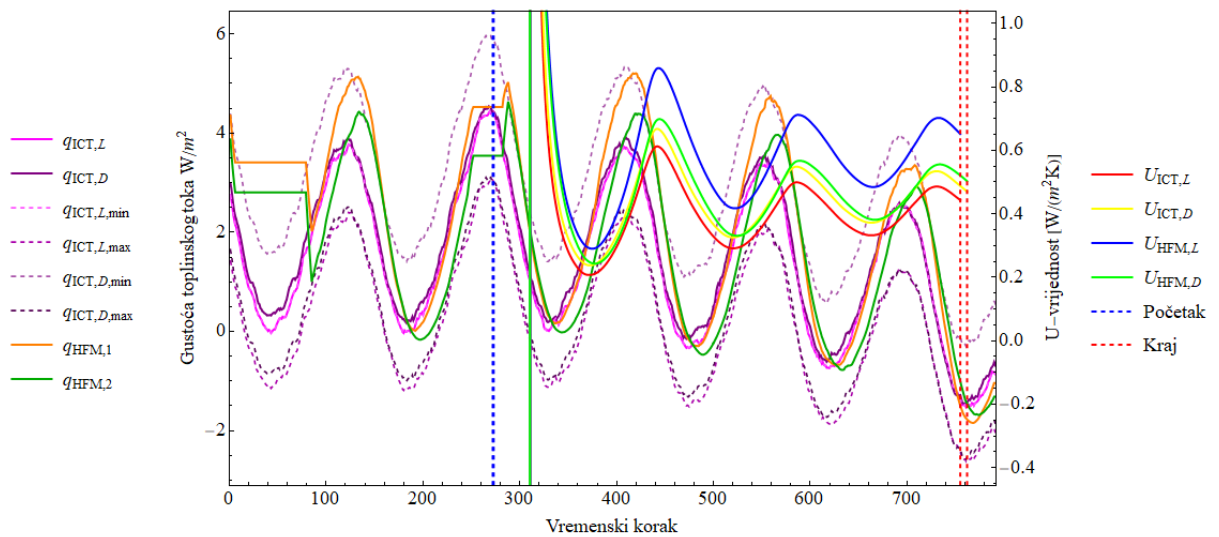


n) Palovec

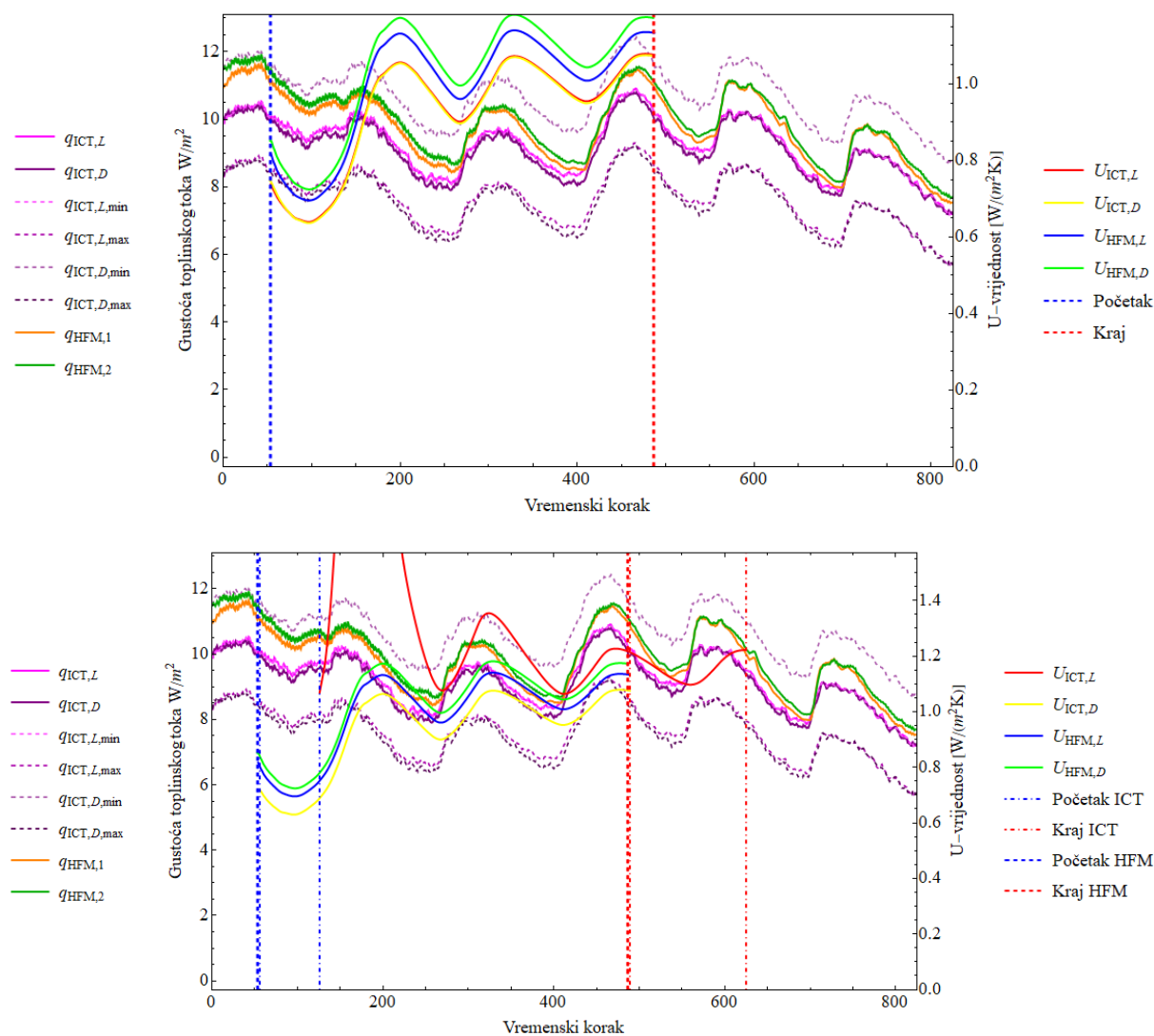




o) Tornyszentmiklos



p) Totovec



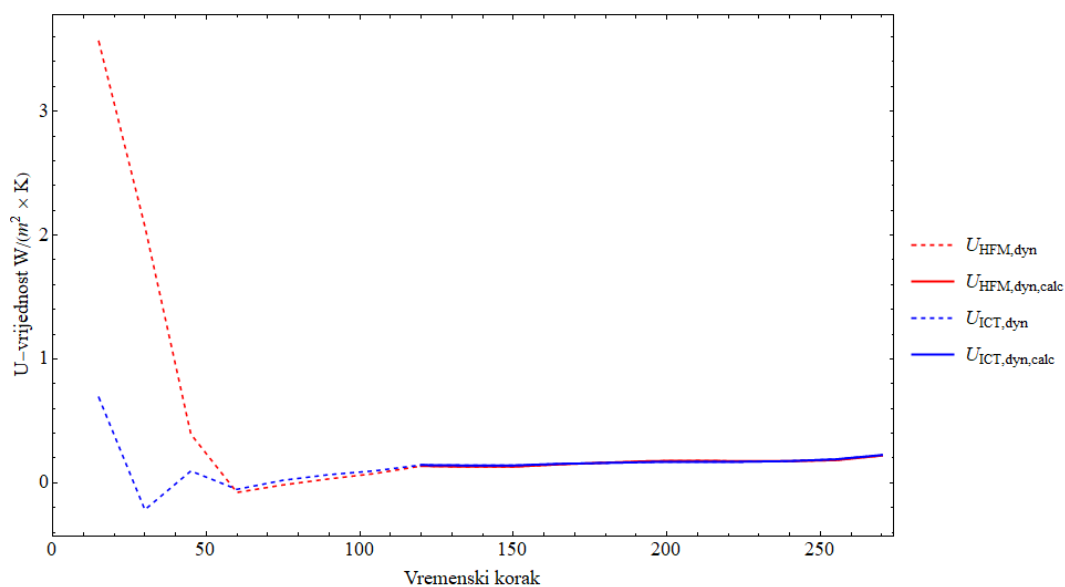
q) Vapori

Slika 75: U-vrijednosti (metoda srednje vrijednosti) određene metodama HFM i ICT

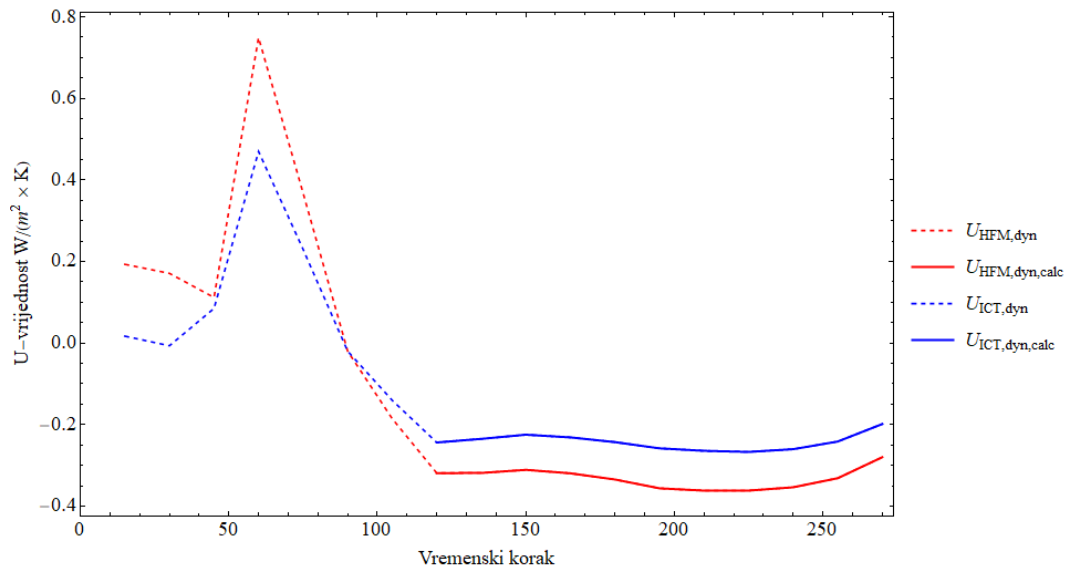
6.3.1.2 Dinamička metoda

Primjenom algoritma prikazanog u poglavlju 3.5.2 izračunata je U-vrijednost primjenom Laplaceovih transformacija. Algoritam je implementiran u programskom paketu Mathematica zbog mogućnosti brzog izračuna inverza matrica i rješavanja sustava jednačbi primjenom iteracijskih postupaka. Slika 76 prikazuje kriterije stabilnosti za pojedine uzorke te vrijeme za koje je stabilnost postignuta. Slika 77 – Slika 80 prikazuju U-vrijednosti izračunate za pojedine laboratorijske (uzorci s izolacijom s unutarnje strane, uzorci bez izolacije i uzorci s izolacijom s vanjske strane) i terenske uzorke s pripadnom nesigurnosti u aproksimiranu U-vrijednost određenu izrazom 133. Na dijagramima je crtkano prikazana U-vrijednost određena dinamičkom metodom dok su punom linijom prikazane U-vrijednosti koje zadovoljavaju

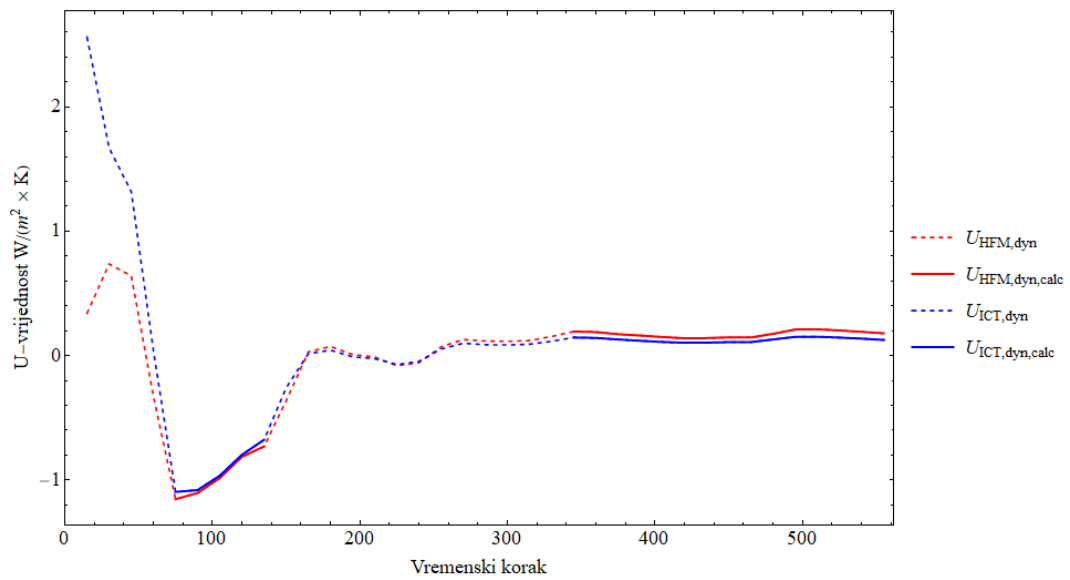
kriterije dane u normi HRN EN ISO 9869-1 za izračun U-vrijednosti primjenom dinamičke metode (interval pouzdanosti manji od 5 % od određene U-vrijednosti, zadovoljenje intervala vremenske konstante, itd.). U svim slučajevima slabo izoliranih i neizoliranih zidova dinamičkom metodom nije moguće odrediti U-vrijednosti ako se kao referentna vrijednost uzme U-vrijednost određena metodom srednje vrijednosti iz rezultata mjerenja HFM-a nakon cijelog perioda mjerenja. Razlog tome je najvjerojatnije toplinska masa (Slika 49 – Slika 52) koja je u svim uzorcima veća od granične vrijednosti od $30 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K})$ dane normom HRN EN ISO 9869-1. Za dulje periode mjerenja dinamička metoda postaje nestabilna za primjenu zbog velikog broja iteracija u pojedinom vremenskom koraku. Iako je metoda sofisticiranija od metode srednje vrijednosti njena primjena u praksi za elemente s teškom nosivom konstrukcijom (opeka i beton) je ograničena što je pokazano u ovom radu te se njena primjena u budućnosti treba detaljnije istražiti. Nadalje, algoritam dinamičke metode za velik broj vremenskih zapisa (u ovom slučaju 800 i više) je vremenski ograničavajući pošto za proračun jednog uzorka treba otprilike 7 minuta ako su uvjeti okoliša kvazi-stacionarni, a u slučaju nestacionarnih rubnih uvjeta i više od 15 minuta. Poboljšanje algoritma i primjena naprednijih numeričkih metoda za rješavanje sustava jednačbi i traženje inverza matrica bi trebala biti tema budućih istraživanja.



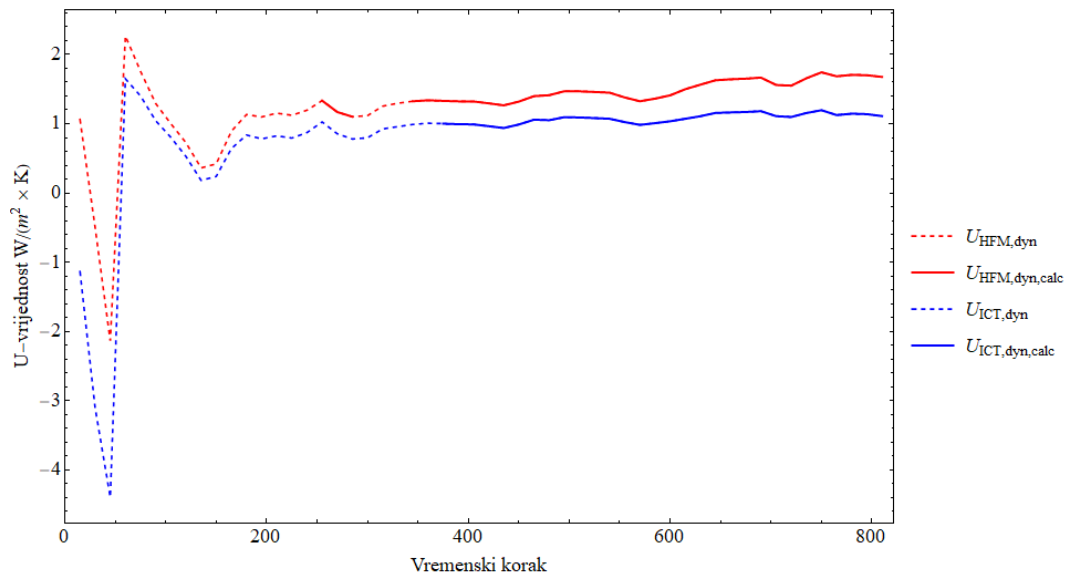
a) 1K



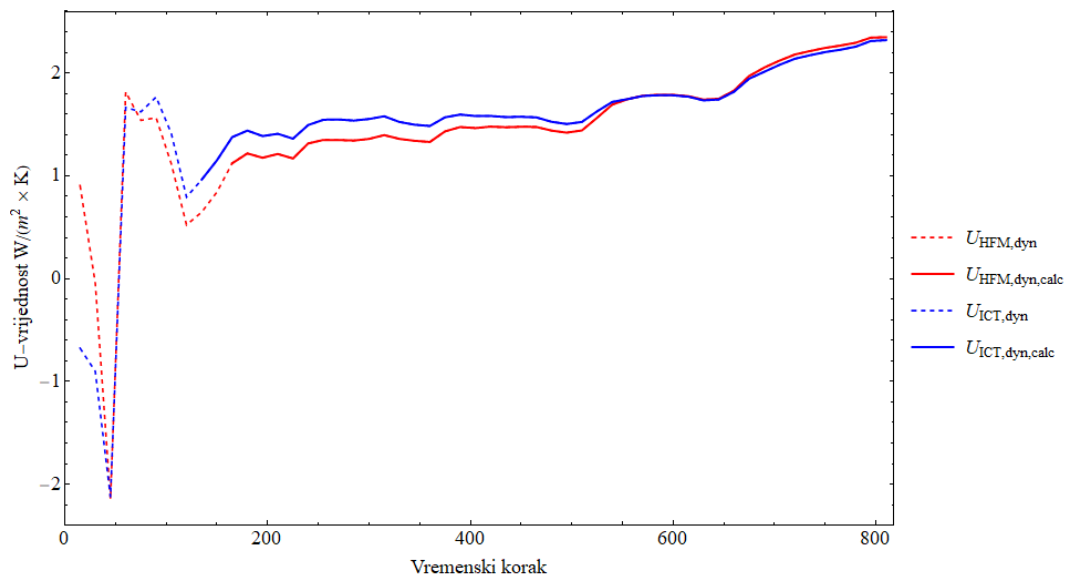
b) 2K



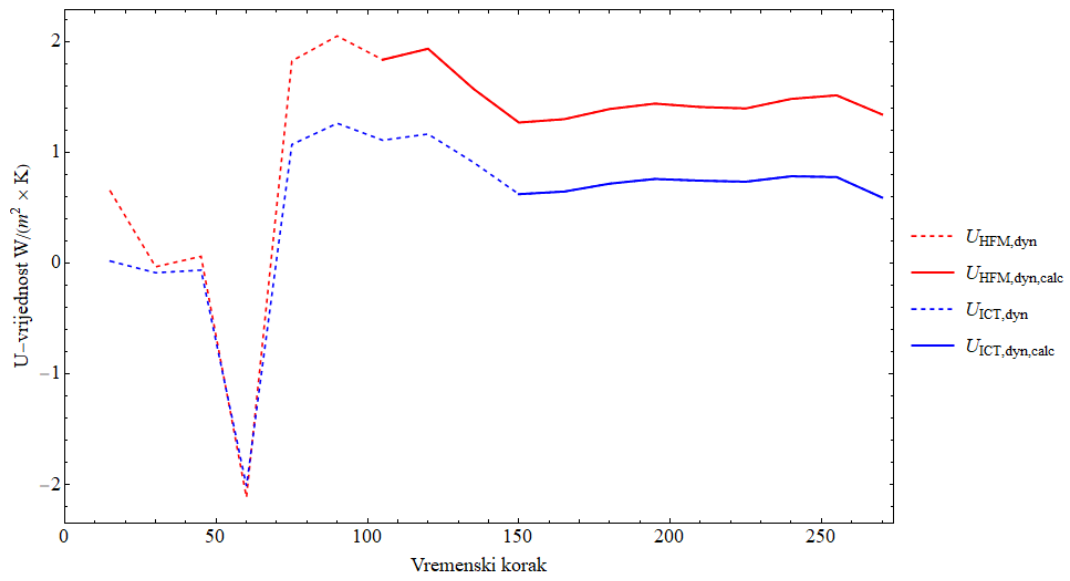
c) 3K



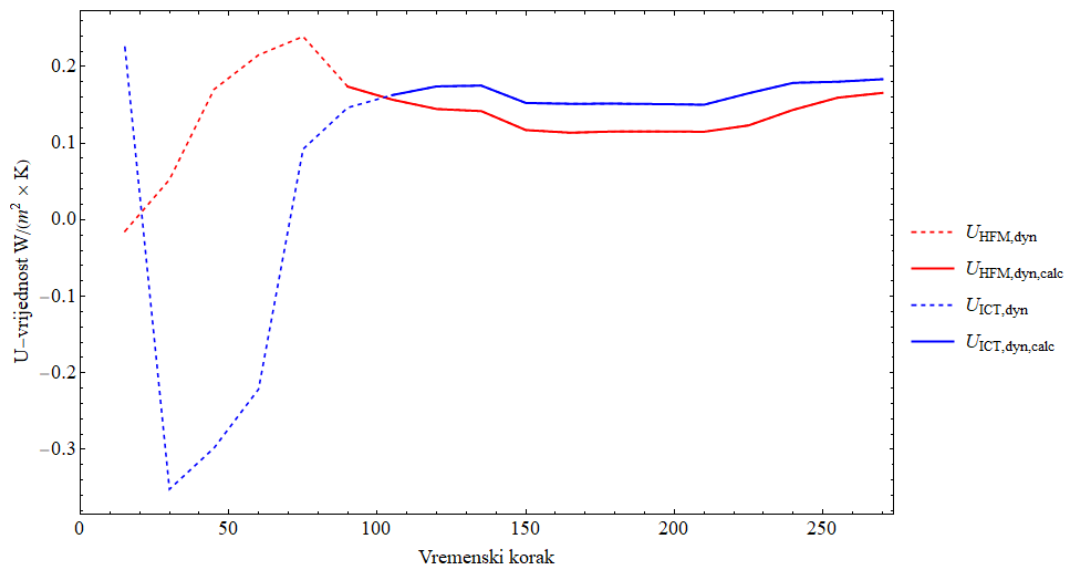
d) 4B



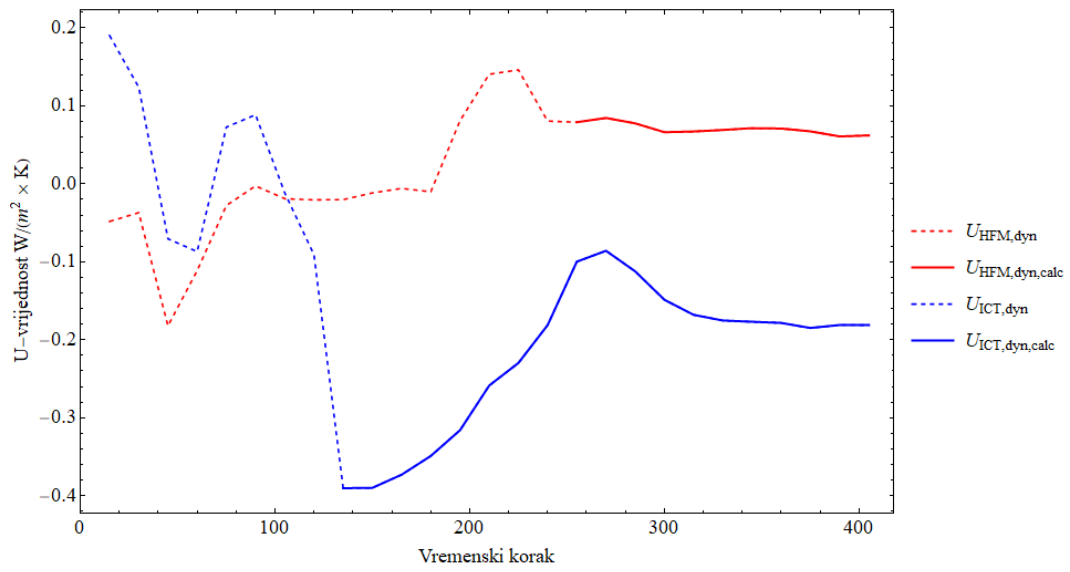
e) 7B



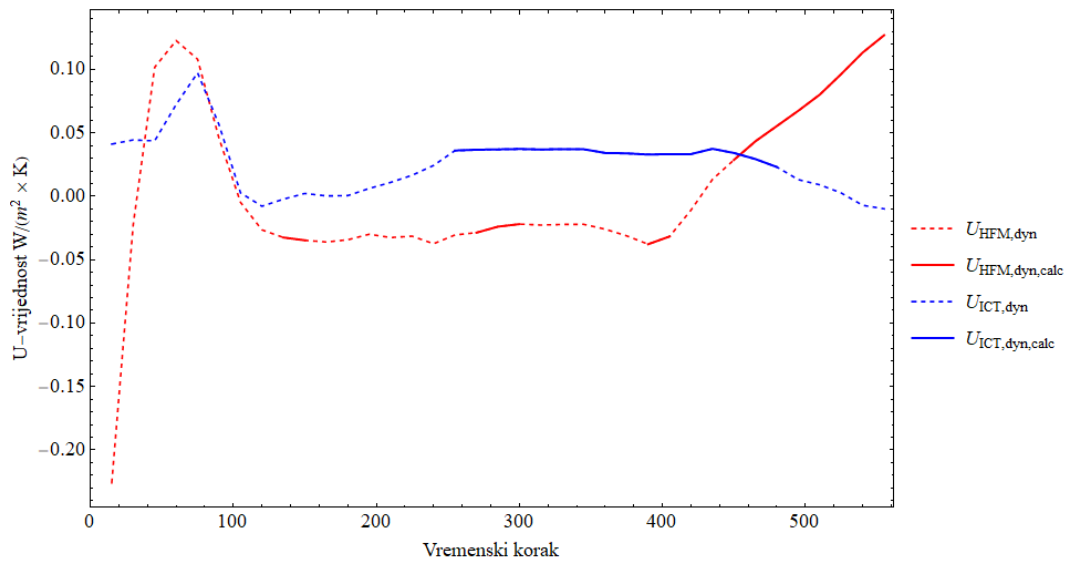
f) 8B



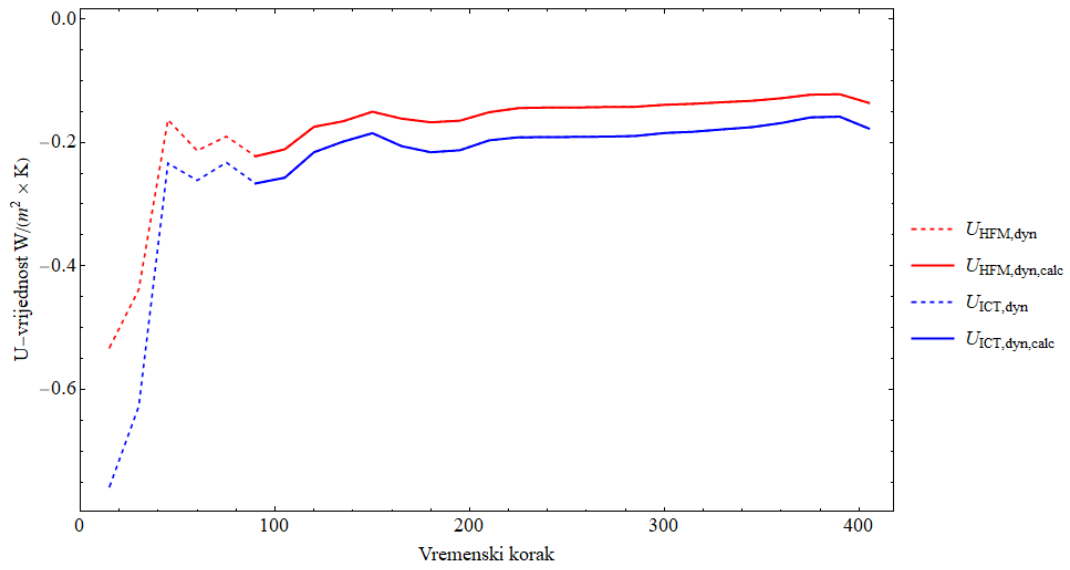
g) 9S



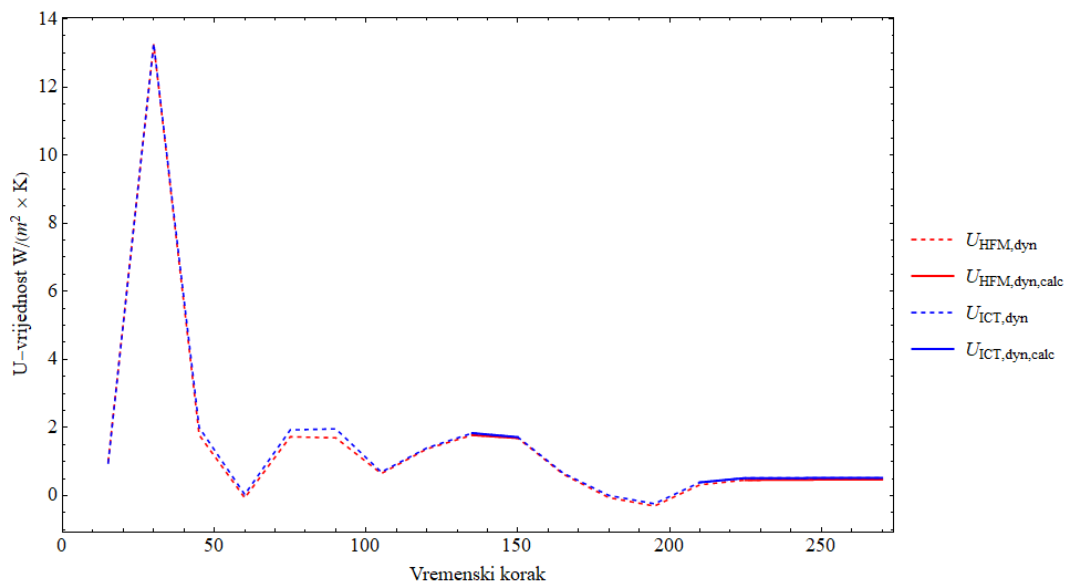
h) 10S



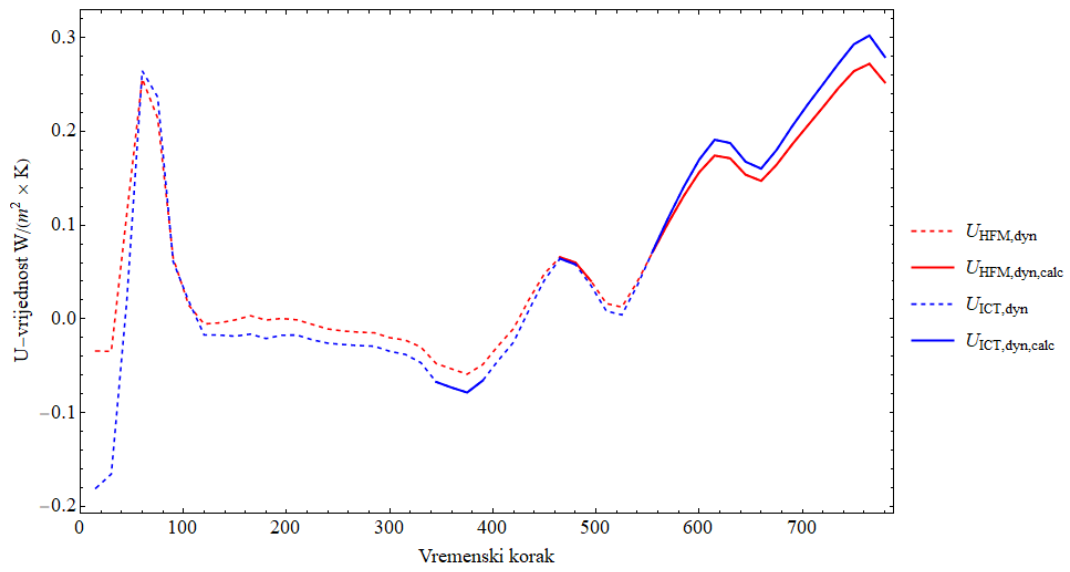
i) 11S



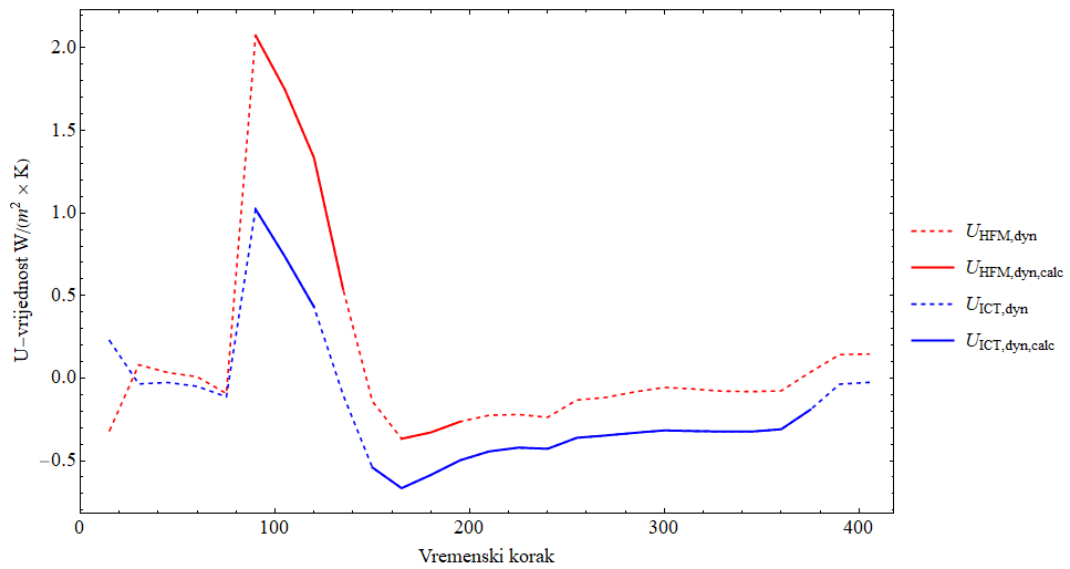
j) Ivanovec



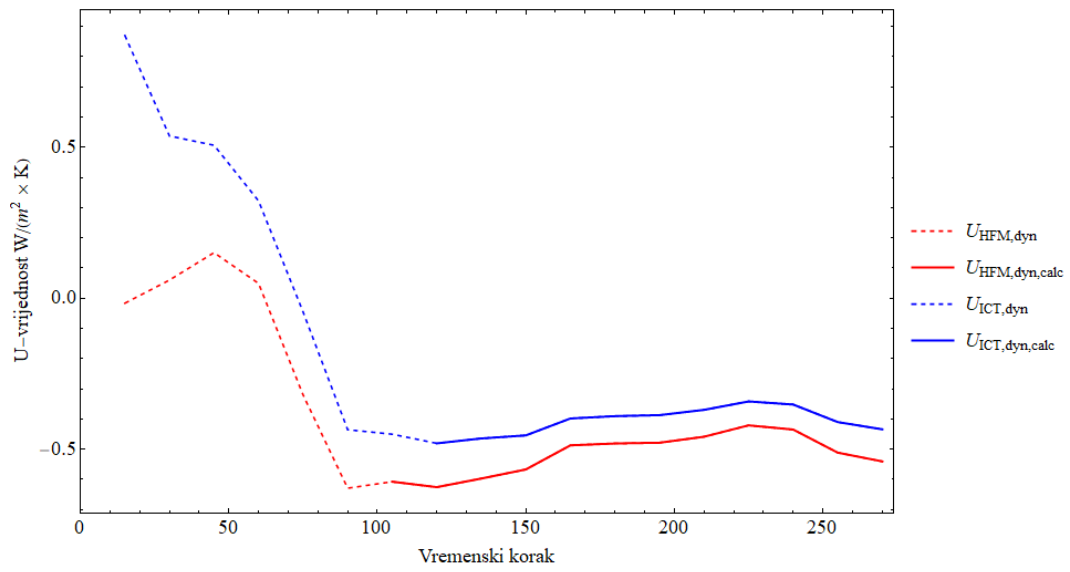
k) Lenti



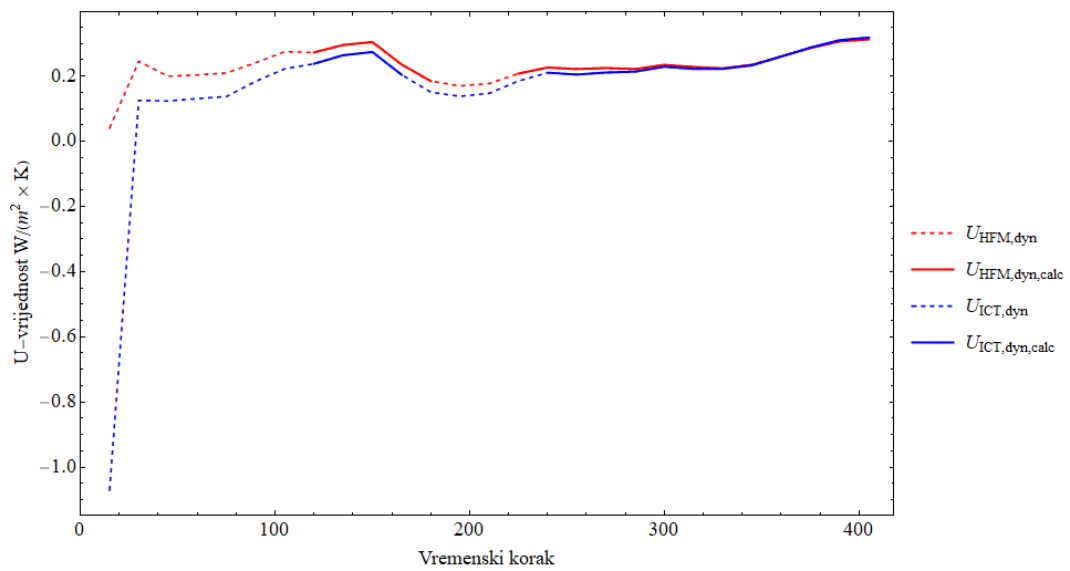
l) Muraszemenye



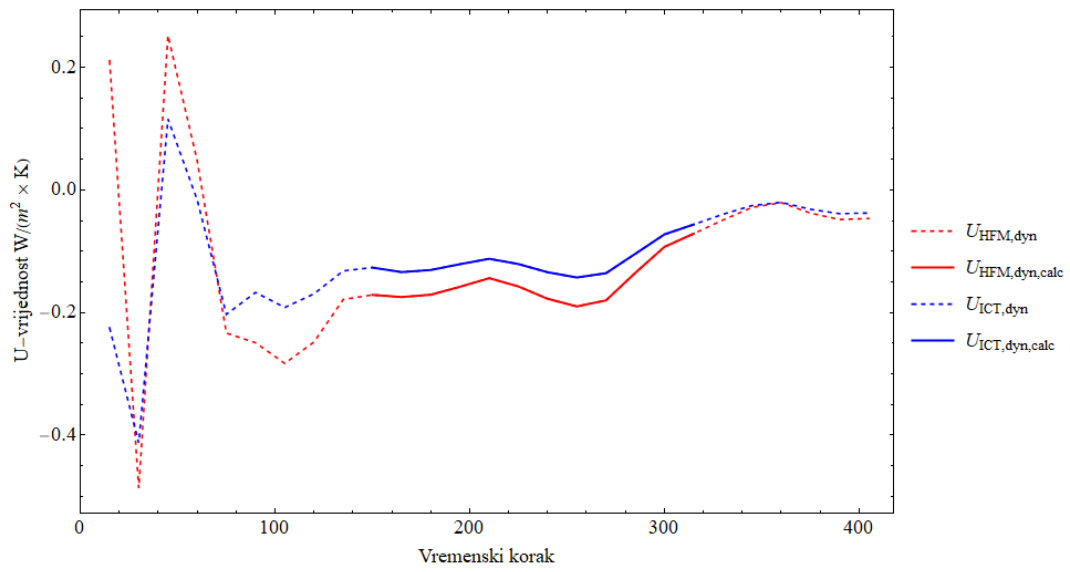
m) Mursko Središće



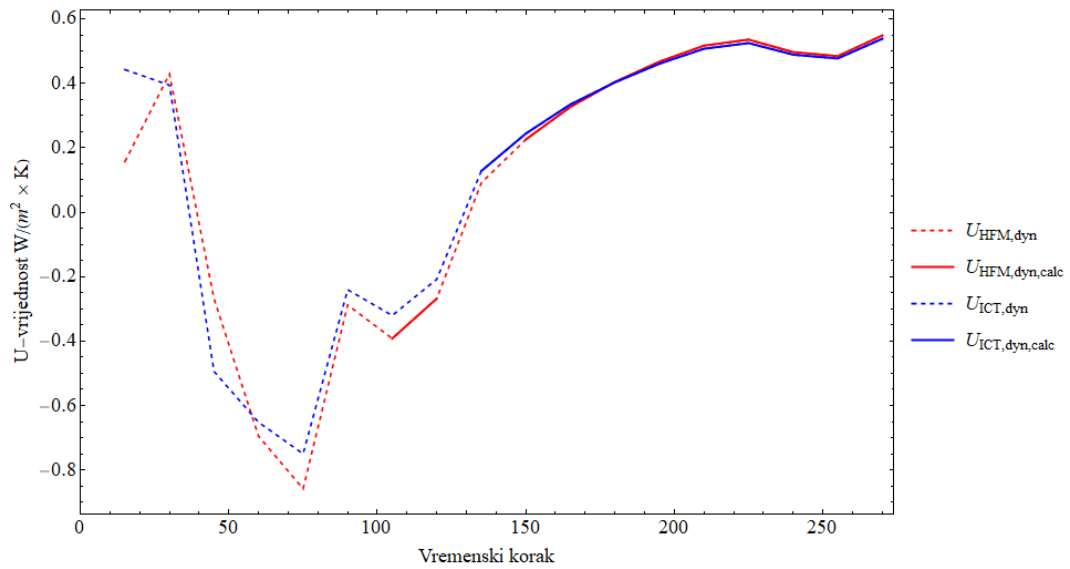
n) Palovec



o) Tornyszentmiklos

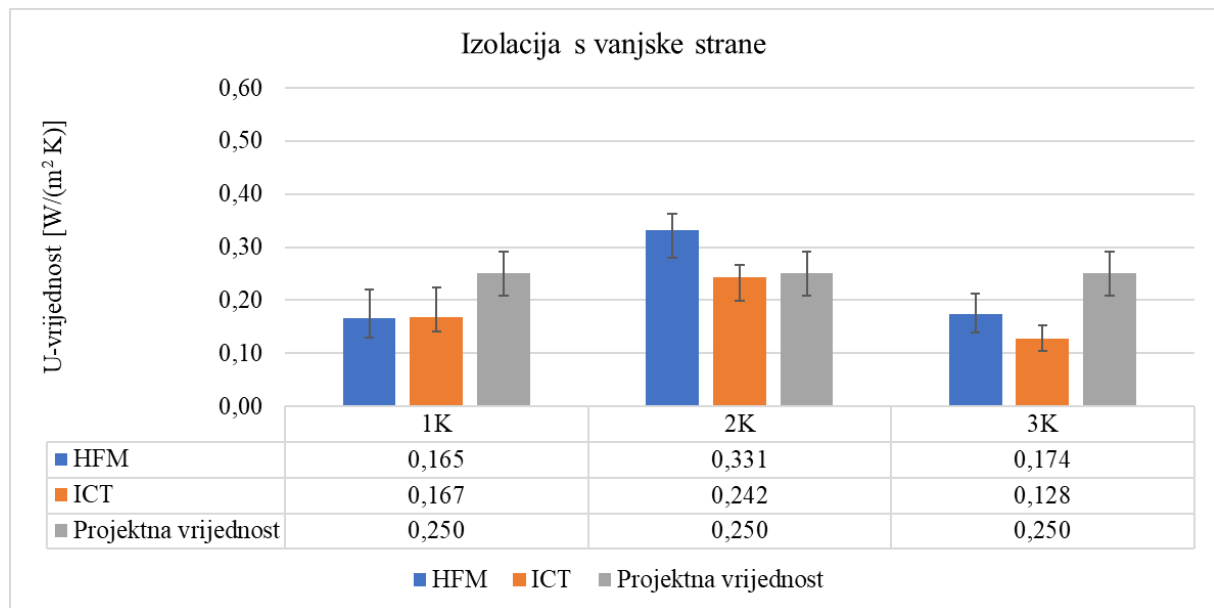


p) Totovec

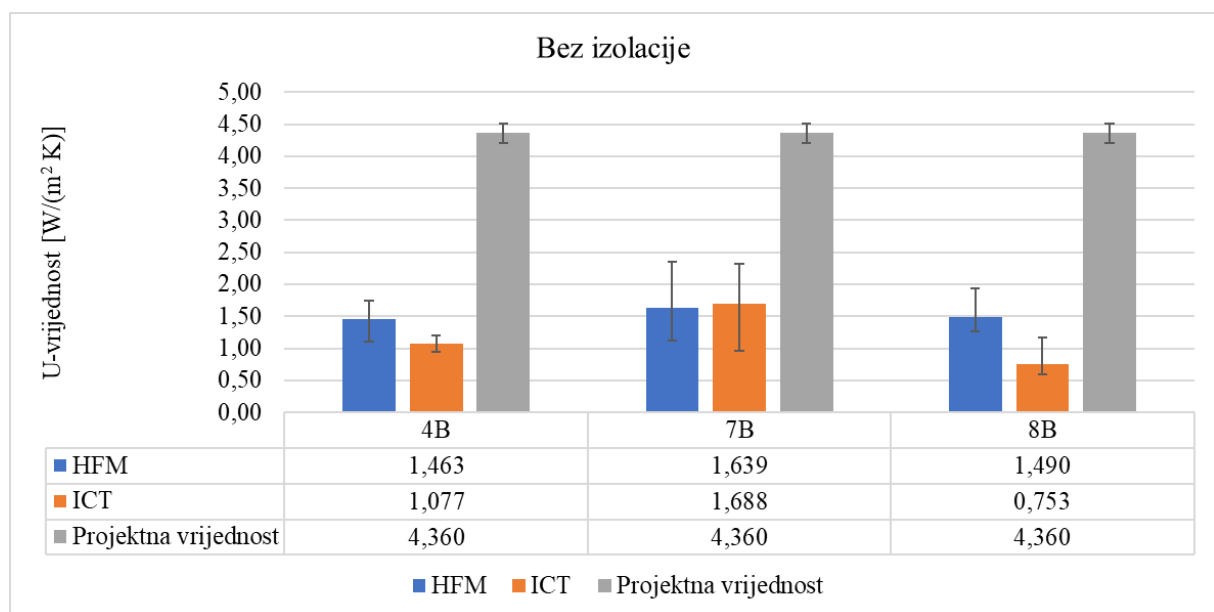


q) Vaspur

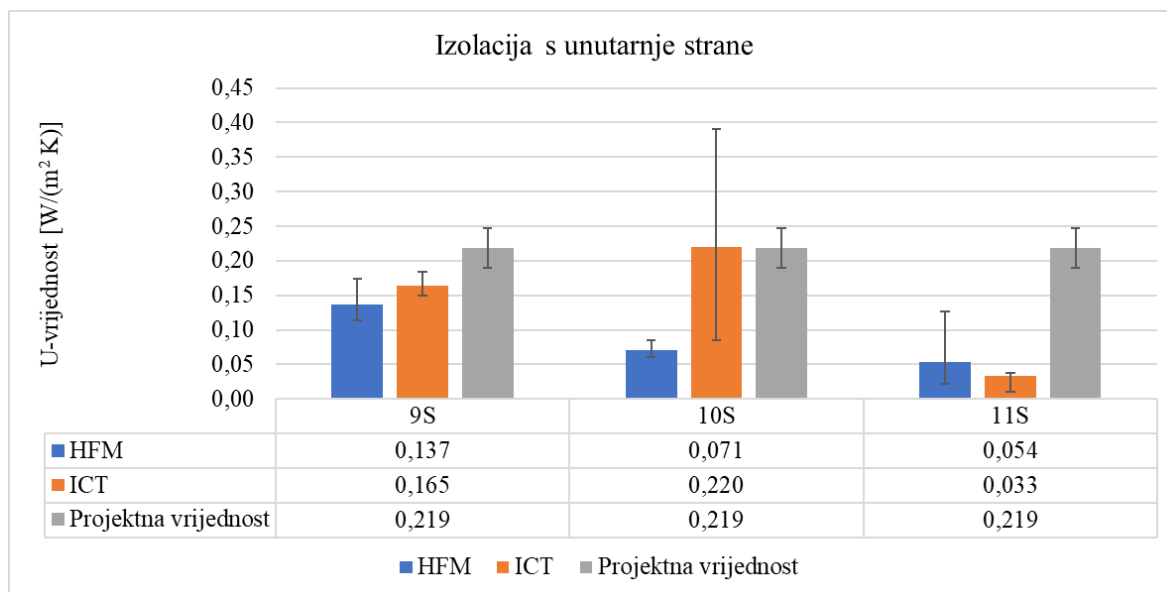
Slika 76: Rezultati analize dinamičkom metodom



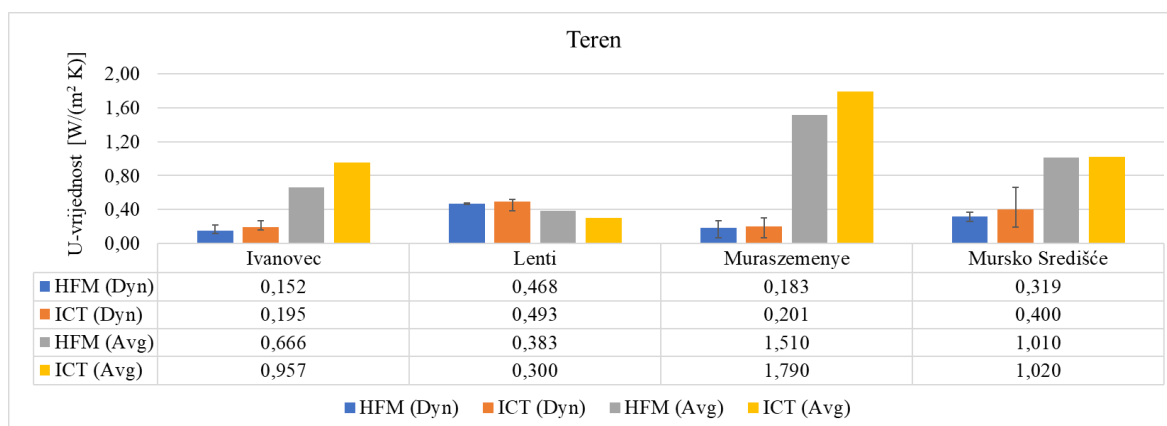
Slika 77: Rezultati određivanja U-vrijednosti dinamičkom metodom za laboratorijske uzorke s izolacijom s vanjske strane



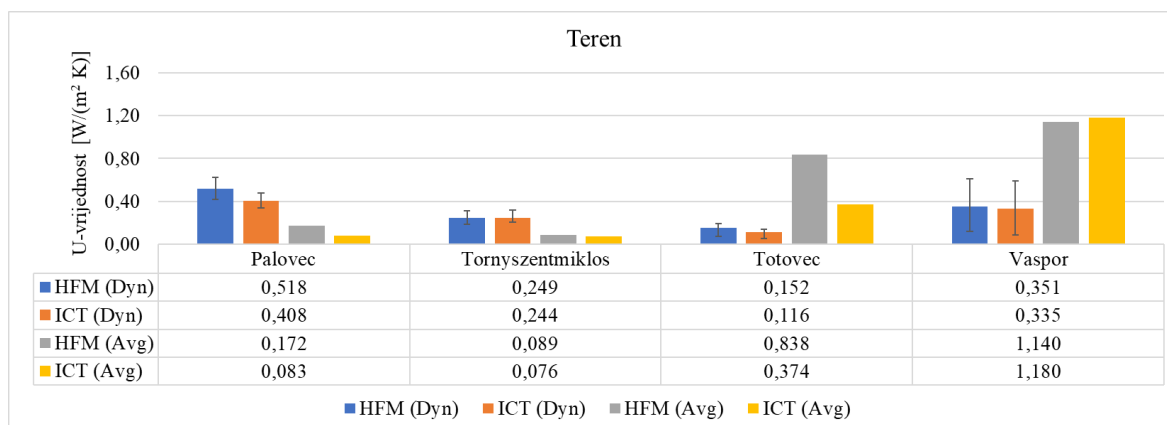
Slika 78: Rezultati određivanja U-vrijednosti dinamičkom metodom za laboratorijske uzorke bez izolacije



Slika 79: Rezultati određivanja U-vrijednosti dinamičkom metodom za laboratorijske uzorke s izolacijom s unutarnje strane



a) Uzorci: Ivanovec, Lenti, Muraszemenye i Mursko Središće



b) Uzorci: Palovec, Tornyszentmiklos, Totovec i Vaspör

Slika 80: Rezultati određivanja U-vrijednosti dinamičkom metodom za terenske uzorke

6.4 Mjerna nesigurnost i greška mjerenja

Primjenom postupka opisanog u poglavlju (5.1.4) dobivaju se mjerne nesigurnosti u gustoću toplinskog toka q i U -vrijednosti metodom ICT (Tablica 36).

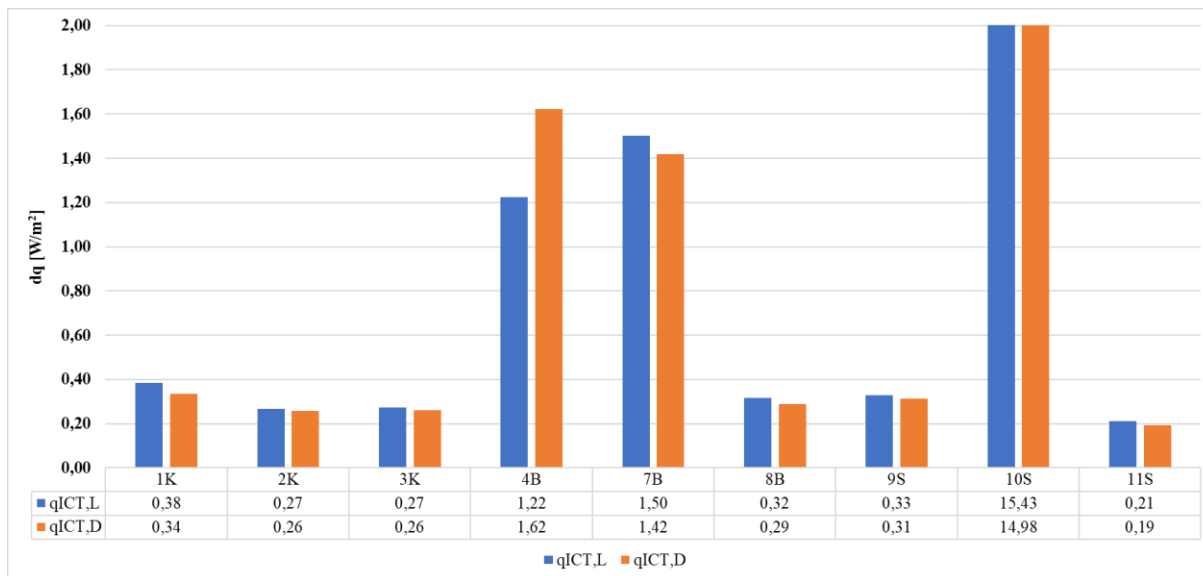
Tablica 36 i Slika 81 prikazuju mjerne nesigurnosti za metodu ICT za gustoću toplinskog toka te težinske koeficijente (w) utjecaja pojedinog parametra na određenu gustoću toplinskog toka. Najveća mjerna nesigurnost je kod uzoraka bez toplinske izolacije (4B, 7B i 8B), ali je kod ovih uzoraka i najveći iznos izmjerene gustoće toplinskog toka. Srednja vrijednost nesigurnosti u izmjereni toplinski tok iznosi 1,45 W/m².

Nadalje, nesigurnost u izmjerenu U -vrijednost metodom ICT određuje se preko izraza (151). Tablica 37 prikazuje U -vrijednosti s pripadnim mjernim nesigurnostima i težinskim koeficijentima (w) za parametre koji utječu na mjerenje. Minimalna nesigurnost u izmjerenu U -vrijednost iznosi 4,91 % za uzorak 4B, a maksimalna nesigurnost, ako se odbaci uzorak s izolacijom s unutarnje strane 10S, iznosi 80,0 % od izmjerene U -vrijednosti za zid Palovec kod kojeg dolazi do pregrijavanje vanjske površine.

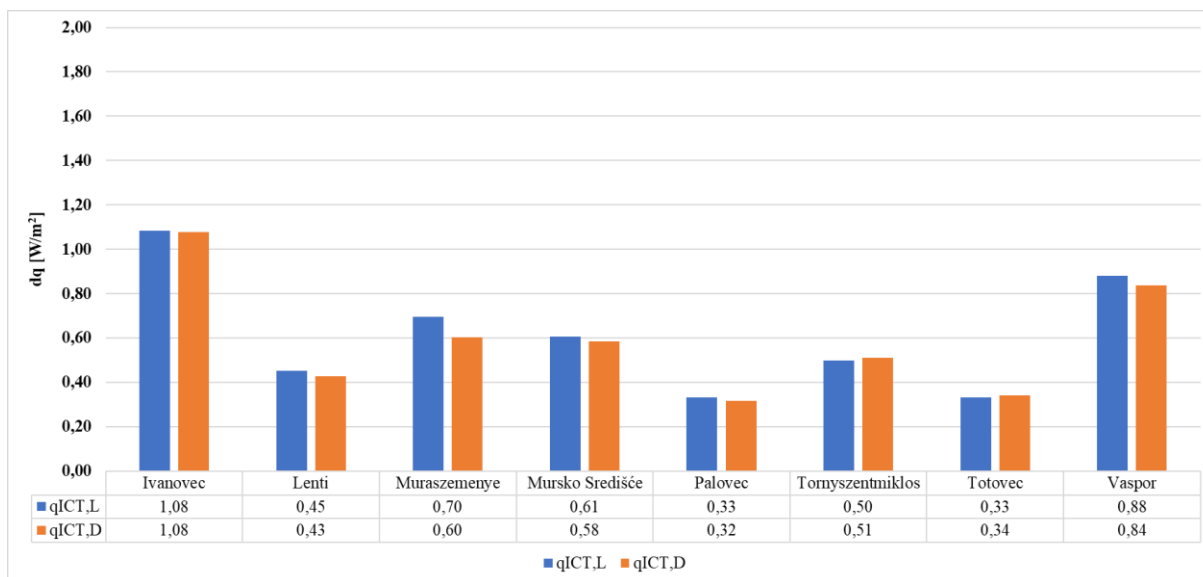
Tablica 36: Određivanje mjerne nesigurnosti za gustoću toplinskog toka za metodu ICT

LIJEVA STRANA UNUTARNJE POVRŠINE						
naziv uzorka	W_{ε}	W_{Trefl}	W_{Tsi}	W_{Ti}	W_{hc}	$dq_{ICT,L}$
	%					W/m ²
1K	0,00	13,70	33,40	4,39	48,40	0,38
2K	0,00	22,80	54,90	7,18	15,10	0,27
3K	0,00	30,60	47,70	6,49	15,20	0,27
4B	0,00	1,78	11,00	0,67	86,60	1,22
7B	0,00	1,63	9,62	0,69	88,10	1,50
8B	0,00	12,30	56,00	5,71	26,00	0,32
9S	0,00	13,00	38,00	5,04	44,00	0,33
10S	0,00	100,00	0,02	0,00	0,01	15,43
11S	0,00	22,50	62,20	8,00	7,23	0,21
Ivanovec	0,00	22,80	65,40	8,55	3,28	1,08
Lenti	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,45
Muraszemenye	0,00	6,31	11,60	1,32	80,70	0,70
Mursko Središće	0,00	11,00	23,40	2,77	62,80	0,61

Palovec	0,00	19,60	47,10	6,10	27,20	0,33
Tornyszentmiklos	0,00	36,40	30,30	3,64	29,70	0,50
Totovec	0,00	10,90	41,90	5,79	41,40	0,33
Vaspor	0,00	5,12	13,50	1,69	79,70	0,88
DESNA STRANA UNUTARNJE POVRŠINE						
naziv uzorka	W_{ϵ}	W_{Trefl}	W_{Tsi}	W_{Ti}	W_{hc}	$dq_{ICT,D}$
	%					W/m^2
1K	0,00	15,80	40,60	5,34	38,30	0,34
2K	0,00	23,30	56,10	7,34	13,30	0,26
3K	0,00	29,20	47,40	6,45	17,00	0,26
4B	0,00	1,61	10,20	0,62	87,60	1,62
7B	0,00	1,67	10,20	0,73	87,40	1,42
8B	0,00	8,14	37,50	4,01	50,40	0,29
9S	0,00	13,30	40,70	5,42	40,60	0,31
10S	0,00	100,00	0,02	0,00	0,01	14,98
11S	0,00	23,40	65,20	8,37	3,05	0,19
Ivanovec	0,00	23,10	66,00	8,64	2,29	1,08
Lenti	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,43
Muraszemenye	0,00	7,42	13,70	1,55	77,40	0,60
Mursko Središće	0,00	11,80	23,60	2,80	61,70	0,58
Palovec	0,00	19,10	49,20	6,40	25,30	0,32
Tornyszentmiklos	0,00	35,30	29,40	3,53	31,80	0,51
Totovec	0,00	10,70	41,20	5,72	42,40	0,34
Vaspor	0,00	5,49	14,00	1,76	78,70	0,84



a)



b)

Slika 81: Mjerna nesigurnost za gustoću toplinskog toka (ICT) – a) laboratorijski uzorci i b) terenski uzorci

Kod laboratorijskih uzoraka s izolacijom s unutarnje strane (10S i 11S) mjerna nesigurnost iznosi 60,00 i 1615,38 % što je još jedan pokazatelj nepouzdanosti mjerenja metodom ICT kod elemenata vanjske ovojnice zgrade s izolacijom s unutarnje strane (Tablica 37).

Tablica 37: Određivanje mjerne nesigurnosti za U-vrijednost za metodu ICT

LIJEVA STRANA UNUTARNJE POVRŠINE						
naziv uzorka	$W_{qICT,L}$	W_{Ti}	W_{Te}	U	dU	dU
	%			W/(m ² K)	W/(m ² K)	%
1K	98,80	0,61	0,61	0,30	0,04	13,67
2K	99,10	0,47	0,47	0,18	0,13	69,44
3K	99,90	0,06	0,06	0,07	0,03	35,71
4B	85,90	7,05	7,05	3,50	0,17	4,91
7B	87,50	6,24	6,24	4,01	0,26	6,46
8B	79,00	10,50	10,50	1,15	0,23	19,74
9S	98,80	0,61	0,61	0,26	0,04	14,62
10S	100,00	0,00	0,00	0,78	12,60	1615,38
11S	99,90	0,03	0,03	0,04	0,02	60,00
Ivanovec	98,40	0,79	0,79	0,96	0,34	34,90
Lenti	99,00	0,50	0,50	0,30	0,03	9,67
Muraszemenye	88,20	5,91	5,91	1,79	0,26	14,36
Mursko Središće	94,90	2,56	2,56	1,02	0,12	11,86
Palovec	99,90	0,07	0,07	0,08	0,06	80,00
Tornyszentmiklos	100,00	0,02	0,02	0,08	0,06	70,00
Totovec	97,10	1,45	1,45	0,37	0,07	19,46
Vaspor	96,30	1,86	1,86	1,18	0,12	9,92

DESNA STRANA UNUTARNJE POVRŠINE						
naziv uzorka	$W_{qICT,D}$	W_{Ti}	W_{Te}	U	dU	dU
	%			W/(m ² K)	W/(m ² K)	%
1K	99,30	5,34	0,36	0,20	0,04	20,00
2K	96,80	7,34	1,61	0,33	0,13	38,18
3K	99,70	6,45	0,15	0,10	0,02	24,00
4B	94,00	0,62	2,98	2,86	0,19	6,50
7B	86,70	0,73	6,64	3,56	0,25	7,08
8B	43,80	4,01	28,10	2,31	0,34	14,68
9S	99,00	5,42	0,48	0,22	0,04	16,36

10S	100,00	0,00	0,00	0,57	11,80	2070,18
11S	99,70	8,37	0,14	0,07	0,02	31,43
Ivanovec	98,70	8,64	0,67	0,87	0,35	40,00
Lenti	98,90	0,00	0,53	0,22	0,03	12,73
Muraszemenye	86,20	1,55	6,90	1,68	0,25	14,58
Mursko Središće	94,10	2,80	2,97	1,04	0,12	11,83
Palovec	99,90	6,40	0,03	0,09	0,06	67,78
Tornyszentmiklos	99,90	3,53	0,04	0,10	0,06	58,00
Totovec	97,00	5,72	1,51	0,10	0,08	78,00
Vaspor	96,80	1,76	1,60	1,23	0,10	8,05

Za metodu HFM se primjenom metode RSS dobivaju mjerne nesigurnosti od 2,11 do 24,55 % od izmjerene U-vrijednosti (Tablica 38). Razlog manje mjerne nesigurnosti nego kod metode ICT je utjecaj manjeg broja parametara (q , T_i i T_e) na izmjerenu veličinu. Nadalje, kod metode HFM se ne uzima variranje temperature zida po cijeloj površini (izotermnost površine) te se ne može sagledati utjecaj zračenja okoline. Ta dva parametra imaju najveći doprinos toplinskom toku na površini elementa. Stvarna mjerna nesigurnost dobivena metodom HFM je puno veća od mjerne nesigurnosti prikazane u ovom istraživanju. Ona bi u pravilu trebala sadržavati mjernu nesigurnost zbog pogrešno postavljenog tokomjera, utjecaje toplinskih mostova iza tokomjera, dodatno zračenje iz okoline, itd. Međutim, metoda HFM nije tema ovog istraživanja pa se njena mjerna nesigurnost neće detaljnije analizirati. Kod metode ICT uzet je velik broj parametara koji svojom mjernom nesigurnosti i odstupanjem (za površinsku temperaturu i reflektiranu temperaturu) po površini u sumi znatno utječu na U-vrijednost određenu metodom ICT što je i prikazano u rezultatima ovog istraživanja.

Tablica 38: Određivanje mjerne nesigurnosti za U-vrijednost za metodu HFM

LIJEVA STRANA UNUTARNJE POVRŠINE						
naziv uzorka	$W_{qHFM,1}$	W_{Ti}	W_{Te}	U	dU	dU
	%			W/(m ² K)	W/(m ² K)	%
1K	77,00	11,50	11,50	0,38	0,01	3,42
2K	20,30	39,90	39,90	0,42	0,03	6,67
3K	84,40	7,82	7,82	0,12	0,00	3,33
4B	71,50	14,20	14,20	4,30	0,15	3,56
7B	63,30	18,30	18,30	4,33	0,15	3,49

8B	9,74	45,10	45,10	3,80	0,37	9,61
9S	77,60	11,20	11,20	0,21	0,01	3,33
10S	10,80	44,60	44,60	0,19	0,02	8,95
11S	77,00	11,50	11,50	0,21	0,01	3,33
Ivanovec	32,50	33,80	33,80	0,67	0,04	5,22
Lenti	89,90	5,05	5,05	0,38	0,01	2,11
Muraszemenye	27,30	36,30	36,30	1,51	0,09	5,83
Mursko Središće	52,50	23,70	23,70	1,01	0,04	4,06
Palovec	53,50	23,20	23,20	0,17	0,01	4,12
Tornyszentmiklos	75,20	12,40	12,40	0,09	0,00	3,33
Totovec	30,40	34,80	34,80	0,84	0,04	4,17
Vaspor	77,40	11,30	11,30	1,14	0,04	3,42

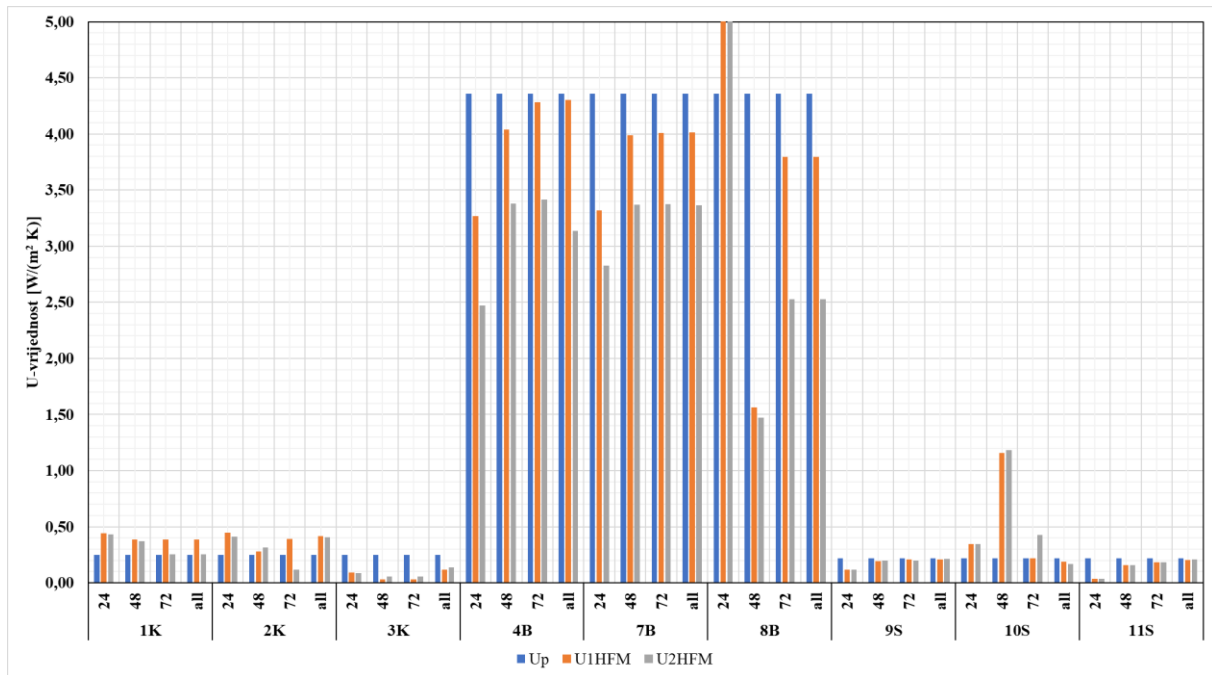
DESNA STRANA UNUTARNJE POVRŠINE						
naziv uzorka	$W_{qHFM,2}$	W_{Ti}	W_{Te}	U	dU	dU
				W/(m² K)	W/(m² K)	%
1K	77,50	11,30	11,30	0,26	0,01	3,46
2K	20,50	39,80	39,80	0,40	0,03	6,75
3K	84,70	7,67	7,67	0,14	0,01	3,57
4B	79,60	10,20	10,20	3,14	0,11	3,34
7B	63,30	18,30	18,30	3,41	0,13	3,72
8B	10,40	44,80	44,80	2,53	0,24	9,33
9S	76,20	11,90	11,90	0,21	0,01	3,33
10S	11,10	44,50	44,50	0,17	0,02	8,82
11S	76,70	11,70	11,70	0,21	0,01	3,33
Ivanovec	30,80	34,60	34,60	0,66	0,04	5,45
Lenti	91,30	4,35	4,35	0,23	0,01	3,91
Muraszemenye	9,47	45,30	45,30	1,61	0,24	14,66
Mursko Središće	51,50	24,30	24,30	0,99	0,04	4,14
Palovec	51,50	24,30	24,30	0,18	0,01	3,89
Tornyszentmiklos	75,40	12,30	12,30	0,08	0,00	3,75
Totovec	30,70	34,60	34,60	0,11	0,03	24,55
Vaspor	76,80	11,60	11,60	1,18	0,04	3,39

Parametri koji najviše utječu na izmjerenu U-vrijednost su površinska temperatura, koeficijent strujanja na unutarnjoj površini te prividna reflektirana temperatura. Rezultati mjerenja metodom HFM i ICT prikazani su u Prilogu 2 gdje se mogu vidjeti standardna odstupanja površinske temperature zida i prividne reflektirane temperature iz kojih je vidljiv utjecaj okoline na mjerenje (ljudi, grijanja, itd.). U slučaju uzorka Lenti je pokazano da je najveći utjecaj strujanja po površini što je i vidljivo na termogramima (Tablica 26) i na dijagramima prikazanim u Prilogu 2. Zbog korištenja prostorije i sustava za grijanje došlo je do pojačanog strujanja po površini.

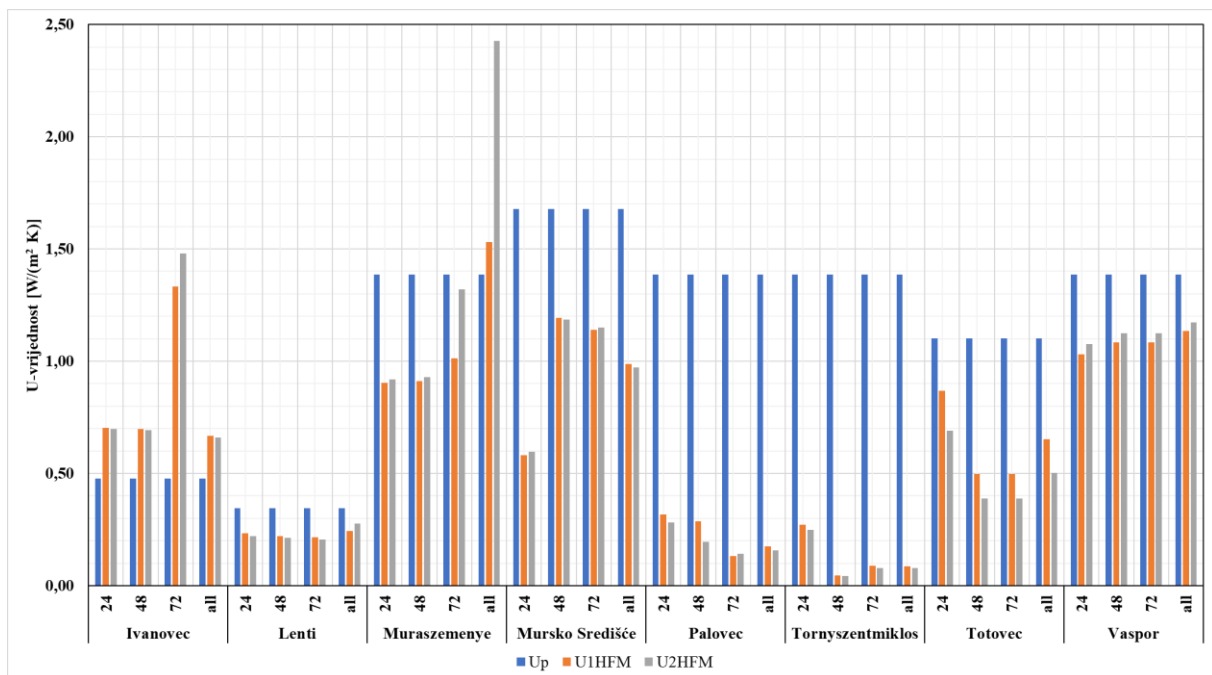
6.4.1 HFM

6.4.1.1 Utjecaj duljine mjerenja

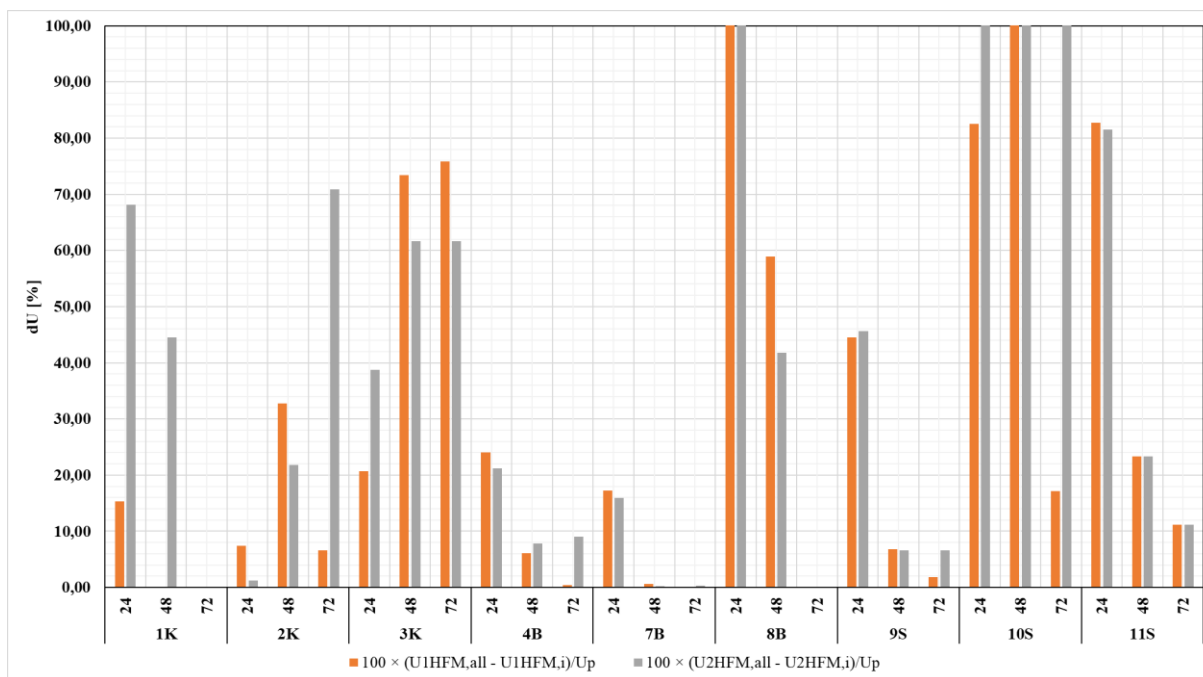
Slika 82 i Slika 83 prikazuju rezultate mjerenja U-vrijednosti za različite periode (24, 48 i 72 sata te za cijeli vremenski period mjerenja) za metodu HFM te projektne U-vrijednosti (U_p) određene normom HRN EN ISO 6746 iz poznatih materijalnih karakteristika i debljina slojeva elemenata vanjske ovojnice zgrade. Slika 84 i Slika 85 prikazuju relativni odnos U-vrijednosti određen nakon 24, 48 i 72 sata u odnosu na U-vrijednost određenu nakon cjelokupnog vremena mjerenja za pojedine laboratorijske i terenske uzorke. Za duljinu mjerenja od 48 sati dobiva se 26,0 % razlike u odnosu na U-vrijednost određenu za cijeli period mjerenja. Za period od 72 h dobiva se razlika od 19,28 %. Ako se nacрта dijagram odstupanja U-vrijednosti i perioda mjerenja izračunatih za periode 24, 48, 72 h za svih 17 uzoraka i cijeli period mjerenja te se linearnom interpolacijom odredi regresijski pravac kroz te točke moguće je odrediti optimalno vrijeme ispitivanja (Slika 86). Ako se uzme da je zadovoljavajuća U-vrijednost ona kod koje je odstupanje manje od 10 % od konačne U-vrijednosti optimalno vrijeme ispitivanja iznosi 100 sati.



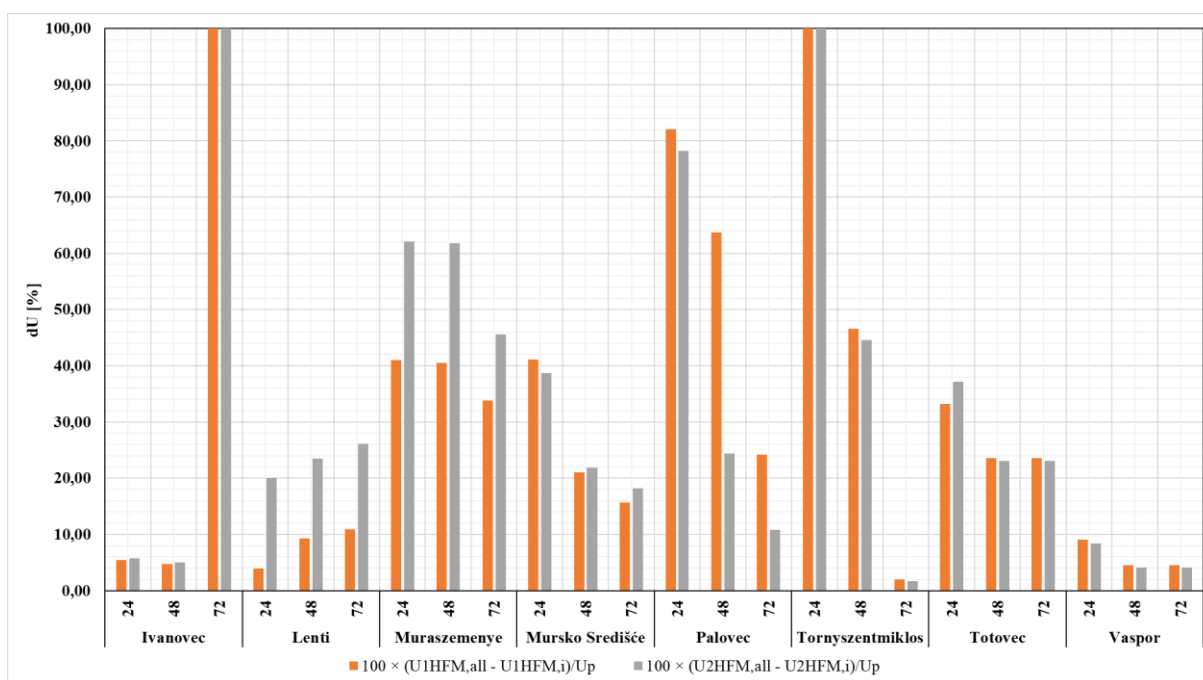
Slika 82: Usporedba U-vrijednosti za različite duljine mjerenja za laboratorijska mjerenja (HFM)



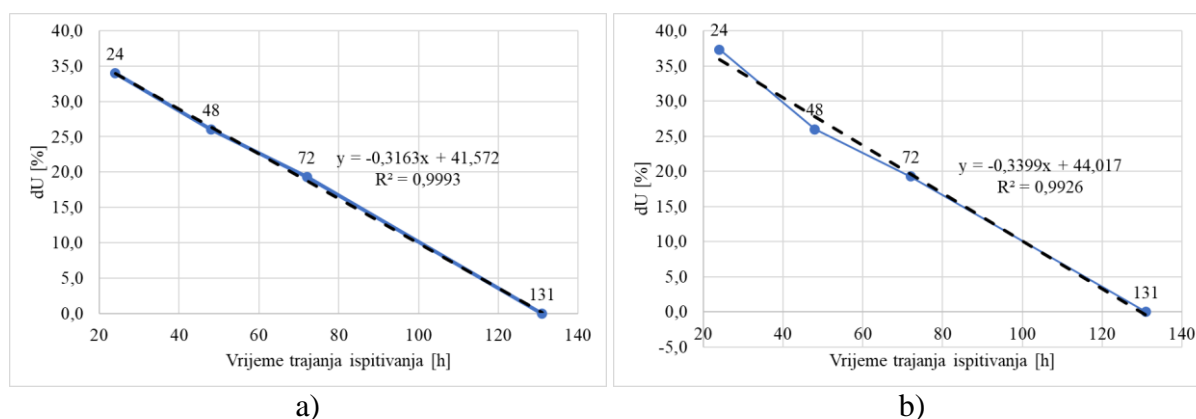
Slika 83: Usporedba U-vrijednosti za različite duljine mjerenja za terenska mjerenja (HFM)



Slika 84: Odstupanja U-vrijednosti za različite duljine mjerenja za HFM (laboratorij)



Slika 85: Odstupanja U-vrijednosti za različite duljine mjerenja za HFM (teren)



Slika 86: Ovisnost duljine mjerenja o U-vrijednosti – a) HFM1 i b) HFM2

6.4.1.2 Utjecaj senzora na 1D toplinski tok

Iako je metoda HFM standardizirana postoje određeni čimbenici koji utječu na preciznost određivanja U-vrijednosti ovom metodom, a direktno su vezani uz korištenje opreme za mjerenje i mogu znatno doprinijeti mjernoj nesigurnosti. Mjernoj nesigurnosti metodom HFM najviše doprinosi tokomjer [124]. Pošto je metoda HFM kontaktna metoda, instalacija tokomjera na površinu zida direktno utječe na mjereni toplinski tok pa time i na izmjerenu U-vrijednost [14,125]. Pogrešno postavljanje senzora najviše doprinosi mjernoj nesigurnosti izmjerene gustoće toplinskog toka [126,127] i to najviše zbog prisustva toplinskih mostova na promatranoj površini. U slučaju lošeg izbora mjesta za instalaciju senzora nesigurnost iznosi između 26 [12] i 30 % [128] od izmjerene U-vrijednosti. Faktori koji doprinose mjernoj nesigurnosti su loše prijanjanje senzora na površinu (2 do 5 %), višedimenzionalni toplinski tokovi (1 do 5 %) [129], zaštita mjerene površine od vanjskih utjecaja (19 do 21 %) [130] te razlika u visini između instaliranog tokomjera i senzora za određivanje temperature unutarnjeg i vanjskog zraka (17 do 22 %) [7].

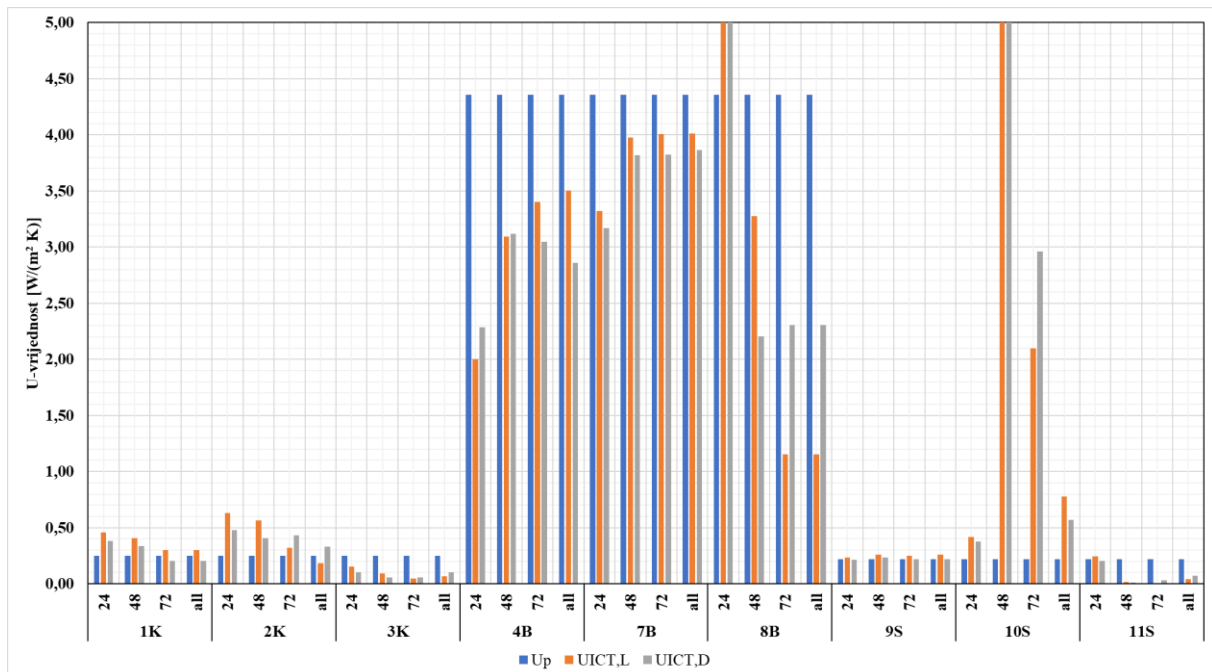
U ovom radu se utjecaj prisustva toplinskih tokova smanjio pošto se lokacija za instalaciju tokomjera prethodno provjerila metodom ICT: Ukupna mjerna nesigurnost zbog loše instalacije tokomjera se u daljnjoj analizi neće razmatrati pošto to nije cilj ovog rada.

6.4.2 ICT

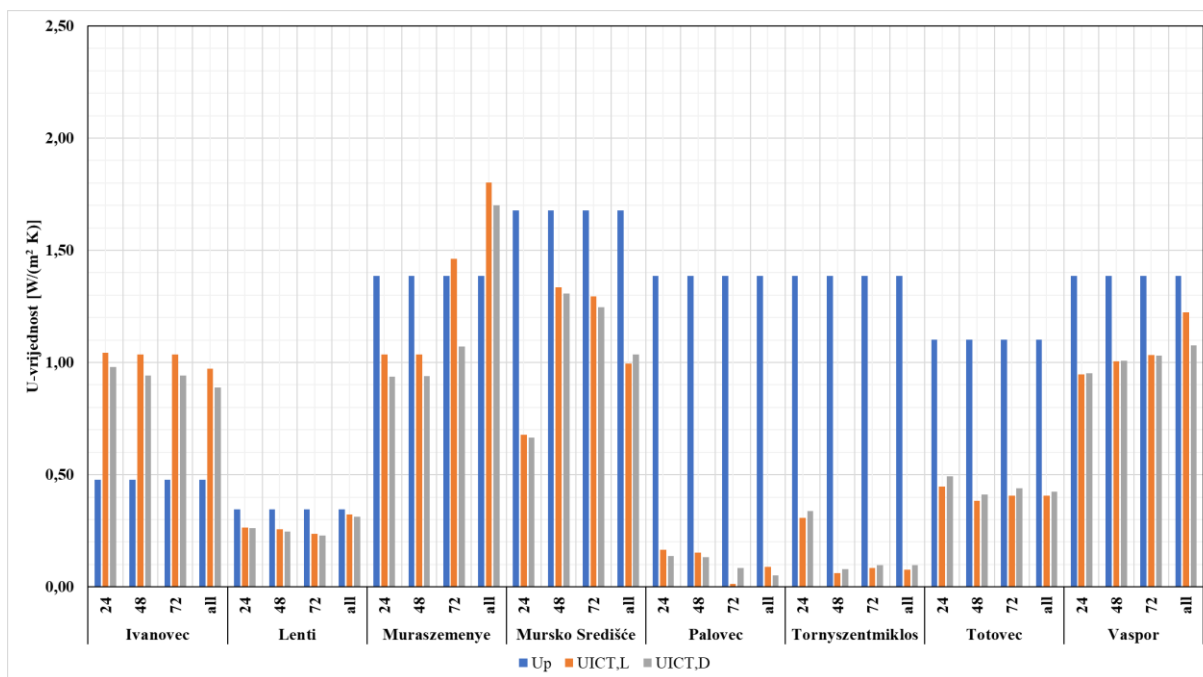
6.4.2.1 Utjecaj duljine mjerenja

Slika 87 i Slika 88 prikazuju rezultate mjerenja U-vrijednosti za različite periode (24, 48 i 72 sata te za cijeli vremenski period mjerenja) za metodu ICT. Slika 89 i Slika 90 prikazuju relativni odnos U-vrijednosti određen nakon 24, 48 i 72 sata u odnosu na U-vrijednost određenu nakon cjelokupnog vremena mjerenja za pojedine laboratorijske i terenske uzorke. Za duljinu

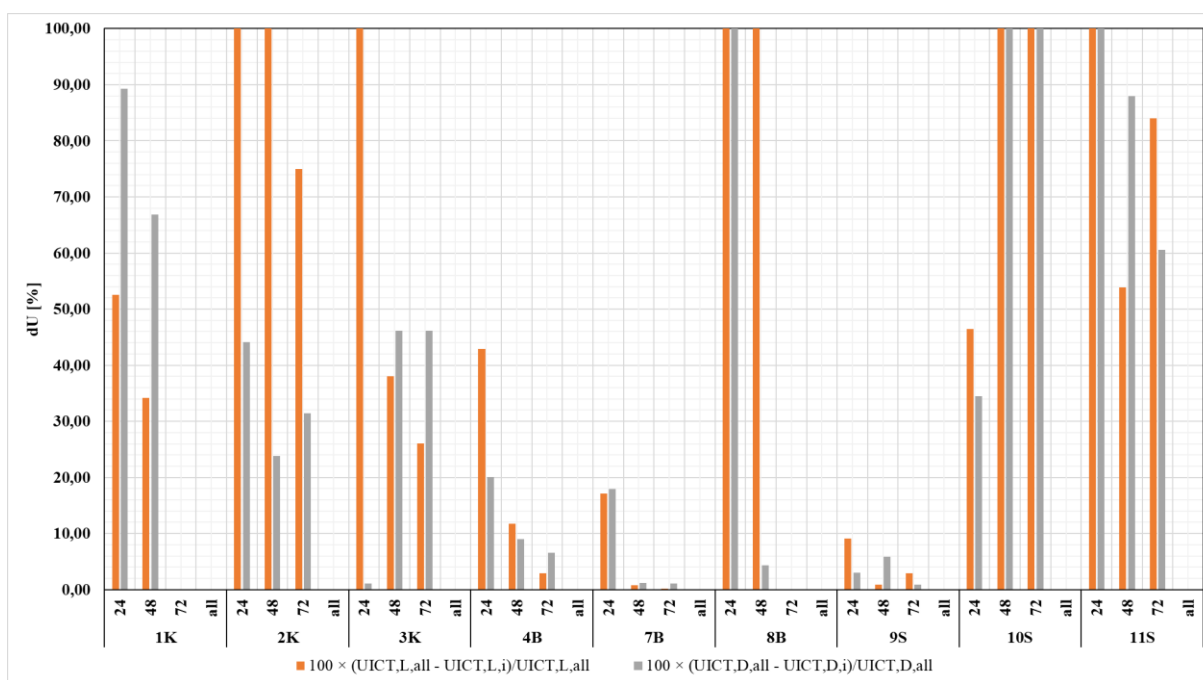
mjerenja od 48 sati dobiva se 25,0 % razlike u odnosu na U-vrijednost određenu za cijeli period mjerenja. Za period od 72 h dobiva se razlika od 20,0 %. Ako se i u ovom slučaju nacrt dijagram odstupanja U-vrijednosti i perioda mjerenja od 24, 48, 72 sata za svih 17 uzoraka i cijeli period mjerenja te se linearnom interpolacijom odredi regresijski pravac kroz točke moguće je odrediti optimalno vrijeme ispitivanja (Slika 91). Ako se uzme da je zadovoljavajuća U-vrijednost ona kod koje je odstupanje manje od 10 % od konačne U-vrijednosti optimalno vrijeme ispitivanja iznosi 100 sati kao i kod metode HFM.



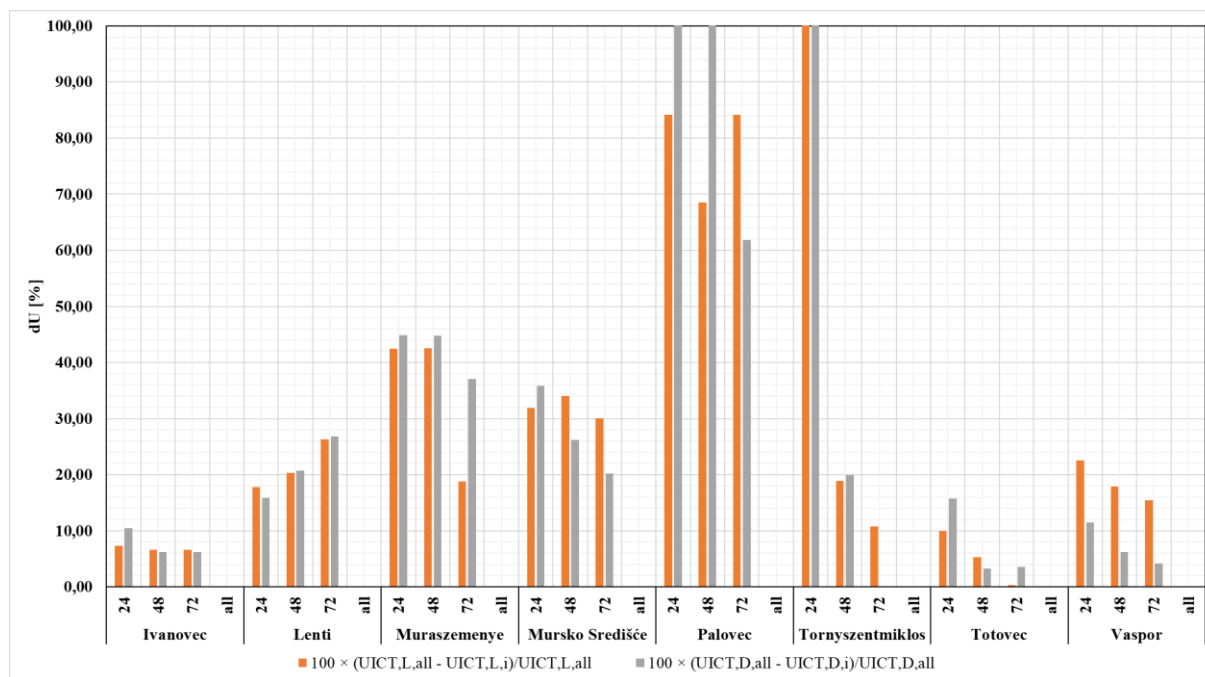
Slika 87: Usporedba U-vrijednosti za različite duljine mjerenja za laboratorijska mjerenja (ICT)



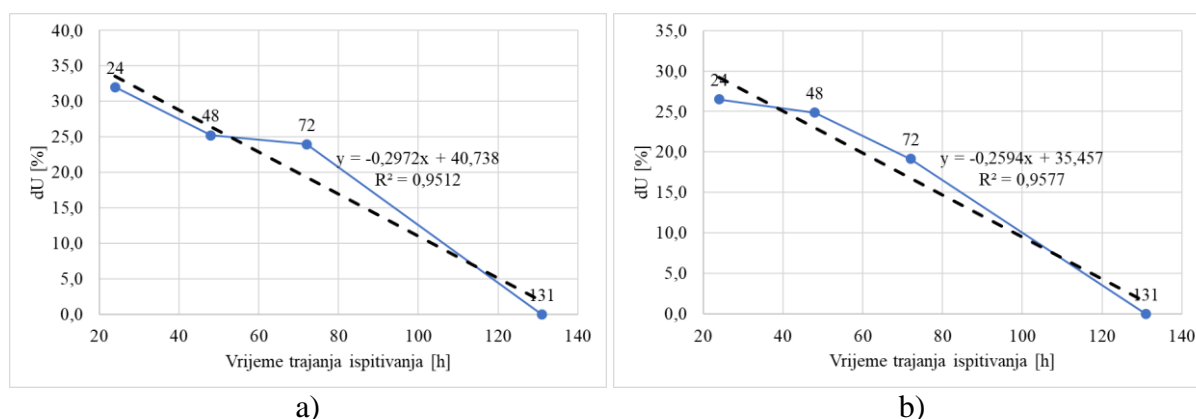
Slika 88: Usporedba U-vrijednosti za različite duljine mjerenja za terenska mjerenja (ICT)



Slika 89: Odstupanja U-vrijednosti za različite duljine mjerenja za ICT (laboratorij)



Slika 90: Odstupanja U-vrijednosti za različite duljine mjerenja za ICT (teren)



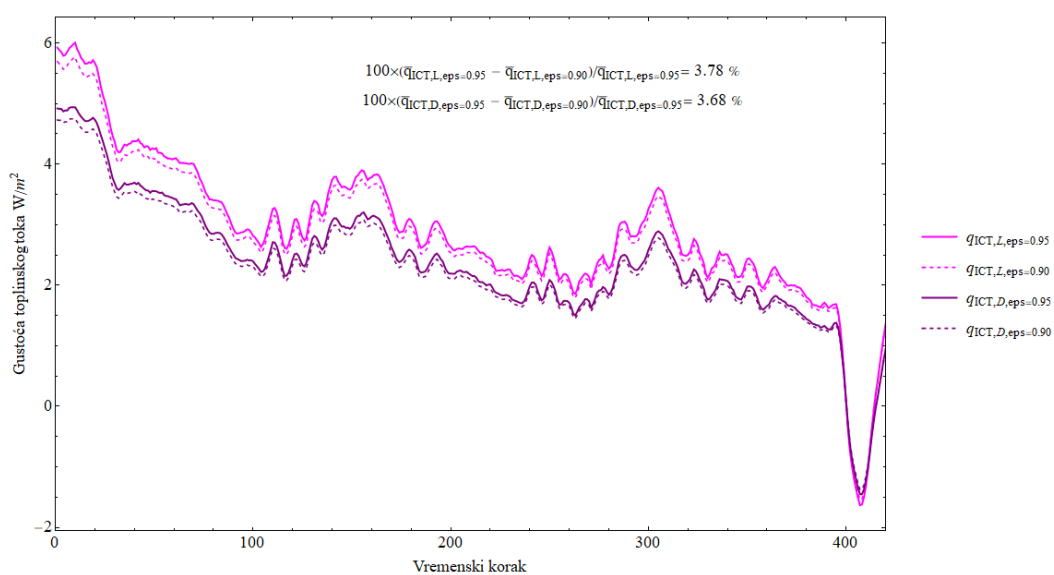
Slika 91: Ovisnost duljine mjerenja o U-vrijednosti – a) lijevi dio (ICT,L) i b) desni dio (ICT,D)

6.4.2.2 Utjecaj emisivnosti površine

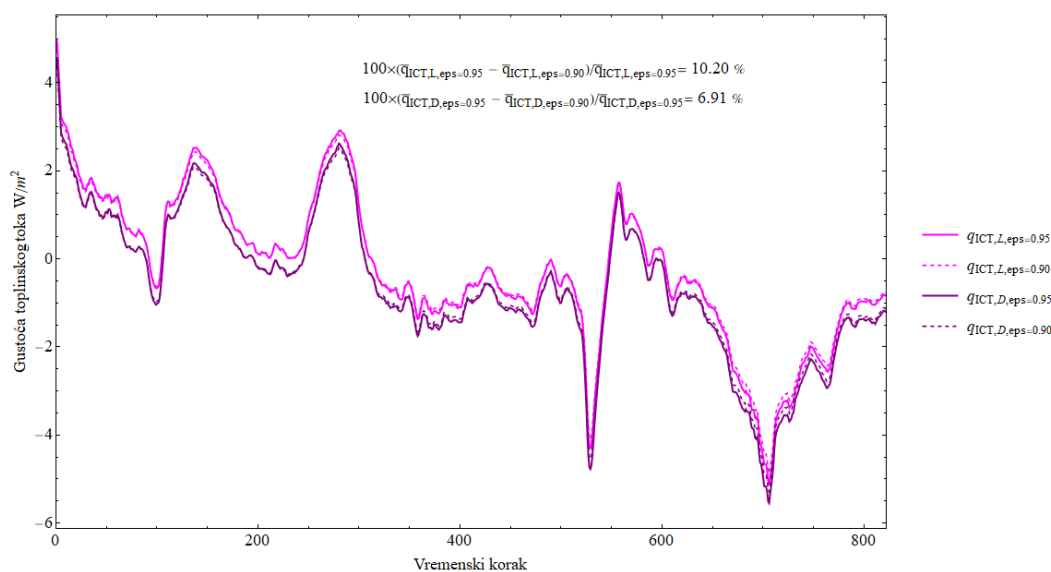
Rezultati ukazuju na to da emisivnost površine ima utjecaj na određivanje toplinskog toka korištenjem metode infracrvene termografije, ali je taj utjecaj naspram utjecaja drugih parametara zanemariv. Utjecaj varira ovisno o razdoblju godine i položaju izolacije (unutarnja ili vanjska) te o samoj U-vrijednosti. Uzorci s izolacijom s unutarnje strane u ovom istraživanju imaju manju emisivnost i veći utjecaj grešaka u očitavanju temperature, što može utjecati na preciznost mjerenja pošto je iznos toplinskog toka kod tih uzoraka (9S, 10S i 11S) na unutarnjoj površini približno jednak 0 W/m^2 .

Konkretno, utjecaj emisivnosti na toplinski tok je veći tijekom prijelaznog razdoblja i ljetnog perioda nego u zimskom periodu. Za uzorke s izolacijom s vanjske strane, utjecaj emisivnosti na toplinski tok kreće se u rasponu od 3,68% do 10,20% (Slika 92a – c), ovisno o periodu godine. Za uzorke bez izolacije, utjecaj emisivnosti kreće se u rasponu od 3,09% do 4,03% (Slika 92d – f). Uzorci s izolacijom s unutarnje strane imaju manji utjecaj emisivnosti na toplinski tok, ali su osjetljiviji na greške u očitavanju temperature.

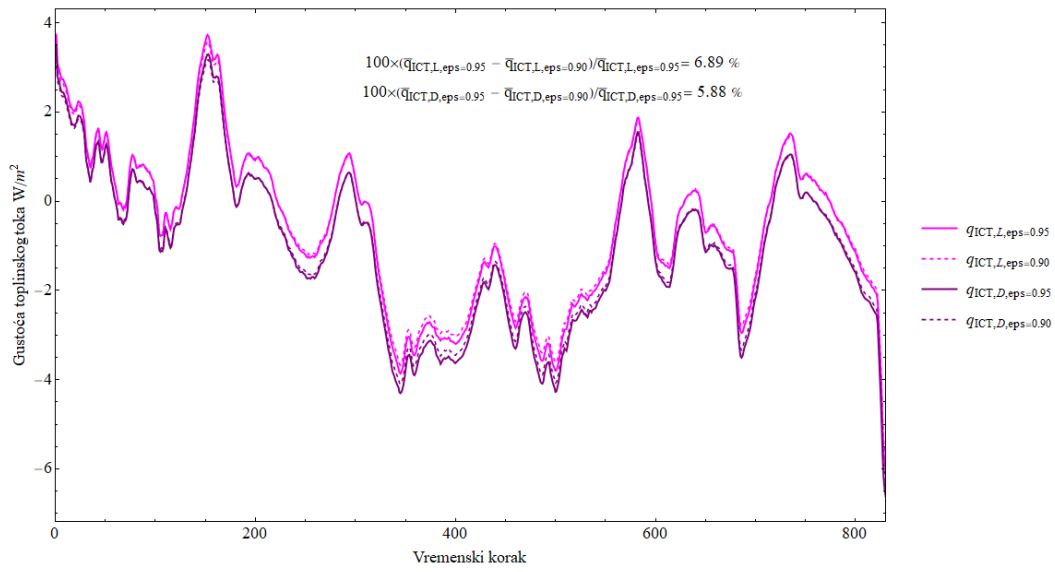
Uzimajući u obzir ove rezultate, važno je osigurati da se pri korištenju metode infracrvene termografije uzimaju u obzir različiti čimbenici koji mogu utjecati na preciznost mjerenja, uključujući emisivnost površine i greške u očitavanju temperature (Slika 92).



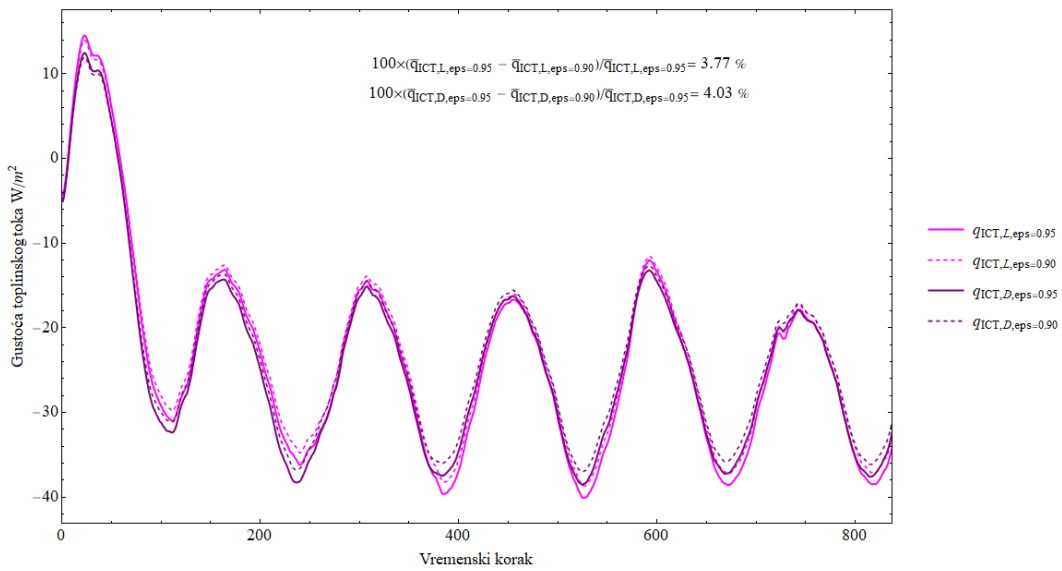
a) 1K



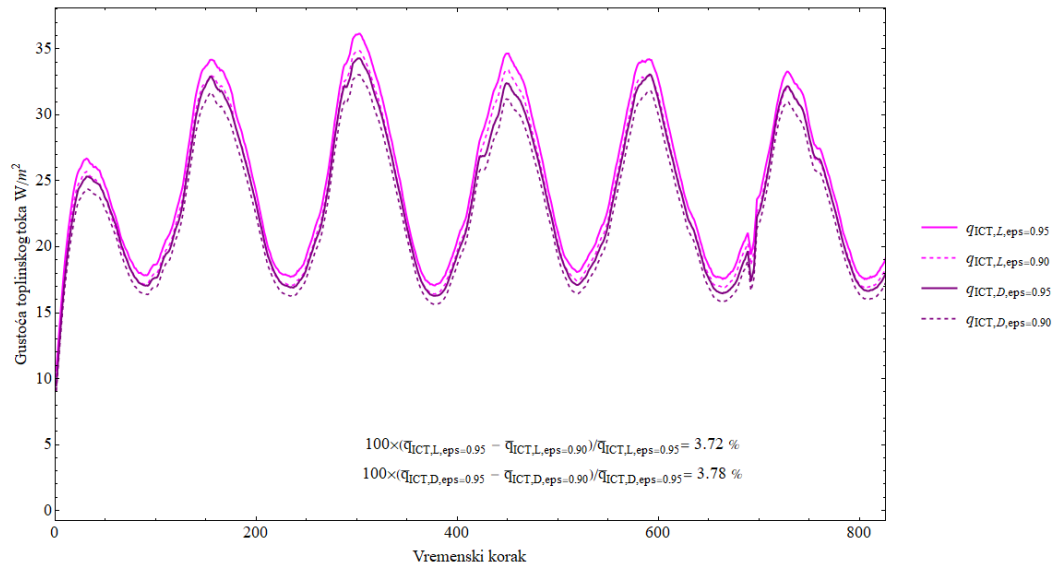
b) 2K



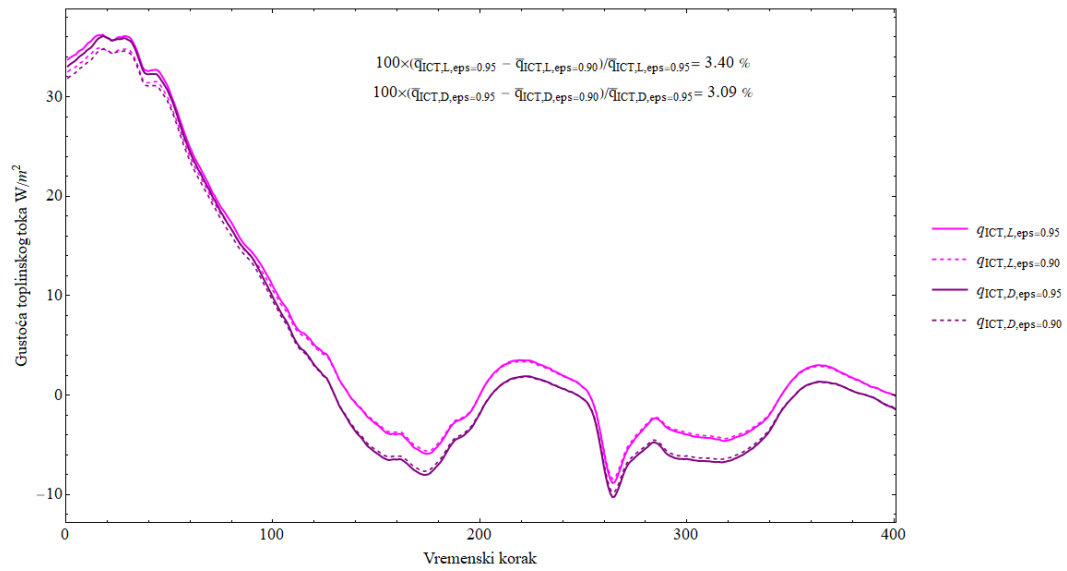
c) 3K



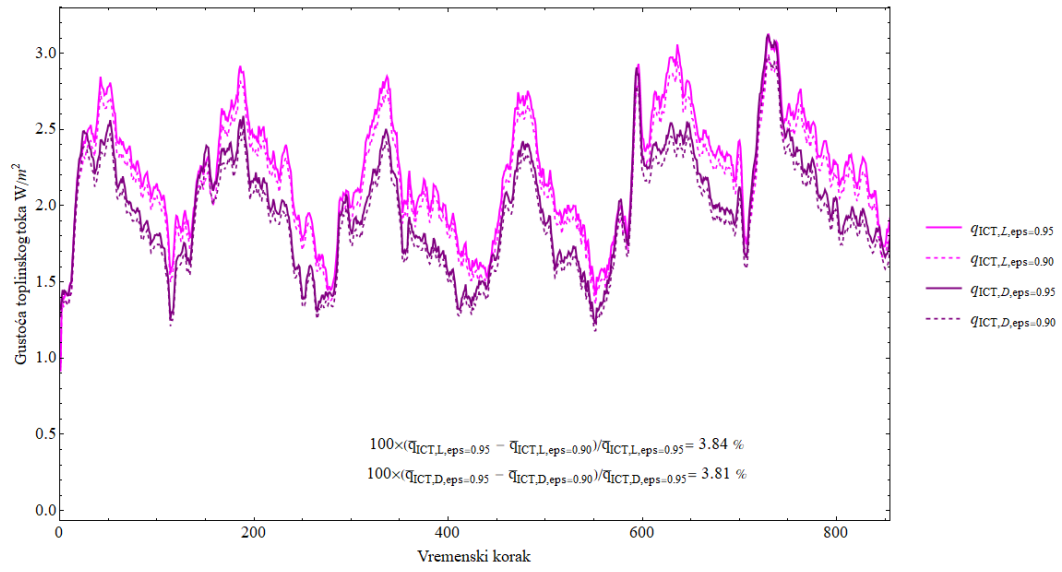
d) 4B



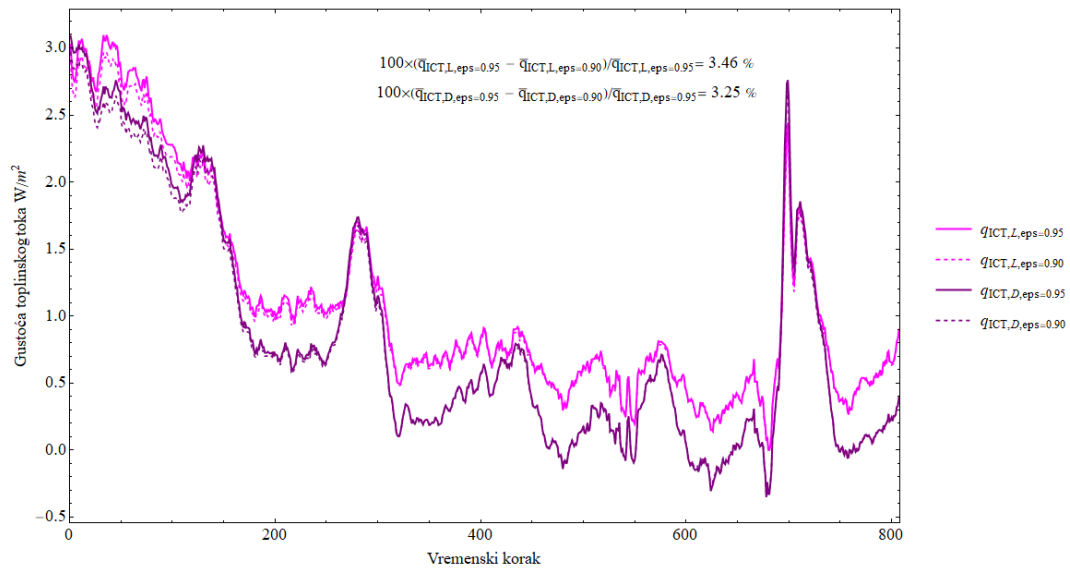
e) 7B



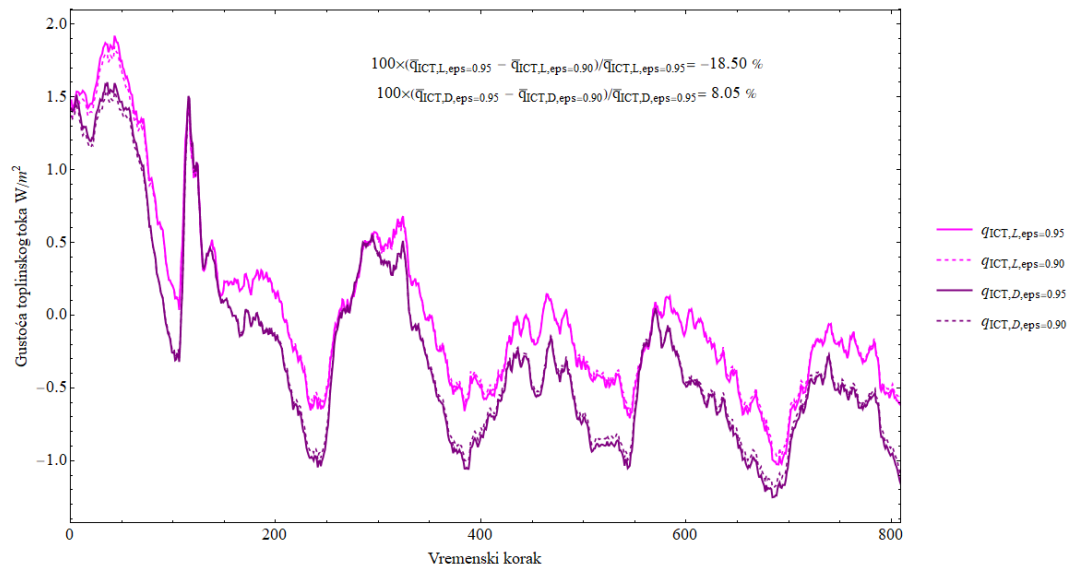
f) 8B



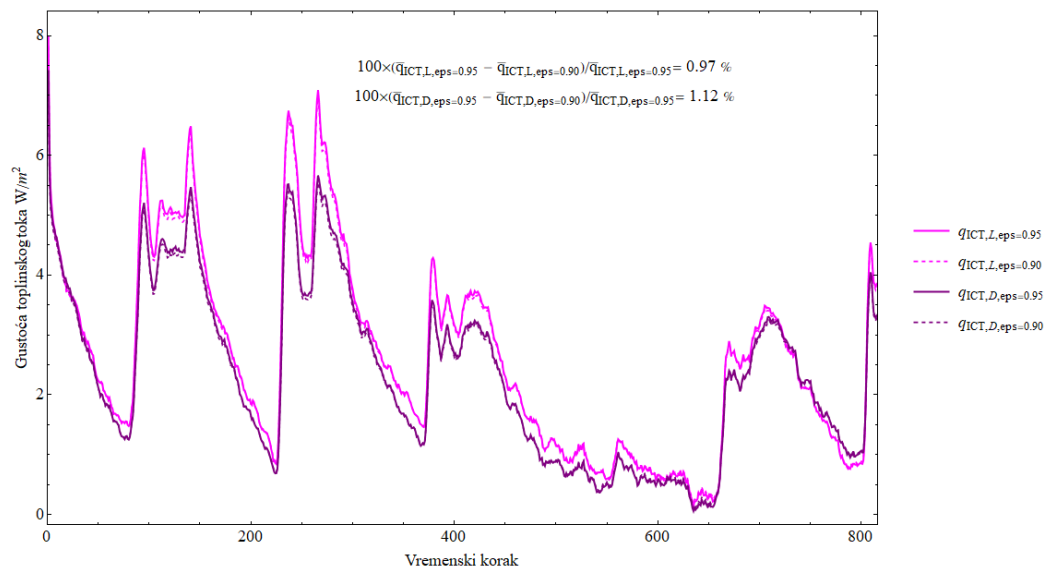
g) 9S



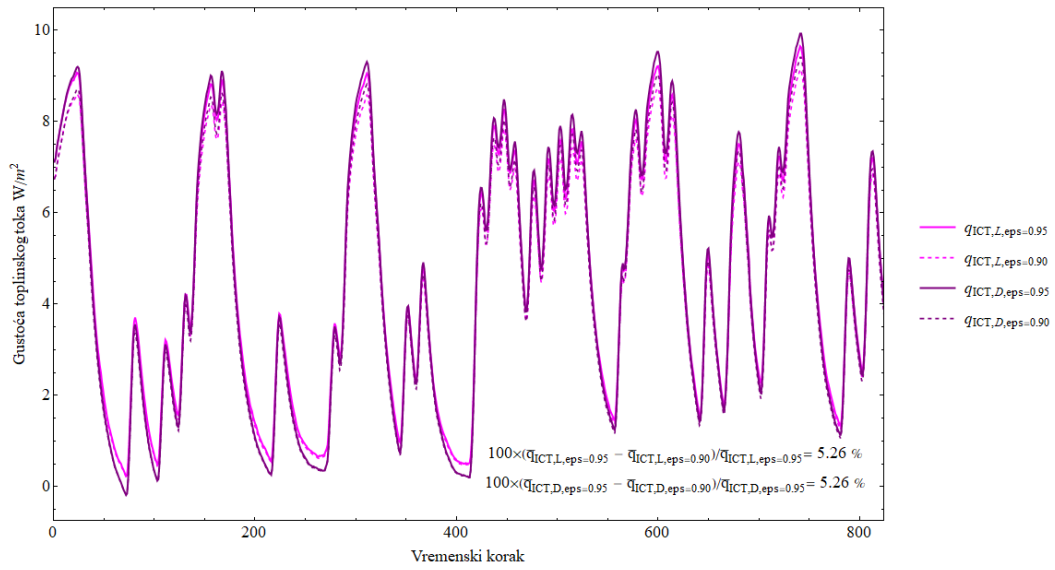
h) 10S



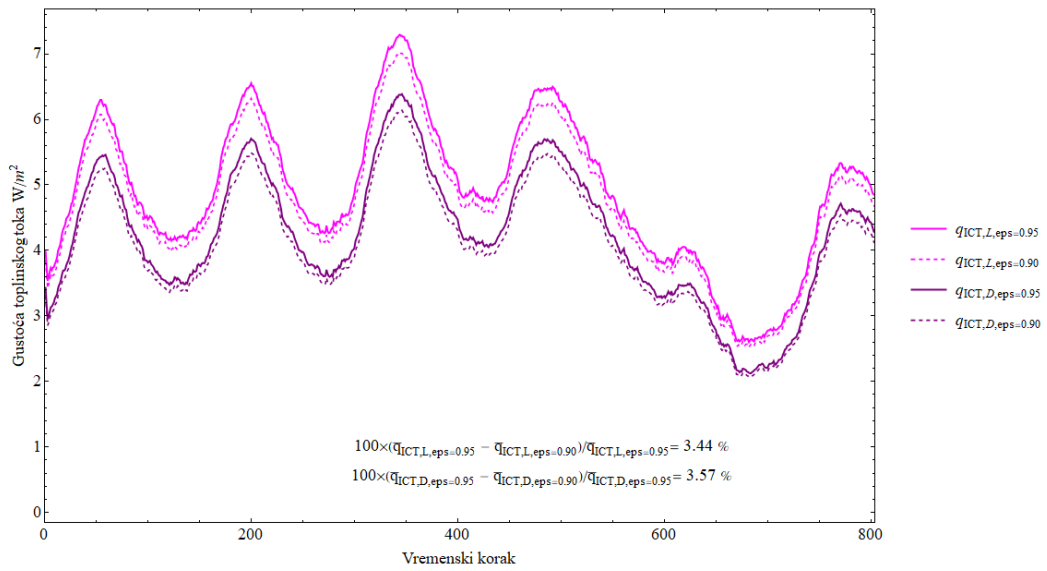
i) 11S



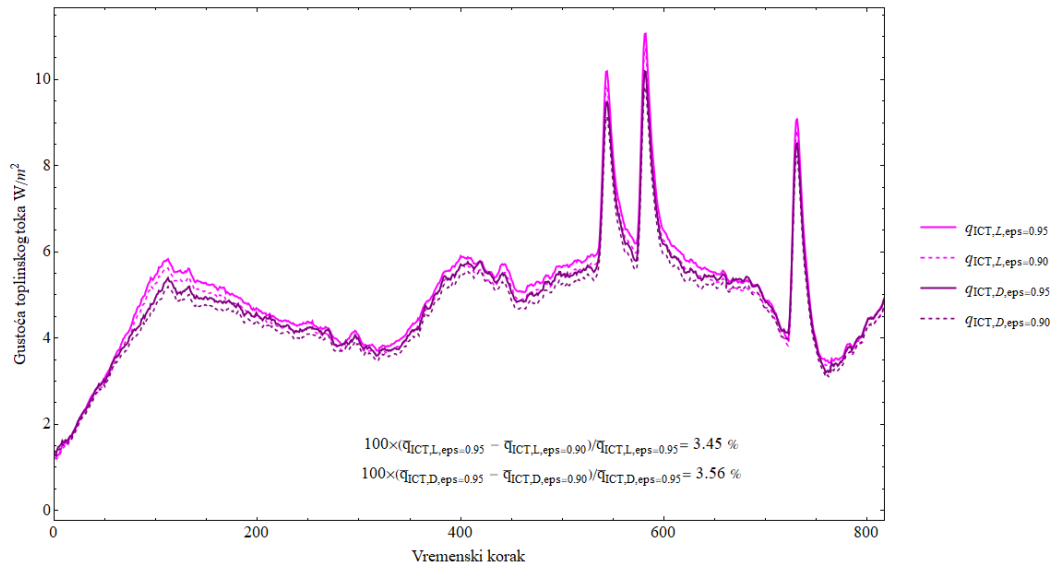
j) Ivanovec



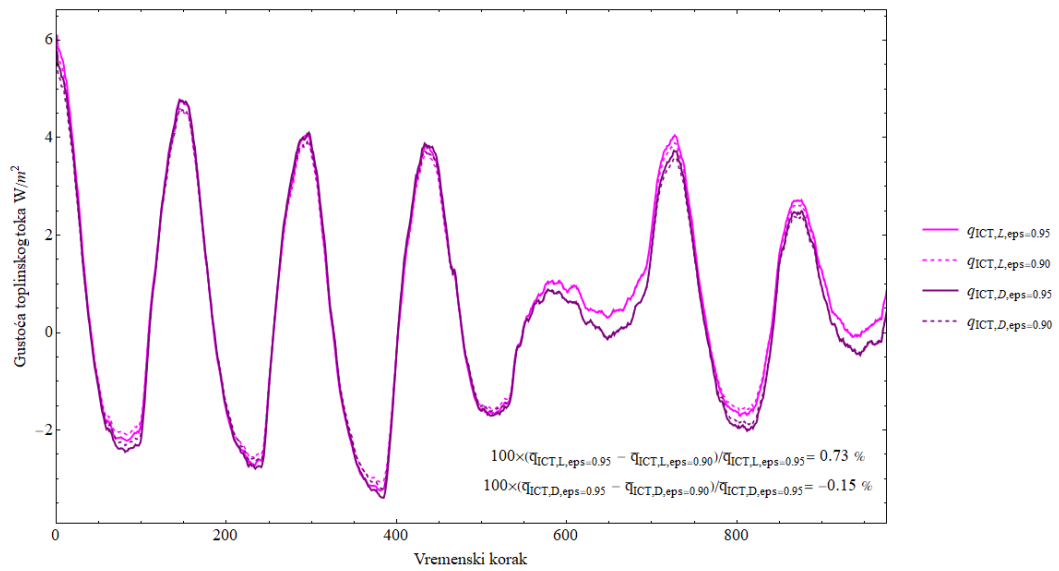
k) Lenti



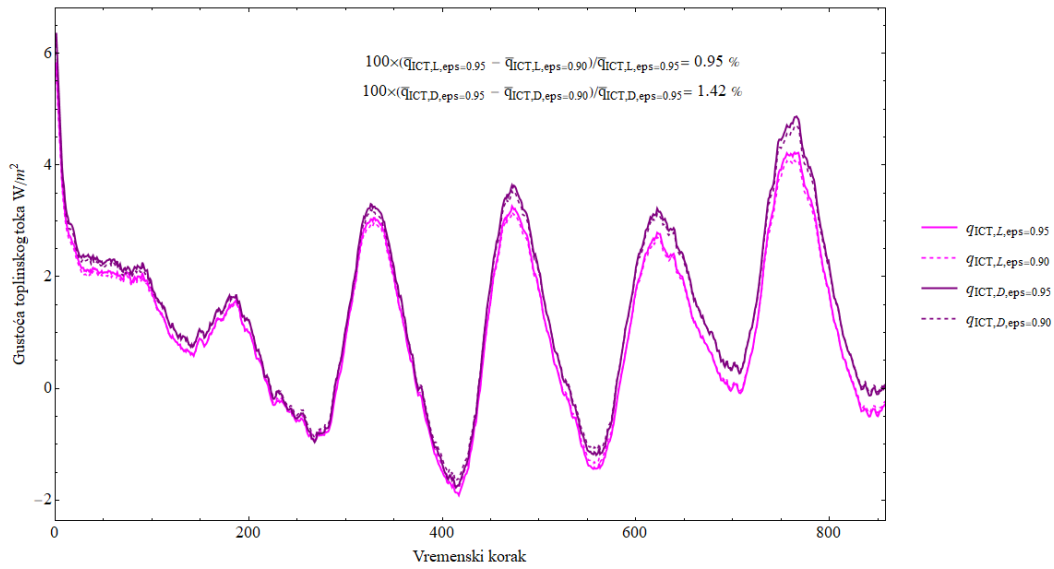
l) Muraszemenye



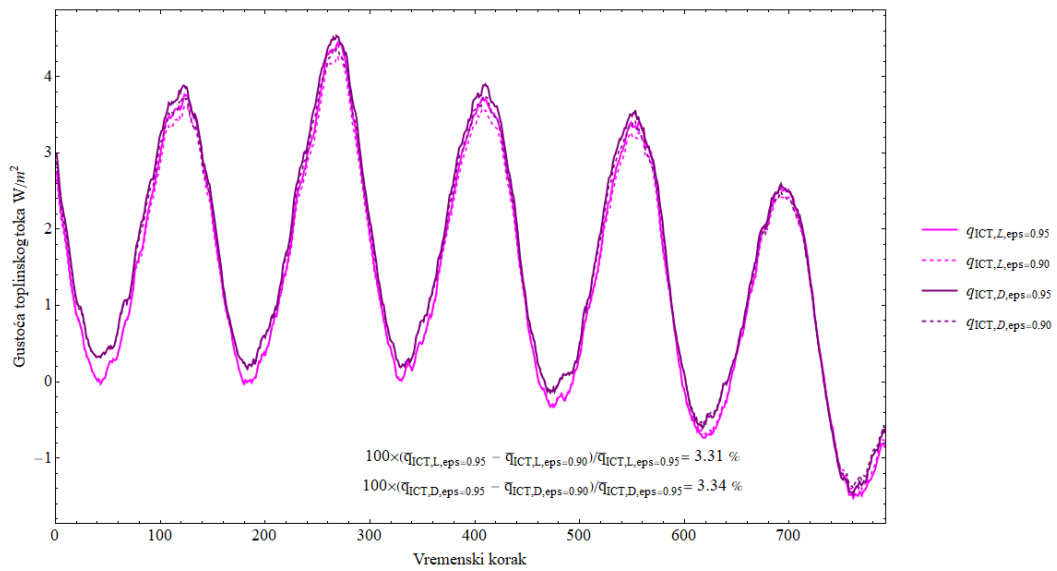
m) Mursko Središće



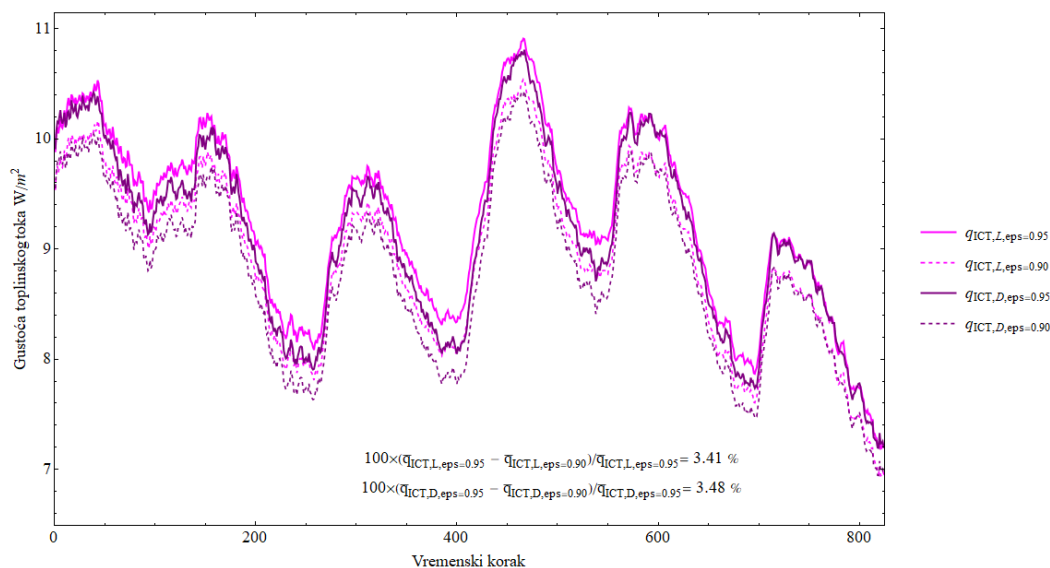
n) Palovec



o) Tornyszentmiklos



p) Totovec



q) Vapor

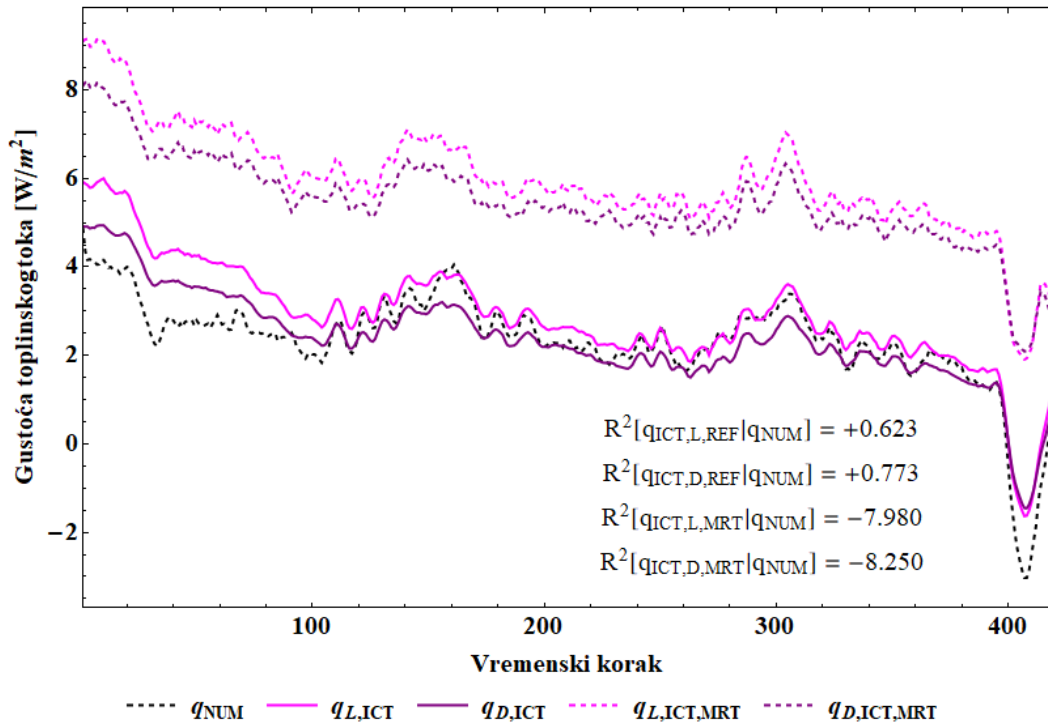
Slika 92: Utjecaj emisivnosti površine na gustoću toplinskog toka

6.4.2.3 Utjecaj transmisije atmosfere

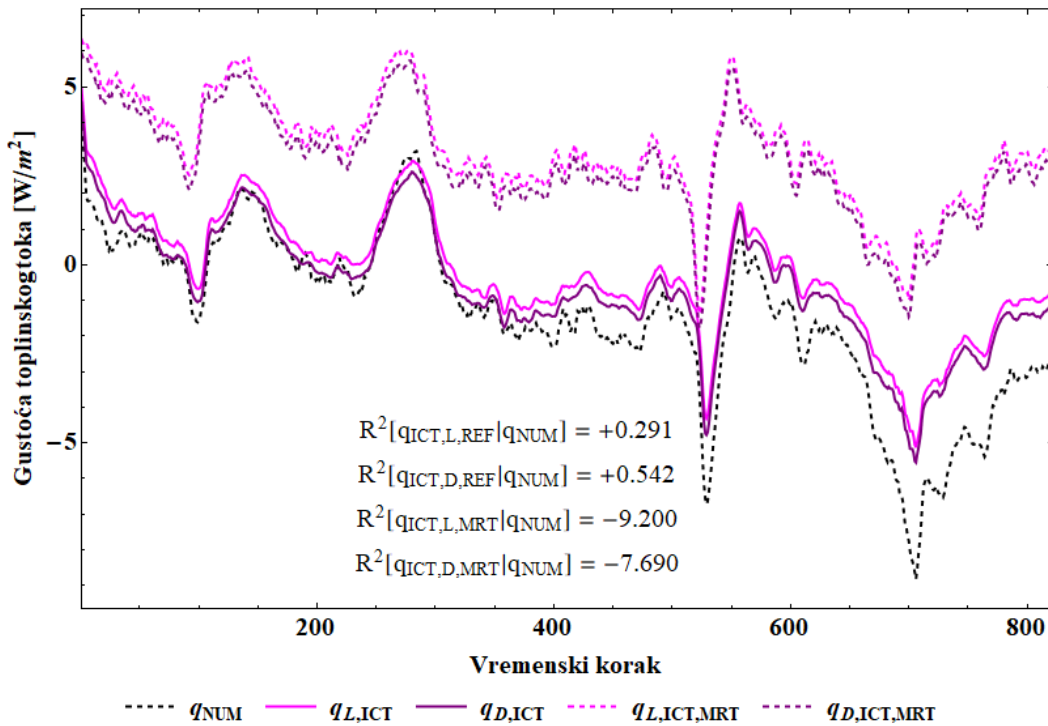
Kao što je prikazano u poglavlju 5.1.2.1 utjecaj atmosfere je zanemariv za manje udaljenosti kamere za sve relativne vlažnosti zraka što i je slučaj u ovom istraživanju.

6.4.2.4 Utjecaj razlike prividne reflektirane temperature i srednje temperature zračenja

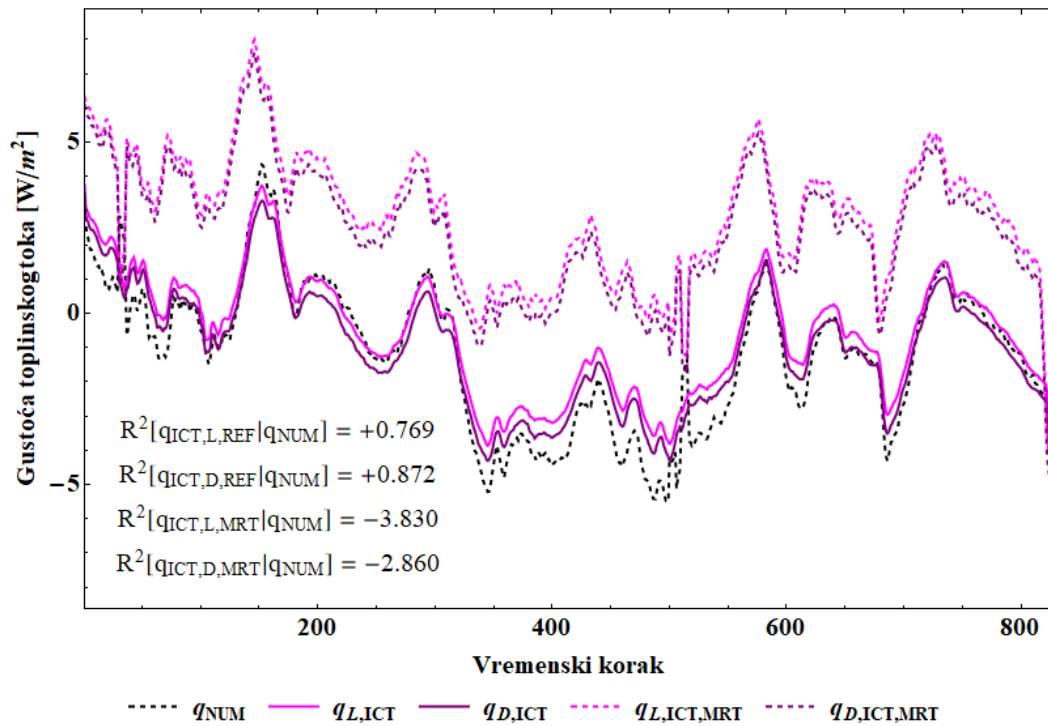
U ovom poglavlju je prikazana usporedba toplinskih tokova određenih metodom ICT za slučaj kada je za zračenje okoline korištena prividna reflektirana temperatura te srednja temperatura zračenja. Može se vidjeti da se korištenjem srednje temperature zračenja uglavnom dobivaju negativni koeficijenti korelacije između toplinskih tokova određenih metodom ICT i numerički (Slika 93) što pokazuje neadekvatnost primjene srednje temperature zračenja za određivanje toplinskog toka na unutarnjoj površini.



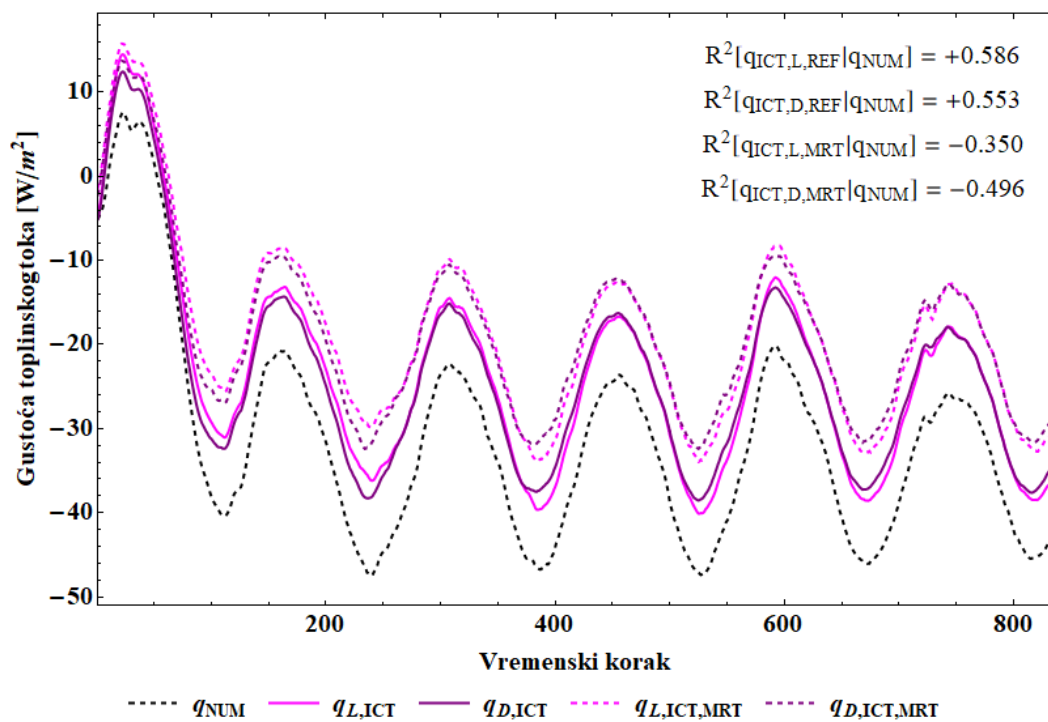
a) 1K



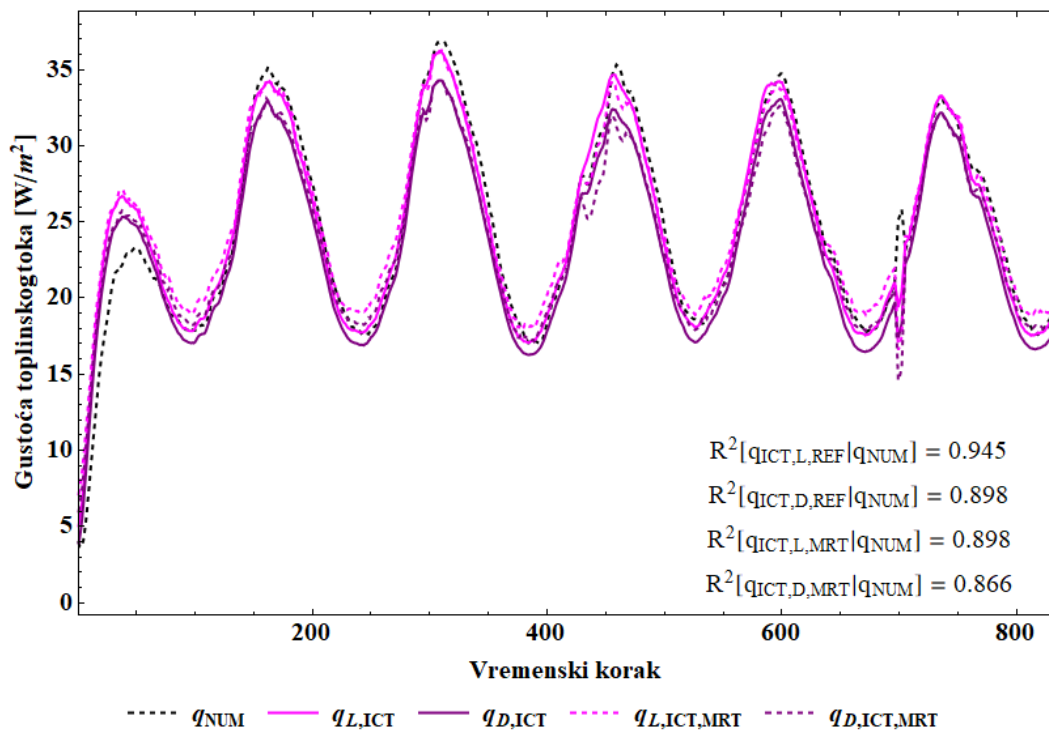
b) 2K



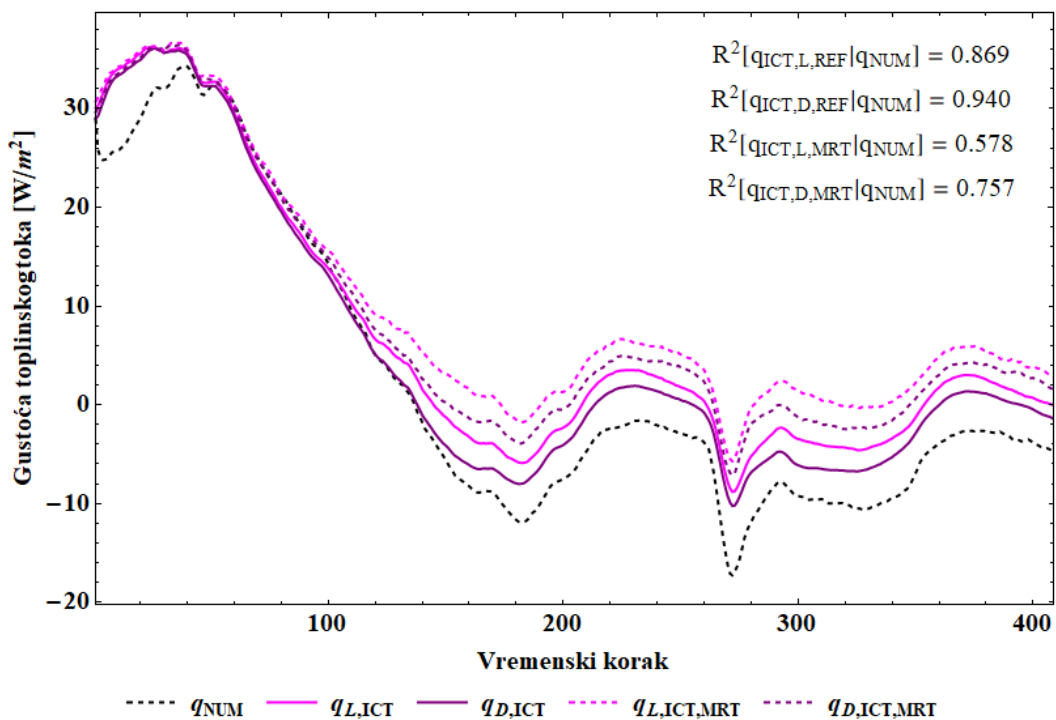
c) 3K



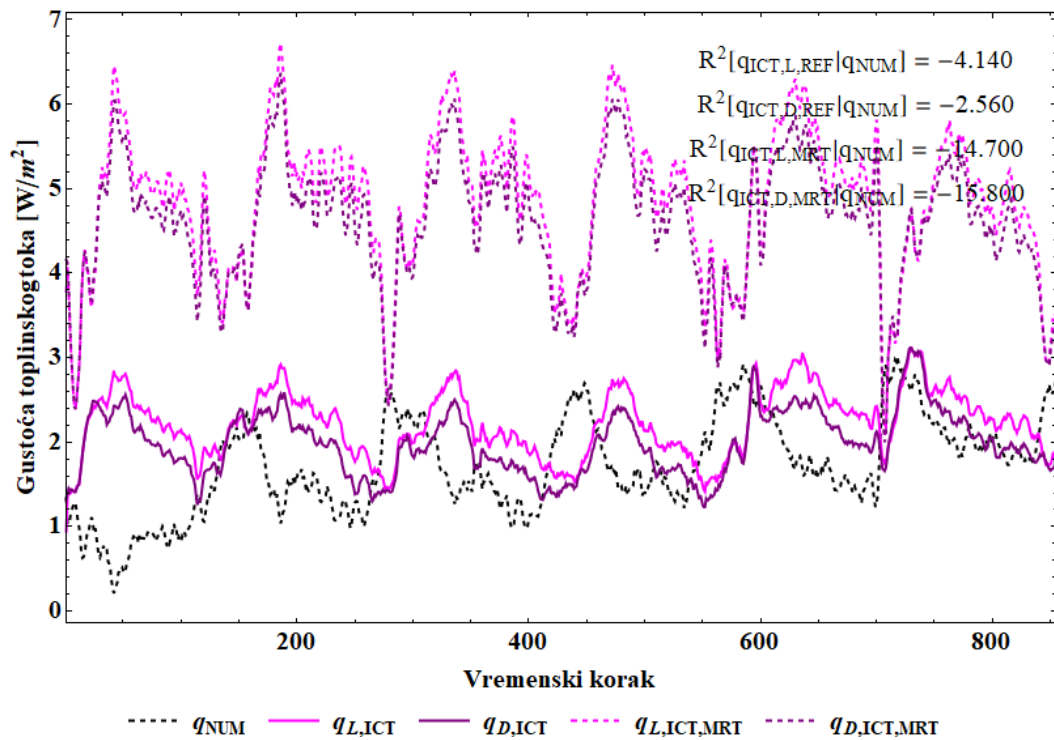
d) 4B



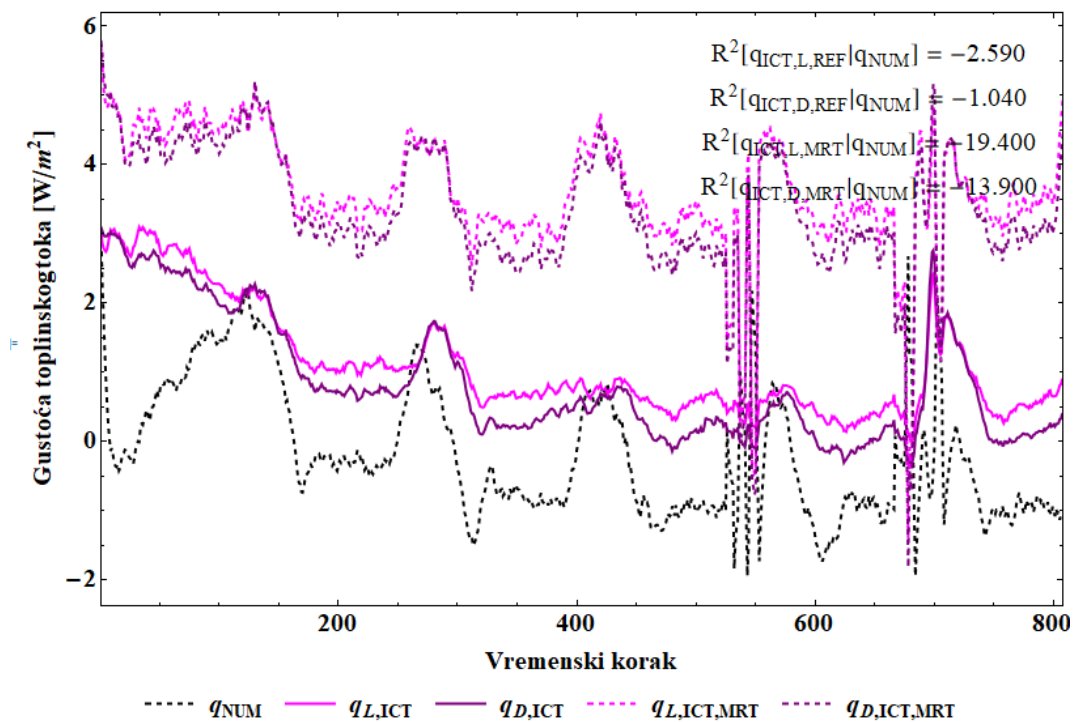
e) 7B



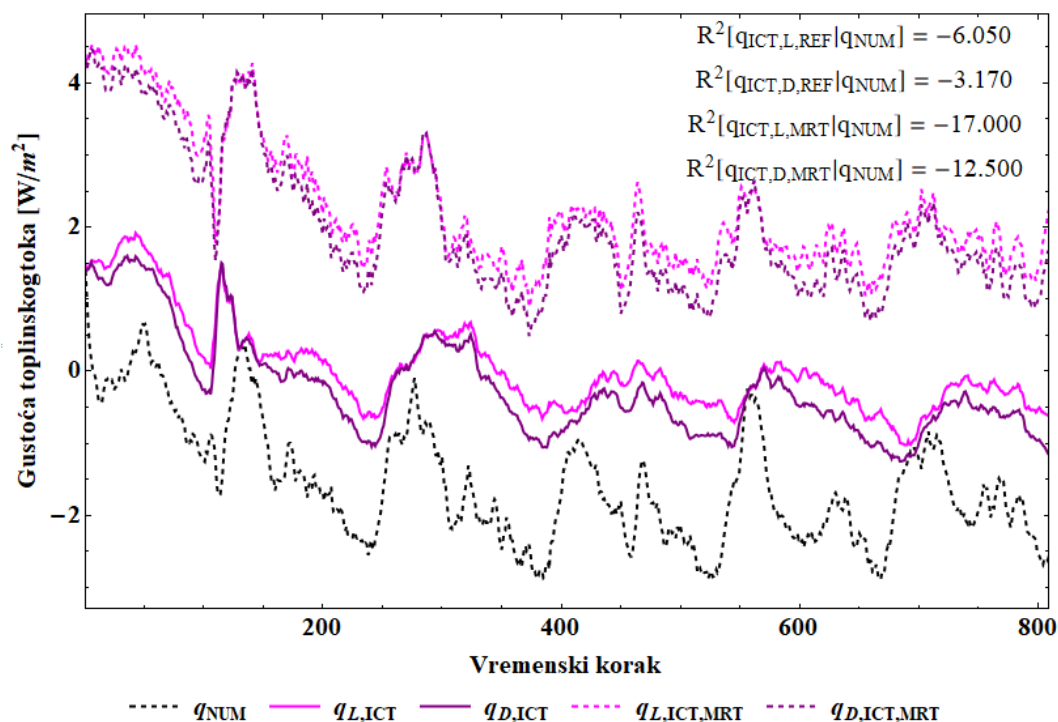
f) 8B



g) 9S



h) 10S

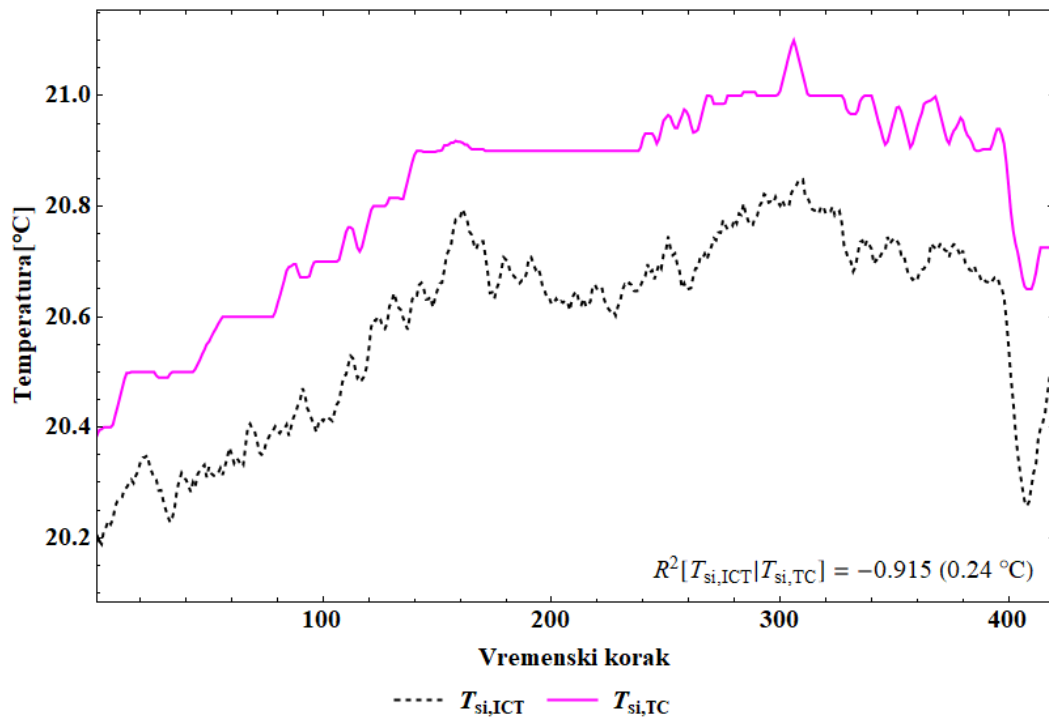


i) 11S

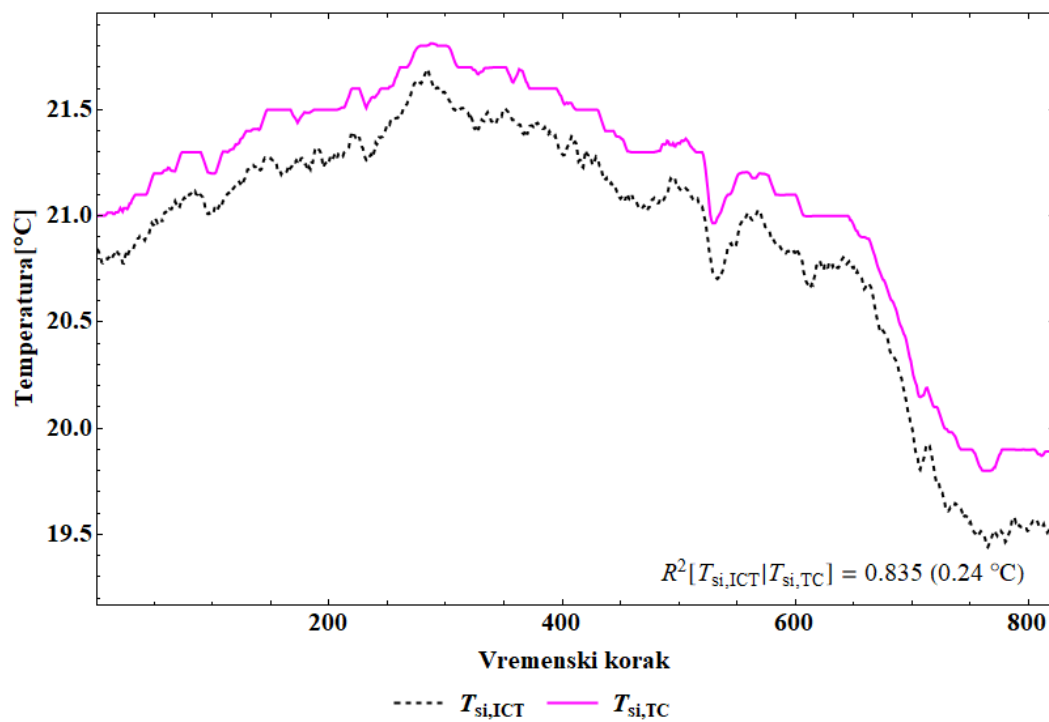
Slika 93: Usporedba toplinskog toka određenog korištenjem MRT-a i prividne reflektirane temperature

6.4.2.5 Utjecaj greške očitavanja površinske temperature metodom ICT

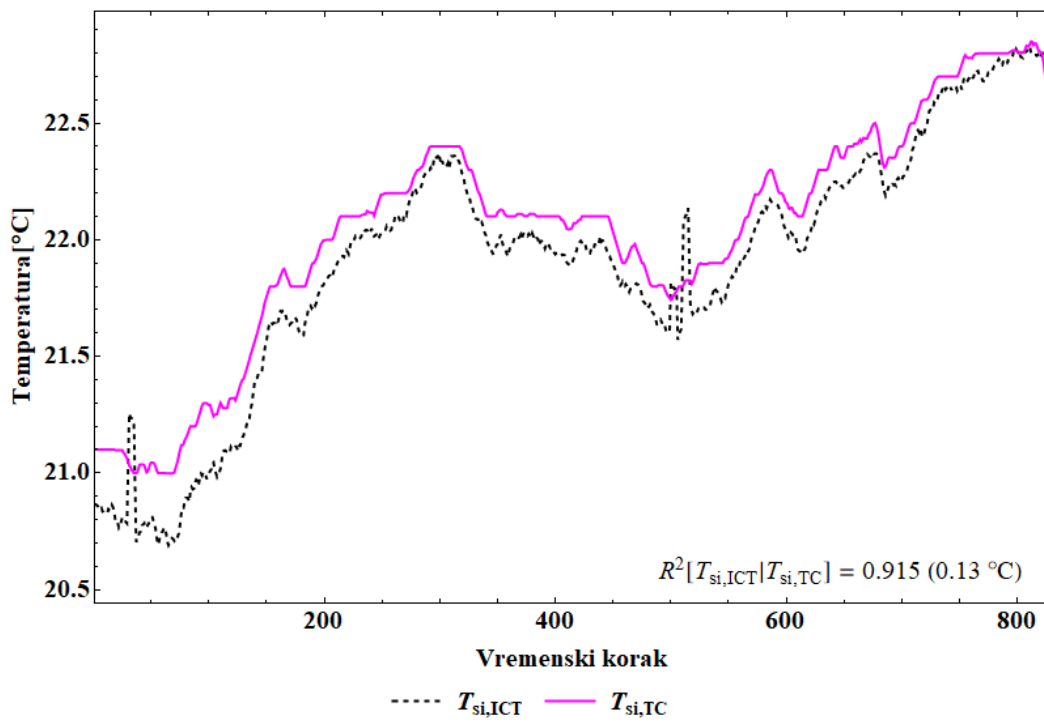
Radi kontrole mjerenja površinske temperature infracrvenom kamerom na površinu zida je postavljen i površinski termočlanak. Slika 94 prikazuje razlike mjerenja površinske temperature između metode ICT i termočlanka. Maksimalno srednje odstupanje je iznosilo 2,90 °C za uzorak 4B kod kojeg je zbog velike razlike između površinske temperature i temperature unutarnjeg zraka došlo do izraženijeg strujanja po površini što je direktno utjecalo na mjerenje površinske temperature termočlankom (Slika 94). Ako se zanemari taj slučaj maksimalna razlika u temperaturama iznosi 0,46 °C za uzorak 7B.



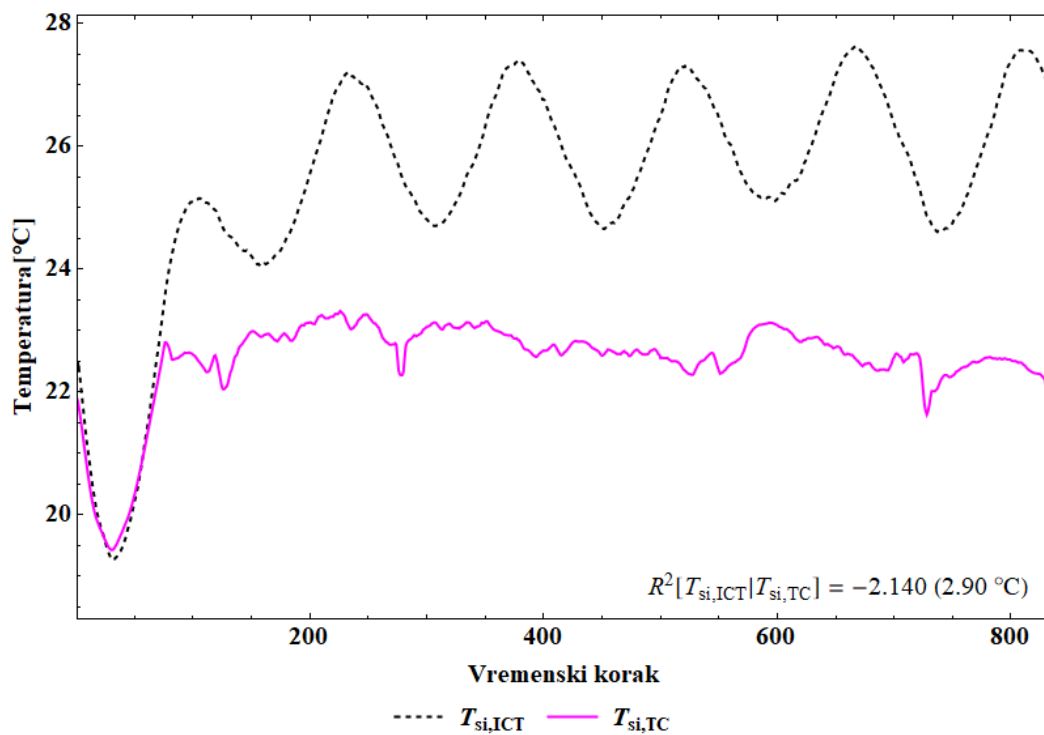
a) 1K



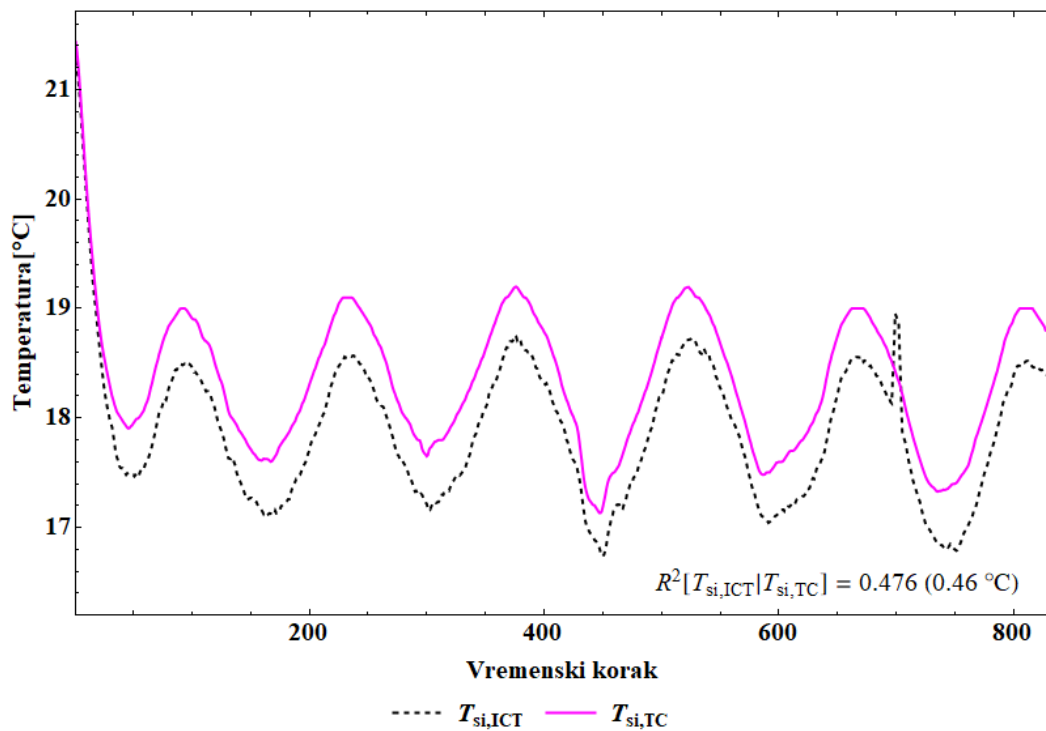
b) 2K



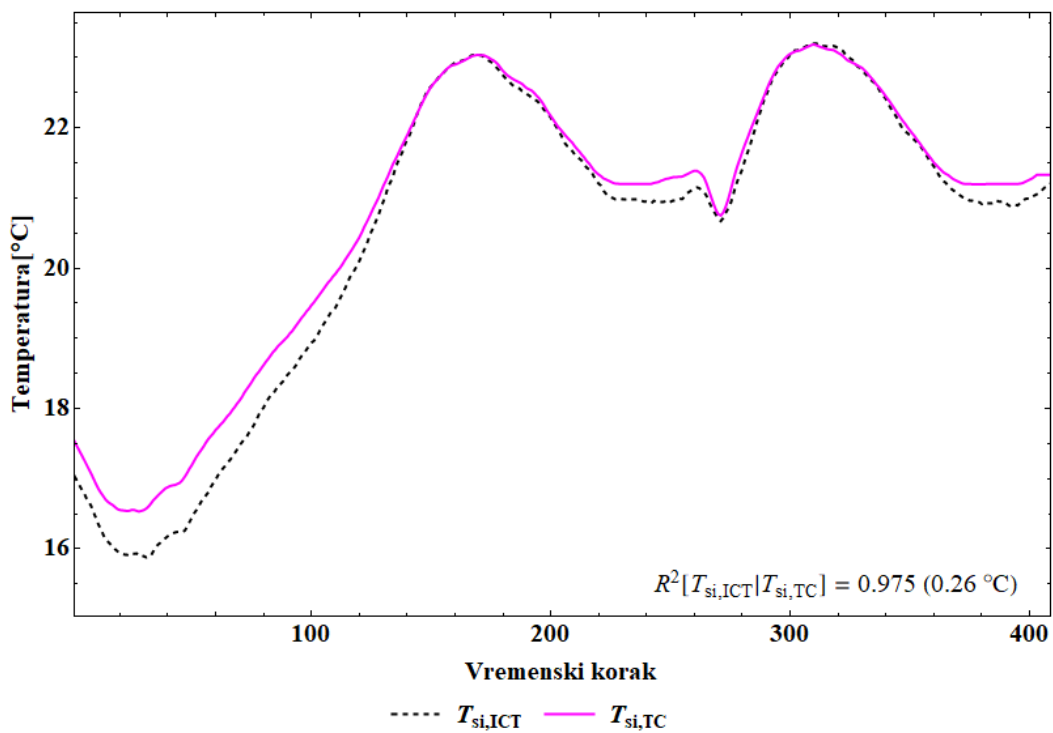
c) 3K



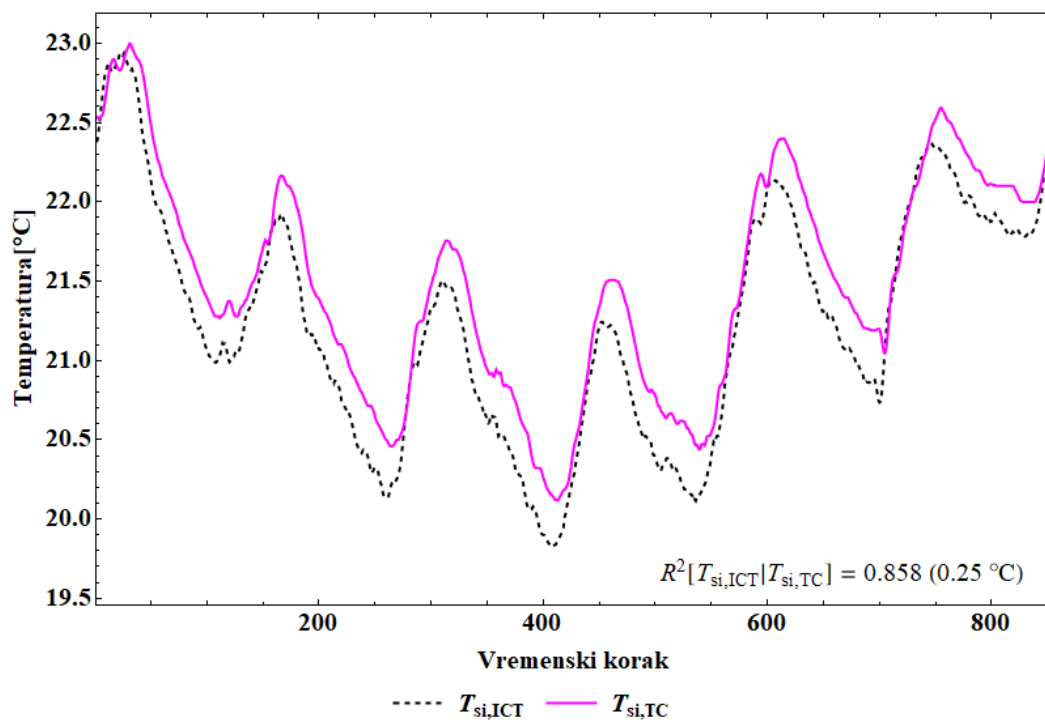
d) 4B



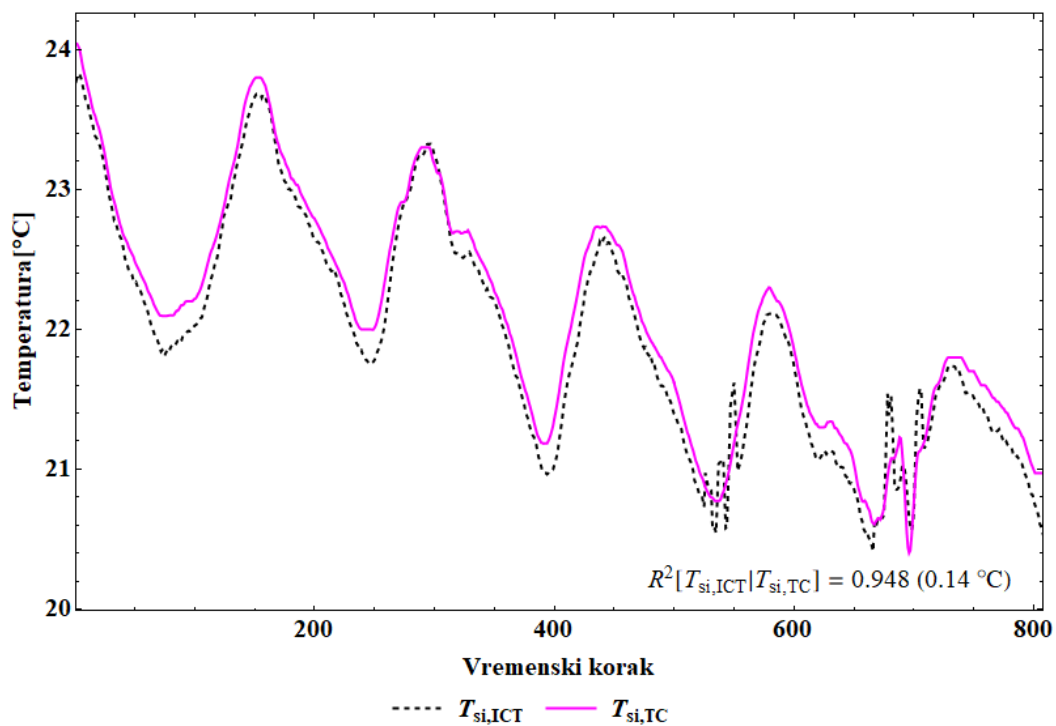
e) 7B



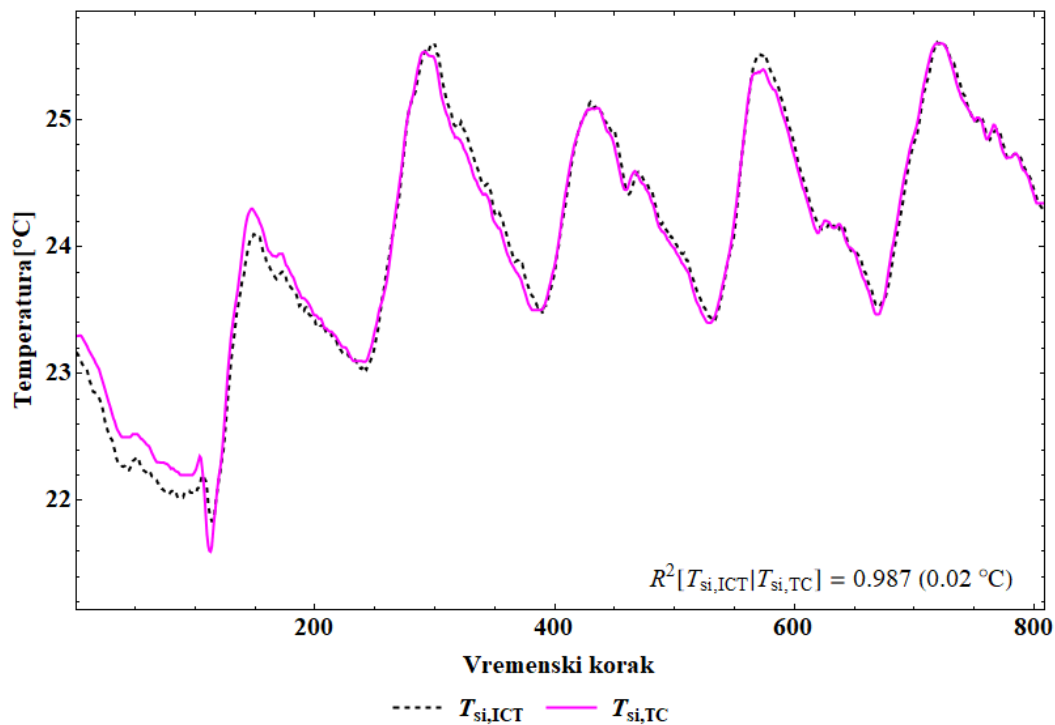
f) 8B



g) 9S



h) 10S



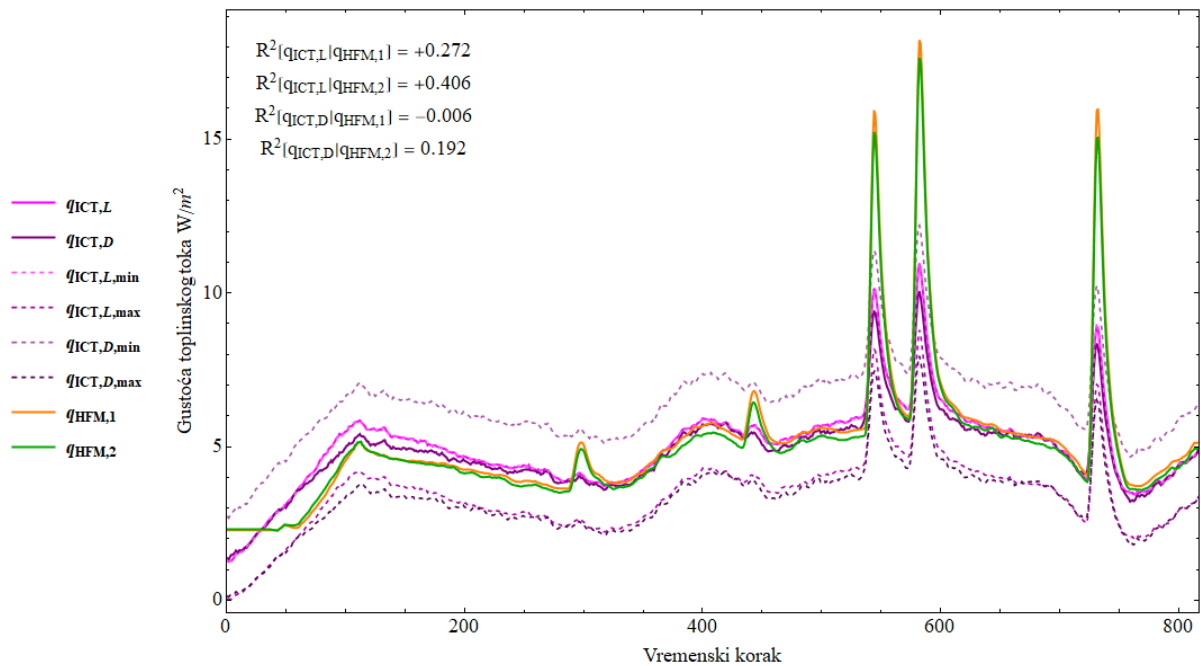
i) 11S

Slika 94: Usporedba površinske temperature izmjerene metodom ICT i površinskim termočlankom

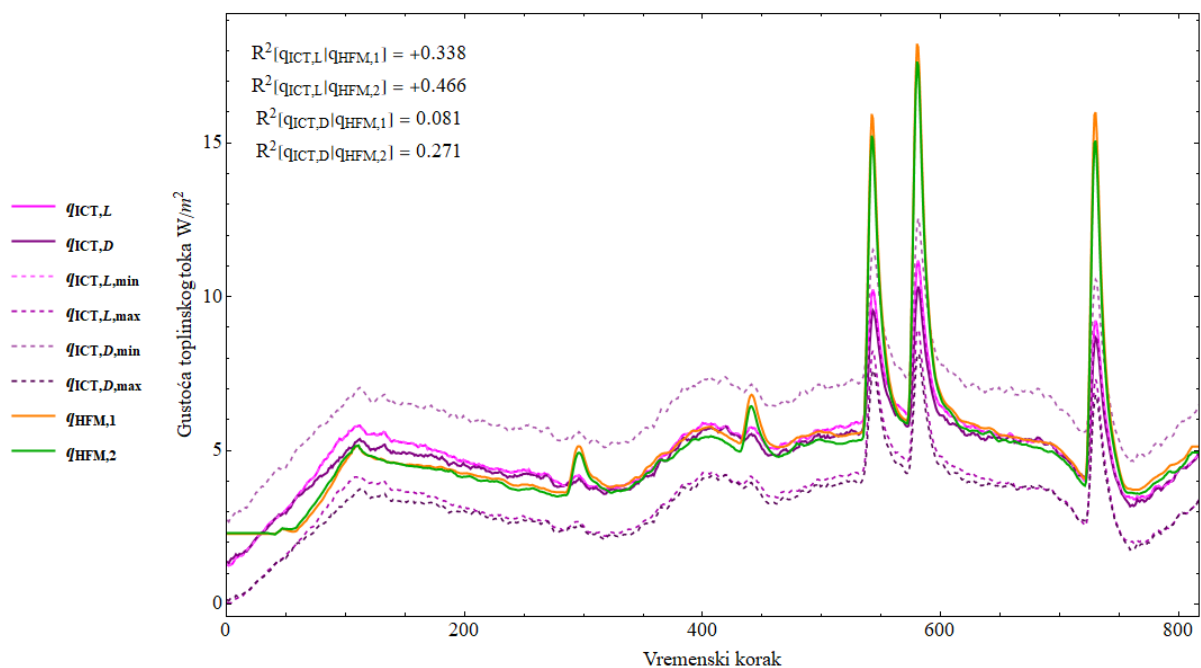
6.4.2.6 Utjecaj razmaka u vremenu uzorkovanja

Razmak u vremenu uzorkovanja može utjecati na određivanje stvarnog toplinskog toka infracrvenom kamerom. Ako snimanje termograma kasni za vrijeme Δt u odnosu na vrijednost očitane termočlankom, tada će kamera mjeriti temperaturu koja je aktualna u trenutku snimanja, a ne u trenutku kada se dogodilo očitavanje temperature termočlankom. To znači da će toplinski tok koji je određen metodom ICT biti približna vrijednost stvarnog toplinskog toka. U slučaju kvazistacionarnih uvjeta okoliša ovaj utjecaj je zanemariv, ali u slučaju kada se vrijednosti temperatura naglo mijenjaju, tada greška određivanja toplinskog toka metodom ICT može odstupati u odnosu na stvarni toplinski tok. Slika 95 i Slika 96 prikazuju rezultate određivanja toplinskog toka za slučajeve Mursko Središće i Palovec kod kojih dolazi do variranja prividne reflektirane temperature (Prilog 2). Može se vidjeti razlika u koeficijentu korelacije određene za slučaj kada očitavanje kamere „kasni“ za jednu i dvije minute u odnosu na očitavanje temperature zraka metodom HFM. Dobiva se razlika u koeficijentu korelacije između metode HFM i ICT od 6,6 % i 7,9 % za slučaj Mursko Središće za lijevi i desni toplinski tok te 0,9 % i 0,1 % za slučaj Palovec. Manja razlika u slučaju Palovec je rezultat ravnomjernije

funkcije toplinskog toka dok su kod slučaja Mursko Središće prisutne ekstremne vrijednosti zbog učestalijeg korištenja prostora u kojemu se nalazio ispitivani zid.

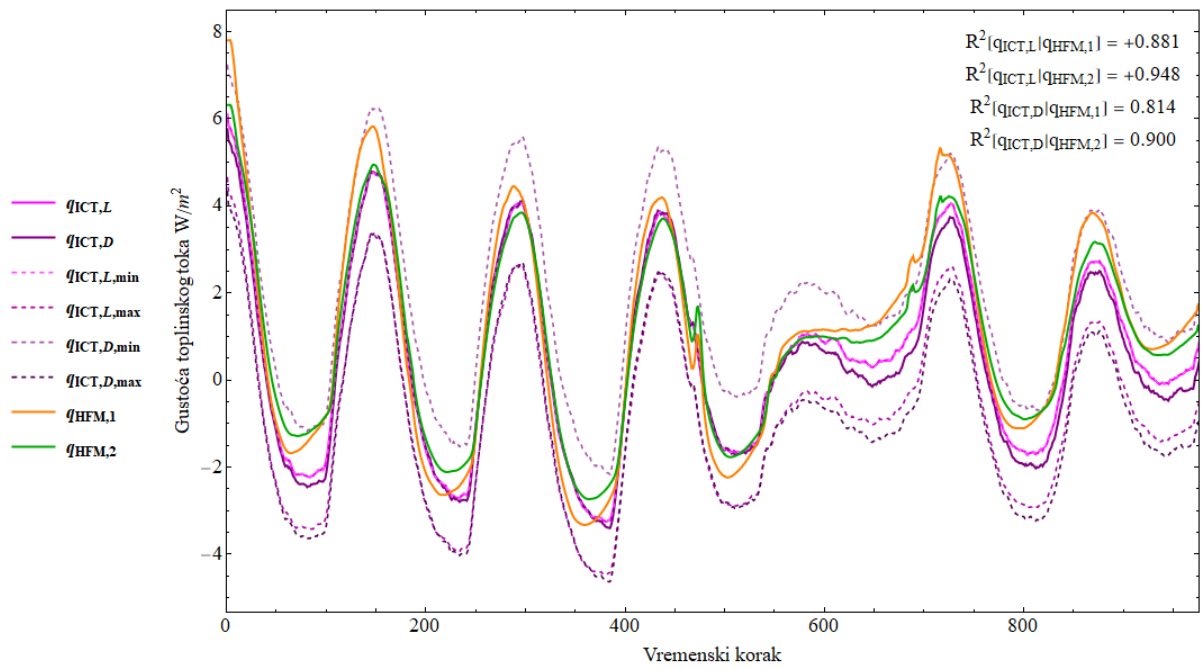


a)

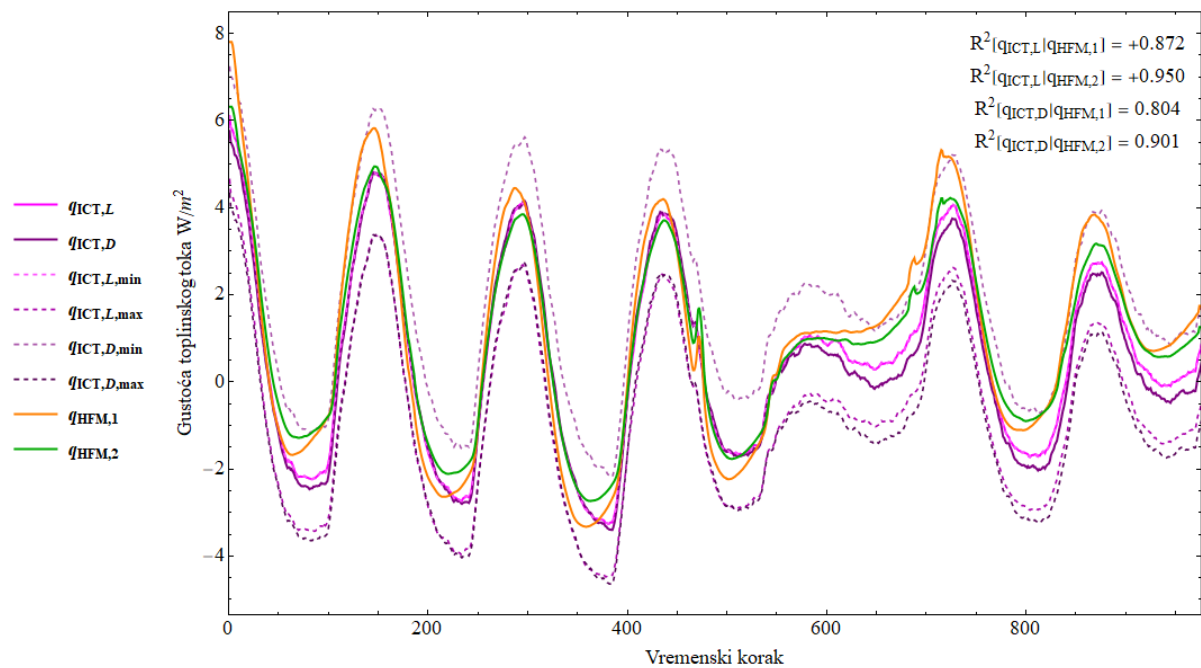


b)

Slika 95: Kašnjenje očitavanja površinske temperature i prividne reflektirane temperature unutarne zraka za Mursko Središće – a) za 1 minutu i b) za 2 minute



a)



b)

Slika 96: Kašnjenje očitavanja površinske temperature i prividne reflektirane temperature i temperature unutarnjeg zraka za Palovec – a) za 1 minutu i b) za 2 minute

7 Diskusija

7.1 Mjerenje koeficijenta prolaska topline metodom ICT

U ovom radu je prikazano određivanje gustoće toplinskog toka metodom ICT i određivanje U-vrijednosti iz izračunatog toplinskog toka. Kao kontrola određenog toplinskog toka korištena je metoda HFM koja je standardizirana normom HRN EN ISO 9869-1 te je primjenjiva za određivanje U-vrijednosti na terenu. Ispitivanje je provedeno u laboratoriju na devet uzoraka te na osam uzoraka na terenu. Laboratorijski uzorci su napravljeni na način da predstavljaju različite tipove elemenata zida vanjske ovojnice zgrade: AB zid bez toplinske izolacije, AB zid s toplinskom izolacijom s vanjske strane te AB zid s toplinskom izolacijom s unutarnje strane. Nosiva konstrukcija zida je napravljena od armiranog betona na koji se zatim postavljala toplinska izolacija. Zidovi su instalirani na komori koja ima mogućnost simuliranja vanjskih vremenskih uvjeta (temperature, relativne vlažnosti i kiše koja u ovom radu nije korištena). Temperatura se regulirala pomoću grijača i dizalice topline zrak-zrak koja ujedno regulira i relativnu vlažnost u komori. Nadalje, grijačem se simuliralo pregrijavanje unutarnje površine. Shodno tome odabrani su različiti vremenski uvjeti na kojem su tri zida ispitivana: zimski period (od 5 do 15 °C), prijelazni period (od 15 do 30 °C) te ljetni period (od 25 do 40 °C). Oprema za mjerenje U-vrijednosti metodom HFM je postavljena na unutarnju površinu (dva tokomjera za mjerenje gustoće toplinskog toka te dva termočlanka za mjerenje temperature unutarnjeg zraka), a unutar komore su postavljeni termočlanci za mjerenje temperature vanjskog zraka. Infracrvena kamera je postavljena na unaprijed određenu udaljenost od promatranog zida, a na površinu je postavljena traka poznate emisivnosti kako bi se kontrolirala temperatura zida te aluminijska folija kako bi se u vremenu pratilo zračenje okoline, tj. prividna reflektirana temperatura. Dodatno je na površinu postavljen termočlanak kako bi se potvrdila temperatura zida određena infracrvenom kamerom, termoanemometar kako bi se pratilo strujanje po površini zida te je u neposrednoj blizini zida postavljen globus termometar kako bi se pratila srednja temperatura zračenja (MRT) u svrhu dodatnog praćenja zračenja okoline. Na vanjsku površinu je također postavljen piranometar kako bi se pratilo Sunčevo zračenje na vanjskoj površini. U laboratorijskim uvjetima piranometar nije bio potreban pošto grijač većinu svoje energije zrači u infracrvenom dijelu elektromagnetskog spektra. Trajanje mjerenja je bilo minimalno 72 sata kako bi se zadovoljio kriterij dan u normi HRN EN ISO 9869-1. Identičan sustav je instaliran i na terenu za svih osam mjerenja te je još dodatno postavljen piranometar na vanjskoj površini kako bi se pratilo Sunčevo zračenje.

Iz svih izmjerenih veličina se odredio utjecaj najbitnijih parametara koji pridonose određivanju gustoće toplinskog toka i naposljetku U-vrijednosti primjenom metode ICT, a ti parametri su:

- Prividna reflektirana temperatura
- Površinska temperatura
- Temperatura unutarnjeg zraka
- Temperatura vanjskog zraka
- Koeficijent plošnog prijelaza topline strujanjem i
- Emisivnost površine.

Nakon provedenog mjerenja analizirani su svi podaci te su se primjenom specijaliziranih računalnih programa za obradu termograma odredile prividna reflektirana temperatura te površinska temperatura s pripadnim standardnim odstupanjima pošto metoda ICT dopušta određivanje toplinskog toka na većem dijelu površine zida što nije slučaj kod metode HFM koja gustoću toplinskog toka određuje točkasto.

Pošto su za laboratorijske uzorke bile poznate i debljine slojeva i karakteristike materijala, napravljeni su i 1D numerički modeli koji u obzir uzimaju i strujanje i zračenje na površinama uzoraka kako bi se usporedili toplinski tokovi s toplinskim tokovima određenim metodama HFM i ICT. Nadalje, uspoređena je i temperatura na unutarnjoj površini metodom ICT s temperaturom izračunatom numeričkim modelima. Metoda korištena za aproksimiranje jednadžbe provođenja topline za slučaj višeslojnih elemenata je metoda konačnih razlika (MKR). Modeli su pokazali dobro poklapanje između numerički dobivenih toplinskih tokova i temperatura na unutarnjoj površini s numerički dobivenim toplinskim tokovima i temperaturama.

Za analizu rezultata u ovom istraživanju korišten je programski paket Mathematica te su u njemu implementirani svi algoritmi i metode prikazane u ovom radu. Nadalje, korištenjem Mathematice primijenjen je i filter („*MeanShiftFilter*“) kako bi se uklonili šumovi iz izmjerenih veličina.

Kako bi se odredila mjerna nesigurnost korištena je metoda RSS koja koristi linearne matematičke transformacije kako bi se odredio utjecaj pojedinog parametra koji utječe na izmjereni toplinski tok metodom ICT (prividna reflektirana temperatura, površinska temperatura, temperatura unutarnjeg i vanjskog zraka, koeficijent plošnog prijelaza topline strujanjem i emisivnost površine) te ukupnu mjernu nesigurnost u aproksimiranu U-vrijednost. Postupak je također implementiran korištenjem programskog paketa Mathematica.

Dinamička metoda proračuna se pokazala neadekvatnom za primjenu i s metodom ICT i HFM. Uzrok tome je najvjerojatnije velika toplinska masa uzoraka. U daljnjim istraživanjima trebalo bi se fokusirati na poboljšanje dinamičke metode za primjenu kod teških građevnih elemenata koji se u potresnim područjima pa tako i u Hrvatskoj često grade. Trenutno se taj problem rješava povećanjem trajanja mjerenja kako bi se što bolje uprosječio toplinski tok, ali utjecaj akumulacije topline unutar elementa ostaje nepoznat pogotovo ako se radi o postojećim elementima vanjske ovojnice zgrade kod kojih nisu poznati slojevi kao što je to slučaj u ovom radu.

7.1.1 Utjecaj strujanja

Kako bi se odredio utjecaj strujanja na izmjereni toplinski tok korišteno je 17 različitih modela za aproksimaciju koeficijenta plošnog prijelaza topline strujanjem te su korištenjem tih modela određeni toplinski tokovi i uspoređeni s metodom HFM. Model koji je dao najbolji koeficijent korelacije R^2 u najvećem broju slučajeva je uzet kao mjerodavan.

Strujanje na površini je modelirano primjenom Newtonovog zakona hlađenja i teorije graničnog sloja. Međutim, korištenje ovako pojednostavljenih izraza zahtjeva dobro poznavanje teorije mehanike fluida te diferencijalnih jednadžbi. Kako bi se još bolje odredio koeficijent plošnog prijelaza topline strujanjem u budućnosti je potrebno provesti numeričke simulacije te eksperimentalno istraživanje o utjecaju različitih parametara koji doprinose strujanju po površini, a nisu uzeti u obzir u ovom radu: hrapavost površine, režim strujanja, profil strujanja po visini zida, itd.

7.1.2 Utjecaj emisivnosti površine

Kao parametar koji najmanje utječe na ukupni toplinski tok pokazala se emisivnost površine zida. Građevinski materijali koji se koriste kao završni slojevi zidova (najčešće žbuke) imaju koeficijent emisivnosti između 0,90 i 0,95. U ovom radu je greška određivanja emisivnosti površine uzeta kao $\pm 0,05$ što je rezultiralo u greški određivanja gustoće toplinskog toka od maksimalno 10,20 % ako se sagleda samo utjecaj emisivnosti dok je kod izračuna mjerne nesigurnosti utjecaj emisivnosti zanemariv u odnosu na druge parametre. Odstupanje od 10,20 % se smatra maksimalnim odstupanjem ako se zanemare laboratorijski uzorci s toplinskom izolacijom s unutarnje strane kod kojih dolazi do velikog problema prilikom određivanja prividne reflektirane temperature zbog relativno male emisivnosti površine i malog iznosa toplinskog toka koji je istog reda veličine kao i izračunata greška mjerenja gustoće toplinskog toka.

7.1.3 Utjecaj razlike prividne reflektirane temperature i površinske temperature zida

Jedni od parametara koji najviše utječu na zračenje koje se izmjenjuje između promatrane površine i okoline i obrnuto su prividna reflektirana temperatura i površinska temperatura zida. Kako bi se što bolje odredio toplinski tok koji se izmjenjuje između okoliša i promatrane površine potrebno je kontinuirano pratiti prividnu reflektiranu temperaturu i površinsku temperaturu zida. Prijenos topline između okoliša i površine je opisan Stefan-Boltzmannovim zakonom koji kaže da je količina topline između dva tijela na temperaturama T_1 i T_2 proporcionalna četvrtoj potenciji razlike apsolutne termodinamičke temperature ta dva tijela. Iz tog proizlazi da mala greška u očitavanju temperatura raste s četvrtom potencijom. Nadalje, temperatura određena infracrvenom kamerom je određena za uski interval valne duljine elektromagnetskog zračenja te je Stefan-Boltzmannovim zakonom ekstrapolirana na cijeli elektromagnetski spektar. Ova pretpostavka je u inženjerskoj praksi dovoljno dobra što je pokazano u ovom radu, ali zbog nje je teško procijeniti stvarnu grešku očitavanja temperature infracrvenom kamerom. Daljnja istraživanja bi se trebala fokusirati na aproksimaciju toplinskog toka korištenjem infracrvenih detektora za različite valne duljine infracrvenog spektra.

7.1.4 Utjecaj razlike srednje temperature zračenja i prividne reflektirane temperature

U poglavlju 6.4.2.4 pokazana je razlika između toplinskog toka određenog preko srednje temperature zračenja i prividne reflektirane temperature. Glavna razlika između ove dvije veličine je u njihovoj tromosti. Srednja temperatura zračenja je uprosječna temperatura svih tijela koje zrače prema promatranoj površini i rezultat je zagrijavanja globus-termometra. Kao takva u svim slučajevima daje veću temperaturu okoliša nego prividna reflektirana temperatura koja je, kao što joj to ime kaže, samo odraz zračenja iz okoline te se dinamički mijenja u vremenu. Primjer je žarulja sa žarnom niti koja može biti upaljena u nekom intervalu u vremenu te će svojim zračenjem promijeniti temperaturu zida, ali i globus termometra koji će toplinu prenijeti na termočlanak unutar globusa. Gašenje žarulje neće drastično promijeniti temperaturu globus-termometra niti površinsku temperaturu zida, ali temperatura koju kamera očitava na zgužvanoj aluminijskoj foliji će se drastično promijeniti. Prema tome odbacuje se Hipoteza 2 te se zaključuje da U-vrijednost određena preko prividne reflektirane temperature bolje opisuje stvarno ponašanje elemenata vanjske ovojnice zgrade nego što je to u slučaju kada se koristi srednja temperatura zračenja. Međutim, naglasak je potrebno staviti na kontinuirano praćenje prividne reflektirane temperature što je u ovom radu i napravljeno. Daljnja istraživanja bi

trebala sagledati utjecaj prividne reflektirane temperature određene na više lokacija na površini zida i u kraćem vremenskom periodu.

7.1.5 Utjecaj razlike ambijentalne temperature i površinske temperature zida

Razlika između ambijentalne temperature i površinske temperature zida direktno utječe na količinu topline koja se odnosi na strujanje po površini. Pošto ambijentalna temperatura nije nužno jednaka temperaturi zraka, u ovom radu se analiziralo koja temperatura najbolje opisuje stvarni toplinski tok strujanjem te je ustanovljeno da ambijentalna temperatura odgovara srednjoj razlici temperature između prividne reflektirane temperature i temperature unutarnjeg zraka. Ovako izračunata temperatura daje najbolja poklapanja između toplinskog toka određenog metodama ICT i HFM. Daljnja istraživanja bi se također trebala fokusirati na metode određivanje ambijentalne temperature korištenjem štíćenog termočlanka u svrhu bolje aproksimacije strujanja po površini.

7.1.6 Utjecaj greške mjerenja površinske temperature i prividne reflektirane temperature

Jedni od parametara koji najviše utječu na toplinski tok određen metodom ICT su nejednolikost površinske temperature zida i prividne reflektirane temperature. Površinsku temperaturu zida je moguće odrediti na bilo kojoj lokaciji koja je u vidnom polju kamere, a određivanje temperature na više lokacija daje mogućnost izračunavanja standardnog odstupanja površinske temperature σ_{si} . Isto vrijedi i za određivanje prividne reflektirane temperature. U ovom radu je prividna reflektirana temperatura određena na jednom mjestu na površini zida korištenjem aluminijske folije površine A_{ref} te je uzeta kao srednja vrijednost na toj površini sa standardnim odstupanjem σ_{ref} . Standardno odstupanje je uzeto u obzir prilikom određivanja mjerne nesigurnosti toplinskog toka. U budućem istraživanju bi se trebalo istražiti kako se prividna reflektirana temperatura mijenja po površini zida korištenjem, npr., više aluminijskih folija na više lokacija na površini.

7.1.7 Pouzdanost određivanje U-vrijednosti

Tablica 39 prikazuje U-vrijednosti određene metodom ICT za svih 17 uzoraka poredane od najveće do najmanje. Vidljivo je da se u pravilu metoda ICT ponaša tako da se za veće U-vrijednosti (neizolirani ili slabo izolirani zidovi) dobivaju bolje pouzdanosti u određenu U-vrijednost dok se kod manjih U-vrijednosti (izolirani zidovi) dobiva lošija pouzdanost. Kada je toplinski tok mali tada je vrijednost pogreške očitavanja površinske temperature i prividne reflektirane temperature infracrvenom kamerom istog reda veličine kao i razlika temperature

između ambijentalne temperature i površinske temperature zida i razlike temperature između prividne reflektirane temperature i površinske temperature zida. Iz tog proizlazi najmanja vrijednost toplinskog toka koju je moguće odrediti metodom ICT koja daje najveću pouzdanost u izmjerenu U-vrijednost. Ta vrijednost iznosi otprilike 1 W/m^2 (Tablica 36).

Tablica 39: Rezultati određivanja U-vrijednosti metodom ICT (od najveće do najmanje)

LIJEVA STRANA UNUTARNJE POVRŠINE						
naziv uzorka	$q_{ICT,L}$	T_i	T_e	U	dU	dU
	%			$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	%
7B	87,5	6,24	6,24	4,01	0,26	6,46
4B	85,9	7,05	7,05	3,50	0,17	4,91
Muraszemenye	88,2	5,91	5,91	1,79	0,26	14,36
Vaspor	96,3	1,86	1,86	1,18	0,12	9,92
8B	79	10,5	10,5	1,15	0,23	19,74
Mursko Središće	94,9	2,56	2,56	1,02	0,12	11,86
Ivanovec	98,4	0,79	0,79	0,96	0,34	34,90
10S	100	0	0	0,78	12,6	1615,38
Totovec	97,1	1,45	1,45	0,37	0,07	19,46
1K	98,8	0,61	0,61	0,30	0,04	13,67
Lenti	99	0,5	0,5	0,30	0,03	9,67
9S	98,8	0,61	0,61	0,26	0,04	14,62
2K	99,1	0,47	0,47	0,18	0,13	69,44
Palovec	99,9	0,07	0,07	0,08	0,06	80,00
Tornyszentmiklos	100	0,02	0,02	0,08	0,06	70,00
3K	99,9	0,06	0,06	0,07	0,03	35,71
11S	99,9	0,03	0,03	0,04	0,02	60,00

LIJEVA STRANA UNUTARNJE POVRŠINE						
naziv uzorka	$q_{ICT,D}$	T_i	T_e	U	dU	dU
				$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	%
7B	86,7	0,73	6,64	3,56	0,25	7,08
4B	94	0,62	2,98	2,86	0,19	6,50

8B	43,8	4,01	28,1	2,31	0,34	14,68
Muraszemenye	86,2	1,55	6,9	1,68	0,25	14,58
Vaspor	96,8	1,76	1,6	1,23	0,1	8,05
Mursko Središće	94,1	2,8	2,97	1,04	0,12	11,83
Ivanovec	98,7	8,64	0,67	0,87	0,35	40,00
10S	100	0	0	0,57	11,8	2070,18
2K	96,8	7,34	1,61	0,33	0,13	38,18
9S	99	5,42	0,48	0,22	0,04	16,36
Lenti	98,9	0	0,53	0,22	0,03	12,73
1K	99,3	5,34	0,36	0,20	0,04	20,00
3K	99,7	6,45	0,15	0,10	0,02	24,00
Tornyszentmiklos	99,9	3,53	0,04	0,10	0,06	58,00
Totovec	97	5,72	1,51	0,10	0,08	78,00
Palovec	99,9	6,4	0,03	0,09	0,06	67,78
11S	99,7	8,37	0,14	0,07	0,02	31,43

Primjenom metode RSS na parametre koji najviše utječu na U-vrijednost određenu metodom ICT određuje se mjerna nesigurnost. Analizom je utvrđeno da se najmanja pouzdanost na određenu U-vrijednost dobiva za laboratorijske uzorke s izolacijom na unutarnjoj strani koji su naposljetku i odbačeni te za terenske uzorke kod kojih dolazi do direktnog ili indirektnog utjecaja Sunčevog zračenja na mjerenje (Ivanovec i Palovec). Nadalje, kod laboratorijskih uzoraka bez izolacije (4B, 7B i 8B) dobiva se najveća razina pouzdanosti i za slučaj pregrijavanja vanjske površine i za slučaj bez simulacije Sunčevog zračenja. Iz ovog proizlazi da je Hipoteza 1 djelomično zadovoljena te da je moguće koristiti metodu ICT i u slučaju ekstremnih vrijednosti na vanjskoj površini ako se unutarnja površina adekvatno zaštiti od svih dodatnih zračenja iz okoline (Sunčevog zračenja, grijaćih tijela, ljudi, itd.).

Zaključci u prijašnjem paragrafu direktno utječu na Hipotezu 3 prema kojoj se za isti element vanjske ovojnice zgrade mogu odrediti U-vrijednosti s istom razinom pouzdanosti. U slučaju laboratorijskih uzoraka 4B (ljetni period) i 7B (zimski period) to je dokazano pošto se dobivaju iste razine pouzdanosti u izmjerenu U-vrijednost od 4,91 i 6,46 %. Međutim, u slučaju laboratorijskih uzoraka s izolacijom s vanjske strane 1K (zimski period) i 3K (ljetni period) dobivaju se razine pouzdanosti od 13,67 i 35,71 % zbog malog toplinskog toka, a koje su nezadovoljavajuće prema kriteriju postavljenom u ovom radu. Iz ovog također proizlazi da je

metodu ICT moguće koristiti u slučaju neizoliranih elemenata vanjske ovojnice zgrade, ali uz adekvatnu zaštitu unutarnje površine od svih dodatnih zračenja iz okoline kao što su: Sunčevo zračenje, grijaća tijela i ljudi.

7.1.8 Prednosti i nedostaci korištenja metode ICT

Metoda ICT je za razliku od metode HFM beskontaktna te ne remeti distribuciju toplinskog toka po površini. Zbog svoje robusnosti moguće ju je koristiti u laboratoriju i na terenu. Oprema je jednostavno prenosiva što dodatno olakšava njeno korištenje. Metoda ICT daje širu sliku prilikom određivanja toplinskog toka i nije ograničena na unaprijed definiranu lokaciju mjerenja.

Glavni nedostatak metode ICT je njena ovisnost o karakteristikama površine za koju se određuje temperatura (koeficijent emisivnost i koeficijent refleksije površine) te o atmosferskim uvjetima u kojima se površina nalazi (zračenje okoline, temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka) te o okruženju u kojemu se površina nalazi (prividna reflektirana temperatura). Drugi veliki nedostatak je što metoda ICT zahtjeva vrlo stručna znanja kako bi se metoda kvalitetno primijenila.

Nadalje, ako se metoda ICT koristi za određivanje toplinskog toka potrebno je poznavati dodatne parametre koji mogu utjecati na stanje na površini, a to je najčešće brzina strujanja fluida po površini. Za razliku od metode HFM metoda ICT nema ograničenje duljine mjerenja što uvelike ubrzava mjerenje.

8 Zaključak

U ovom istraživanju provedeno je mjerenje koeficijenta prolaska topline (U-vrijednosti) metodom infracrvene termografije (ICT) kako bi se odredila gustoća toplinskog toka i U-vrijednost zidova. Metoda HFM (eng. „*Heat Flux Meter*“) korištena je kao kontrola ICT metode, budući da je standardizirana i primjenjiva za mjerenje U-vrijednosti na terenu.

Istraživanje je provedeno u laboratoriju na devet uzoraka zidova i na terenu na osam uzoraka. Laboratorijski uzorci predstavljaju različite tipove elemenata zida vanjske ovojnice zgrade, uključujući zidove bez toplinske izolacije, zidove s toplinskom izolacijom s vanjske strane i zidove s toplinskom izolacijom s unutarnje strane. Uzorci se sastoje od armirano-betonske konstrukcije na koju se postavljala toplinska izolacija. Uzorci su instalirani u komori koja simulira vanjske vremenske uvjete, s mogućnošću regulacije temperature, relativne vlažnosti i brzine strujanja zraka unutar komore.

Laboratorijska mjerenja su provedena tijekom tri različita vremenska razdoblja: zimski period (od 5 do 15 °C), prijelazni period (od 15 do 30 °C) i ljetni period (od 25 do 40 °C). Površinska temperatura se mjerila infracrvenom kamerom dok su se temperature zraka mjerile termočlancima. Dodatno su postavljeni i drugi senzori kako bi se pratili parametri poput: intenziteta sunčevog zračenja, brzine strujanja zraka i srednje temperature zračenja.

Na temelju izmjerenih podataka analiziran je utjecaj različitih parametara koji doprinose gustoći toplinskog toka i U-vrijednosti zidova. Ti parametri uključuju: prividnu reflektiranu temperaturu, površinsku temperaturu, temperaturu unutarnjeg zraka, temperaturu vanjskog zraka, koeficijent plošnog prijelaza topline strujanjem i emisivnost površine. Podaci su obrađeni pomoću specijaliziranih računalnih programa za obradu termograma kako bi se odredile prividna reflektirana temperatura i površinska temperatura zida.

Analiza rezultata je provedena korištenjem programskog paketa Mathematica, uključujući statističku analizu i određivanje mjernih nesigurnosti. Mjerna nesigurnost je izračunata korištenjem metode RSS (eng. „*Root Sum Square*“), uzimajući u obzir nesigurnosti u mjerenju temperature infracrvenom kamerom, nesigurnosti u mjerenju temperature termočlanakom, nesigurnosti u emisivnosti površine te nesigurnost u mjerenju površinske temperature i prividne reflektirane temperature infracrvenom kamerom kao standardno odstupanje temperature na promatranom dijelu površine.

Usporedba gustoća toplinskih tokova određenih metodama ICT i HFM rezultirala je minimalnim koeficijentom korelacije od 0,641 za laboratorijske uzorke ako se odbace uzorci s izolacijom s unutarnje strane kod kojih je iznos toplinskog toka približno jednak 1 W/m^2 te je greška očitavanja toka velika zbog osjetljivosti mjerne opreme. Kod terenskih ispitivanja najlošija podudaranja su za slučajeve: Muraszemenye, Mursko Središće, Totovec i Vaspör. U slučaju Muraszemenya, Vaspöra i Totovca je zbog male temperature unutarnjeg zraka te prisustva nedovoljno zabrtvljene stolarije došlo do pojačanog strujanja koje se pojednostavljenim izrazima za izračun koeficijenta h_c teško može uzeti u obzir te su potrebne zahtjevnije numeričke simulacije kako bi se odredio toplinski tok koji otpada na strujanje.

Također su izrađeni numerički modeli koji uzimaju u obzir strujanje i zračenje na površinama uzoraka, te su uspoređeni s rezultatima dobivenim metodama HFM i ICT. Za metodu ICT minimalni iznos koeficijenta korelacije iznosi 0,291 za laboratorijski uzorak s toplinskom izolacijom s unutarnje strane „2K“ ako se odbace uzorci s toplinskom izolacijom s unutarnje strane (10S i 11S) pošto je kod tih uzoraka iznos toplinskog toka blizu nule pa je utjecaj greške mjerenja velik. Ako se usporede U-vrijednosti određene metodama ICT i HFM dobiva se maksimalno odstupanje od 69,74 % za laboratorijski uzorak 8B ako se odbace uzorci 10S i 11S.

Također su uspoređene površinske temperature izmjerene infracrvenom kamerom s onima određenima preko numeričkog modela. Usporedba dobivenih temperatura daje minimalni koeficijent korelacije od 0,727 za uzorak AB zida bez izolacije „4B“ što pokazuje jako dobru korelaciju s izmjerenim temperaturama. Očitavanja infracrvene kamere su, radi kontrole, uspoređena i s površinskom temperaturom određenom površinskim termočlankom. Maksimalno srednje odstupanje je iznosilo $2,90 \text{ °C}$ za uzorak 4B kod kojeg je zbog velike razlike između površinske temperature i temperature unutarnjeg zraka došlo do izraženijeg strujanja po površini što je direktno utjecalo na mjerenje površinske temperature termočlankom. Ako se zanemari taj slučaj maksimalna razlika u temperaturama iznosi $0,46 \text{ °C}$ za uzorak 7B.

Na temelju analize rezultata utvrđeno je da strujanje, površinska temperatura i prividna reflektirana temperatura zida značajno utječu na gustoću toplinskog toka i na izmjerene U-vrijednosti zidova. Također je uočeno da greška u mjerenju temperatura infracrvenom kamerom ima veliki utjecaj na izračun toplinskog toka pogotovo kod zidova s izolacijom s unutarnje strane kod kojih je nesigurnost u određeni toplinski tok istog reda veličine kao i izmjerena veličina. Najveća mjerna nesigurnost je kod uzoraka bez toplinske izolacije (4B, 7B i 8B), ali je kod ovih uzoraka i najveći iznos izmjerene gustoće toplinskog toka.

Srednja vrijednost nesigurnosti u izmjereni toplinski tok iznosi $1,45 \text{ W/m}^2$. Minimalna nesigurnost u izmjerenu U-vrijednost iznosi 4,91 % za uzorak 4B, a maksimalna nesigurnost, ako se odbaci uzorak s izolacijom s unutarnje strane 10S, iznosi 80,0 % od izmjerene U-vrijednosti za zid Palovec kod kojeg dolazi do pregrijavanje vanjske površine.

Dinamička metoda proračuna toplinskog toka, koja se temelji na varijaciji temperature na površini uzorka tijekom vremena, pokazala se manje adekvatnom za primjenu u ovom istraživanju. Potrebna su daljnja istraživanja u cilju poboljšanje metoda za primjenu kod ICT metode na terenu kako bi se uključili dodatni parametri i smanjila mjerna nesigurnost.

8.1 Izvorni znanstveni doprinos

Istraživanja provedena u okviru ovog doktorskog rada su dala sljedeće znanstvene doprinose:

1. Definirani su glavni parametri koji utječu na određivanje koeficijenta prolaska topline elemenata vanjske ovojnice zgrade korištenjem metode infracrvene termografije.
2. Razvijen je postupak za određivanje gustoće toplinskog toka na unutarnjoj površini i koeficijenta prolaska topline metodom infracrvene termografije.
3. Razvijen je postupak za kvantificiranje mjerne nesigurnosti za određivanje koeficijenta prolaska topline metodom ICT.
4. Definirana je ambijentalna temperatura za kvantificiranje utjecaja strujanja po površini kao srednja vrijednost prividne reflektirane temperature i temperature unutarnjeg zraka.
5. Određen je koeficijent plošnog prijelaza topline strujanjem koji daje najbolja poklapanja s toplinskim tokom izmjerenim standardiziranim metodama.
6. Postupak određivanja gustoće toplinskog toka metodom ICT potvrđen je korištenjem numeričkih metoda.
7. Dan je postupak određivanja utjecaja neizoternosti distribucije površinske temperature i prividne reflektirane temperature.
8. Parametarska analiza utjecaja na izmjerenu U-vrijednost metodom ICT u cilju pouzdanije aproksimacije stvarnih toplinskih gubitaka u zgradarstvu.
9. Primjena razvijene metode za određivanje U-vrijednosti korištenjem metode ICT i u slučajevima ljetnih mjeseci, odnosno u periodu ekstremnih temperatura na vanjskoj površini elementa.

8.2 Preporuke za daljnja istraživanja

Određivanje koeficijenta prolaska topline metodom ICT je novost u današnjem svijetu. Najveća prednost ove metode je što se korištenjem jedne infracrvene kamere može odrediti koeficijent prolaska topline više građevinskih elemenata što uvelike olakšava kontrolu kvalitete izvedenih radova i određivanje toplinskih gubitaka za zgrade koje će biti podvrgnute energetskej obnovi. Međutim, pošto je ovo još uvijek relativno nova metoda za određivanje toplinskih gubitaka u zgradarstvu potrebno je provesti još veći broj istraživanja u svrhu poboljšanja metode. Preporuča se u budućnosti bavljenje sljedećim istraživanjima:

1. Utjecaj površinske temperature određene infracrvenim detektorima na različitim valnim duljinama.
2. Određivanje granične razlučivosti infracrvene kamere na izmjerenu temperaturu koja ne utječe na mjerenje U-vrijednosti elementa vanjske ovojnice zgrade metodom ICT.
3. Utjecaj različitih parametara na koeficijent prijelaza topline strujanjem kao što su: hrapavost površine, profil brzine strujanja zraka, režim strujanja, itd.
4. Razvoj numeričkih modela koji opisuju strujanje po površini korištenjem računalne dinamike fluida i modeliranjem prostorija u kojima se zid nalazi.
5. Usporedba toplinskog toka zračenjem metodom ICT i metodom HFM zaštićivanjem tokomjera materijalima poznate emisivnosti kako bi se izmjerio samo toplinski tok zračenjem.
6. Određivanje toplinskog toka strujanjem metodom HFM zaštićivanjem tokomjera visoko reflektivnim materijalima kako bi se izmjerio samo toplinski tok strujanjem.
7. Razvoj dinamičkih metoda za mjerenje toplinskog toka u stvarnom vremenu.
8. Poboljšanje mjerenja metodom ICT za elemente vanjske ovojnice zgrade s izolacijom na unutarnjoj strani.
9. Određivanje toplinskih tokova za različite toplinske mase elemenata vanjske ovojnice zgrade metodom ICT, tj. za elemente vanjske ovojnice zgrade s teškom i laganom nosivom konstrukcijom.
10. Poboljšanje algoritma dinamičke metode za primjenu na toplinski teškim elementima vanjske ovojnice zgrade.

Popis literature

- [1] Narodne novine, Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, 2020.
- [2] Croatian Standard Institute, HRN EN ISO 6946 - Građevni djelovi i građevni elementi - Toplinski otpor i koeficijent prolaska topline - Metode proračuna, Zagreb, 2017.
- [3] The International Organization for Standardization, ISO 9869-2:2018 Thermal insulation — Building elements — In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance — Part 2: Infrared method for frame structure dwelling, (2018).
- [4] D.S. Choi, M.J. Ko, Analysis of Convergence Characteristics of Average Method Regulated by ISO 9869-1 for Evaluating In Situ Thermal Resistance and Thermal Transmittance of Opaque Exterior Walls, *Energies*. 12 (2019) 1–18. <https://doi.org/10.3390/en12101989>.
- [5] A.-H. Deconinck, Reliable Thermal Resistance Estimation of Building Components from On-site Measurements, KU Leuven, 2017. <https://lirias.kuleuven.be/handle/123456789/570021>.
- [6] L. Evangelisti, C. Guattari, P. Gori, R. De Lieto Vollaro, In situ thermal transmittance measurements for investigating differences between wall models and actual building performance, *Sustain*. 7 (2015) 10388–10398. <https://doi.org/10.3390/su70810388>.
- [7] L. Evangelisti, C. Guattari, F. Asdrubali, Comparison between heat-flow meter and Air-Surface Temperature Ratio techniques for assembled panels thermal characterization, *Energy Build*. 203 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109441>.
- [8] F. Rezvani, I.Z. Bribián, Evaluating in-situ thermal transmittance measurement to analyze deviations between actual house thermal performance and modelled one by means of energy simulation software, *Rev. La Constr*. 18 (2019) 311–322. <https://doi.org/10.7764/RDLC.18.2.311>.
- [9] K. Gaspar, M. Casals, M. Gangoells, A comparison of standardized calculation methods for in situ measurements of façades U-value, *Energy Build*. 130 (2016) 592–599. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.072>.
- [10] D.S. Choi, M.J. Ko, Comparison of various analysis methods based on heat flowmeters and infrared thermography measurements for the evaluation of the in situ thermal transmittance of opaque exteriorwalls, *Energies*. 10 (2017). <https://doi.org/10.3390/en10071019>.
- [11] M. Gaši, B. Milovanović, S. Gumbarević, Comparison of Infrared Thermography and Heat Flux Method for Dynamic Thermal Transmittance Determination, *Buildings*. 9 (2019) 132. <https://doi.org/10.3390/buildings9050132>.
- [12] X. Meng, B. Yan, Y. Gao, J. Wang, W. Zhang, E. Long, Factors affecting the in situ measurement accuracy of the wall heat transfer coefficient using the heat flow meter method, *Energy Build*. 86 (2015) 754–765. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.005>.
- [13] P.G. Cesaratto, M. De Carli, A measuring campaign of thermal conductance in situ and possible impacts on net energy demand in buildings, *Energy Build*. 59 (2013) 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.036>.

- [14] P.G. Cesaratto, M. De Carli, S. Marinetti, Effect of different parameters on the in situ thermal conductance evaluation, *Energy Build.* 43 (2011) 1792–1801. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.021>.
- [15] A. Ahmad, M. Maslehuudin, L.M. Al-Hadhrami, In situ measurement of thermal transmittance and thermal resistance of hollow reinforced precast concrete walls, *Energy Build.* 84 (2014) 132–141. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.048>.
- [16] G. Ficco, F. Iannetta, E. Ianniello, F.R. D’Ambrosio Alfano, M. Dell’Isola, U-value in situ measurement for energy diagnosis of existing buildings, *Energy Build.* 104 (2015) 108–121. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.071>.
- [17] D. Bienvenido-Huertas, R. Rodríguez-Álvarez, J. Moyano, F. Rico, D. Marín, Determining the U-Value of Façades Using the Thermometric Method: Potentials and Limitations, *Energies.* 11 (2018) 360. <https://doi.org/10.3390/en11020360>.
- [18] R. Albatici, A.M. Tonelli, M. Chiogna, A comprehensive experimental approach for the validation of quantitative infrared thermography in the evaluation of building thermal transmittance, *Appl. Energy.* 141 (2015) 218–228. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.035>.
- [19] B. Tejedor, M. Casals, M. Gangoells, X. Roca, Quantitative internal infrared thermography for determining in-situ thermal behaviour of façades, *Energy Build.* 151 (2017) 187–197. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.040>.
- [20] B.M. Marino, N. Muñoz, L.P. Thomas, Estimation of the surface thermal resistances and heat loss by conduction using thermography, *Appl. Therm. Eng.* 114 (2017) 1213–1221. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.033>.
- [21] A. Marshall, J. Francou, R. Fitton, W. Swan, J. Owen, M. Benjaber, Variations in the U-Value Measurement of a Whole Dwelling Using Infrared Thermography under Controlled Conditions, *Buildings.* 8 (2018) 46. <https://doi.org/10.3390/buildings8030046>.
- [22] I. Danielski, M. Fröling, In Situ Measurements of Thermal Properties of Building Fabrics Using Thermography under Non-Steady State Heat Flow Conditions, *Infrastructures.* 3 (2018) 20. <https://doi.org/10.3390/infrastructures3030020>.
- [23] D. Patel, J. Estevam Schmiedt, M. Röger, B. Hoffschmidt, Approach for external measurements of the heat transfer coefficient (U-value) of building envelope components using UAV based infrared thermography, (2018) 1–8. <https://doi.org/10.21611/qirt.2018.026>.
- [24] N. Soares, C. Martins, M. Gonçalves, P. Santos, L.S. da Silva, J.J. Costa, Laboratory and in-situ non-destructive methods to evaluate the thermal transmittance and behavior of walls, windows, and construction elements with innovative materials: A review, *Energy Build.* 182 (2019) 88–110. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.021>.
- [25] M. Teni, H. Krstić, P. Kosiński, Review and comparison of current experimental approaches for in-situ measurements of building walls thermal transmittance, *Energy Build.* 203 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109417>.
- [26] B. Tejedor, M. Casals, M. Macarulla, A. Giretti, U-value time series analyses: Evaluating the feasibility of in-situ short-lasting IRT tests for heavy multi-leaf walls, *Build. Environ.* 159 (2019) 106123. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.05.001>.

- [27] B. Tejedor, M. Casals, M. Gangoles, Assessing the influence of operating conditions and thermophysical properties on the accuracy of in-situ measured U-values using quantitative internal infrared thermography, *Energy Build.* 171 (2018) 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.011>.
- [28] D. Bienvenido-Huertas, J. Bermúdez, J. Moyano, D. Marín, Comparison of quantitative IRT to estimate U-value using different approximations of ECHTC in multi-leaf walls, *Energy Build.* 184 (2019) 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.028>.
- [29] D. Bienvenido-Huertas, J. Moyano, D. Marín, R. Fresco-Contreras, Review of in situ methods for assessing the thermal transmittance of walls, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 102 (2019) 356–371. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.016>.
- [30] M. O’Grady, A.A. Lechowska, A.M. Harte, Application of infrared thermography technique to the thermal assessment of multiple thermal bridges and windows, *Energy Build.* 168 (2018) 347–362. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.034>.
- [31] M. O’Grady, A.A. Lechowska, J.A. Schnotale, A.M. Harte, Assessment of Thermal Bridging Heat Loss by Means of the Infrared Thermography Technique, (2019) 625–635. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00662-4_52.
- [32] M. O’Grady, A.A. Lechowska, A.M. Harte, Infrared thermography technique as an in-situ method of assessing heat loss through thermal bridging, *Energy Build.* 135 (2017) 20–32. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.039>.
- [33] I. Garrido, S. Lagüela, P. Arias, J. Balado, Thermal-based analysis for the automatic detection and characterization of thermal bridges in buildings, *Energy Build.* 158 (2018) 1358–1367. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.031>.
- [34] V. Vavilov, *Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing*, Springer Nature Switzerland AG, Cham, Switzerland, 2020.
- [35] X.P. V. Maldague, *Evaluation of Materials by Infrared Thermography*, Springer London, London, 1993. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4471-1995-1>.
- [36] W. Herschel, Investigation of the powers of the prismatic colours to heat and illuminate objects; with remarks, that prove the different refrangibility of radiant heat. To which is added, an inquiry into the method of viewing the sun advantageously, with telescopes of, *Abstr. Pap. Print. Philos. Trans. R. Soc. London.* (1832).
- [37] W. Herschel, The Royal Society is collaborating with JSTOR to digitize, preserve, and extend access to *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences.* © www.jstor.org, *Philos. Trans. R. Soc. London.* (1800). <http://www.jstor.org/stable/2418233>.
- [38] L. Nobili, Beschreibung eines Thermo - Multiplikatoren oder elektrischen Thermoskops, *Ann. Phys.* (1832).
- [39] E.S. Barr, The Infrared Pioneers—II. Macedonio Melloni, *Infrared Phys.* 2 (1962) 67–73.
- [40] J. Herschel, I. On the chemical action of the rays of the solar spectrum on preparations of silver and other substances, both metallic and non-metallic, and on some photographic processes, *Philos. Trans. R. Soc. London.* (1840). <http://www.jstor.org/stable/2418233>.
- [41] E. Ring, The historical development of thermometry and thermal imaging in medicine,

- J. Med. Eng. Technol. 30 (2006) 192–198. <https://doi.org/10.1080/03091900600711332>.
- [42] S.P. Langley, The Bolometer and Radiant Energy, Proc. Am. Acad. Arts Sci. (1881).
- [43] H.E. John, V. Niumsawatt, W.M. Rozen, I.S. Whitaker, Clinical applications of dynamic infrared thermography in plastic surgery: A systematic review, Gland Surg. 5 (2016) 122–132. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2227-684X.2015.11.07>.
- [44] M. Vollmer, K.-P. Möllmann, Infrared thermal imaging fundamentals, Wiley, 2018.
- [45] A. Richards, Alien vision: exploring the electromagnetic spectrum with imaging technology, SPIE, 2011.
- [46] FLIR, User's manual FLIR T6xx, (2013).
- [47] N. Bowler, Blackbody Radiometry Volume 1: Fundamentals, Springer, 2020.
- [48] Y. Emre, E. Battal, M.Y. Tanrikulu, A.K. Okyay, Infrared Physics & Technology An all-ZnO microbolometer for infrared imaging, INFRARED Phys. Technol. 67 (2014) 245–249. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2014.07.023>.
- [49] F.P. Incropera, D.P. Dewitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th ed., John Wiley & Sons, 2007.
- [50] D.P. Dewitt, D.N. Gene, Theory and Practice of Radiation Thermometry, John Wiley & Sons (Wiley), 1988.
- [51] G. Gaussorgues, La thermographie infrarouge, principes, technologies, applications, 1989.
- [52] M. Planck, On the Theory of the Energy Distribution Law of the Normal Spectrum, Old Quantum Theory. 237 (1967) 82–90. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-012102-4.50013-9>.
- [53] M. Planck, The Theory of Heat Radiation, 1959.
- [54] M. Kaviany, A. Kanury, Principles of Heat Transfer, 2002. <https://doi.org/10.1115/1.1497490>.
- [55] A. Einstein, On the Electrodynamics of Moving Bodies, Ann. Phys. (1905). <https://doi.org/10.1002/andp.200590006>.
- [56] J. Crepeau, A brief history of the T4 radiation law, Proc. ASME Summer Heat Transf. Conf. 2009, HT2009. 1 (2009) 59–65. <https://doi.org/10.1115/HT2009-88060>.
- [57] ASTM International, Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers, (2022) 8. <https://doi.org/10.1520/C1371-15>.
- [58] ASTM International, Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers, (2022).
- [59] ASTM International, Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Reflected Temperature, (2022).
- [60] W.L. Wolfe, G.J. Zissis, The Infrared Handbook, 1978.
- [61] A.M. Jones, I.E. Smith, S.D. Probert, External Thermography of Buildings and

- Structures as a Means of Determining Their Heat Losses, (1977).
- [62] J. Vlcek, Field Method for Determination of Emissivity With Imaging Radiometers., *Photogramm. Eng. Remote Sensing.* 48 (1982) 609–614.
- [63] P. Paljak, *Thermography of Buildings*, Swedish Building Research Institute, Stockholm, 1972.
- [64] M.A. Bramson, *Infrared Radiation: A Handbook for Applications*, Springer New York, NY, New York, 1968. <https://doi.org/10.1126/science.95.2477.614>.
- [65] C. Hyll, H. Vomhoff, L. Mattsson, A method for measurement of the directional emittance of paper in the infrared wavelength range, *Nord. Pulp Pap. Res. J.* 27 (2012) 958–967. <https://doi.org/10.3183/NPPRJ-2012-27-05-p958-967>.
- [66] M. Young, *Thermal imaging in the historic environment.*, (2015).
- [67] Flir Systems, ResearchIR, (n.d.). <https://www.flir.eu/support/products/researchir>.
- [68] A. Galović, *Termodinamika II*, 3rd ed., Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2003.
- [69] B.O. Kvamme, *Validation of heat transfer coefficients Single pipes with different surface treatments and heated deck element*, University of Stavanger, 2016.
- [70] B.E. Yuce, E. Pulat, Forced, natural and mixed convection benchmark studies for indoor thermal environments, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 92 (2018) 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.02.003>.
- [71] N. Ferdelji, *Prijenos topline i tvari, laminarni granični slojevi*, Zagreb, n.d.
- [72] M.J. Moran, H.N. Shapiro, B.R. Munson, D.P. DeWitt, *Introduction to Thermal Systems Engineering: Thermodynamics, Fluid Mechanics and Heat Transfer*, John Wiley & Sons, New York, 2003.
- [73] W. Sutherland, LII. The viscosity of gases and molecular force, *Philos. Mag. Ser. 5.* 36 (1893) 507–531. <https://doi.org/10.1080/14786449308620508>.
- [74] Sutherland's law -- CFD-Wiki, the free CFD reference, (n.d.). https://www.cfd-online.com/Wiki/Sutherland's_law (accessed November 10, 2018).
- [75] Y.A. Cengel, *Heat and Mass transfer: A Practical Approach*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 2006.
- [76] J.H. Lienhard, J.H. Lienhard, *A Heat Transfer Textbook*, 3rd ed., Phlogiston Press, 2003.
- [77] H. Schlichting, K. Gersten, *Boundary Layer Theory*, 9th ed., Berlin, 2017. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0997754600011018>.
- [78] K. Kadoya, N. Matsunaga, A. Nagashima, Viscosity and Thermal Conductivity of Dry Air in the Gaseous Phase, *J. Phys. Chem. Ref. Data.* 14 (1985) 947–970. <https://doi.org/10.1063/1.555744>.
- [79] S.G. Penoncello, R.T. Jacobsen, A.R.H. Goodwin, A thermodynamic property formulation for cyclohexane, *Int. J. Thermophys.* 16 (1995) 519–531. <https://doi.org/10.1007/BF01441918>.
- [80] H.D. Baehr, K. Stephan, *Heat and Mass Transfer*, 2nd ed., Springer-Verlag Berlin

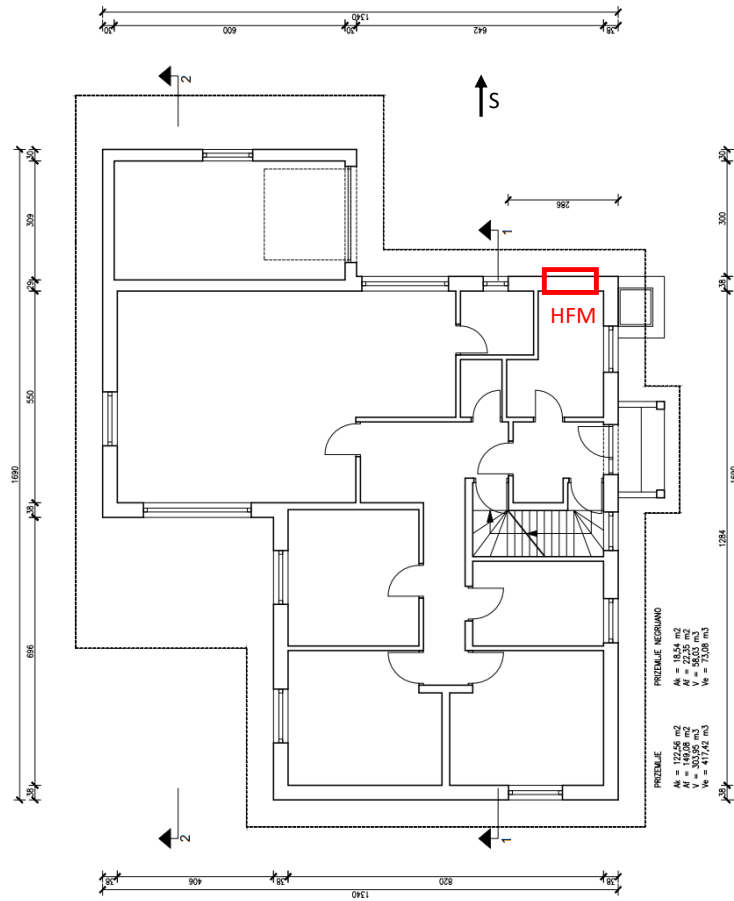
- Heidelberg, Berlin, 2006.
- [81] Y. Shen, N. Wong, E.Y. Lam, C.K. Koh, Finite difference schemes for heat conduction analysis in integrated circuit design and manufacturing, *Int. J. Circuit Theory Appl.* 39 (2011) 905–921. <https://doi.org/10.1002/cta.675>.
- [82] P. Santos, M. Gonçalves, C. Martins, N. Soares, J.J. Costa, Thermal transmittance of lightweight steel framed walls: Experimental versus numerical and analytical approaches, *J. Build. Eng.* 25 (2019) 100776. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100776>.
- [83] International Organization for Standardization, ISO 9869-1:2014 - Thermal insulation - Building elements -- In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance -- Part 1: Heat flow meter method, (2014) 36. <https://www.iso.org/standard/59697.html> (accessed June 3, 2019).
- [84] Croatian Standard Institute, HRN EN ISO 10211 - Toplinski mostovi u zgradarstvu - Toplinski tokovi i površinske temperature - Detaljni proračuni, (n.d.). <https://hrn4you.hzn.hr/> (accessed January 1, 2018).
- [85] M. Gaši, B. Milovanović, S. Gumbarević, Comparison of Infrared Thermography and Heat Flux Method for Dynamic Thermal Transmittance Determination, *Buildings.* 9 (2019) 132. <https://doi.org/10.3390/buildings9050132>.
- [86] S. Park, S.H. Kim, H. Jeong, S.L. Do, J. Kim, In Situ Evaluation of the U-Value of a Window Using the Infrared Method, (2021).
- [87] D.Q.G. Qylurqphqw, J.L. Aguilar-santana, M. Velasco-carrasco, S. Riffat, Thermal Transmittance (U-value) Evaluation of Innovative Window Technologies, 6 (2020) 1–13.
- [88] X. Lu, A. Memari, Application of infrared thermography for in-situ determination of building envelope thermal properties, *J. Build. Eng.* 26 (2019) 100885. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100885>.
- [89] I.A. Atsonios, I.D. Mandilaras, D.A. Kontogeorgos, M.A. Founti, A comparative assessment of the standardized methods for the in-situ measurement of the thermal resistance of building walls, *Energy Build.* 154 (2017) 198–206. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.064>.
- [90] C. Roulet, J. Gass, I. Marcus, In situ U value measurement: reliable results in short time by dynamic interpretation of the measurement, *ASHARE Trans.* 93 (1987) 1371–1379.
- [91] I. Yang, D. Kim, S. Lee, H. Jang, Construction and calibration of a large-area heat flow meter apparatus, *Energy Build.* 203 (2019) 109445. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109445>.
- [92] G. Ficco, F. Iannetta, E. Ianniello, F.R. D’Ambrosio Alfano, M. Dell’Isola, U-value in situ measurement for energy diagnosis of existing buildings, *Energy Build.* 104 (2015) 108–121. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.071>.
- [93] F. Goia, V. Serra, Analysis of a non-calorimetric method for assessment of in-situ thermal transmittance and solar factor of glazed systems, *Sol. Energy.* 166 (2018) 458–471. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.058>.
- [94] R.O. Hegarty, O. Kinnane, D. Lennon, S. Colclough, In-situ U-value monitoring of

- highly insulated building envelopes : Review and experimental investigation, *Energy Build.* (2021) 111447. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111447>.
- [95] A. Marshall, R. Fitton, W. Swan, D. Farmer, D. Johnston, M. Benjaber, Y. Ji, Domestic building fabric performance: Closing the gap between the in situ measured and modelled performance, *Energy Build.* 150 (2017) 307–317. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.028>.
- [96] M. O’Grady, A.A. Lechowska, A.M. Harte, Quantification of heat losses through building envelope thermal bridges influenced by wind velocity using the outdoor infrared thermography technique, *Appl. Energy.* 208 (2017) 1038–1052. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.047>.
- [97] G. Baldinelli, F. Bianchi, Windows thermal resistance : Infrared thermography aided comparative analysis among finite volumes simulations and experimental methods, *Appl. Energy.* 136 (2014) 250–258. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.021>.
- [98] E. Lucchi, Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings : A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2017) 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.031>.
- [99] Spec-Net Building Index, Flir Systems’ P640 infared camera, (n.d.). https://www.spec-net.com.au/press/0408/fsa_020408/Flir-Systems-P640-infared-camera-seeing-is-believing.
- [100] I. FLIR Systems, FLIR P640 The High Performance infrared inspection system, (n.d.). <https://www.irtech-environnement.fr/userfiles/FCKeditor/P640.pdf>.
- [101] Hukseflux Thermal Sensors BV, Hukseflux, (n.d.). <https://www.hukseflux.com/>.
- [102] Hukseflux Thermal Sensors BV, TRSYS01 heat flux measuring system, (n.d.). <https://www.hukseflux.com/>.
- [103] Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Ahlborn, (n.d.). <https://www.ahlborn.com/>.
- [104] Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Globe thermometer (Pt100 4L), (n.d.). <https://www.ahlborn.com/download/pdfs/kap12/eng/Behagle.pdf>.
- [105] Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Digital thermoanemometer FVAD 35 TH4Kx, (n.d.). <https://www.ahlborn.com/download/pdfs/kap09/eng/dthermoane.pdf>.
- [106] Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, NiCr-Ni sensor with handle FTA 150 LxxxxH, (n.d.). <https://www.ahlborn.com/download/pdfs/kap07/eng/03oberfilfe.pdf>.
- [107] Hukseflux Thermal Sensors BV, USER MANUAL SRA01 Second class albedometer, (n.d.). https://www.hukseflux.com/uploads/product-documents/SRA01_manual_v1601.pdf.
- [108] Campbell Scientific Ltd., Campbell Scientific, (n.d.). <https://www.campbellsci.de/>.
- [109] International organization for standardization, ISO 13786 Thermal performance of building components — Dynamic thermal characteristics — Calculation methods, *Int. Stand.* (2017).
- [110] TWC Product and Technology LLC, Weather Underground, (n.d.). <https://www.wunderground.com/>.

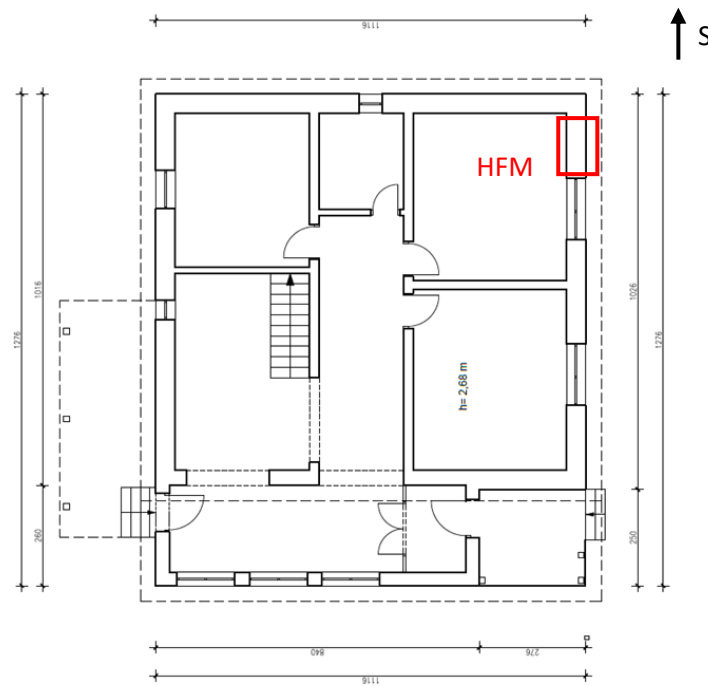
- [111] H.Q. Tran, D.Y. Han, J. Huh, Effects of Ambient Temperature and Relative Humidity on Subsurface Defect Detection in Concrete Structures by Active Thermal Imaging, (2017). <https://doi.org/10.3390/s17081718>.
- [112] I. FLIR Systems, Toolkit IC2 Dig 16 Developers Guide 1.01 Agema 550/570, ThermoCAM PM 5x5 and the ThermoVision Family, (n.d.).
- [113] ASHRAE, ASHRAE Handbook – Fundamentals, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., (1985).
- [114] K. AJN., Heat transfer processes in buildings, University of Wales College of Cardiff, Cardiff, UK., 1989.
- [115] C.-E. Hagentoft, Introductoin to Building Physics, Ligthning Source, 2001.
- [116] H.B. Awbi, A. Hatton, Natural convection from heated room surfaces, *Energy Build.* 30 (1999) 234–244.
- [117] E.J. LeFevre, Laminar Free Convection from a Vertical Plane Surface, in: 1956: p. 5.
- [118] B.H. Cohen, P.D.A. Member, F.J. Bayley, M. Sc, P.D. Associate, Heat- transfer Problems of Liquid-cooled Gas- turbine Blades, (2015).
- [119] C.Y. Warner, AN EXPERIMENTAL NATURAL ALONG INVESTIGATION HEATED OF TURBULENT FLAT PLATE CONVECTION A VERTICAL IN AIR AT LOW PRESSURE, I (1968).
- [120] W.H. McAdams, Heat Transmission, McGraw-Hill, 1942.
- [121] S.W. Churchill, H.H.S. Chu, Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate, *Int. J. Heat Mass Transf.* 18 (1975) 1323–1329.
- [122] Wolfram Research (2010), MeanShiftFilter, Wolfram Language function, (n.d.). <https://reference.wolfram.com/language/ref/MeanShiftFilter.html>.
- [123] A. M., I.A. Stegun, Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, 9th printing., 1965. <https://doi.org/10.1159/000452153>.
- [124] C. Hoffmann, A. Geissler, The rebound-effect in detail: Real indoor temperatures in basements and measured versus calculated U-values, *Energy Procedia.* 122 (2017) 32–37. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.301>.
- [125] H. Trethewen, Measurement errors with surface-mounted heat flux sensors, *Build. Environ.* 21 (1986) 41–56. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(86\)90007-7](https://doi.org/10.1016/0360-1323(86)90007-7).
- [126] C. Peng, Z. Wu, In situ measuring and evaluating the thermal resistance of building construction, *Energy Build.* 40 (2008) 2076–2082. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.05.012>.
- [127] M. Cucumo, A. De Rosa, V. Ferraro, D. Kaliakatsos, V. Marinelli, A method for the experimental evaluation in situ of the wall conductance, *Energy Build.* 38 (2006) 238–244. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.005>.
- [128] M. Cucumo, V. Ferraro, D. Kaliakatsos, M. Mele, On the distortion of thermal flux and of surface temperature induced by heat flux sensors positioned on the inner surface of buildings, *Energy Build.* 158 (2018) 677–683. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.034>.

- [129] L. Evangelisti, C. Guattari, P. Gori, R. de Lieto Vollaro, F. Asdrubali, Experimental investigation of the influence of convective and radiative heat transfers on thermal transmittance measurements, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 78 (2016) 214–223. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.09.008>.
- [130] K. Gaspar, M. Casals, M. Gangoellis, Influence of HFM thermal contact on the accuracy of in situ measurements of façades' U-value in operational stage, *Appl. Sci.* 11 (2021) 1–14. <https://doi.org/10.3390/app11030979>.

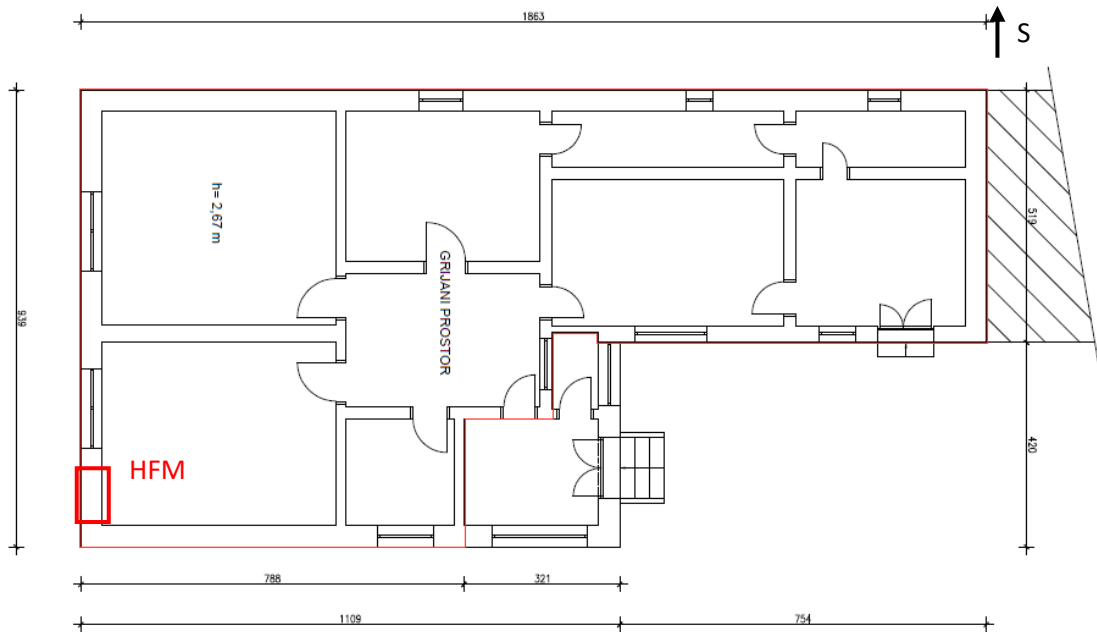
Prilog 1: Tlocrti i orijentacije zidova



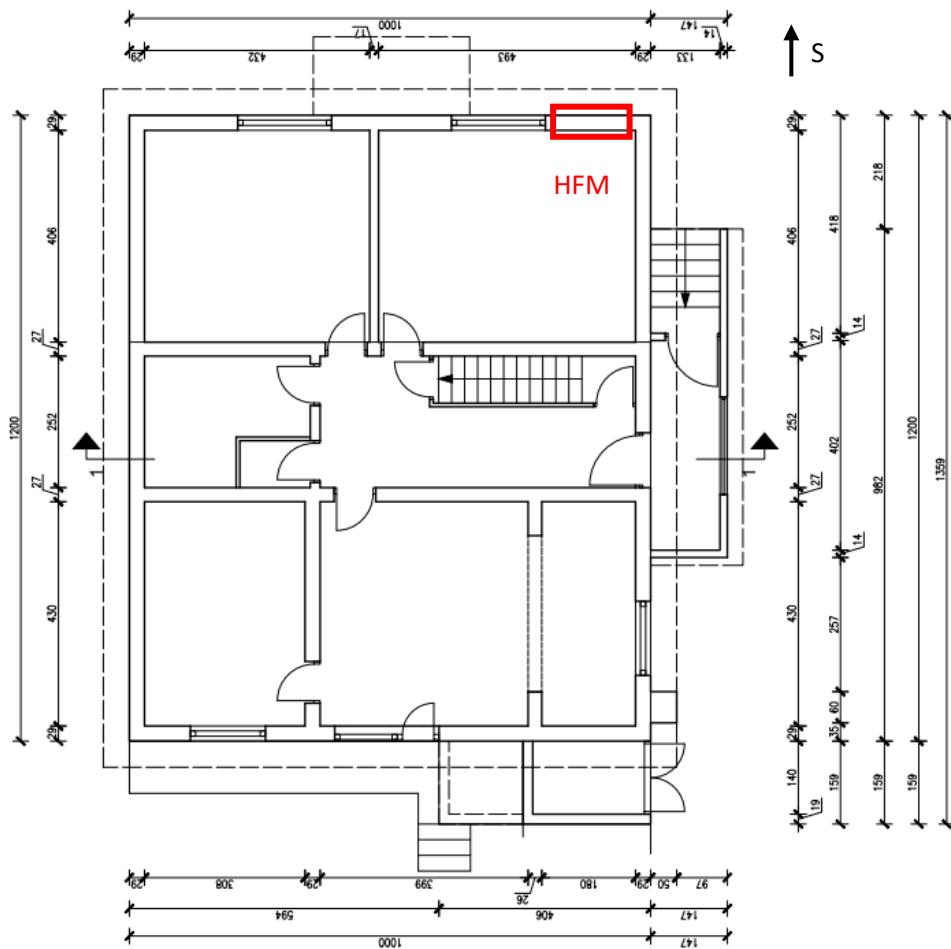
a) Ivanovec



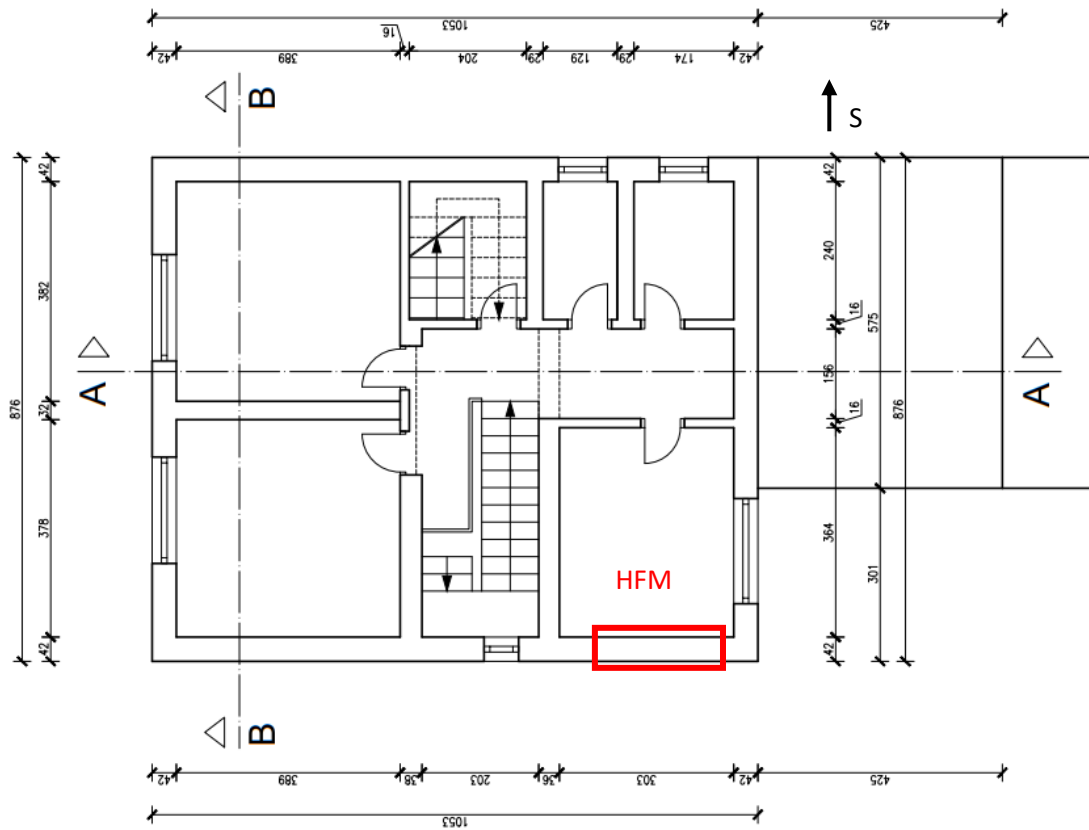
b) Lenti



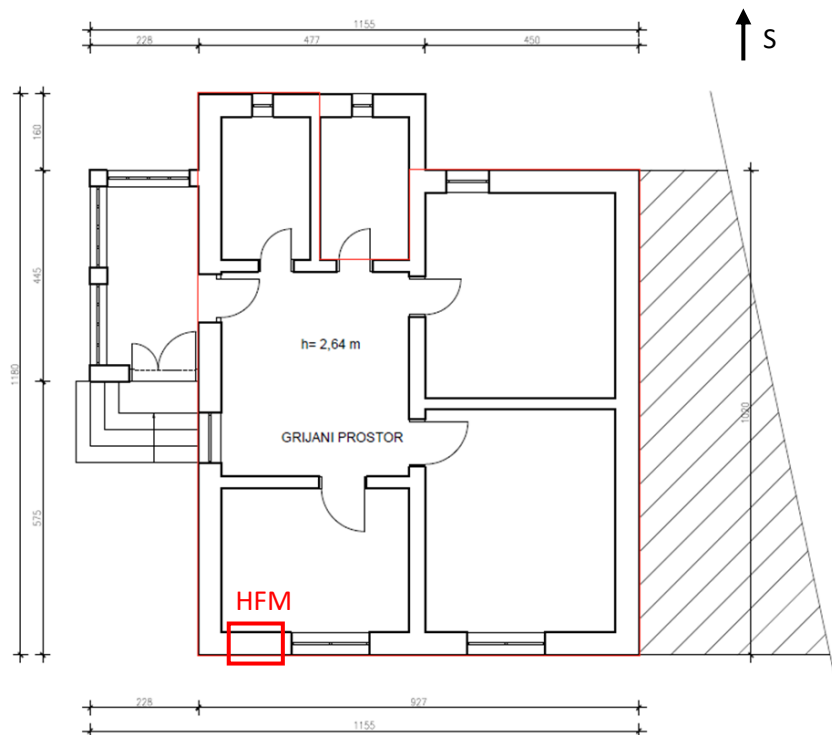
c) Murszemenye



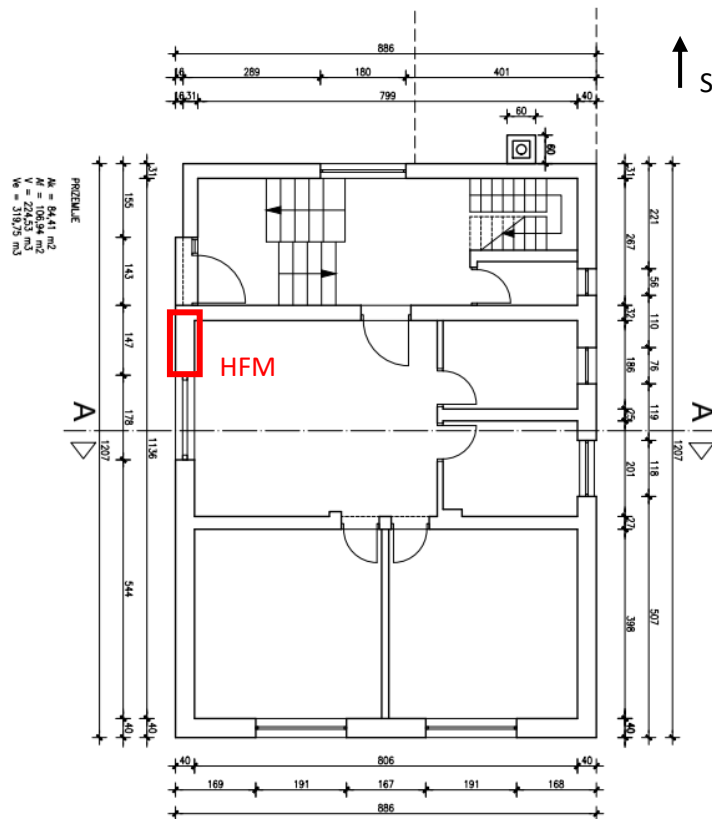
d) Mursko Središće



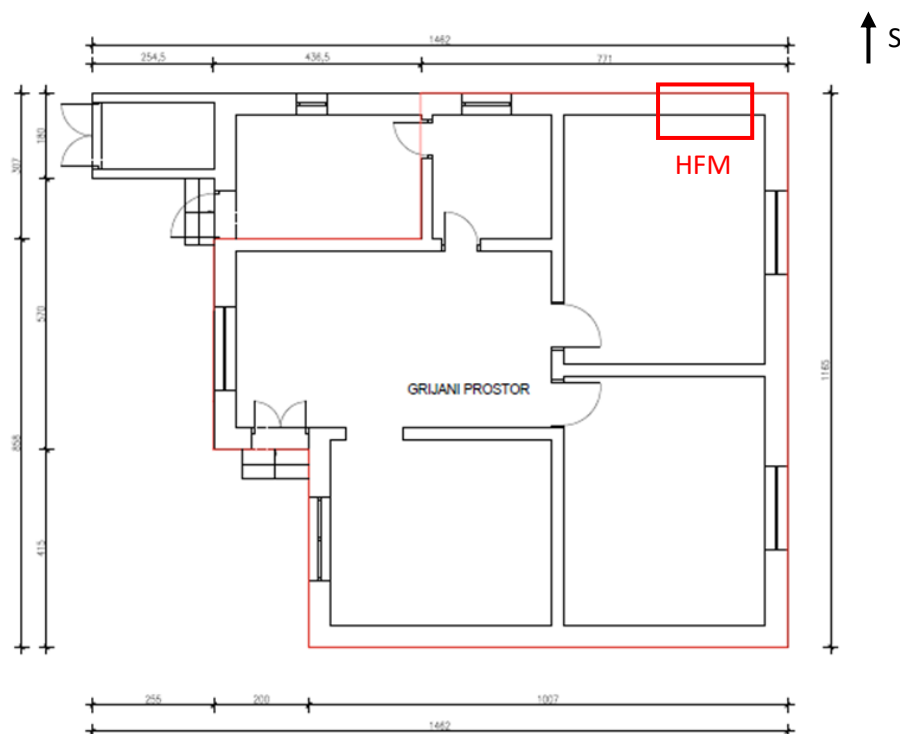
e) Palovec



f) Palovec

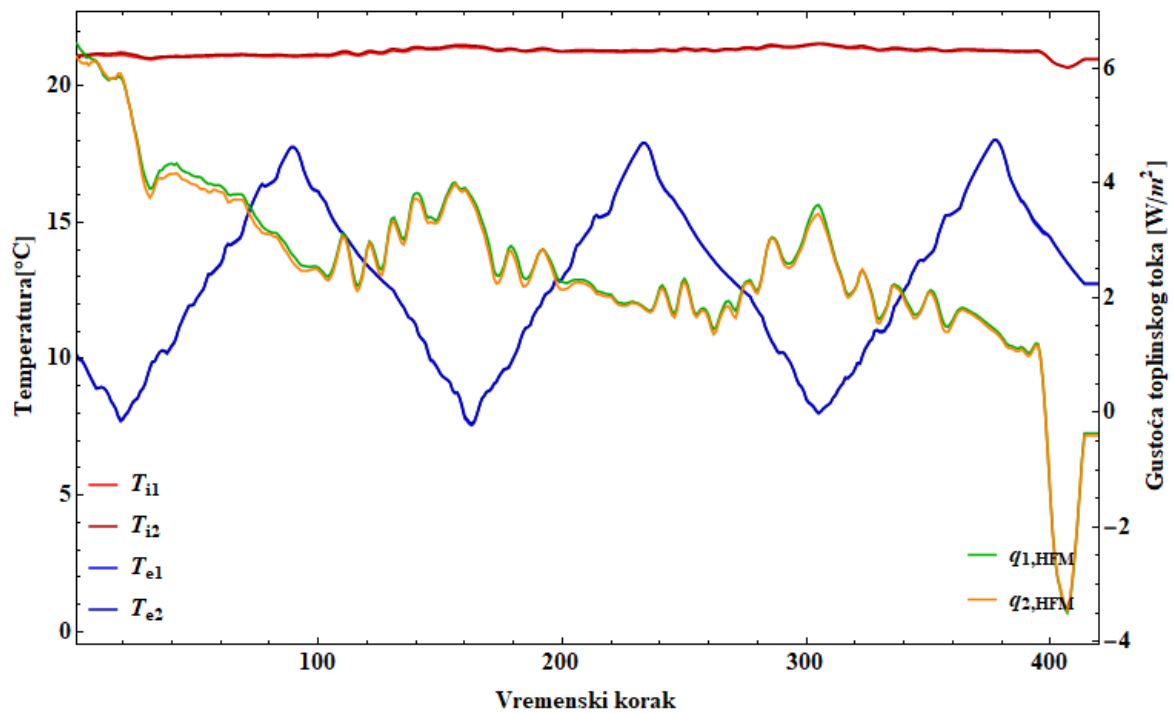


g) Totovec

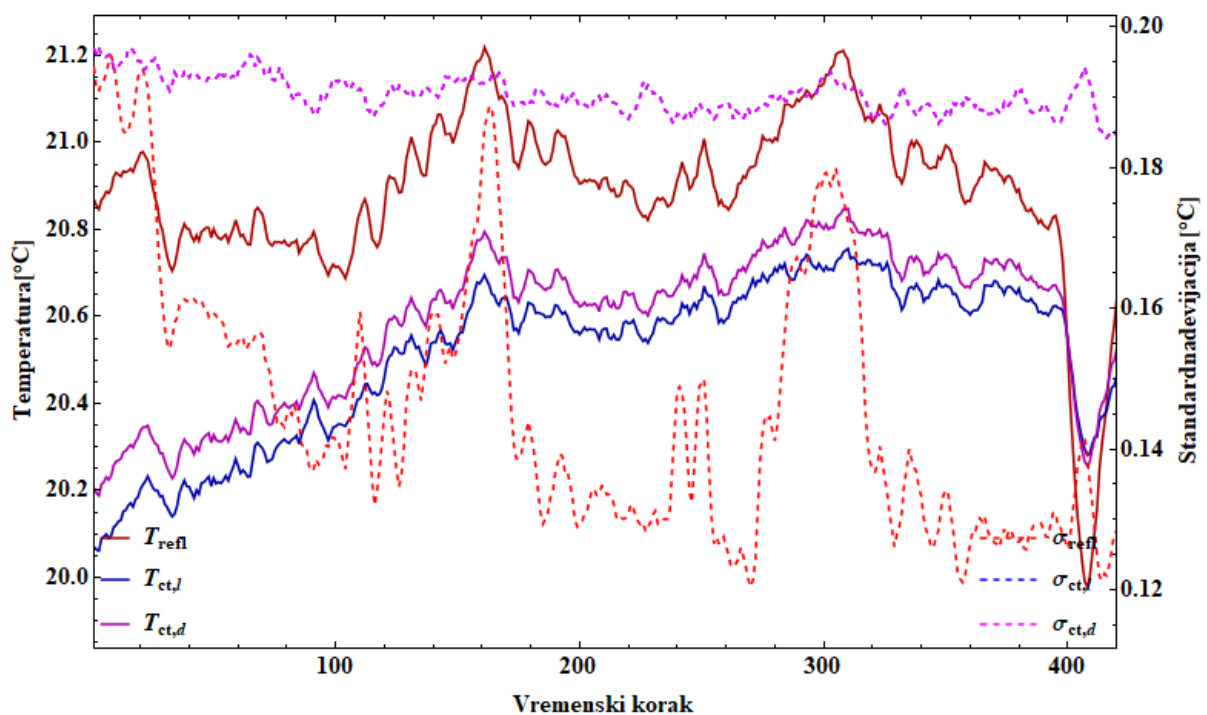


h) Vaspur

Prilog 2: Rezultati mjerenja

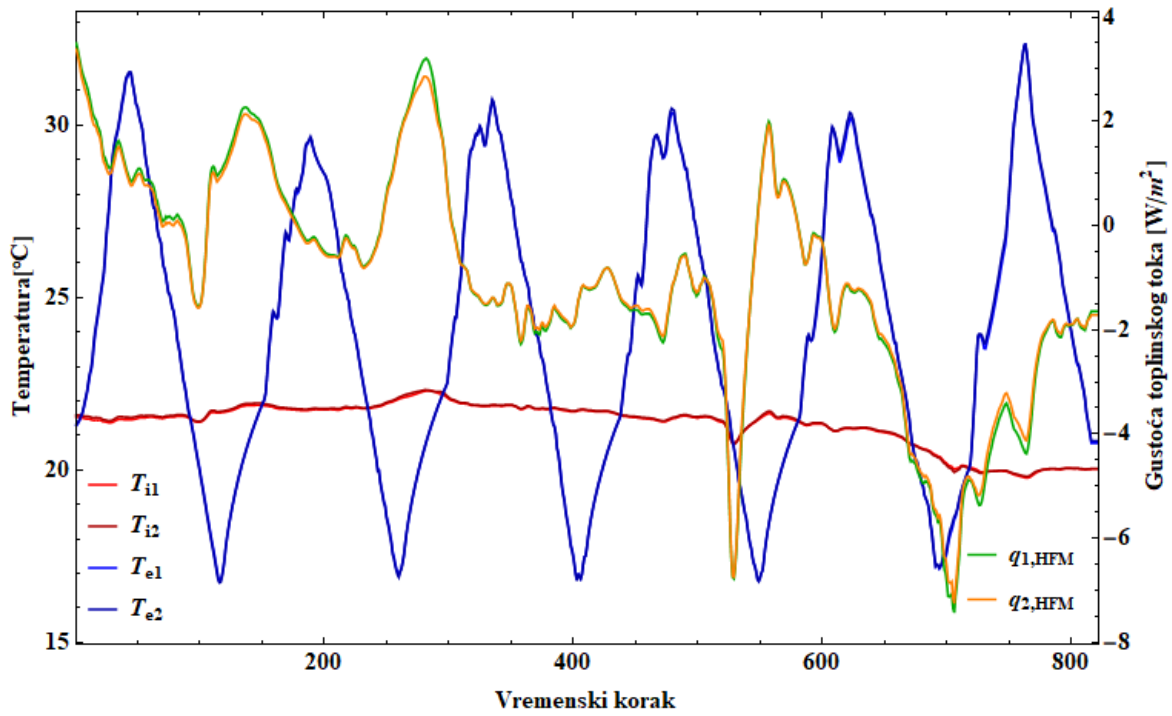


HFM

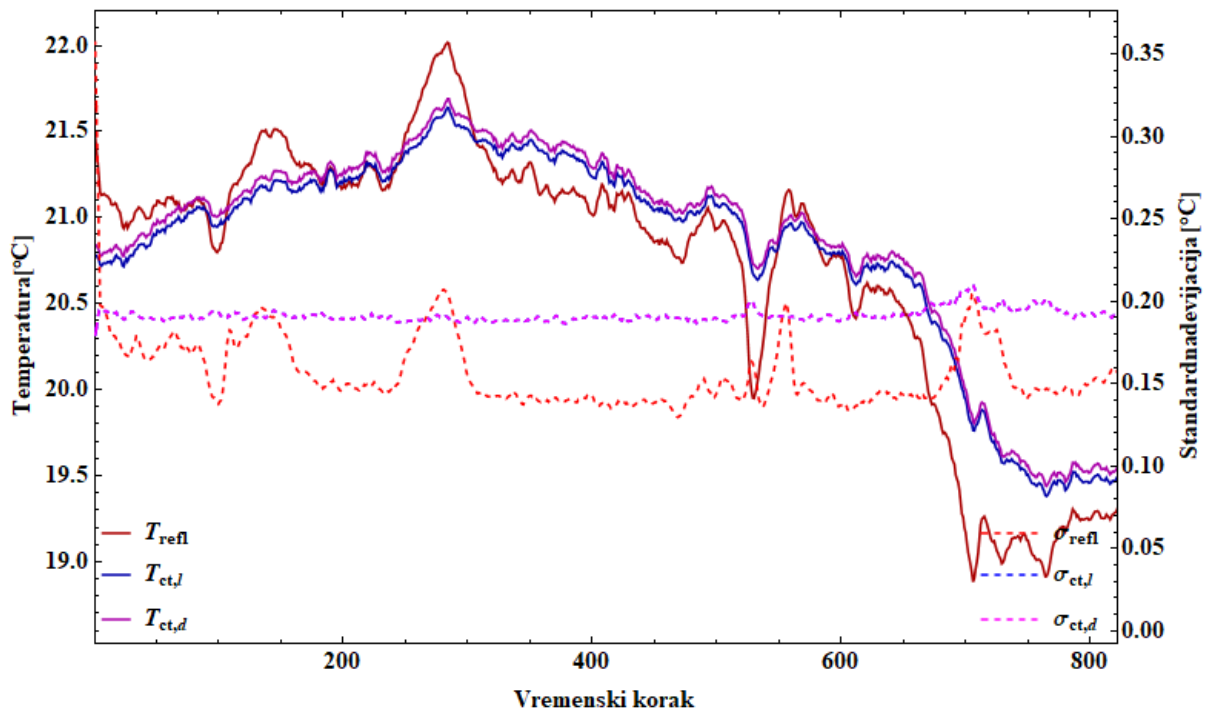


ICT

a) 1K

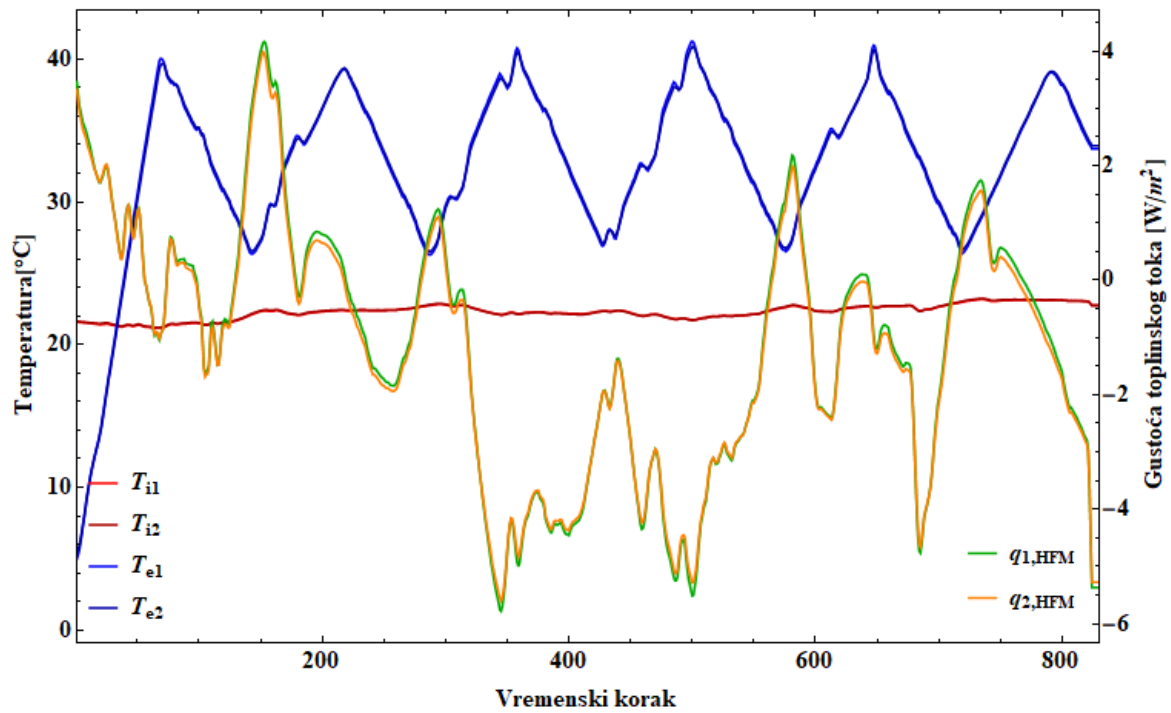


HFM

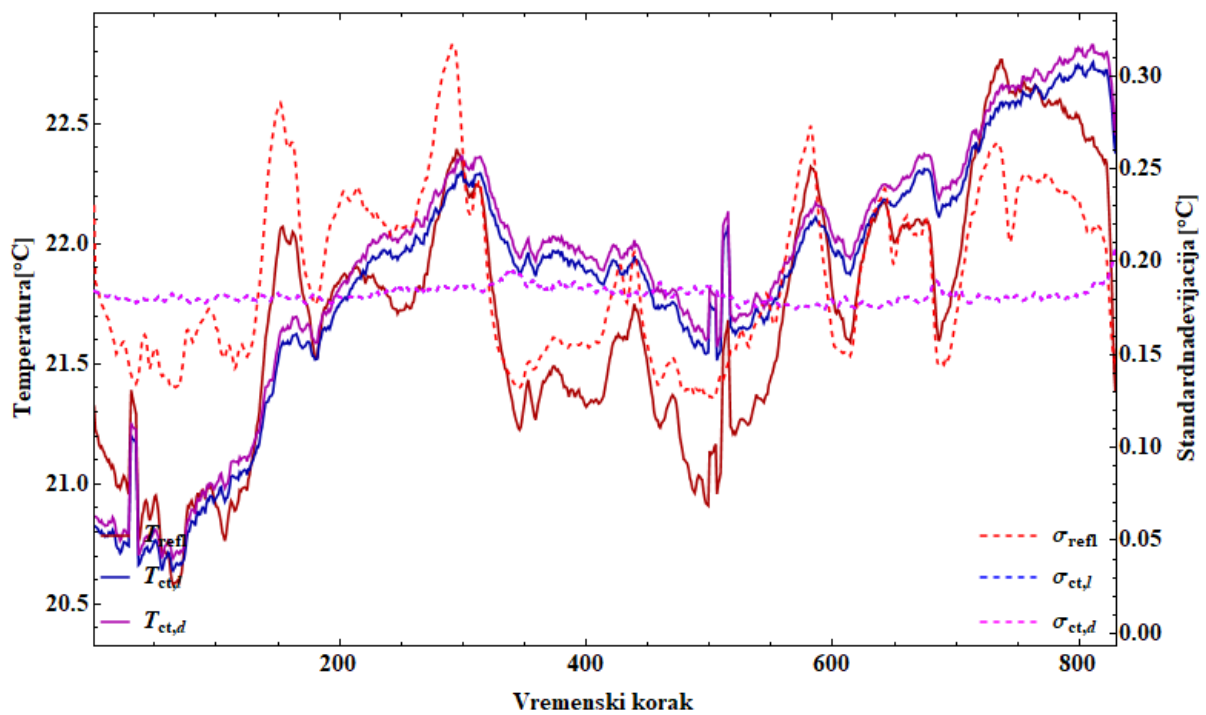


ICT

b) 2K

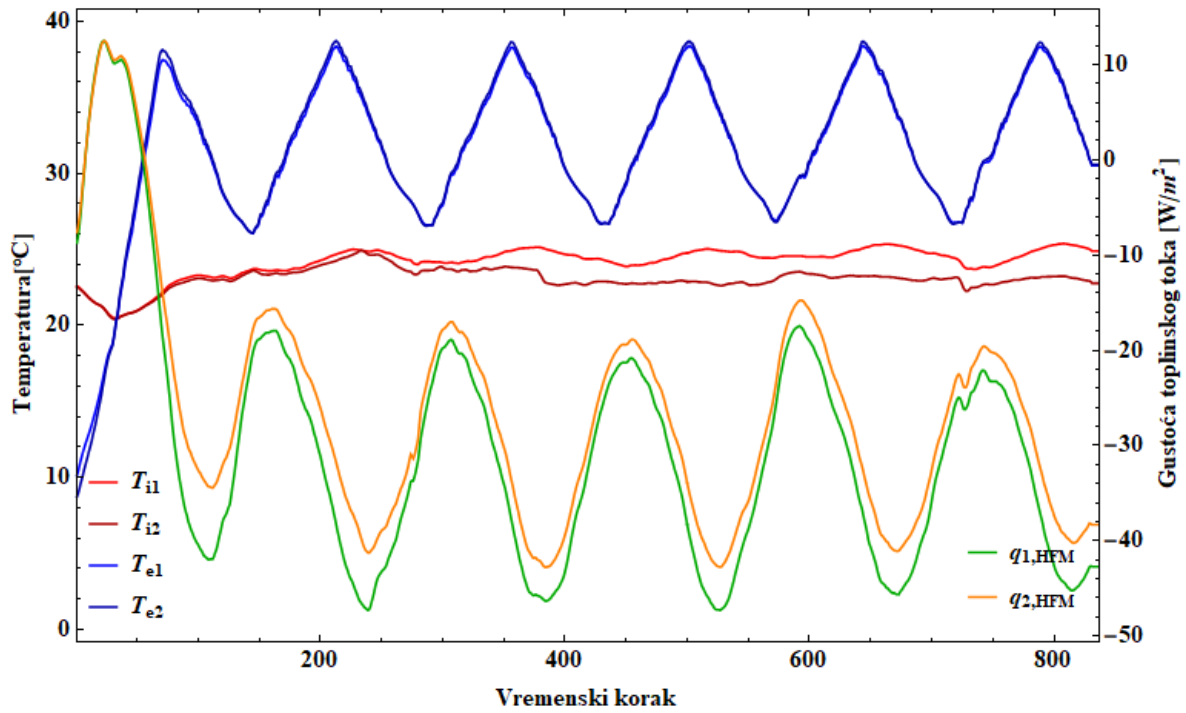


HFM

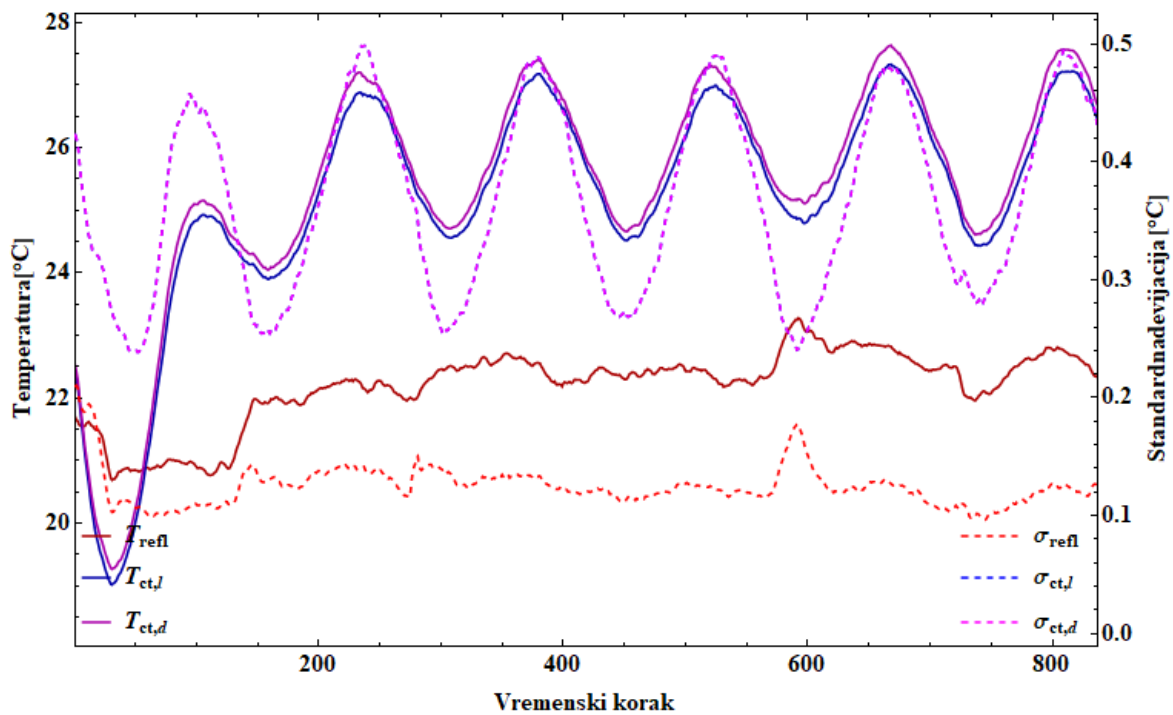


ICT

c) 3K

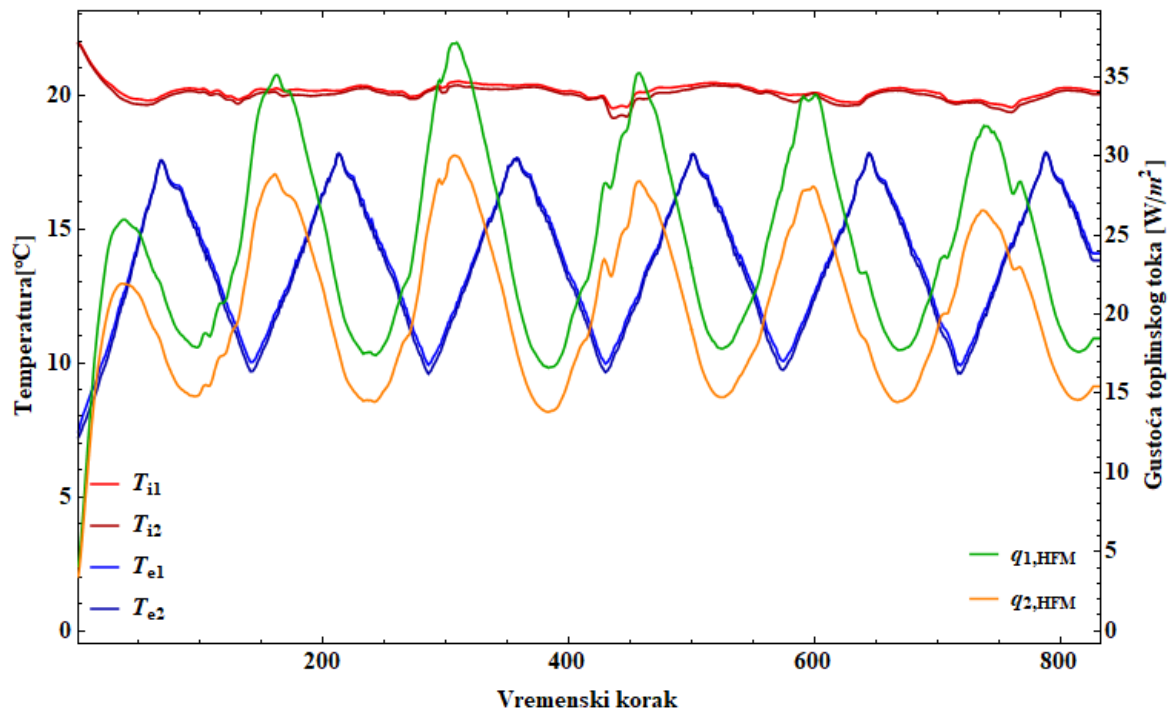


HFM

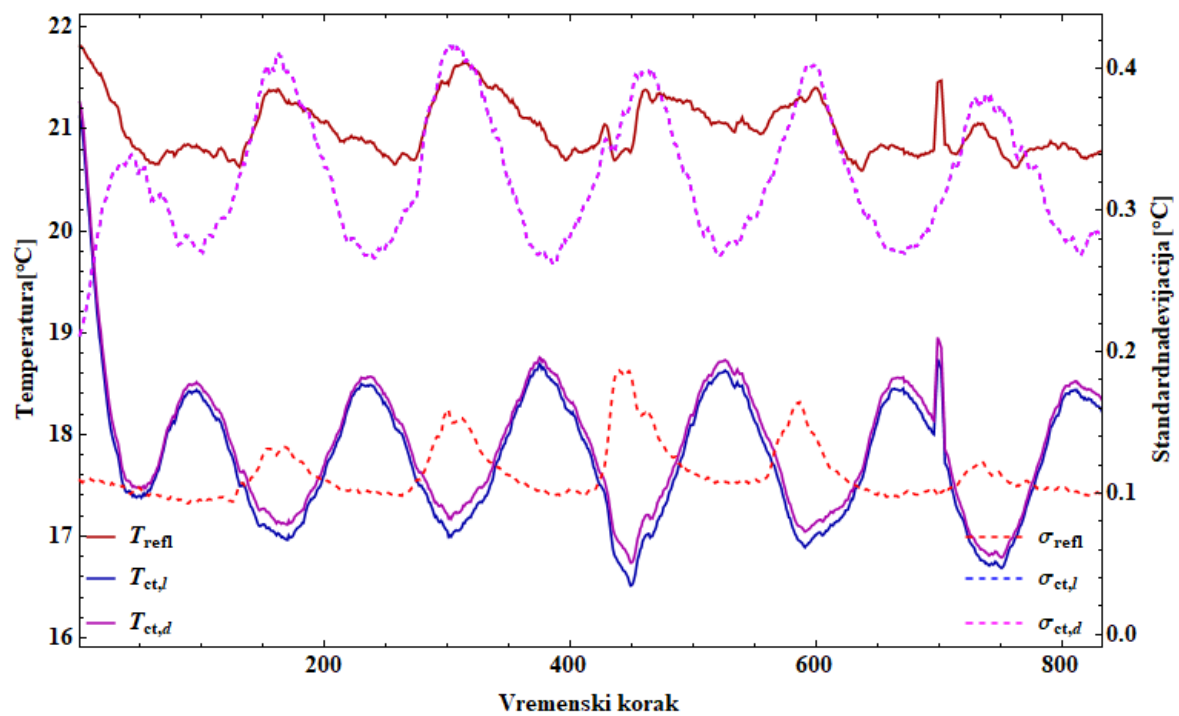


ICT

d) 4B

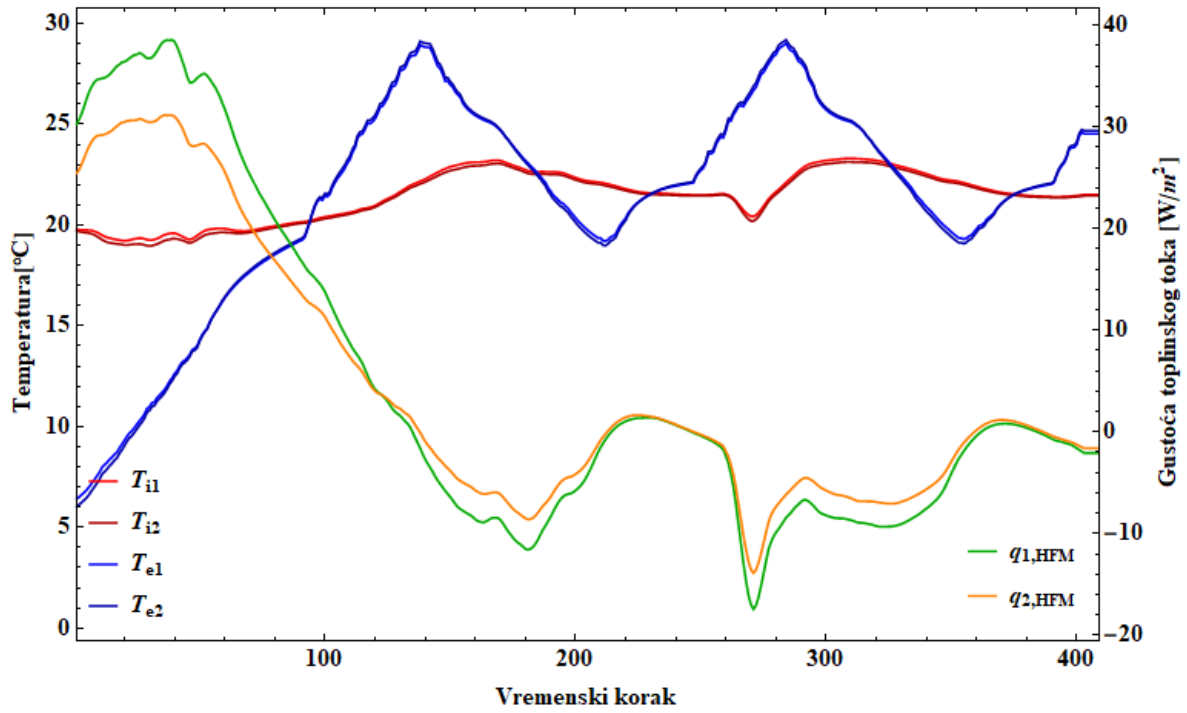


HFM

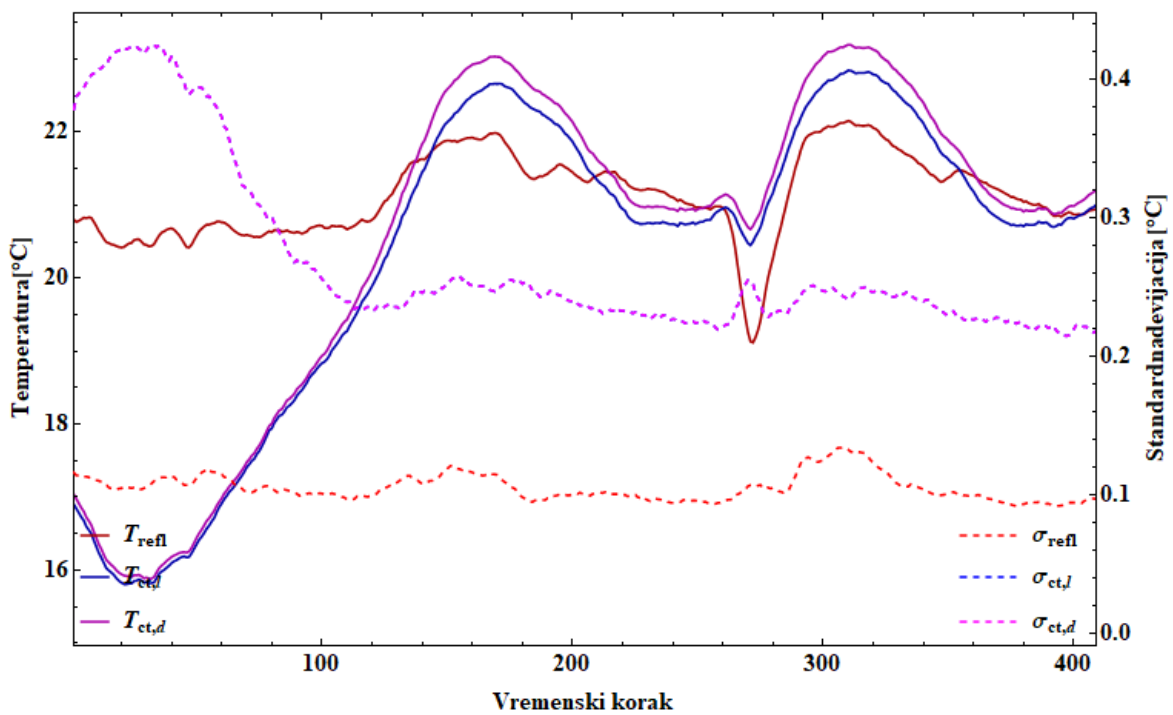


ICT

e) 7B

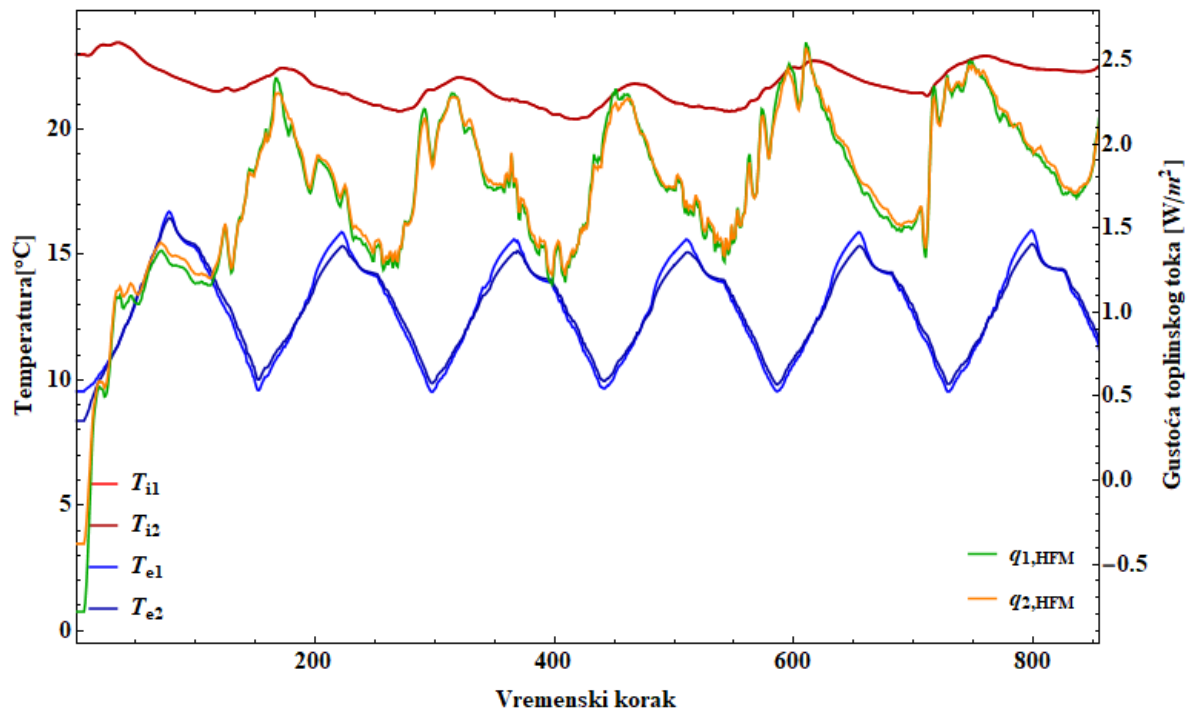


HFM

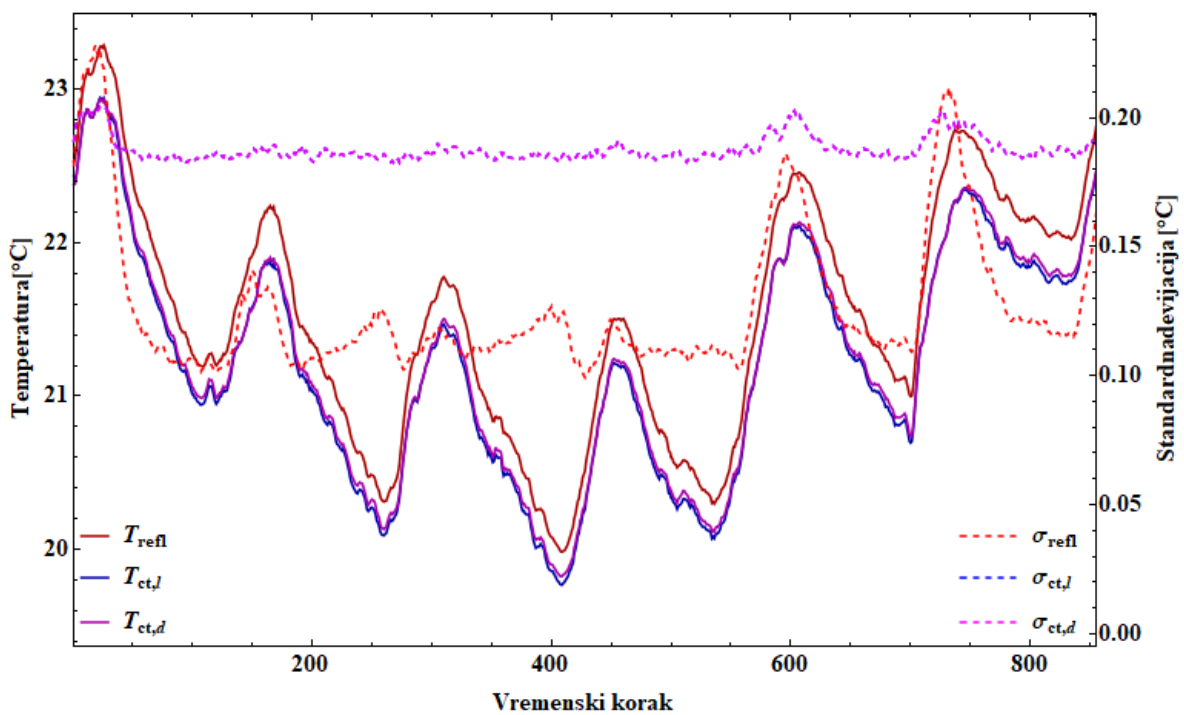


ICT

f) 8B

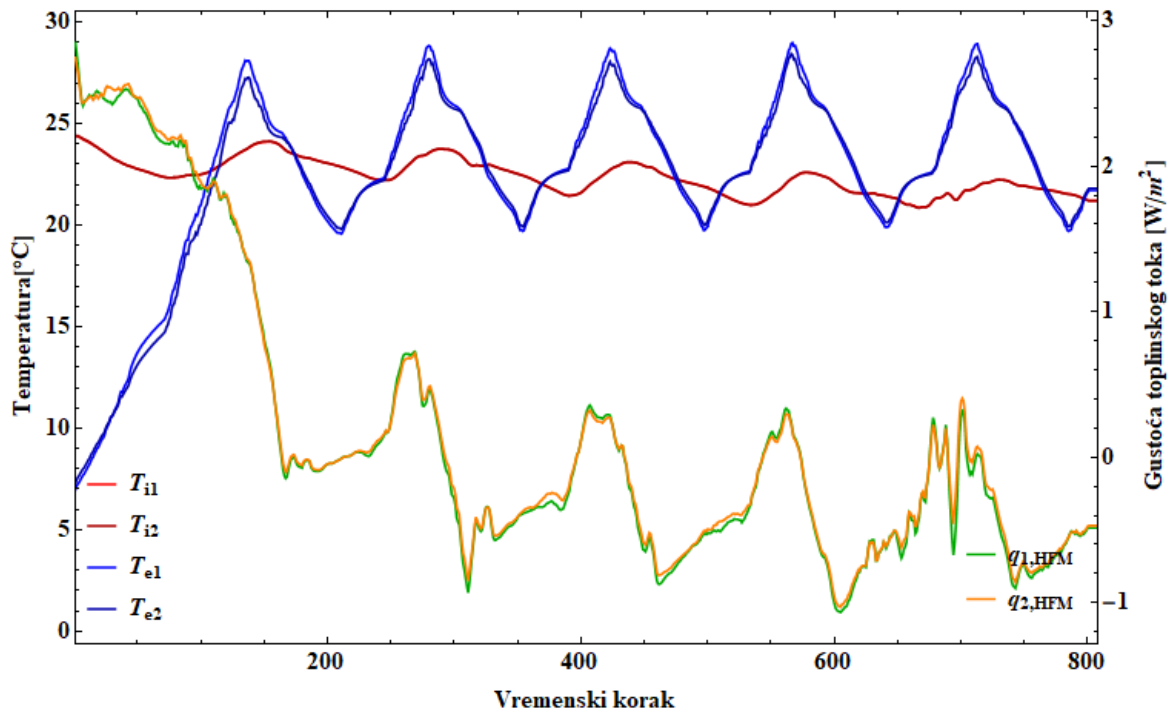


HFM

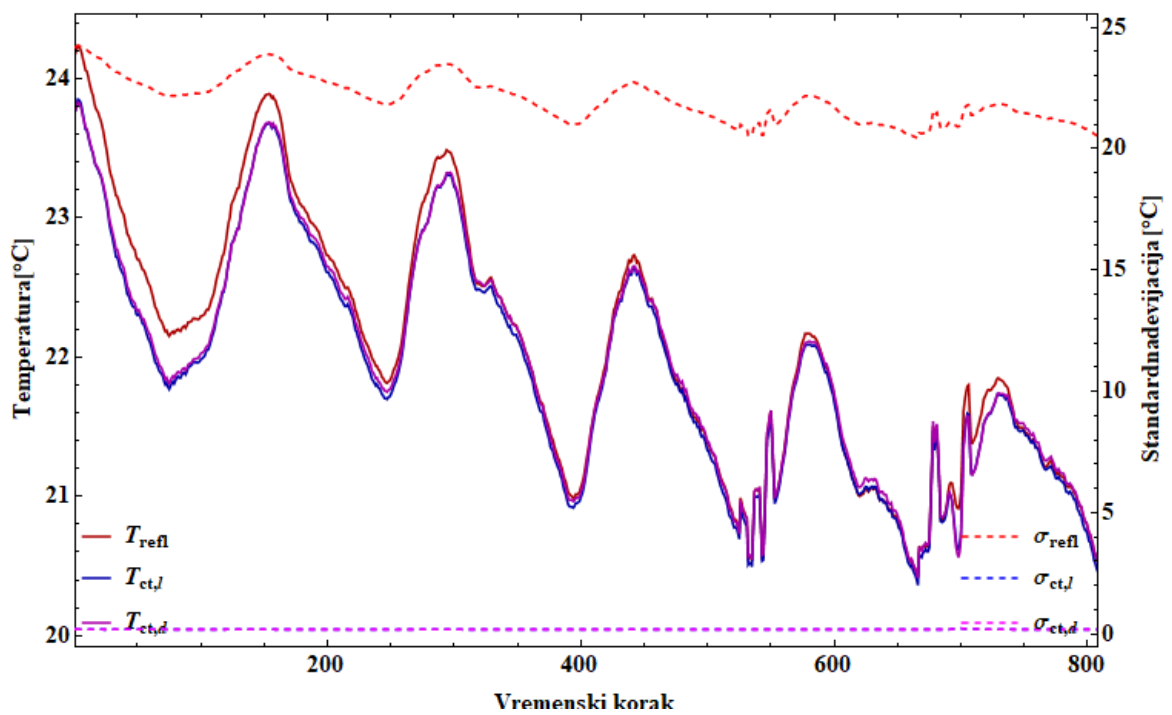


ICT

g) 9S

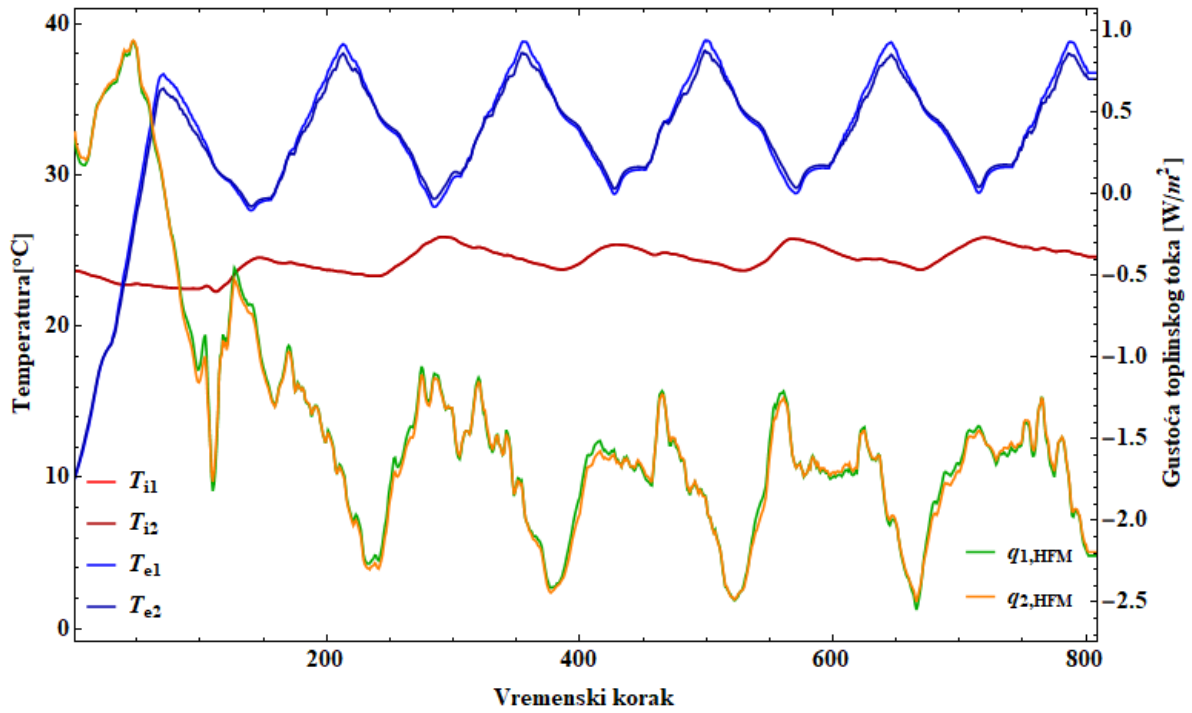


HFM

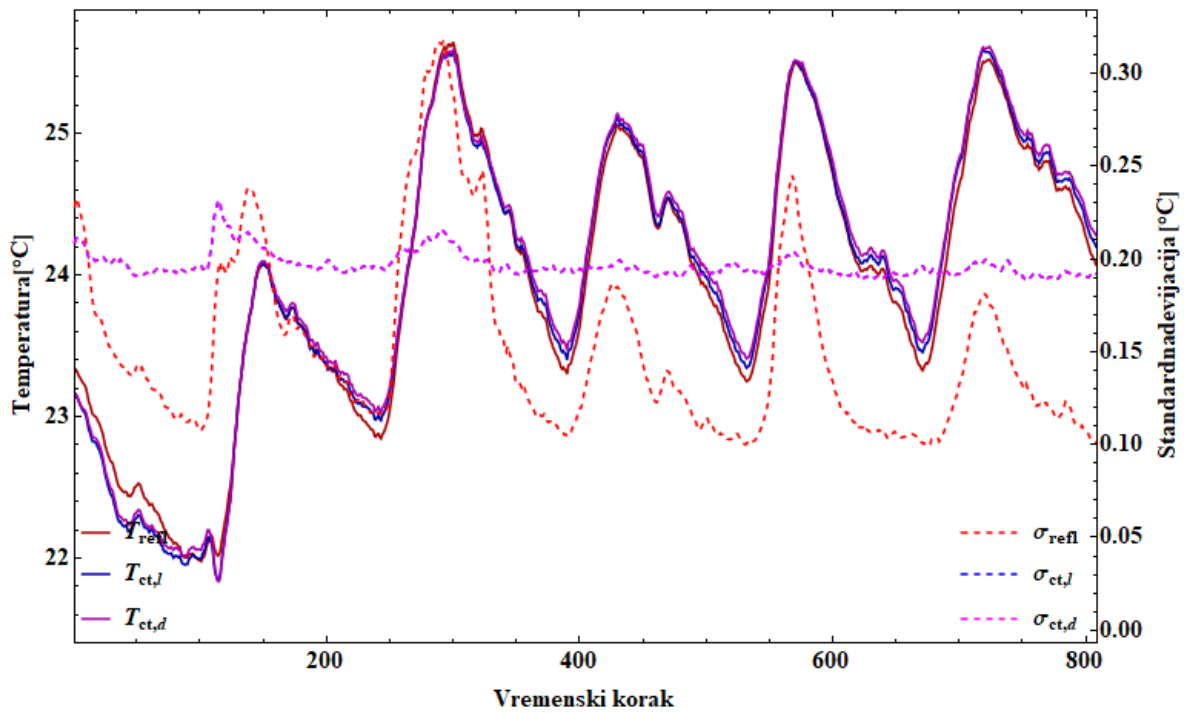


ICT

h) 10S

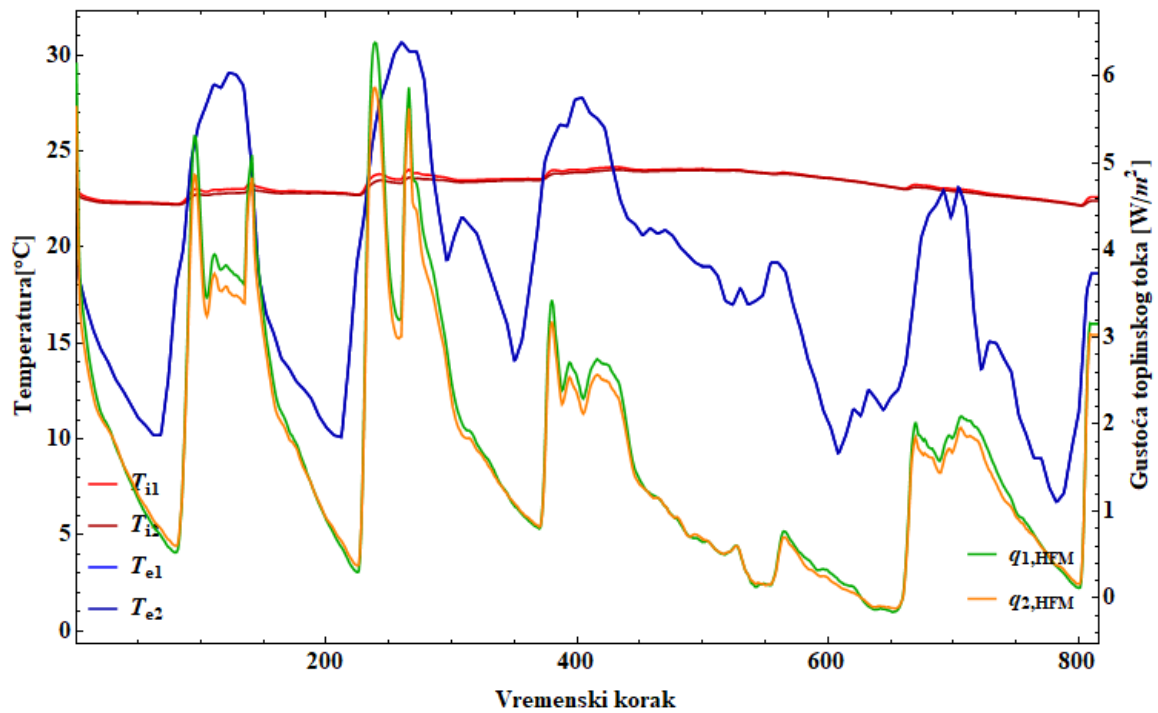


HFM

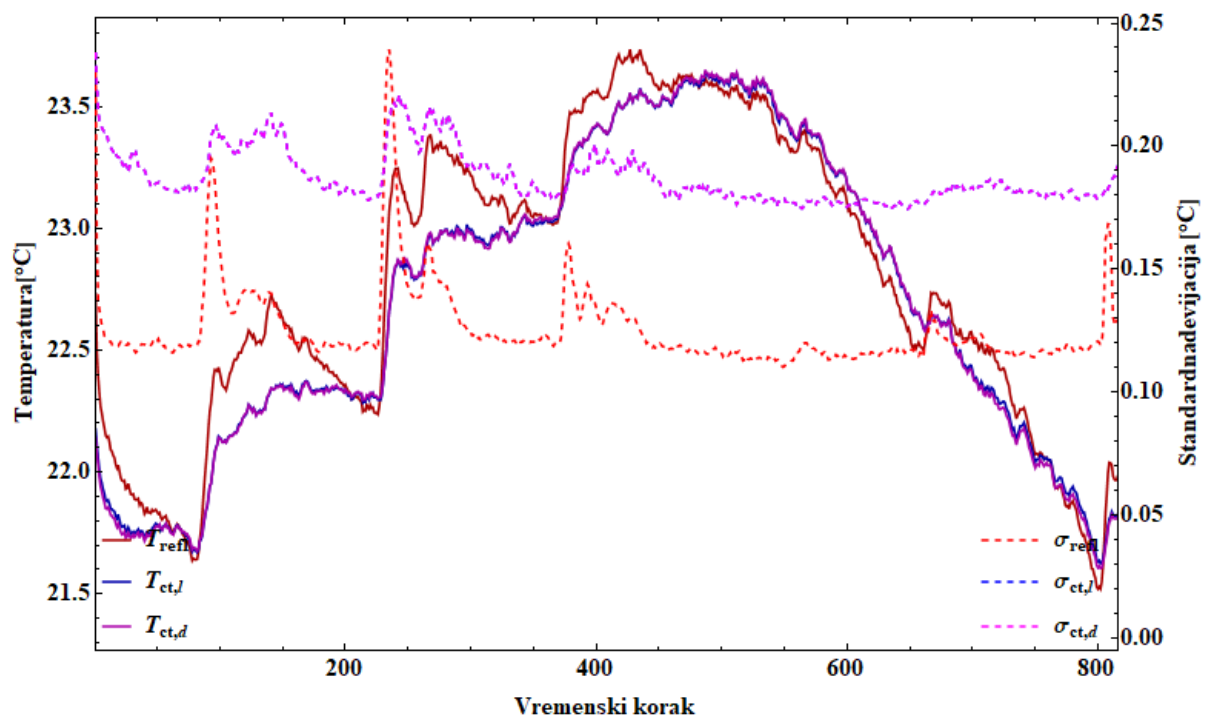


ICT

i) 11S

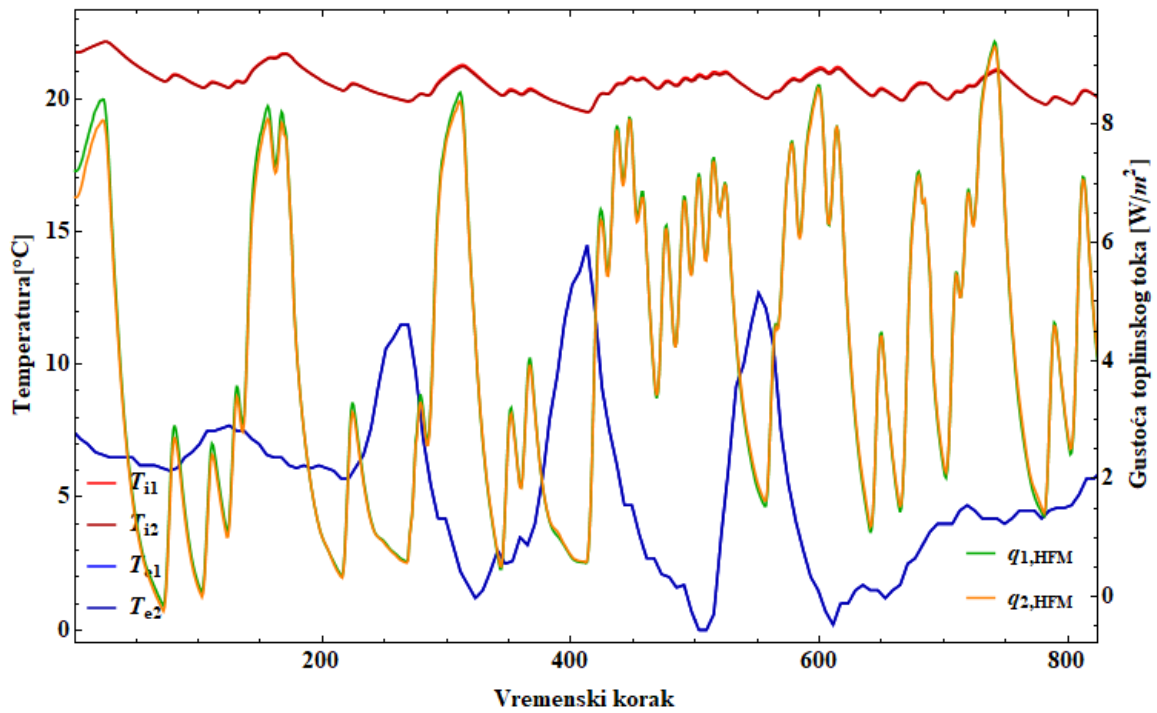


HFM

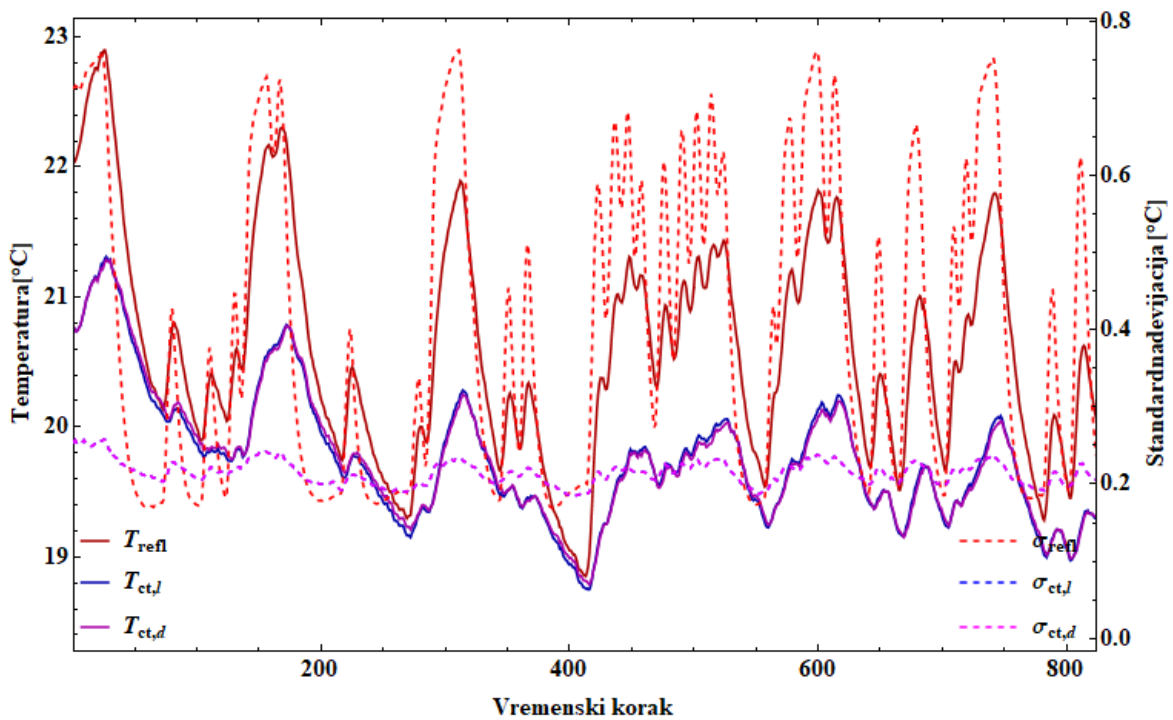


ICT

j) Ivanovec

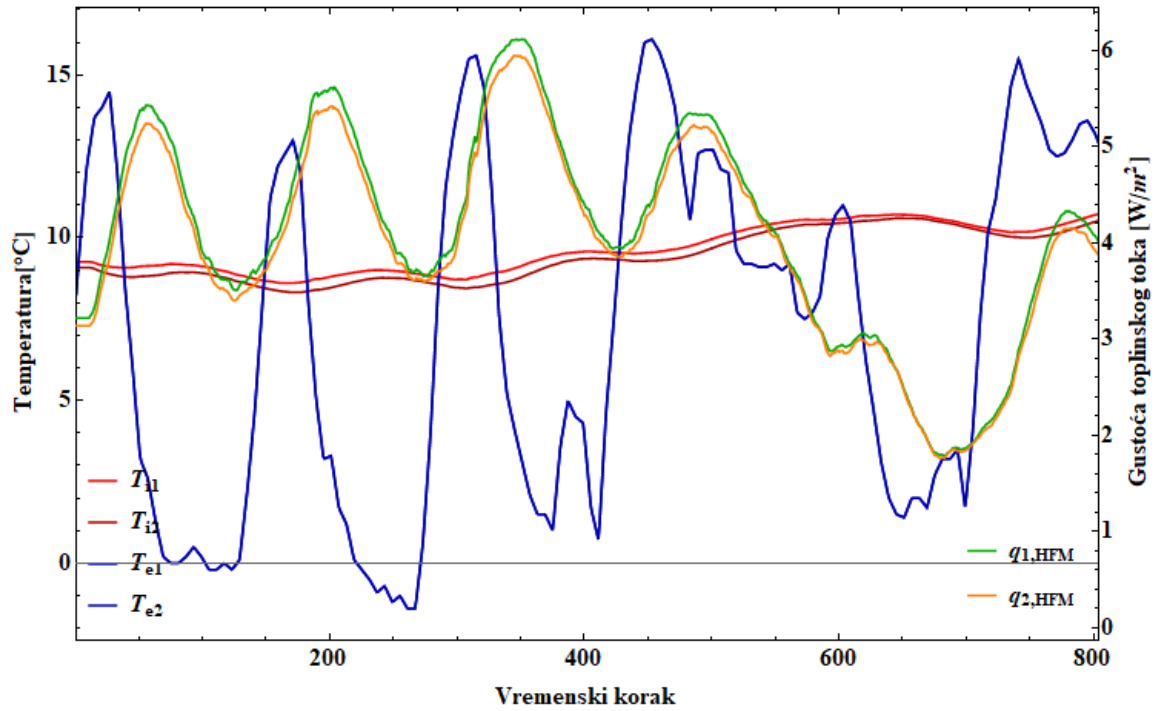


HFM

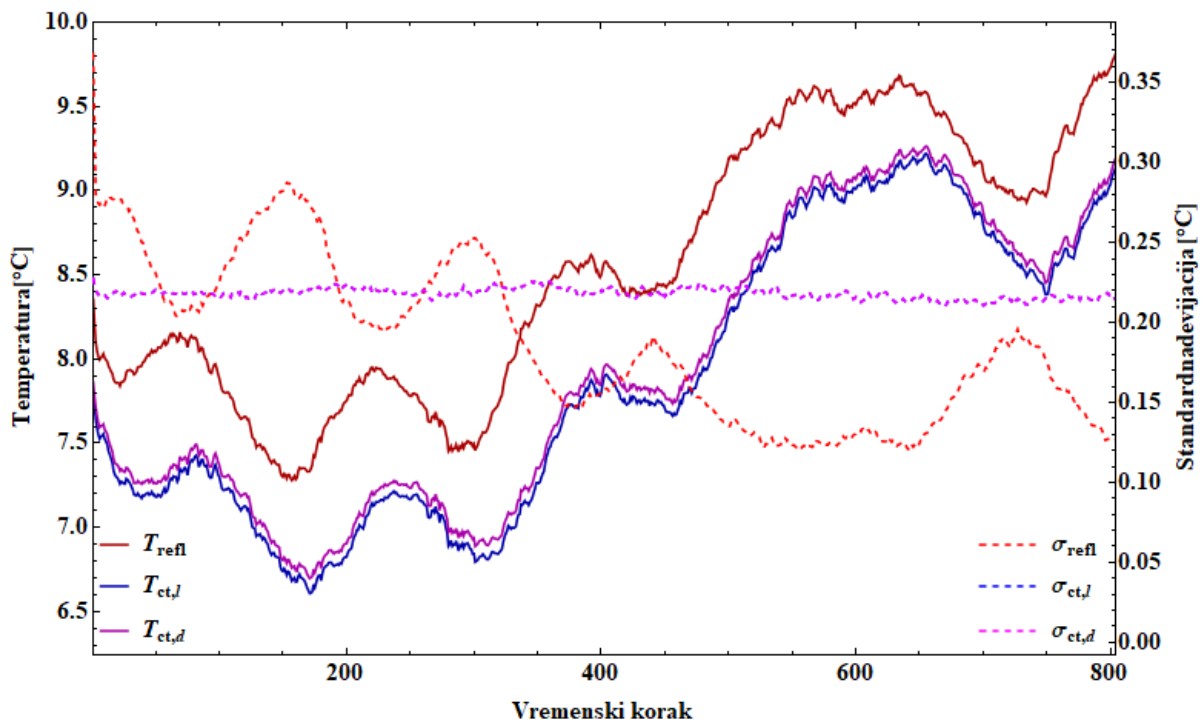


ICT

k) Lenti

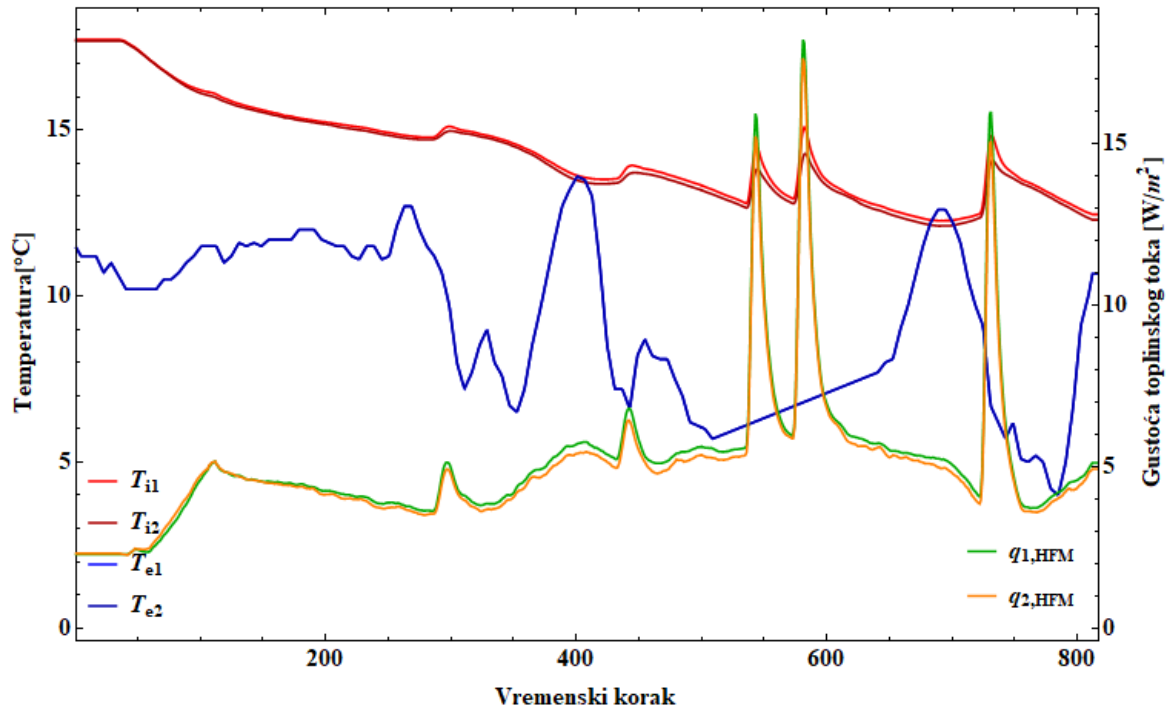


HFM

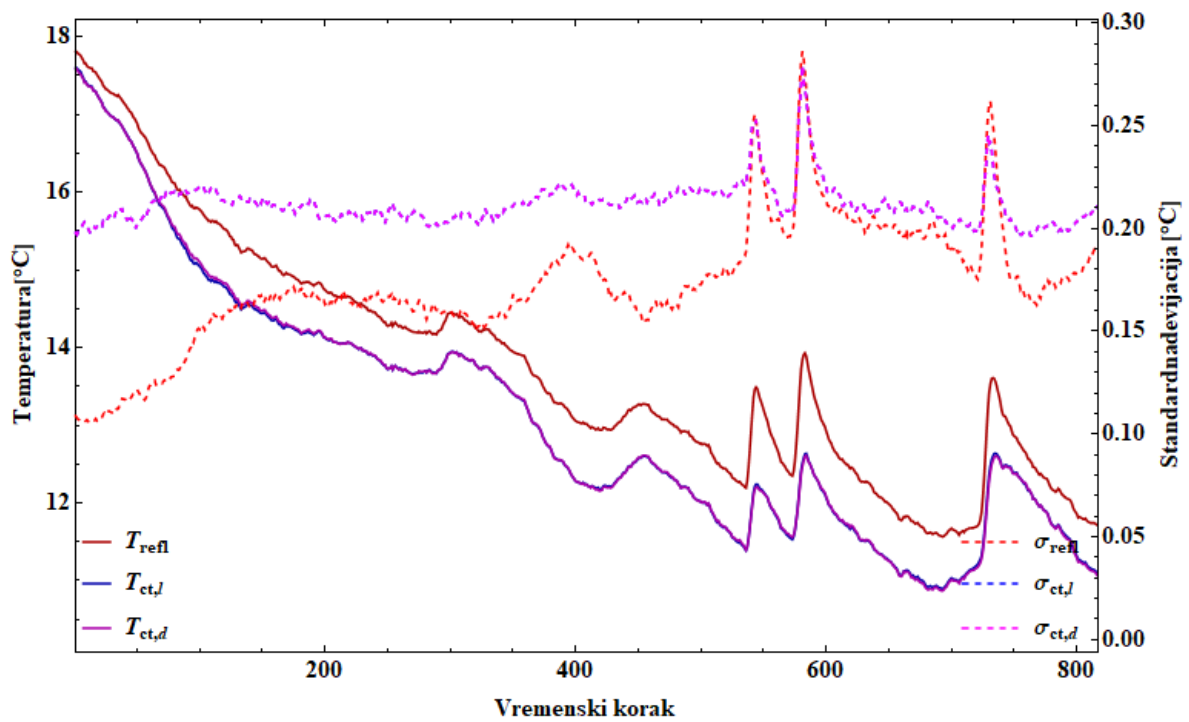


ICT

l) Muraszemenye

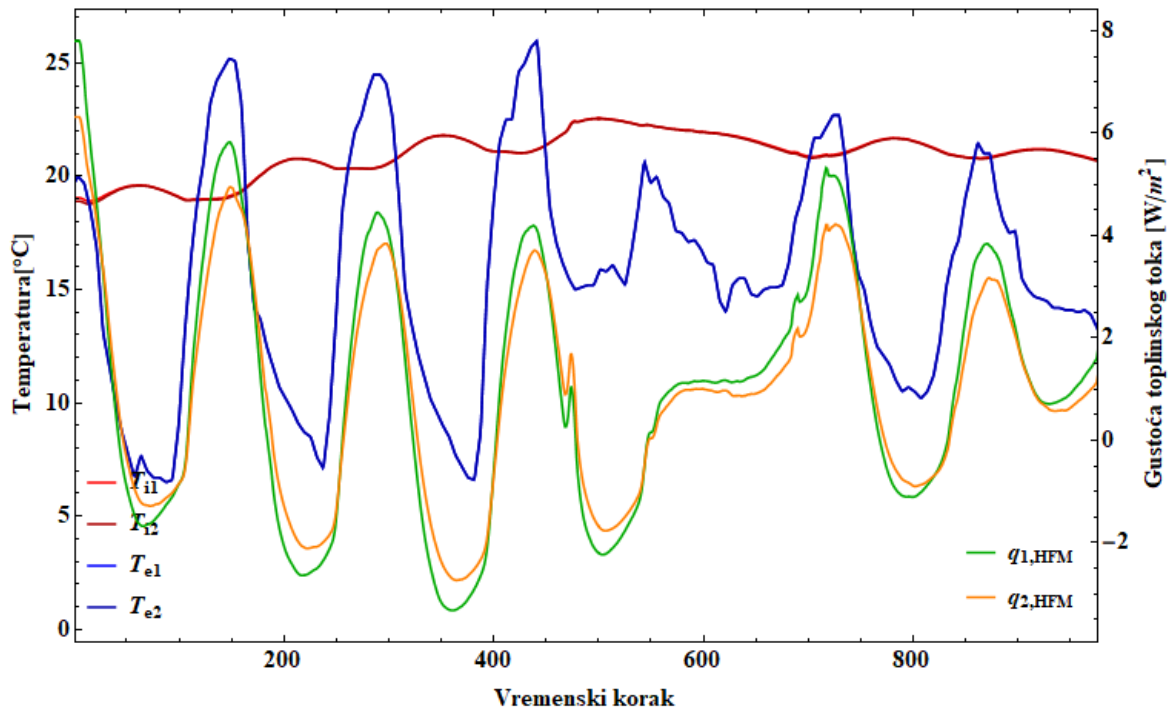


HFM

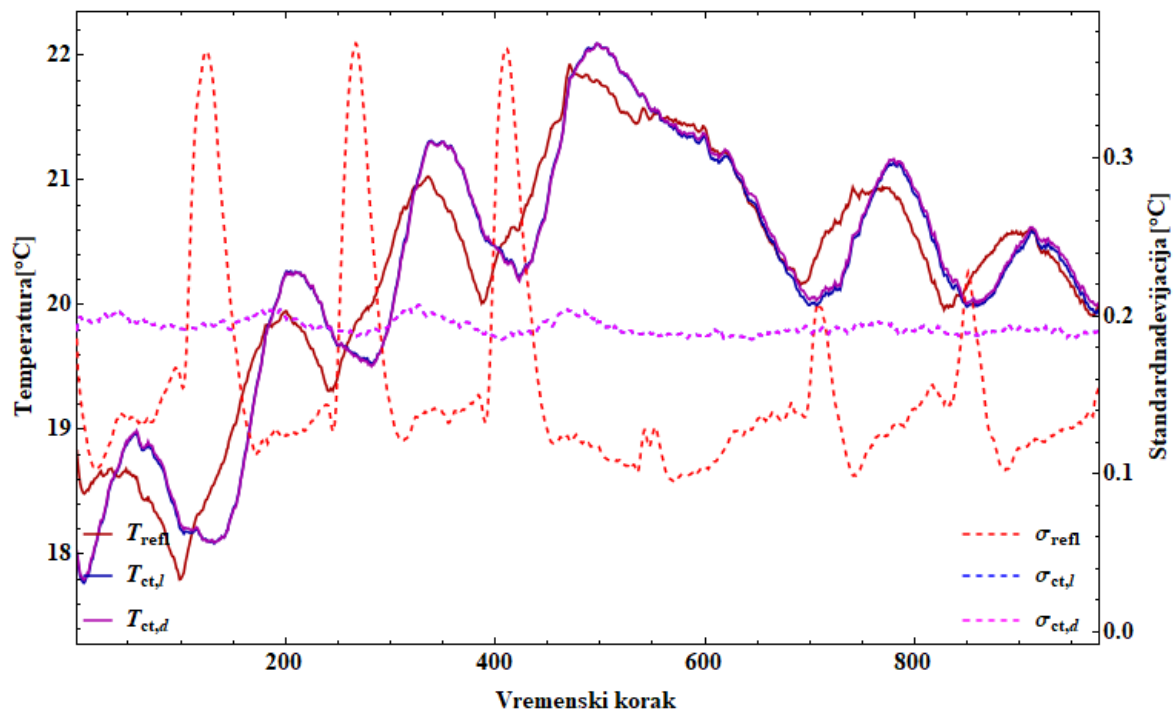


ICT

m) Mursko Središće

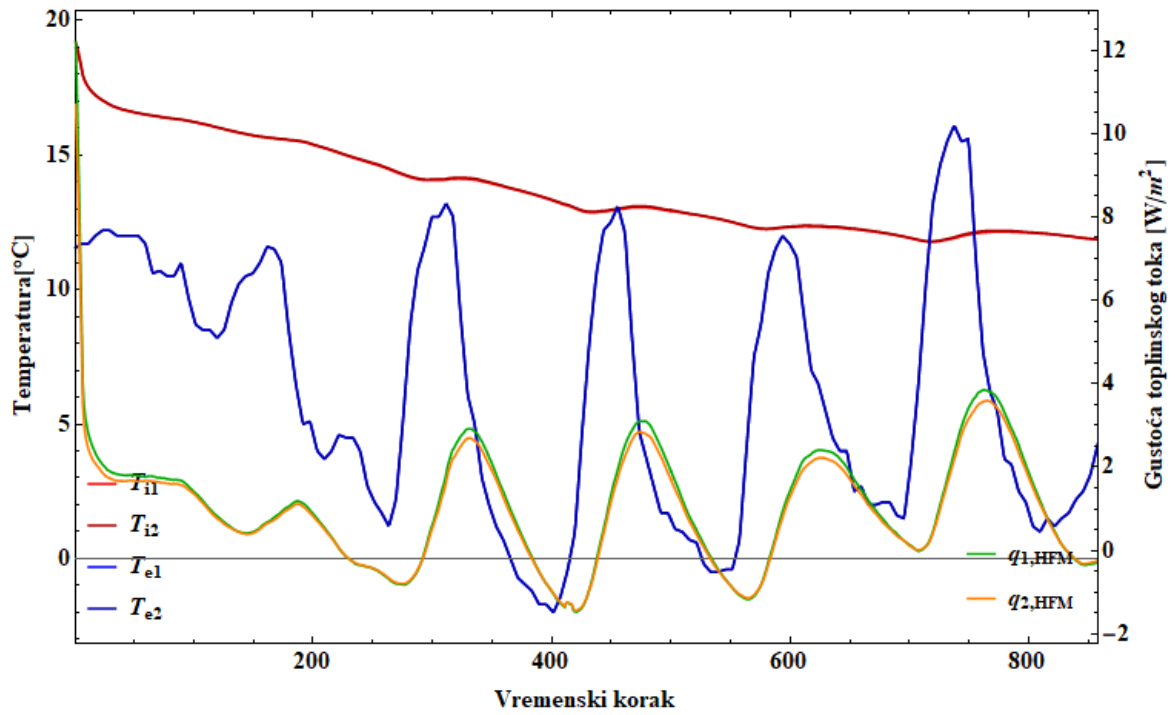


HFM

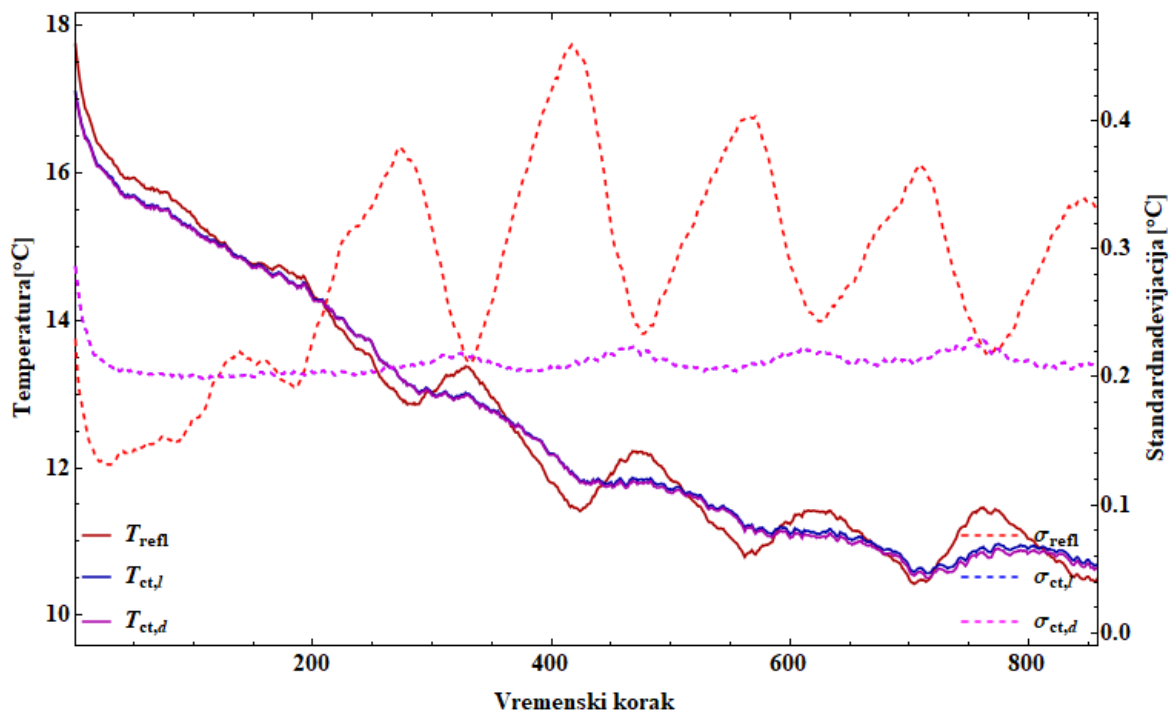


ICT

n) Palovec

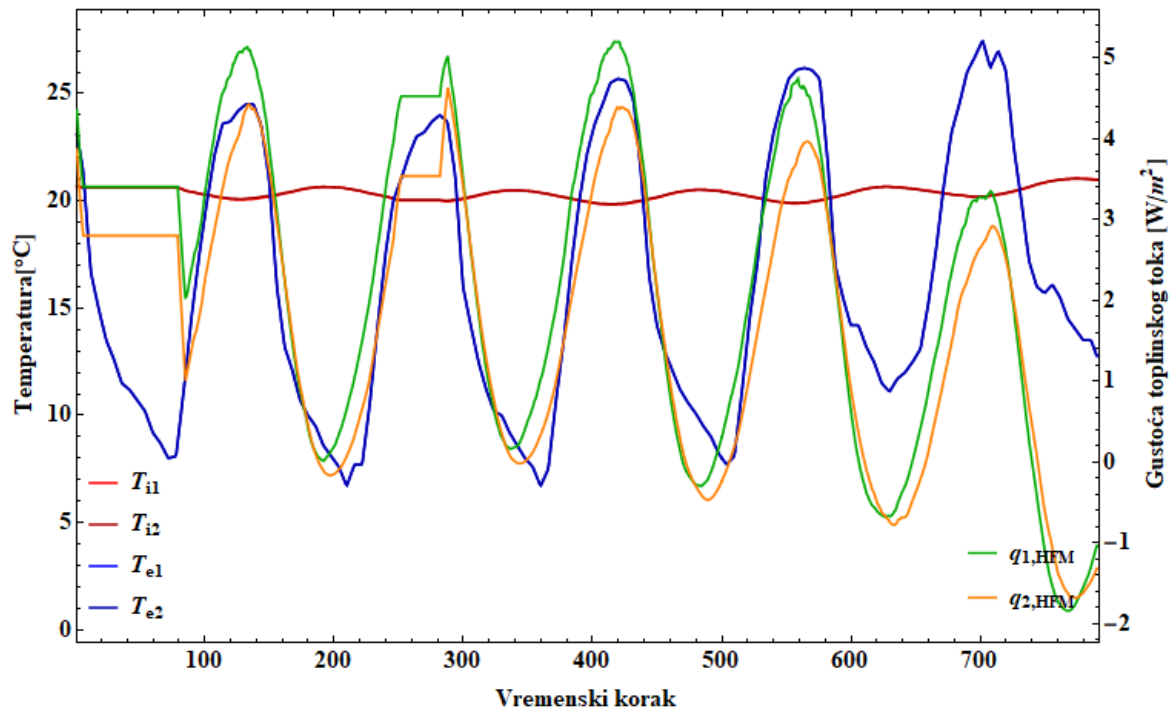


HFM

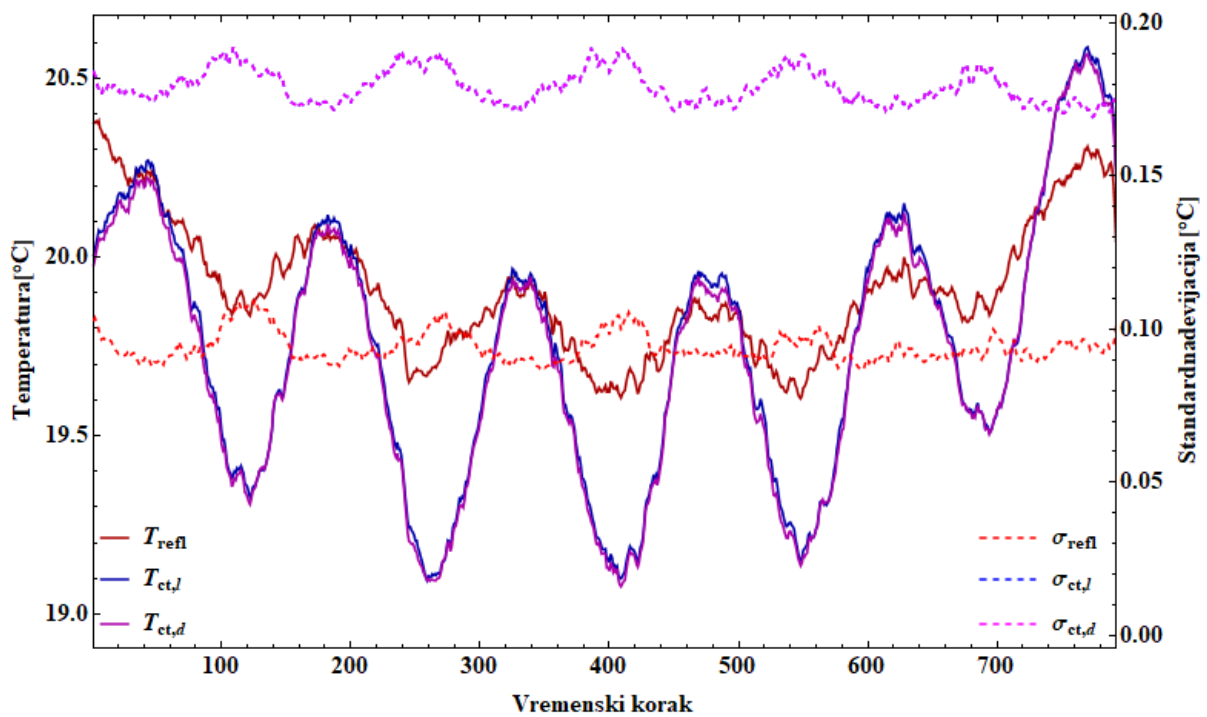


ICT

o) Tornyszentmiklos

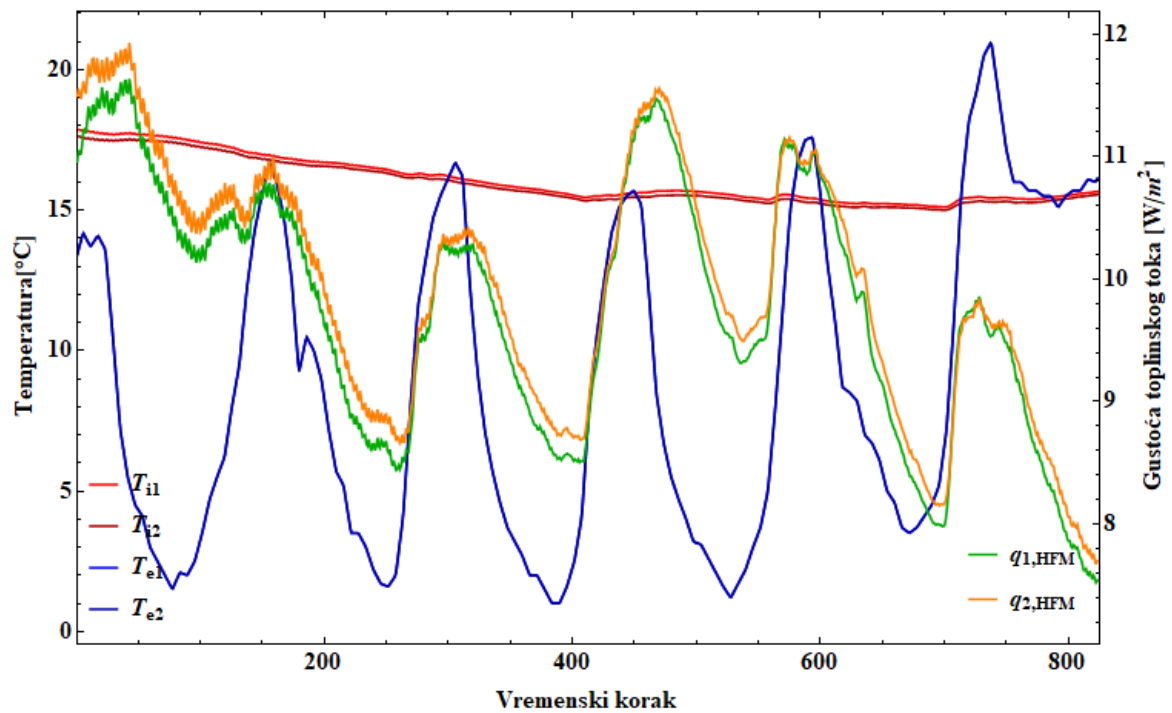


HFM

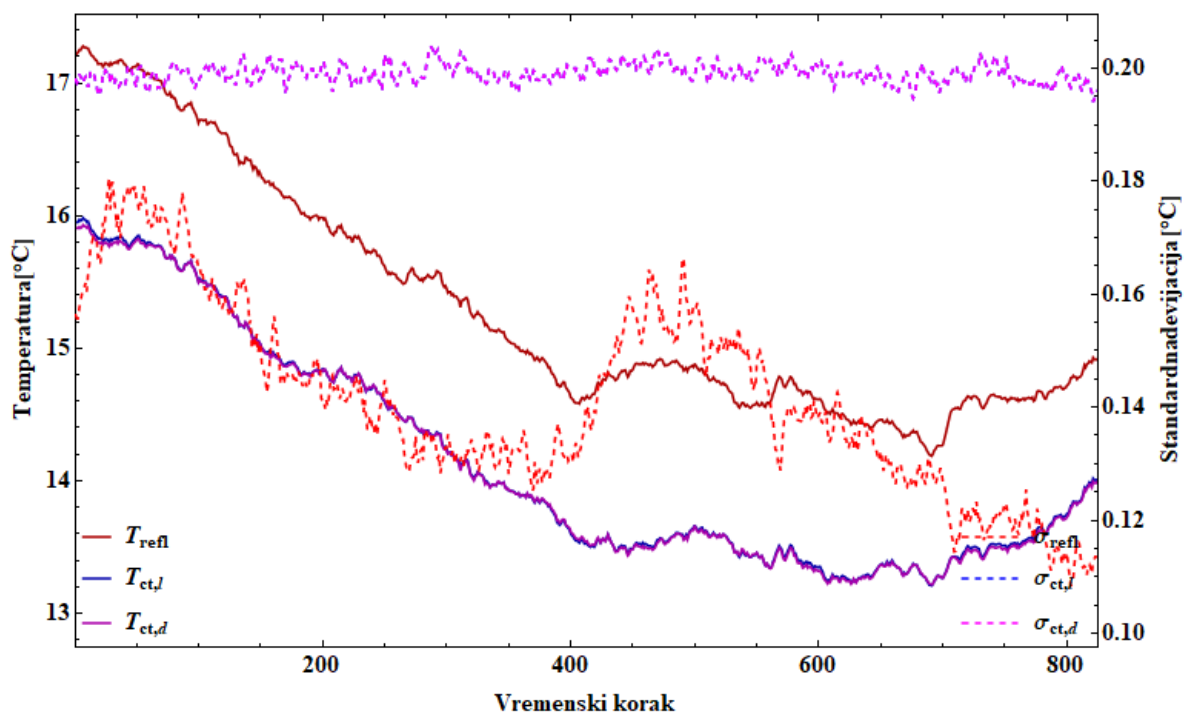


ICT

p) Totovec



HFM



ICT

q) Vapour

Životopis

Mergim Gaši rođen je 29. 12. 1993. u Makarskoj. Osnovnu školu završio je 2008. godine u Podgori, a srednju školu završio je 2012. godine u Srednjoj strukovnoj školi u Makarskoj, smjer Elektrotehničar.

Na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu diplomirao je 21. 9. 2017. godine na smjeru Teorija i modeliranje konstrukcija pod mentorstvom prof. dr. sc. Mladena Meštovića na temu „Proračun konstrukcije poslovne građevine“.

Poslijediplomski doktorski studij upisuje 19. 12. 2017. godine na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Od 16. 10. 2017. godine radi na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na Zavodu za materijale, najprije kao stručni suradnik na projektima: Net-UBIEP – „*Network for Using BIM to Increase the Energy Performance*“ (Obzor 2020), FIT-TO-NZEB – „*Innovative training schemes for retrofitting to nZEB-levels*“ (Obzor 2020) i Istraživanje i razvoj E-burze energetske obnove u zgradarstvu i industriji (Europski fond za regionalni razvoj, Operativni program Konkurentnost i kohezija). Od 1. 9. 2020. radi kao asistent na projektima: *The nZEB Roadshow* (Obzor 2020), BIMzeED – „*Educate for zero energy buildings using Building Information Modeling*“ (Obzor 2020) i na projektu Razvoj i istraživanje PLASTOPOR compact EPS(F) ploče (Europski fond za regionalni razvoj).

Kao autor i koautor objavio je devet radova u časopisima, 16 radova u zbornicima skupova, sedam sažetaka na skupovima te je sudjelovao na raznim međunarodnim i domaćim konferencijama.

U okviru svoje znanstvene djelatnosti bavi se:

- Građevinskom fizikom
- Numeričkim modeliranjem higrotermalnih svojstava elemenata vanjske ovojnice zgrade
- Energetskom učinkovitosti u zgradama
- Ispitivanjem higrotermalnih svojstava materijala
- Nerazornim ispitivanjima (metoda infracrvene termografije, Blowerdoor, određivanje koeficijenta prolaska topline, određivanje indeksa solarne refleksije)
- Monitoringom unutarnjeg okoliša u zgradama

- Izradom računalnih programa specijaliziranih za Građevinsku fiziku

Tijekom rada na Zavodu za materijale uključen je u stručne poslove te izradu stručnih izvještaja u području Građevinske fizike koja uključuju:

- Termografska ispitivanja višestambenih zgrada i kuća.
- Određivanje koeficijenta prolaska topline elemenata vanjske ovojnice zgrade.
- Određivanje zrakopropusnosti višestambenih zgrada, kuća i stambenih jedinica (Blowerdoor).
- Određivanje koeficijenta prolaska topline metodom HFM.
- Određivanje indeksa solarne refleksije korištenjem piranometra.

Aktivno sudjeluje na raznim stručnim skupovima koji uključuju specijalizirana znanja iz područja Građevinske fizike.

Popis objavljenih radova

1. **Milovanović, Bojan; Bagarić, Marina; Gaši, Mergim; Vezilić Strmo, Nikolina;** Case Study in Modular Lightweight Steel Frame Construction: Thermal Bridges and Energy Performance Assessment // Applied sciences (Basel), 12 (2022), 20; 1-31 doi:10.3390/app122010551 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)
2. Bagarić, Marina; **Milovanović, Bojan; Gaši, Mergim;** Is there an Energy Savings Potential of Comprehensive Renovation of Historic Buildings? // ArhiBau 2022 konferencija: Kultura građenja i održivi razvoj Zagreb, Hrvatska, 2022. (predavanje, međunarodna recenzija, pp prezentacija, znanstveni)
3. **Milovanović, Bojan;** Bagarić, Marina; **Gaši, Mergim;** Stepinac, Mislav; Energy renovation of the multi-residential historic building after the Zagreb earthquake – Case study // Case Studies in Thermal Engineering, 38 (2022), October 2022; 1-24 doi:10.1016/j.csite.2022.102300 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)
4. Gumbarević, Sanjin; **Milovanović, Bojan;** Dalbelo Bašić, Bojana; **Gaši, Mergim;** Combining Deep Learning and the Heat Flux Method for In-Situ Thermal-Transmittance Measurement Improvement // Energies, 15 (2022), 14; 5029, 20 doi:10.3390/en15145029 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)
5. **Gaši, Mergim; Milovanović, Bojan;** Banjad Pečur, Ivana; Bagarić, Marina; Utjecaj perforacija i proreza na higrotermalna svojstva EPS-a // Građevinar : časopis Hrvatskog saveza građevinskih inženjera, 74 (2022), 5; 369-381 doi:10.14256/JCE.3483.2022 (međunarodna recenzija, prethodno priopćenje, znanstveni)
6. **Milovanović, Bojan; Gaši, Mergim;** Terenska mjerenja parametara vanjske ovojnice zgrade na 10 obiteljskih kuća // 8. Susret termografista HUICT-a Sv. Martin na Muri: HUICT, 2022. str. 1-30 (predavanje, pp prezentacija, stručni)
7. **Milovanović, Bojan;** Bagarić, Marina; **Gaši, Mergim;** MUZA-istraži pametnu mobilnu kuću koja troši gotovo nula energije i saznaj kako izgleda zvuk u prostoru, 2022. (izložba).
8. **Milovanović, Bojan; Gaši, Mergim;** Terenska mjerenja parametara vanjske ovojnice zgrade na 10 obiteljskih kuća // Zbornik sažetaka predavanja - 16. dani Hrvatske komore inženjera građevinarstva / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: HKIG, 2022. 53, 30 (predavanje, domaća recenzija, sažetak, stručni)

9. Bagarić, Marina; **Milovanović, Bojan; Gaši, Mergim**; Potencijal uštede energije tijekom cjelovite obnove tipične višestambene zgrade u središtu Zagreba // Zbornik sažetaka predavanja "XVI. Dani Hrvatske komore inženjera građevinarstva" / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: Hrvatska komora inženjera građevinarstva, 2022. str. 48-48 (predavanje, podatak o recenziji nije dostupan, sažetak, stručni)
10. Gumbarević, Sanjin; **Milovanović, Bojan; Gaši, Mergim**; Bagarić, Marina; Thermal transmittance prediction based on the application of artificial neural networks on heat flux method results // 8th International Buildings Physics Conference 2021 online, 2021. 1240, 8 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
11. **Gaši, Mergim; Milovanović, Bojan**; Gumbarević, Sanjin; Bagarić, Marina; Utjecaj toplinskih mostova u zgradama podvrgnutim protupotresnoj obnovi // 8. Sabor hrvatskih graditelja, Graditeljstvo i klimatske promjene / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: Hrvatski savez građevinskih inženjera, 2021. str. 41-53 doi:10.14256/8SHG.2021.151 (predavanje, domaća recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
12. **Milovanović, Bojan**; Bagarić, Marina; **Gaši, Mergim**; Gumbarević, Sanjin; Energetska obnova kao sastavni dio integralne obnove zgrada kulturne baštine nakon potresa – mogućnosti i ograničenja // 8. Sabor hrvatskih graditelja, Graditeljstvo i klimatske promjene / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: Hrvatski savez građevinskih inženjera, 2021. str. 87-99 doi:10.14256/8SHG.2021.204 (predavanje, domaća recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
13. Gumbarević, Sanjin; **Milovanović, Bojan; Gaši, Mergim**; Bagarić, Marina; BIM kao alat za ubrzanje i povećanje točnosti iskaza elemenata vanjske ovojnice zgrade koji su potrebni za procjenu energijskog ponašanja // 8. Sabor hrvatskih graditelja, Graditeljstvo i klimatske promjene / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: Hrvatski savez građevinskih inženjera, 2021. str. 31-40 doi:10.14256/8SHG.2021.124 (predavanje, domaća recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
14. Gumbarević, Sanjin; **Milovanović, Bojan; Gaši, Mergim**; Bagarić, Marina; Overcoming the mismatched skills for delivering NZEBs using Building Information Modelling // C4E Forum Poiana Brasov, Rumunjska, 2021. (predavanje, pp prezentacija, stručni)

15. **Milovanović, Bojan; Gaši, Mergim;** Gumbarević, Sanjin; Bagarić, Marina; Education for zero energy buildings using building information modelling // Proceedings of the 2nd International Conference CoMS 2020/21 - Volume 1 / Šajna, Aljoša ; Legat, Andraž ; Jordan, Sabina ; Horvat, Petra ; Kemperle, Ema ; Dolenc, Sabina ; Ljubešek, Metka ; Michelizza, Matej (ur.). Ljubljana: Slovenian National Building and Civil Engineering Institute (ZAG), 2021. str. 225-234 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
16. Gumbarević, Sanjin; **Milovanović, Bojan; Gaši, Mergim;** Bagarić, Marina; The impact of building zone elements on airtightness // Proceedings of the 2nd International Conference CoMS 2020/21 - Volume 1 / Šajna, Aljoša ; Legat, Andraž ; Jordan, Sabina ; Horvat, Petra ; Kemperle, Ema ; Dolenc, Sabina ; Ljubešek, Metka ; Michelizza, Matej (ur.). Ljubljana: Slovenian National Building and Civil Engineering Institute (ZAG), 2021. str. 106-114 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
17. **Gaši, Mergim; Milovanović, Bojan;** Perišić, Jakov; Gumbarević, Sanjin; Thermal bridge assessment in prefabricated ventilated façade systems with recycled aggregates // Proceedings of the 2nd International Conference CoMS 2020/21 - Volume 1 / Šajna, Aljoša ; Legat, Andraž ; Jordan, Sabina ; Horvat, Petra ; Kemperle, Ema ; Dolenc, Sabina ; Ljubešek, Metka ; Michelizza, Matej (ur.). Ljubljana: Slovenian National Building and Civil Engineering Institute (ZAG), 2021. str. 75-83 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
18. Gumbarević, Sanjin; **Milovanović, Bojan; Gaši, Mergim;** Bagarić, Marina; Application of Multilayer Perceptron Method on Heat Flow Method Results for Reducing the in-situ Measurement Time // 7th International Electronic Conference on Sensors and Applications session Applications / Mariani, Stefano ; Messervey, Tom A. ; Vallan, Alberto ; Bosse, Stefan (ur.). Online: Engineering Proceedings, MDPI, 2020. 2(1), 29, 6 doi:10.3390/ecsa-7-08272 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
19. Gumbarević, Sanjin; Burcar Dunović, Ivana; **Milovanović, Bojan; Gaši, Mergim;** Method for Building Information Modeling Supported Project Control of Nearly Zero-Energy Building Delivery // Energies, 13 (2020), 20; 5519, 21 doi:10.3390/en13205519 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)

20. **Milovanović, Bojan; Gaši, Mergim;** Gumbarević, Sanjin; Principal Component Thermography for Defect Detection in Concrete // *Sensors*, 20 (2020), 14; 3891, 21 doi:10.3390/s20143891 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)
21. Gumbarević, Sanjin; **Milovanović, Bojan;** Bagarić, Marina; **Gaši, Mergim;** Burcar Dunović, Ivana; Improving competences of engineers and workers in the AEC industry for delivering NZEBs // *Organization, technology & management in construction*, 12 (2020), 1; 2256-2274 doi:10.2478/otmcj-2020-0021 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)
22. Štirmer, Nina; **Milovanović, Bojan;** Gumbarević, Sanjin; **Gaši, Mergim;** Bagarić, Marina; Obrazovanje u BIM-u i NZEB-u za povećanje kvalitete zgrada // 21. Međunarodni simpozij o kvaliteti/21st International Symposium on Quality Kvaliteta – jučer, danas, sutra / *Quality - Yesterday, Today, Tomorrow / Drljača, Miroslav (ur.)*. Zagreb: Hrvatsko društvo za kvalitetu, 2020. str. 1-9 doi:10.30657/hdmk.2020.32 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
23. Gumbarević, Sanjin; **Milovanović, Bojan;** Bagarić, Marina; **Gaši, Mergim;** Burcar Dunović, Ivana; Improving Competences of Engineers and Workers in the AEC Industry for Delivering NZEBs // 14th International conference Organization, technology and management in construction and 7th International project management association research - conference proceedings Zagreb: Croatian Association for Construction Management and University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, 2019. str. 740-754 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
24. **Gaši, Mergim;** E-burza energetske obnove postojećih zgrada // *Zbornik radova - Stručni skup studenata “Mi imamo rješenja – vizije novih generacija za održivi, zeleni razvoj” / Milovanović, Bojan ; Lakušić, Stjepan ; Šamarinec, Vlatka (ur.)*. Zagreb: Građevinski fakultet, Sveučilišta u Zagrebu, 2019. str. 11-11 (predavanje, domaća recenzija, sažetak, znanstveni)
25. **Gaši, Mergim; Milovanović, Bojan;** Gumbarević, Sanjin; Comparison of Infrared Thermography and Heat Flux Method for Dynamic Thermal Transmittance Determination // *Buildings*, 9 (2019), 132; 1-23 doi:10.3390/buildings9050132 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)
26. Gumbarević, Sanjin; **Milovanović, Bojan;** Bagarić, Marina; **Gaši, Mergim;** Competences of engineers and workers in the architecture, engineering & construction industry for delivering nearly zero-energy buildings // *Zbornik radova 19. Hrvatska konferencija o*

kvaliteti, 10. znanstveni skup Hrvatskog društva za kvalitetu / Peranić, Janko (ur.). Zagreb: Hrvatsko društvo za kvalitetu, 2019. str. 64-73 (plenarno, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)

27. Gumbarević, Sanjin; **Milovanović, Bojan**; Bagarić, Marina; **Gaši, Mergim**; Possibilities of using BIM for deep energy renovation analyses // Proceedings of the International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS 2019) Energy Efficient Building Design and Legislation / Bagarić, Marina ; Banjad Pečur, Ivana ; Künzel, Hartwig M. (ur.). Paris, France: RILEM Publications S.A.R.L., 2019. str. 241-228 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)

28. **Gaši, Mergim; Milovanović, Bojan**; Gumbarević, Sanjin; Infrared thermography for dynamic thermal transmittance determination // Proceedings of the International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS 2019) Energy Efficient Building Design and Legislation / Bagarić, Marina ; Banjad Pečur, Ivana ; Künzel, Hartwig M. (ur.). Paris, France: RILEM Publications S.A.R.L., 2019. str. 51-58 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)

29. **Gaši, Mergim**; Numeričko modeliranje točkastih toplinskih mostova ventiliranih fasadnih sustava // Common Foundations 2018 - uniSTem: 6th Congress of Young Researchers in the Field of Civil Engineering and Related Sciences Split: Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split, 2018. str. 76-81 doi:10.31534/co/zt.2018.11 (predavanje, domaća recenzija, cjeloviti rad (in extenso), ostalo)

30. **Gaši, Mergim**; Doprinos zrakopropusnosti na ukupne energetske gubitke kod zgrada gotovo nulte energije // Zgrade gotovo nulte energije (nZEB) povezivanjem znanosti, inovacija i gospodarstva / Veršić, Zoran ; Muraj, Iva (ur.). Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet, 2018. str. 1-19 (predavanje, recenziran, sažetak, stručni)

31. **Gaši, Mergim; Milovanović, Bojan**; Kvantificiranje utjecaja linijskih toplinskih mostova metodom infracrvene termografije // Zbornik radova sa Simpozija doktorskog studija / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: Građevinski fakultet, Sveučilišta u Zagrebu, 2018. str. 1-8 (predavanje, domaća recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)

32. **Gaši, Mergim; Milovanović, Bojan**; Bagarić, Marina; Numerical model of point thermal bridges // Proceedings of the Tenth International Conference on Engineering

Computational Technology / Topping, B.H.V. ; Ivanyi, P. (ur.). Barcelona: Civil-Comp Press, 2018. str. 1-2 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)

33. **Gaši, Mergim**; Analiza krutosti kolosijeka, 2015., diplomski rad, preddiplomski, Građevinski fakultet, Zagreb

34. **Gaši, Mergim**; Milovanović, Bojan; Grozdek, Marino; Bagarić, Marina, Laplace and State-Space Methods for Calculating the Heat Losses in Case of Heavyweight Building Elements and Short Sampling Times // Energies, 16 (2023), 11; 1-18 doi:10.3390/en16114277 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)

35. Tkalčić, Domagoj; Milovanović, Bojan; **Gaši, Mergim**; Jelčić Rukavina, Marija; Banjad Pečur, Ivana Optimization of Thermal Bridges Effect of Composite Lightweight Panels with Integrated Steel Load-Bearing Structure // Energies (Basel), 16/2023 (2023.); 1 - 24 doi:10.3390/en16186474 (izvorni znanstveni rad)