

Tehnologija energetske obnove vanjskih zidova primjenom unaprijeđene temperaturne metode

Domazetović, Mihaela

Doctoral thesis / Disertacija

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:521417>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-01**



GRAĐEVINSKI I ARHITEKTONSKI FAKULTET OSIJEK
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Repository / Repozitorij:

[Repository GrAFOS - Repository of Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek](#)



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Poslijediplomski sveučilišni studij Građevinarstvo

Doktorska disertacija

Tehnologija energetske obnove vanjskih zidova primjenom unaprijeđene temperature
metode

Mihaela Domazetović, mag.ing.aedif.

Osijek, 18. veljače 2022. godine

*Mojoj obitelji,
Hrvoju i Leni*

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Postgraduate University Study Programme in Civil Engineering

Doctoral dissertation

External walls energy renovation technology based on an improved temperature based
method

Mihaela Domazetović, M. Sc. in Civ. Eng.

Osijek, February 18, 2022

PROSUDBENA POVJERENSTVA I BIBLIOGRAFSKI PODACI

Povjerenstvo za prihvaćanje teme doktorske disertacije

Povjerenstvo za prihvaćanje teme doktorske disertacije imenovano na 215. redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, održanoj 10. rujna 2019. godine:

1. *izv. prof. dr. sc. Zlata Dolaček-Alduk, dipl. ing. građ., izvanredna profesorica, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, predsjednica*
2. *izv. prof. dr. sc. Hrvoje Krstić, dipl. ing. građ., izvanredni profesor, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, član*
3. *doc. dr. sc. Ivan Marović, dipl. ing. građ., docent, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, član*

Tema, mentor i komentor doktorske disertacije prihvaćeni su odlukom Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku na 218. redovitoj sjednici održanoj 20. rujna 2019. godine.

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije imenovano na 4. redovitoj elektroničkoj sjednici Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, održanoj 12. siječnja 2022. godine:

1. *prof. dr. sc. Zlata Dolaček-Alduk, dipl. ing. građ., redovita profesorica, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, predsjednica*
2. *izv. prof. dr. sc. Hrvoje Krstić, dipl. ing. građ., izvanredni profesor, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, član i mentor*
3. *izv. prof. dr. sc. Ivan Marović, dipl. ing. građ., izvanredni profesor, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, član*

Doktorske disertacija prihvaćena je odlukom Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku na 5. redovitoj elektroničkoj sjednici održanoj 9. veljače 2022. godine.

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije imenovano na 5. redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, održanoj 9. veljače 2022. godine:

- 1. prof. dr. sc. Zlata Dolaček-Alduk, dipl. ing. građ., redovita profesorica, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, predsjednica*
- 2. izv. prof. dr. sc. Hrvoje Krstić, dipl. ing. građ., izvanredni profesor, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, član i mentor*
- 3. izv. prof. dr. sc. Ivan Marović, dipl. ing. građ., izvanredni profesor, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, član*
- 4. doc. dr. sc. Mario Galić, dipl. ing. građ., docent, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, zamjenski član*

Doktorske disertacija javno je obranjena 18. veljače 2022. godine na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

Doktorska disertacija sadržava 212 stranica, 136 ilustracija, 61 tablicu, 2 priloga i 224 citirane publikacije.

Mentor doktorske disertacije je izv. prof. dr. sc. Hrvoje Krstić, dipl. ing. građ., izvanredni profesor na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

Komentor doktorske disertacije je dr inž. Piotr Kosiński, adiunkt, docent na Fakultetu geodezije, geoprostornog inženjerstva i građevinarstva Sveučilišta Warmije i Mazurije u Olsztynu, Olsztyn, Poljska.

Istraživanje u okviru doktorske disertacije pripada znanstvenom području tehničkih znanosti, znanstvenom polju građevinarstvo.

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je doktorska disertacija isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno prepisan iz necitiranog rada te kako nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem kako nisam prijavila doktorsku disertaciju s istovjetnom temom na drugom studiju Sveučilišta ili na drugom sveučilištu.

Osijek, 18. veljače 2022. godine

Mihaela Domazetović, mag.ing.aedif.

PREDGOVOR

Ova doktorska disertacija izrađena je u okviru znanstveno-istraživačkog projekta na Sveučilištu Josipa Jurja Strossmayera, Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek, pod nazivom "Vrednovanje eksperimentalnih metoda za određivanje koeficijenta prolaska topline u kontroliranim uvjetima", voditelja projekta izv. prof. dr. sc. Hrvoje Krstić, dipl. ing. građ.

Veliko hvala svima koji su na bilo koji način sudjelovali u izradi ove doktorske disertacije.

Tvrtkama Knauf Insulation d.o.o., BAUMIT d.o.o. i WIENERBERGER d.o.o. zahvaljujem na susretljivosti, angažmanu i potpori u provedbi eksperimentalnog ispitivanja donacijom građevinskih materijala.

Mentoru, izv. prof. dr. sc. Hrvoju Krstiću veliko hvala od srca na podršci, razumijevanju, usmjeravanju, nesebičnoj pomoći, uskakanju u provedbi mjerenja te što je cijeli proces izrade doktorske disertacije učinio lijepim i ugodnim iskustvom.

Zahvaljujem komentoru, dr inž. Piotru Kosińskom na podršci, pomoći i savjetima vezanim uz numeričko istraživanje.

Uredskom kolegi Dini, svim ostalim kolegama i laborantima zahvaljujem se na savjetima i stručnoj pomoći tijekom provedbe istraživanja i izrade doktorske disertacije.

Najveće hvala bratu Matku na odvojenom vremenu, strpljenju, savjetima i nesebičnoj pomoći prilikom provedbe eksperimentalnog istraživanja te obrade podataka.

Hvala mojoj obitelji i mužu Hrvoju na vjeri, podršci, strpljenju, savjetima i riječima ohrabrenja.

SAŽETAK

In situ nerazorne metode vrlo su korisne za određivanje stvarnih toplinskih svojstava građevnih dijelova postojećih zgrada, posebice jer vrijednosti utvrđene mjerenjem na terenu u stvarnim uvjetima mogu značajno varirati od teorijskih vrijednosti. Zbog uočenih ograničenja standardiziranih metoda, razvijaju se nove metode s ciljem poboljšanja točnosti i pouzdane procjene in situ mjerenja. Osnovna ideja je pronaći brzu, jednostavnu i jeftinu metodu mjerenja te definirati točnost i uvjete primjene iste. Detaljnim i iscrpnim pregledom stanja područja in situ ispitivanja koeficijenta prolaska topline (U vrijednosti) vanjskih zidova nerazornim metodama, uočene su značajne prednosti temperaturne metode u odnosu na standardizirane metode poput brzine provođenja mjerenja, jednostavnosti obrade podataka i smanjenih troškova ispitivanja. Međutim pokazalo se kako nedostaju smjernice za provođenje ispitivanja te ispitivanja na različitim vrstama građevnih elemenata i u različitim uvjetima kako bi se definirala ograničenja, uklonili mogući negativni utjecaji i donijeli detaljni zaključci o mogućnosti pouzdane procjene U vrijednosti ovom metodom.

U doktorskoj disertaciji istražena je mogućnost primjene temperaturne metode za ispitivanje koeficijenta prolaska topline (U vrijednosti) vanjskih zidova in situ. S ciljem proširenja spoznaja o pouzdanosti mjerenja i poboljšanja pouzdanosti mjerenja temperaturnom metodom provedeno je eksperimentalno i numeričko istraživanje. Eksperimentalna ispitivanja provedena su na 18 modela zidova od različitih zidnih elemenata. Na temelju rezultata provedenih eksperimentalnih ispitivanja u različitim temperaturnim uvjetima i numeričkih simulacija prijenosa topline provedena je analiza utjecaja različitih parametara na rezultate ispitivanja i analiza ušteda koje je moguće ostvariti primjenom temperaturne metode za određivanje U vrijednosti na troškovima obnove i tijekom razdoblja uporabe zgrada izborom ekonomski opravdanih tehnologija obnove vanjskih zidova. Također, na temelju prikazanih eksperimentalnih rezultata predloženi su pojednostavljeni matematički modeli za predviđanje U vrijednosti vanjskih zidova temperaturnom metodom. Kako bi se osigurala šira praktična primjena temperaturne metode, na temelju prikazanih rezultata i analize predložene su detaljne smjernice kojih bi se trebalo pridržavati prilikom provođenja ispitivanja temperaturnom metodom.

Ključne riječi: in situ mjerenja, nerazorne metode, temperaturna metoda, koeficijent prolaska topline (U vrijednost), vanjski zidovi, analiza ušteda, tehnologija obnove, analiza troškova, matematički model

ABSTRACT

In-situ non-destructive methods are very useful for determining the actual thermal performance of building elements of existing buildings, especially since the values determined in situ in real conditions can significantly vary from theoretical values. Due to the observed limitations of standardized methods, new methods are being developed with the aim of improving the accuracy and reliability of in situ measurements. The basic idea is to find a quick, simple, and inexpensive method and to define the accuracy and conditions of its application. A detailed and comprehensive literature review of current experimental in-situ non-destructive approaches used to determine the thermal transmittance (U-value) of walls, revealed significant advantages of recently proposed Temperature Based Method (TBM) over standardized methods such as measurement duration, simple data processing and reduced measurement costs. However, detailed guidelines for conducting in situ measurement using TBM are still missing as well as further testing on different types of building elements in different conditions to minimise all possible negative impacts and to determine all parameters affecting the accuracy of measurement.

In the doctoral dissertation, the possibility of applying the TBM for in situ measurement of U-value of external walls was investigated. To improve the reliability of the TBM for in situ measurement of U-value, experimental and numerical research was conducted. For this purpose, 18 different types of external walls were experimentally investigated. Based on the experimental results performed in different thermal conditions and numeric simulations of the heat transfer, the analysis of the impact of various parameters on the results of the experiment was done. Savings analysis on the reconstruction expenses and for the period of the use of buildings that can be achieved by choosing appropriate and cost-effective building technology for renovation of external walls was done by using U-values determined by temperature based method. To provide a wider practical application of the TBM, detailed guidelines for conducting in situ measurements with TBM have been proposed based on the presented results and analysis.

Key words: in-situ measurements, non-destructive methods, Temperature Based Method (TBM), thermal transmittance (U-value), external walls, savings analysis, building technology renovation of external walls, cost analysis, mathematical model

SADRŽAJ

PREGOVOR	I
SAŽETAK	III
ABSTRACT	IV
POPIS ILUSTRACIJA	X
POPIS TABLICA	XV
POPIS KRATICA I SIMBOLA	XVIII
1 UVOD	1
1.1 Predmet i ciljevi istraživanja	3
1.2 Hipoteze istraživanja	3
1.3 Znanstvene metode i metodologija istraživanja	4
1.4 Očekivani izvorni znanstveni doprinos	6
2 TOPLINSKA ZAŠTITA U GRAĐEVINARSTVU	8
2.1 Energetsko stanje zgrada u Republici Hrvatskoj.....	9
2.2 Strategije energetskog razvitka Republike Hrvatske.....	12
2.3 Razvoj propisa o toplinskoj zaštiti zgrada	16
3 STANJE ISTRAŽIVAČKOG PODRUČJA	25
3.1 Prijenos topline	25
3.2 Prijenos topline vođenjem	25
3.3 Prijenos topline strujanjem	26
3.4 Prijenos topline zračenjem	27
3.5 Prijenos topline kroz građevinske elemente.....	28
3.6 Toplinska svojstva materijala	29
3.6.1 Koeficijent toplinske provodljivosti	29
3.6.2 Toplinski otpor	30
3.6.3 Koeficijent prolaska topline (U vrijednost).....	32
3.7 Pregled stanja područja postojećih in situ metoda za mjerenje koeficijenta prolaska topline vanjskih zidova	32
3.7.1 Metoda mjerenja toplinskog toka kroz građevne dijelove	33
3.7.2 Metoda mjerenja toplinskog toka kroz građevne dijelove pomoću jednostavne vruće komore.....	40
3.7.3 Metoda infracrvene termografije	43
3.7.4 Temperaturna metoda	47
3.7.5 Metoda mjerenja koeficijenta prolaska topline pomoću prirodne konvekcije i radijacije	51
3.7.6 Usporedba postojećih in situ metoda za mjerenje koeficijenta prolaska topline vanjskih zidova	53
4 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA	55

4.1	Pregled i opis eksperimentalnih modela	55
4.2	Opis komore.....	57
4.3	Tehnologija izvođenja ispitanih modela zidova	58
4.3.1	Tehnologija izvođenja zidova opečnim zidnim elementima od pune i šuplje blok opeke	60
4.3.2	Tehnologija izvođenja zidova opečnim zidnim elementima od brušene šuplje blok opeke i brušene šuplje blok opeke s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune u vertikalnim šupljinama	61
4.3.3	Tehnologija izvođenja zidova zidnim elementima od porastog betona	62
4.3.4	Tehnologija izvođenja zidova betonskim zidnim elementima s recikliranom opekom.....	63
4.4	Toplinska svojstva ugrađenih zidnih elemenata.....	64
4.5	Teorijske U vrijednosti eksperimentalno ispitanih zidova	67
4.6	Lokacije mjernih uređaja i postupak ispitivanja	69
5	REZULTATI PROVEDENIH EKSPERIMENTALNIH ISPITIVANJA	74
5.1	Rezultati ispitivanja temperaturnom metodom – Modeli TIP 1	74
5.2	Rezultati ispitivanja temperaturnom metodom – Modeli TIP 2	76
5.3	Rezultati ispitivanja temperaturnom metodom – Modeli TIP 3	78
5.4	Rezultati ispitivanja temperaturnom metodom – Modeli TIP 4	80
5.5	Rezultati ispitivanja temperaturnom metodom – Modeli TIP 5	82
5.6	Rezultati ispitivanja temperaturnom metodom – Modeli TIP 6	84
5.7	Rezultati mjerenja U vrijednosti temperaturnom metodom različitih vremena trajanja	86
5.8	Rezultati usporednog ispitivanja modela temperaturnom metodom i metodom mjerenja toplinskog toka kroz građevne dijelove	88
6	NUMERIČKO MODELIRANJE.....	90
6.1	Rezultati numeričkog modeliranja prijenosa topline	90
7	ANALIZA UVJETA EKSPERIMENTALNIH ISPITIVANJA I OBRADA REZULTATA.....	95
7.1	Rezultati analize podataka mjerenja - Modeli TIP 1	97
7.2	Rezultati analize podataka mjerenja - Modeli TIP 2	105
7.3	Rezultati analize podataka mjerenja - Modeli TIP 3	112
7.4	Rezultati analize podataka mjerenja - Modeli TIP 4	119
7.5	Rezultati analize podataka mjerenja - Modeli TIP 5	126
7.6	Rezultati analize podataka mjerenja - Modeli TIP 6	133
7.7	Analiza rezultata ispitivanja U vrijednosti temperaturnom metodom različitih vremena trajanja	140
7.8	Analiza rezultata usporednog ispitivanja modela temperaturnom metodom i metodom mjerenja toplinskog toka kroz građevne dijelove	143
7.9	Analiza pročišćenog seta podataka	147
8	ANALIZA UTJECAJA KOEFICIJENTA PRIJELAZA TOPLINE NA REZULTATE IN SITU ISPITIVANJA	149

9	CO-HEATING TEST	152
9.1	Analiza rezultata primjenom metode Co-heating	155
10	IZBOR EKONOMSKI OPRAVDANE TEHNOLOGIJE OBNOVE VANJSKIH ZIDOVA I ANALIZA UŠTEDA	161
11	MATEMATIČKI MODELI PROCJENE U VRIJEDNOSTI TEMPERATURNOM METODOM.....	165
11.1	Odabir statističke metode i varijabli modela	165
11.2	Razvoj modela procjene U vrijednosti vanjskih zidova.....	168
11.3	Modeli procjene U vrijednosti vanjskih zidova.....	170
11.4	Validacija modela procjene U vrijednosti vanjskih zidova	171
11.5	Prednosti i ograničenja korištenja modela	173
12	SMJERNICE ZA PROVOĐENJE IN SITU ISPITIVANJA TEMPERATURNOM METODOM	174
13	ZAKLJUČAK I SMJERNICE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA.....	176
13.1	Zaključak.....	176
13.2	Smjernice za daljnja istraživanja	179
	LITERATURA.....	180
	PRILOZI	190
	PRILOG 1 – Deskriptivna statistika baze podataka za razvoj modela procjene U vrijednosti temperaturnom metodom	191
	PRILOG 2 – Prikaz korelacije zavisne varijable i nezavisnih varijabli	194
	CURRICULUM VITAE.....	211

POPIS ILUSTRACIJA

Slika 2.1 Debljina toplinske izolacije zidova u 2001. godini [64]	9
Slika 2.2 Debljina toplinske izolacije zidova za pojedine zemlje Europe od 1982. do 2001. godine [64].....	9
Slika 2.3 Udio ukupne potrošnje u zgradama u 2019. godini u ukupnoj potrošnji finalne energije [65]	10
Slika 2.4 Pregled stambenog i nestambenog fonda prema godini izgradnje	11
Slika 2.5 Procijenjena potrošnja korisne energije po m ² stana u odnosu na godinu izgradnje [69].....	12
Slika 2.6 Nacrt Strategije energetskog razvitka Republike Hrvatske, 1998. godina [71]	13
Slika 2.7 Grafički prikaz razvoja propisa u području uštede energije i toplinske zaštite u zgradama	21
Slika 2.8 Najveće dopuštene U vrijednosti za: a) vanjski zid, b) krov, c) strop iznad vanjskog zraka i d) pod na tlu, ovisno o zakonskoj regulativi.....	23
Slika 2.9 Najveće dopuštene U vrijednosti za: a) vanjski zid, b) krov, c) strop iznad vanjskog zraka i d) pod na tlu, ovisno o zakonskoj regulativi prema karakterističnim razdobljima izgradnje zgrada	24
Slika 3.1 Prijenos topline kroz vanjski zid	29
Slika 3.2 Odnos toplinske provodljivosti i: a) gustoće materijala b) srednje temperature [92]	30
Slika 3.3 Grafički prikaz in-situ metoda za mjerenje U-vrijednosti	33
Slika 3.4 Shematski prikaz određivanja U vrijednosti metodom mjerenja toplinskog toka kroz građevne dijelove prema normi ISO 9869-1:2014	34
Slika 3.5 Shematski prikaz određivanja U vrijednosti metodom mjerenja toplinskog toka kroz građevne dijelove pomoću jednostavne vruće komore u ljetnim uvjetima	41
Slika 3.6 Shematski prikaz određivanja U vrijednosti metodom infracrvene termografije prema normi ISO 9869-2:2018	43
Slika 3.7 Shematski prikaz određivanja U vrijednosti primjenom temperaturne metode	49
Slika 3.8 Shematski prikaz određivanja U vrijednosti primjenom NCaR metode.....	52
Slika 4.1 Geometrija komore	57
Slika 4.2. Izvedba komore za ispitivanje.....	58
Slika 4.3 Prikaz izvedbe unutarnjeg sloja žbuke.....	58
Slika 4.4 Postavljanje toplinske izolacije od ekspandiranog polistirena	59
Slika 4.5 Postavljanje toplinske izolacije od kamene vune	59
Slika 4.6 Zidanje zida od šuplje blok opeke.....	60
Slika 4.7 Zidanje zida od pune opeke.....	60
Slika 4.8 Zidanje zida od brušene šuplje blok opeke.....	61
Slika 4.9 Zidanje zida od brušene šuplje blok opeke s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune	62
Slika 4.10 Zidanje zida od zidnih elemenata od porastog betona	62
Slika 4.11 Dimenzije betonskih blokova s recikliranom opekom i kalupi korišteni za izradu betonskih blokova	63
Slika 4.12 Unutarnja (lijevo) i vanjska strana (desno) izvedenog zida od betonskih zidnih elemenata s recikliranom opekom.....	63

Slika 4.13 Zidanje zida od betonskih zidnih elemenata s recikliranom opekom	64
Slika 4.14 Shematski prikaz lokacija mjerne opreme: a) pogled i presjek istok unutra, b) pogled i presjek zapad unutra i c) pogled istok i zapad vani	70
Slika 4.15 Uređaj Testo 435-4, sonda s trostrukim sustavom senzora za mjerenje temperature površine zida (T_w) i senzorom na priključku sonde za određivanje unutarnje temperature zraka (T_i) te bežična sonda za određivanje vanjske temperature zraka (T_e) [201]	72
Slika 4.16 Uređaj TRSYS01 za mjerenje toplinskog otpora i U vrijednosti građevnih dijelova	73
Slika 5.1 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 1/Ia	75
Slika 5.2 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 1/IIa	75
Slika 5.3 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 1/IIIa	75
Slika 5.4 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 1/IIIb	76
Slika 5.5 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 2/Ia	77
Slika 5.6 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 2/IIa	77
Slika 5.7 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 2/IIIa	77
Slika 5.8 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 2/IIIb	78
Slika 5.9 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 3/Ib	79
Slika 5.10 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 3/IIb	79
Slika 5.11 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 3/IIIb	79
Slika 5.12 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 3/IIIc	80
Slika 5.13 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 4/Ib	81
Slika 5.14 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 4/IIb	81
Slika 5.15 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 4/IIIb	81

Slika 5.16 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 4/IIIc.....	82
Slika 5.17 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 5/Ib.....	83
Slika 5.18 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 5/IIc.....	83
Slika 5.19 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 5/IIIc.....	83
Slika 5.20 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 5/IIIb.....	84
Slika 5.21 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 6/Ib.....	85
Slika 5.22 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 6/IIc.....	85
Slika 5.23 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 6/IIIc.....	85
Slika 5.24 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 6/IIIb.....	86
Slika 5.25 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model 3/IIIb.....	86
Slika 5.26 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model 4/IIIb.....	87
Slika 5.27 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model 5/IIIb.....	87
Slika 5.28 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model 6/IIIb.....	87
Slika 5.29 Prikaz dobivenih U vrijednosti HFM i temperaturnom metodom tijekom sezone grijanja, model 5/Ib... 88	88
Slika 5.30 Prikaz dobivenih U vrijednosti HFM i temperaturnom metodom tijekom sezone grijanja, model 5/IIIb. 88	88
Slika 5.31 Prikaz dobivenih U vrijednosti HFM i temperaturnom metodom tijekom sezone grijanja, model 6/Ib... 89	89
Slika 5.32 Prikaz dobivenih U vrijednosti HFM i temperaturnom metodom tijekom sezone grijanja, model 6/IIIb. 89	89
Slika 6.1 Usporedni prikaz rezultata numeričke simulacije U vrijednosti i in situ mjerenja TBM-om, model 2/Ia... 91	91
Slika 6.2 Usporedni prikaz rezultata numeričke simulacije U vrijednosti i in situ mjerenja TBM-om, model 2/IIa.. 91	91
Slika 6.3 Usporedni prikaz rezultata numeričke simulacije U vrijednosti i in situ mjerenja TBM-om, model 2/IIIa. 92	92
Slika 6.4 Usporedni prikaz rezultata numeričke simulacije U vrijednosti i in situ mjerenja TBM-om, model 2/IIIb. 92	92
Slika 6.5 Usporedni prikaz rezultata numeričke simulacije U vrijednosti i in situ mjerenja TBM-om, model 1/Ia... 92	92
Slika 6.6 Usporedni prikaz rezultata numeričke simulacije U vrijednosti i in situ mjerenja TBM-om, model 1/IIa.. 93	93
Slika 6.7 Usporedni prikaz rezultata numeričke simulacije U vrijednosti i in situ mjerenja TBM-om, model 1/IIIa. 93	93

Slika 6.8 Usporedni prikaz rezultata numeričke simulacije U vrijednosti i in situ mjerenja TBM-om, model 1/IIIb.	93
Slika 7.1 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 1/Ia	100
Slika 7.2 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 1/Ia	100
Slika 7.3 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 1/IIa	101
Slika 7.4 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 1/IIa	101
Slika 7.5 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 1/IIIa	102
Slika 7.6 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 1/IIIa	102
Slika 7.7 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 1/IIIb	103
Slika 7.8 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 1/IIIb	103
Slika 7.9 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 2/Ia	107
Slika 7.10 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 2/Ia	107
Slika 7.11 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 2/IIa	108
Slika 7.12 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 2/IIa	108
Slika 7.13 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 2/IIIa	109
Slika 7.14 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 2/IIIa	109
Slika 7.15 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 2/IIIb	110
Slika 7.16 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 2/IIIb	110
Slika 7.17 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 3/Ib	114
Slika 7.18 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 3/Ib	114
Slika 7.19 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 3/IIb	115
Slika 7.20 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 3/IIb	115
Slika 7.21 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 3/IIIb	116
Slika 7.22 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 3/IIIb	116
Slika 7.23 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 3/IIIc	117
Slika 7.24 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 3/IIIc	117
Slika 7.25 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 4/Ib	121
Slika 7.26. Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 4/Ib	121
Slika 7.27 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 4/IIb	122
Slika 7.28 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 4/IIb	122
Slika 7.29 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 4/IIIb	123
Slika 7.30 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 4/IIIb	123
Slika 7.31 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 4/IIIc	124
Slika 7.32 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 4/IIIc	124
Slika 7.33 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 5/Ib	128
Slika 7.34 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 5/Ib	128
Slika 7.35 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 5/IIc	129
Slika 7.36 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 5/IIc	129

Slika 7.37 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 5/IIIc	130
Slika 7.38 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 5/IIIc	130
Slika 7.39 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 5/IIIb	131
Slika 7.40 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 5/IIIb	131
Slika 7.41 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 6/Ib	135
Slika 7.42 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 6/Ib	135
Slika 7.43 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 6/IIc	136
Slika 7.44 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 6/IIc	136
Slika 7.45 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 6/IIIc	137
Slika 7.46 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 6/IIIc	137
Slika 7.47 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 6/IIIb	138
Slika 7.48 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 6/IIIb	138
Slika 7.49 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici nakon 14 dana ispitivanja, model TIP 3/IIIb	140
Slika 7.50 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici nakon 14 dana ispitivanja, model 4/IIIb	141
Slika 7.51 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici nakon 30 dana ispitivanja, model 5/IIIb	141
Slika 7.52 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici nakon 30 dana ispitivanja, model 6/IIIb	141
Slika 7.53 Srednje U vrijednosti in situ ispitivanja TBM-om i HFM metodom u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 5/Ib	145
Slika 7.54 Srednje U vrijednosti in situ ispitivanja TBM-om i HFM metodom u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 5/IIIb	145
Slika 7.55 Srednje U vrijednosti in situ ispitivanja TBM-om i HFM metodom u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 6/Ib	146
Slika 7.56 Srednje U vrijednosti in situ ispitivanja TBM-om i HFM metodom u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 6/IIIb	146
Slika 9.1 Dijagram toka provođenja Co-heating testa.....	153
Slika 9.2 Oprema za ispitivanje zrakopropusnosti komore Blower door metodom	155
Slika 9.3 Oprema za in situ ispitivanje U vrijednosti TBM-om i HFM metodom	155
Slika 9.4 Usporedni prikaz rezultata Co-heating testa i projektnih vrijednosti	158
Slika 9.5 Usporedni prikaz rezultata Co-heating testa i projektnih vrijednosti dobivenih korištenjem izmjerene vrijednosti n_{50} i stvarnih U vrijednosti izmjerenih HFM metodom	159
Slika 9.6 Usporedni prikaz rezultata Co-heating testa i projektnih vrijednosti dobivenih korištenjem izmjerene vrijednosti n_{50} i stvarnih U vrijednosti izmjerenih TBM metodom.....	159
Slika 9.7 Usporedba odstupanja projektnih i stvarnih toplinskih gubitaka	160

POPIS TABLICA

Tablica 2.1 Struktura ukupno potrošene energije po godinama i sektorima potrošnje u PJ [65, 67, 68]	10
Tablica 2.2 Pregled nacionalnog fonda zgrada Republike Hrvatske prema godini izgradnje i namjeni [66].....	11
Tablica 2.3 Godišnja potrebna toplinska finalna energija za grijanje i godišnja potrošnja finalne energije za kontinentalnu i primorsku Hrvatsku (kWh/m ² a) [66].....	12
Tablica 2.4 Traženi zahtjevi u pogledu racionalne uporabe energije i toplinske zaštite u zgradama u ovisnosti o promjenama zakonske regulative	20
Tablica 3.1 Karakteristične vrijednosti koeficijenta prijelaza topline konvekcijom [85].....	27
Tablica 3.2 Sažeti prikaz prethodnih ispitivanja U vrijednosti korištenjem HFM metode	38
Tablica 3.3 Sažeti prikaz rezultata ispitivanja U vrijednosti korištenjem SHB-HFM metode.....	42
Tablica 3.4 Sažeti prikaz rezultata ispitivanja U vrijednosti korištenjem metode IC termografije.....	46
Tablica 3.5 Sažeti pregled ispitivanja TBM-om za određivanje U vrijednosti vanjskih zidova	51
Tablica 3.6 Sažeti pregled ispitivanja provedenog NCaR metodom za određivanje U vrijednosti vanjskih zidova.....	53
Tablica 3.7 Usporedba metoda za in situ mjerenje U vrijednosti s obzirom na točnost, troškove, trajanje i postupak ispitivanja.....	54
Tablica 4.1 Pregled eksperimentalno ispitanih zidova	56
Tablica 4.2 Koeficijenti toplinske provodljivosti ugrađenih zidnih elemenata preuzeti od proizvođača.....	65
Tablica 4.3 Podatci o ispitnim uzorcima i rezultati ispitivanja toplinske provodljivosti pune opeke.....	65
Tablica 4.4 Podatci o ispitnom uzorku i rezultati ispitivanja toplinske provodljivosti ploče samozbijajućeg betona s recikliranom opekrom	66
Tablica 4.5 Pregled eksperimentalno ispitanih zidova i U vrijednosti dobivenih proračunom	67
Tablica 4.6. Glavne tehničke specifikacije korištene opreme	71
Tablica 5.1 Prikaz ispitanih modela TIP 1, uvjeta i trajanja ispitivanja.....	74
Tablica 5.2 Prikaz ispitanih modela TIP 2, uvjeta i trajanja ispitivanja.....	76
Tablica 5.3 Prikaz ispitanih modela TIP 3, uvjeta i trajanja ispitivanja.....	78
Tablica 5.4 Prikaz ispitanih modela TIP 4, uvjeta i trajanja ispitivanja.....	80
Tablica 5.5 Prikaz ispitanih modela TIP 5, uvjeta i trajanja ispitivanja.....	82
Tablica 5.6 Prikaz ispitanih modela TIP 6, uvjeta i trajanja ispitivanja.....	84
Tablica 6.1 Sažeti prikaz numerički modeliranih zidova	90
Tablica 6.2 Sažeti prikaz i usporedba rezultata eksperimentalno i numerički određenih U vrijednosti	91
Tablica 7.1 Uvjeti ispitivanja, izmjerene srednje U vrijednosti, teorijske U vrijednosti i odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti modela TIP 1.....	98
Tablica 7.2 Izmjerene U vrijednosti sa mjernim nesigurnostima, odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti i koeficijent varijacije U vrijednosti, modeli TIP 1	104
Tablica 7.3 Uvjeti ispitivanja, izmjerene srednje U vrijednosti, teorijske U vrijednosti i odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti modela TIP 2.....	105

Tablica 7.4 Izmjerene U vrijednosti sa mjernim nesigurnostima, odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti i koeficijent varijacije U vrijednosti, modeli TIP 2.....	111
Tablica 7.5 Uvjeti ispitivanja, izmjerene srednje U vrijednosti, teorijske U vrijednosti i odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti modela TIP 3.....	112
Tablica 7.6 Izmjerene U vrijednosti sa mjernim nesigurnostima, odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti i koeficijent varijacije U vrijednosti, modeli TIP 3.....	118
Tablica 7.7 Uvjeti ispitivanja, izmjerene srednje U vrijednosti, teorijske U vrijednosti i odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti modela TIP 4.....	119
Tablica 7.8 Izmjerene U vrijednosti sa mjernim nesigurnostima, odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti i koeficijent varijacije U vrijednosti, modeli TIP 4.....	125
Tablica 7.9 Izmjerene srednje U vrijednosti, teorijske U vrijednosti i odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti modela TIP 5.....	126
Tablica 7.10 Izmjerene U vrijednosti sa mjernim nesigurnostima, odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti i koeficijent varijacije U vrijednosti, modeli TIP 5.....	132
Tablica 7.11 Uvjeti ispitivanja, izmjerene srednje U vrijednosti, teorijske U vrijednosti i odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti modela TIP 6.....	133
Tablica 7.12 Izmjerene U vrijednosti sa mjernim nesigurnostima, odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti i koeficijent varijacije U vrijednosti, modeli TIP 6.....	139
Tablica 7.13 Izmjerene srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima, odstupanje između teorijskih i izmjerenih U vrijednosti i koeficijent varijacije izmjerenih U vrijednosti.....	142
Tablica 7.14 Sažeti prikaz rezultata in situ ispitivanja U vrijednosti, teorijskih U vrijednosti i usporedbe između teorijskih i izmjerenih U vrijednosti.....	144
Tablica 7.15 Usporedni prikaz rezultata mjerenja za pročišćeni i cijeli set podataka.....	148
Tablica 8.1 Koeficijenti prijelaza topline konvekcijom i zračenjem.....	150
Tablica 8.2 Usporedni prikaz U vrijednosti dobivenih ispitivanjem različitim metodama.....	151
Tablica 9.1 Temperaturni korekcijski faktori f_k za toplinske gubitke prema različitim okolnim plohama [211].....	154
Tablica 9.2 Sažeti prikaz U vrijednosti eksperimentalno ispitanih zidova.....	156
Tablica 9.3. Rezultati Co-heating testa.....	156
Tablica 9.4. Projektne vrijednosti ukupnih ventilacijskih i transmisivskih toplinskih gubitaka te koeficijenata toplinskih gubitaka.....	157
Tablica 10.1 Karakteristike obiteljske kuće.....	161
Tablica 10.2 Proračunske, in situ izmjerene i procijenjene U vrijednosti vanjskih zidova.....	162
Tablica 10.3 Rezultati proračuna potrebne toplinske energije za grijanje, troškova i emisije CO ₂	163
Tablica 10.4 Početni trošak ulaganja i godišnja ušteda troškova energetske obnove vanjskih zidova.....	163
Tablica 10.5 Razdoblje povrata i jednostavna stopa povrata.....	164
Tablica 11.1 Popis mogućih neovisnih varijabli za razvoj modela procjene U vrijednosti temperaturnom metodom.....	166

Tablica 11.2 Opis predloženih modela	166
Tablica 11.3 Koeficijenti korelacije neovisnih i ovisne varijable	166
Tablica 11.4 Deskriptivna statistika uzoraka.....	167
Tablica 11.5 Chaddockova ljestvica jakosti veze [218]	169
Tablica 11.6 Vrijednosti koeficijenta determinacije, srednje apsolutne greške i korijena srednje kvadratne pogreške	169
Tablica 11.7 Prijedlog modela procjene U vrijednosti.....	170
Tablica 11.8 Predloženi modeli procjene U vrijednosti	170
Tablica 11.9 Maksimalne i minimalne vrijednosti varijabli modela i vrijednosti varijabli testnih uzoraka vanjskih zidova	171
Tablica 11.10 Rezultati validacije predloženih modela procjene U vrijednosti.....	172

POPIS KRATICA I SIMBOLA

U	koeficijent prolaska topline (U vrijednost)
nZEB	Nearly Zero Energy Building
HFM	Heat flow meter
TBM	Temperature based method
ΔT	razlika između unutarnje i vanjske temperature zraka
HEP	Hrvatska elektroprivreda
INA	Industrija nafte
NAPEnU	Nacionalni akcijski plan energetske učinkovitosti
SFRJ	Socijalistička Federativna Republika Jugoslavija
λ	koeficijent toplinske provodljivosti
TPRUETZZ	Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama
Q	toplina
m	masa
c	specifični toplinski kapacitet
\emptyset	toplinski tok
t	vrijeme
q	gustoća toplinskog toka
h	plošni koeficijent prijelaza topline
q	gustoća toplinskog toka
Q	toplinski tok
A	površina
Δx	debljina sloja
h_c	koeficijent prijelaza topline konvekcijom
T_s	temperatura površine
T_f	temperatura fluida
c	brzina elektromagnenog vala
λ	valna duljina
ν	frekvencija
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)
T	temperatura okoline
ε	koeficijent emisivnosti površine
h_r	koeficijent prijelaza topline zračenjem
R	toplinski otpor
d	debljina sloja
R_T	ukupni toplinski otpor

R_{si}	unutarnji plošni otpor prijelaza topline
R_{se}	vanjski plošni otpor prijelazu topline
R_s	plošni otpor prijelazu topline
h_{r0}	koeficijent prijelaza topline zračenjem crnog tijela
T_m	srednja temperatura površine i njene okoline
h_{ci}, h_{in}	koeficijent prijelaza topline konvekcijom na unutarnjim plohama
h_{ce}, h_{out}	koeficijent prijelaza topline konvekcijom na vanjskim plohama
v	brzina vjetra
T_i, T_l	unutarnja temperatura zraka
T_e, T_E	vanjska temperatura zraka
$\dot{T}_{I,i}$ i $\dot{T}_{E,i}$	vremenske derivacije unutarnje i vanjske temperature
β_n	eksponencijalne funkcije vremenske konstante
$\tau_n, K_1, K_2, P_n,$ i Q_n	dinamičke karakteristike zida koje ovise o vremenskoj konstanti τ_n
U_c	teorijska U vrijednost
σ	odstupanje
TCB-HFM	Temperature control box-heat flow meter
SHB-HFM	Simple hot box-heat flow meter
N	ukupan broj mjerenja
T_{si}, T_w	temperatura unutarnje površine zida
T_{se}	temperatura vanjske površine zida
θ_{ni}, θ_i	unutarnja temperatura zraka
θ_{ne}, θ_e	vanjska temperatura zraka
θ_n	temperatura zraka
θ_s	temperatura površine zida
θ_{si}	temperatura unutarnje površine zida
GHB	Guarded Hot Box
THM	Thermometric method
ASTR	Air-surface temperature ratio method
T_{si}	temperatura površine tijela
h_i	unutarnji plošni koeficijent prijelaza topline
NCaR	Natural Convection and Radiation method
C i n	konstante izraza za proračun koeficijenta prijelaza topline konvekcijom
IC, ICT	infracrvena termografija
EPS	ekspandirani polistiren
KV	kamena vuna
ACI	American Concrete Institute

λ_d	projektna vrijednost toplinske provodljivosti
$\lambda_{10,dry}$	toplinska provodljivost pri +10°C, u suhom stanju
U_t	teorijska (proračunska) U vrijednost
α	koeficijent unutarnjeg prijelaza topline
V	Koeficijent varijacije
U_m	izmjerena U vrijednost
$\overline{U_m}$	srednja vrijednost izmjerenih U vrijednosti
n	ukupan broj podataka
$\frac{\delta f}{\delta x_i}$	koeficijenti osjetljivosti
$u(x_i)$	standardne nesigurnosti neovisnih mjerenih veličina
u_c	sastavljena standardna nesigurnost
U_{mf}	pročišćena izmjerena U vrijednost
σ_f	odstupanje pročišćenih podataka
THL	Total heat losses
HLC	Heat loss coefficient
HLP	Heat Loss Parameter
Q	ukupna izmjerena potrošnja energije za grijanje prostora
R	solarni otvor zgrade
S	sunčevo zračenje
$\Sigma U \times A$	ukupni transmisivni toplinski gubitak kroz ovojnicu
C_v	ventilacijski toplinski gubitak
A_k	površina građevnog elementa
f_k	temperaturni korekcijski faktor
$\Phi_{T,i}$	ukupni transmisivni toplinski gubici
$\theta_{int,i}$	unutarnja projektna temperatura
θ_e	vanjska projektna temperatura
$H_{v,i}$	ukupni koeficijent ventilacijskih toplinskih gubitaka
V_i	volumen grijanog prostora (i)
n_{min}	minimalan broj izmjena unutarnjeg zraka s vanjskim zrakom
$\Phi_{V,i}$	ukupni ventilacijski toplinski gubici
H_i	ukupni toplinski gubici
$U_{m,HFM}$	izmjerena U vrijednost TBM-om
$U_{m,TBM}$	izmjerena U vrijednost HFM metodom
E	električna energija
Q	energija

A_k	korisna površina
V_e	obujam grijanog dijela zgrade
f_0	faktor oblika
U_p	procijenjene U vrijednosti na temelju predloženih matematičkih modela
$Q''_{h,nd}$	specifična godišnja potrebna toplinska energija za grijanje
E''_{prim}	specifična godišnja primarna energija
E''_{del}	specifična godišnja isporučena energija
$T_i - T_w$	razlika između unutarnje temperature zraka i temperature na površini zida
MAE	Mean Absolute Error
R^2	koeficijent determinacije
RMSE	Root-mean-square error
PU	procjena U vrijednosti
A_c	Model Accuracy
PC	U vrijednost predviđena modelom
AC	stvarna U vrijednost

1 UVOD

Strategija smanjenja potrošnje energije na prostoru Europske unije je povećanje energetske učinkovitosti. U području zgradarstva, cilj je povećati energetske učinkovitosti postojećih i novih zgrada budući da prema Direktivi europskog parlamenta i vijeća Europske Unije (EU) 2018/844 [1] do 2050. godine sve nove zgrade i postojeće zgrade trebaju zadovoljiti kriterije zgrade gotovo nulte energije (*eng. nearly Zero Energy Building, nZEB*). S obzirom na to da se godišnje gradi tek 1 do 3 % novih zgrada [2], a 75% postojećeg fonda zgrada je energetski neučinkovito [3], najveći izazov i glavni zadatak u ostvarenju cilja energetski visokoučinkovitog i dekarboniziranog fonda zgrada predstavlja povećanje stope, kvalitete i učinkovitosti energetske obnove postojećih zgrada.

Prilikom planiranja energetske obnove postojećih zgrada i provođenja energetskih pregleda, ocjena stvarne toplinske kvalitete ovojnice zgrade od ključne je važnosti jer utječe na donošenje odluka o izboru ekonomski opravdanih tehnologija energetske obnove i provedbu mjera za uštedu energije kako bi se povećala energetska učinkovitost zgrada. Od svih parametara, najvažniji čimbenik koji se koristi za opisivanje toplinskih svojstava zgrada, a time i ukupne energetske učinkovitosti neke zgrade je koeficijent prolaska topline (U vrijednost) [4]. Prema analizi osjetljivosti koju su proveli Majcen et al. [5, 6] pokazalo se da čak i neznatne promjene U vrijednosti rezultiraju značajnim promjenama u potrebama energije za grijanjem [5, 6].

Najznačajniji dio energetske potrošnje zgrada predstavlja potrošnja toplinske energije za grijanje prostora i pripremu potrošne tople vode. Budući da velik postotak zgrada građenih prije više desetljeća ne odgovara standardima i današnjim propisima iz područja toplinske zaštite i energetske učinkovitosti velik dio potrošene energije za grijanje nepotrebno se gubi kroz vanjsku ovojnicu. Od svih elemenata ovojnice, vanjski zidovi najčešće čine najveći postotak površine ovojnice zgrada [4, 7] te samim tim imaju i najveći utjecaj na energetske bilancu zgrade (EN ISO 13790) [8]. Iz tog razloga, prilikom energetske obnove postojećih zgrada najčešće primijenjena troškovno učinkovita mjera jest rekonstrukcija vanjskih zidova izvedbom dodatne toplinske izolacije. S obzirom na to da se najveći dio toplinske energije gubi upravo kroz vanjske zidove te da svako precjenjivanje ili podcjenjivanje toplinskih svojstava direktno utječe na energetske učinkovitost i potrošnju energije u zgradama, a samim time na troškove uporabe zgrade, izuzetno je važno prilikom energetskog pregleda utvrditi stvarna toplinska svojstva odnosno stvarne U vrijednosti vanjskih zidova.

Stvarne U vrijednosti vanjskih zidova postojećih zgrada moguće je trenutno odrediti korištenjem proračunskih i/ili eksperimentalnih metoda. Međutim, kako se kod postojećih građevina, a posebno kod povijesnih građevina često javlja problem ograničenosti ili nedostupnosti informacija o primijenjenim materijalima i tehnologijama izvedbe, metode proračuna koje se temelje na HRN EN ISO 6946:2017 [9] nisu uvijek primjenjive te se ne smatraju dovoljno pouzdanima. Isto tako, laboratorijske metode za određivanje U vrijednosti često su ograničene u primjeni ili ih nije moguće primijeniti, primjerice kod povijesno zaštićenih zgrada. Od svih metoda pokazalo se da su in situ mjerenja vrlo korisna za određivanje stvarnih toplinskih svojstava građevinskih dijelova postojećih građevina, posebice jer vrijednosti utvrđene mjerenjem na terenu u stvarnim uvjetima mogu značajno varirati od teorijskih vrijednosti. Pri

tome, najveća prednost pridaje se nerazornim metodama jer ne oštećuju konstrukciju ili uzrokuju samo manja površinska oštećenja.

Brojna istraživanja provedena od 1990. do danas pokazala su postojanje nesrazmjera između očekivane i stvarne potrošnje energije [5, 6, 10-15], kao i nesrazmjera između izmjerenih i proračunskih vrijednosti toplinskih svojstava građevnih elemenata [16-22]. Prema talijanskoj normi UNI 10351, razlike između laboratorijskih mjerenja i stvarnih vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti novih materijala variraju u rasponu od 5% do 50%, ovisno o starosti materijala, vrsti materijala, prosječnim udjelima vlage te o načinu izvedbe instalacija [3, 15, 16]. Također, na temelju brojnih istraživanja utvrđeno je da razlike između U vrijednosti zidova izmjerenih in situ različitim metodama i teorijskih vrijednosti variraju i do 153% [19], zbog čega je često teško odlučiti koji postupak mjerenja koristiti.

S obzirom na postojanje velikih razlika između stvarnih i projektiranih toplinskih svojstava zgrada te trenutno postavljenog zahtjeva za postizanje gotovo nulte energije, sve veći broj stručnjaka i znanstvenika pridaje značaj razvoju i uporabi nerazornih eksperimentalnih in situ metoda za određivanje stvarnih toplinskih svojstava u postojećim zgradama kako bi se utvrdile odgovarajuće tehnologije sanacije, odredili troškovi sanacije, njihov životni vijek i isplativost ulaganja, ostvarilo smanjenje emisije CO₂ te povećala udobnost i kvaliteta življenja.

Prva in situ mjerenja toplinskih karakteristika vanjskih zidova novih i postojećih zgrada provedena su početkom 1980-ih godina [23-25], a prvo izdanje norme ISO 9869 [26] za mjerenje toplinskog otpora i toplinske prohodnosti in situ metodom mjerenja protoka topline kroz građevinske elemente (eng. Heat flow meter method, HFM method) objavljeno je 1994. godine. Ova norma je revidirana i zamijenjena novim izdanjem u 2014. godini (ISO 9869-1:2014) [27]. HFM metoda je poznata, opisana formulama i u normi, ali je teško provediva na terenu. Brojna istraživanja u kojima je HFM metoda korištena pokazala su odstupanja mjerenih vrijednosti i preko 100% u odnosu na teorijske [20, 28, 29], a terenska mjerenja su provođena i po nekoliko godina. Osim in situ ispitivanja HFM metodom, od 2018. godine normom ISO 9869-2:2018 [30] definirano je mjerenje toplinskog otpora i toplinske prohodnosti in situ korištenjem kvantitativne infracrvene termografije.

Do danas, proveden je velik broj istraživanja primjenom HFM metode [16, 19-21, 28, 29, 31-37] i kvantitativne metode infracrvene termografije [17, 38-50] za određivanje U vrijednosti. S obzirom na uočene brojne nedostatke i ograničenja metoda propisanih normama, mnogi autori nedavno su pokazali sve veći interes za daljnjim poboljšanjem i razvojem postojećih i novih in situ metodologija za određivanje stvarnih toplinskih svojstava građevnih dijelova.

Pri provedbi energetskih pregleda podaci o karakteristikama ovojnice zgrade, a time i zidova su potrebni brzo, utječu na donošenje odluka o mjerama za povećanje energetske učinkovitosti i isplativosti tih mjera. Stoga je osnovna ideja pronaći brzu, jednostavnu i jeftinu metodu te definirati točnost i uvjete njezine primjene. S ciljem poboljšanja točnosti i pouzdanosti in situ mjerenja U vrijednosti građevnih dijelova, čak i u ljetnim uvjetima u kojima se teško provode i postižu pouzdani podatci [28, 51, 52], kao i skraćivanja vremena ispitivanja potrebnog za pouzdanu procjenu, nekoliko autora predložilo je nove metode. Jedna od tih metoda je i temperaturna metoda (eng.

Temperature based method, TBM) za određivanje U vrijednosti. Iako se temperaturna metoda koristi u praksi [53], još uvijek nije detaljno istražena mogućnost pouzdane procjene toplinskih svojstava izmjerenih ovom metodom. Do danas, samo je nekoliko istraživača proučavalo ponašanje vanjskih zidova u stvarnim uvjetima koristeći ovu metodu [53-59] za koju rezultati provedenih istraživanja upućuju na potencijalnu mogućnost primjene. Značajne prednosti temperature metode u odnosu na standardizirane metode poput brzine provođenja mjerenja, jednostavnosti obrade podataka i smanjenih troškova ispitivanja, ali i uočeni nedostaci ukazuju na potrebu daljnjeg istraživanja s ciljem razvoja inženjerski prihvatljive metode za in situ određivanje U vrijednosti vanjskih zidova.

1.1 Predmet i ciljevi istraživanja

Cilj istraživanja je doprinijeti razvoju eksperimentalne in situ temperature metode za određivanje U vrijednosti. Istraživanjem će se osigurati šira praktična primjena temperature metode na postojećim građevinama uz povećanje točnosti rezultata dobivenih mjerenjem, a u svrhu odabira ekonomski opravdanih tehnologija obnove vanjskih zidova postojećih zgrada i definiranja ušteda koje je moguće ostvariti na troškovima obnove i tijekom razdoblja uporabe zgrada.

Vrednovanje eksperimentalne in situ temperature metode za određivanje U vrijednosti, kao najvažnijeg čimbenika za određivanje toplinskih značajki građevnih dijelova, provest će se na temelju vlastitih eksperimentalnih i numeričkih rezultata te usporedbom s proračunskih metodama. Primjenjivost temperature metode i uvjeti primjene utvrdit će se izradom i provedbom in situ eksperimentalnih istraživanja u 3 faze - na zidu načinjenom od različitih zidnih elemenata (pune opeke, šuplje blok opeke, brušene šuplje blok opeke, blokova od porastog betona, brušene šuplje blok opeke s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune, betonskih blokova s recikliranom opekam) bez i s dvije vrste toplinske izolacije. Opisat će se tehnologija izvođenja zidnih elemenata s recikliranim opekam koji su razvijeni na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek kako bi se omogućila njihova šira primjena. Na temelju određenih koeficijenata korelacije između koeficijenata prolaska topline dobivenih nerazornom eksperimentalnom temperaturnom metodom, vrijednosti dobivenih proračunskom metodom i parametara utvrđenih mjerenjem izradit će se matematički model koji će omogućiti detaljniji uvid u toplinske karakteristike građevnih dijelova postojećih građevina (točnije zida) i primjenu na postojećim građevinama.

1.2 Hipoteze istraživanja

Hipoteze istraživanja i rada su sljedeće:

H1: Moguća je primjena temperature metode za ispitivanje koeficijenta prolaska topline vanjskih zidova in situ.

H2: Primjenom temperature metode moguće je odabrati primjerenu tehnologiju energetske obnove vanjskih zidova postojećih zgrada čime će se ostvariti uštede tijekom razdoblja uporabe zgrade.

H3: Moguće je na osnovu eksperimentalnih rezultata mjerenja definirati pojednostavljeni matematički model za predviđanje koeficijenta prolaska topline vanjskih zidova temperaturnom metodom.

1.3 Znanstvene metode i metodologija istraživanja

Tijekom predloženog istraživanja koristit će se dvije metode: (1) eksperimentalno i (2) numeričko istraživanje. Eksperimentalni dio (ispitivanje 18 modela zidova, od čega 6 modela toplinski neizoliranih i 12 modela toplinski izoliranih zidova) provesti će se s dvije nerazorne in situ metode: metodom mjerenja toplinskog toka (eng. Heat flow meter method, HFM method) i temperaturnom metodom (eng. Temperature Based Method, TBM), u laboratoriju na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek.

Predviđeno je provođenje vlastitih eksperimentalnih ispitivanja u okviru znanstveno istraživačkog projekta "Vrednovanje eksperimentalnih metoda za određivanje koeficijenta prolaska topline u kontroliranim uvjetima", financiranom od strane Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek na sljedećim vrstama zidova:

1. Neizolirani zid od šuplje blok opeke
2. Zid od šuplje blok opeke toplinski izoliran ekspaniranim polistirenom
3. Zid od šuplje blok opeke toplinski izoliran kamenom vunom
4. Neizolirani zid od pune opeke
5. Zid od pune opeke toplinski izoliran ekspaniranim polistirenom
6. Zid od pune opeke toplinski izoliran kamenom vunom
7. Neizolirani zid od brušene šuplje blok opeke
8. Zid od brušene šuplje blok opeke toplinski izoliran ekspaniranim polistirenom
9. Zid od brušene šuplje blok opeke toplinski izoliran kamenom vunom
10. Neizolirani zid od blokova od porastog betona
11. Zid od blokova od porastog betona toplinski izoliran ekspaniranim polistirenom
12. Zid od blokova od porastog betona toplinski izoliran kamenom vunom
13. Neizolirani zid od brušene šuplje blok opeke s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune
14. Zid od brušene šuplje blok opeke s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune toplinski izoliran ekspaniranim polistirenom
15. Zid od brušene šuplje blok opeke s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune toplinski izoliran kamenom vunom
16. Neizolirani zid od betonskih blokova s recikliranom opekom
17. Zid od betonskih blokova s recikliranom opekom toplinski izoliran ekspaniranim polistirenom
18. Zid od betonskih blokova s recikliranom opekom toplinski izoliran kamenom vunom.

Do sada, istraživanja nisu provedena u kontroliranim uvjetima kakvi se predviđaju u navedenom projektu i ovoj doktorskoj disertaciji. S obzirom na to da se normama zahtijevaju stabilni meteorološki uvjeti (bez sunčevog zračenja, bez oborina uz što manji utjecaj vjetra), za potrebe istraživanja izgradit će se komora za ispitivanje unutar negrijane zgrade. Na taj način s vanjske strane komore simulirat će se vanjske temperature bez nepoželjnog sunčevog zračenja (izravnog i reflektirajućeg), oborina i strujanja zraka. Budući da je plošni koeficijent prijelaza topline najvažniji parametar koji utječe na rezultate mjerenja temperaturnom metodom tijekom ispitivanja mjerit će

se i dodatni fizikalni parametri (relativna vlažnost zraka, brzina strujanja zraka, površinske temperature okolnih elemenata komore i emisivnost). Navedeni parametri koristeće se za izračun plošnog koeficijenta prijelaza topline budući da vrijednost preporučena u normi nije reprezentativna u svim uvjetima primjene. Mjerenje dodatnih fizikalnih parametara koristeće se za analizu vanjskih utjecaja na mjerenje U vrijednosti vanjskih zidova i korekciju dobivenih vrijednosti. Prilikom provođenja mjerenja planira se i upotreba metode infracrvene termografije za određivanje lokacije senzora kako bi se izbjegla mjesta toplinskih mostova, nepravilnosti, pukotina i sl. što može značajno utjecati na rezultate mjerenja. Tijekom ispitivanja provodit će se mjerenje potrošnje energije u kWh za održavanje unutarnje temperature te će se provesti ispitivanja zrakopropusnosti na temelju kojih će se odrediti toplinski gubici tzv. Co-heating test.

Budući da smjernice za provođenje mjerenja dane od strane proizvođača uređaja ne obuhvaćaju sve faktore koji mogu imati utjecaj na rezultate ispitivanja, planira se na temelju provedenih ispitivanja izraditi detaljne smjernice i kriterije za provođenje mjerenja U vrijednosti temperaturnom metodom.

S ciljem proširenja saznanja o pouzdanosti mjerenja temperaturnom metodom nakon provedenih eksperimentalnih ispitivanja, provest će se numeričko modeliranje zida korištenjem ulaznih parametara dobivenih mjerenjem. Numeričko istraživanje provest će se u računalnom programu CHAMPS-BES za simulaciju prijenosa topline, zraka i vlage u zgradama. U vrijednosti dobivene numeričkim simulacijama usporedit će se s eksperimentalnim rezultatima.

Povezivanje eksperimentalnih i analitičkih rezultata se planira definiranjem koeficijenata korelacije, razvojem matematičkog modela i uporabom analize osjetljivosti. Analizom osjetljivosti definirat će se relevantni parametri koji utječu na rezultate mjerenja U vrijednosti koji će se potom koristiti kao ulazni parametri matematičkog modela predviđanja U vrijednosti na postojećim građevnim dijelovima.

Navedene metode koristeće se s ciljem razvoja brze i pouzdane eksperimentalne metode određivanja U vrijednosti građevnih dijelova postojećih zgrada za koje se trenutno koriste podatci koji su isti kao i za nove zgrade ne uzimajući u obzir različite utjecajne parametre. Na osnovu dobivenih rezultata definirat će se smjernice i upute za praktičnu primjenu temperaturne metode s ciljem povećanja pouzdanosti pri procjeni stvarnih toplinskih svojstava zgrada prilikom provođenja energetskih pregleda zgrada. Analiza ušteda, koje je moguće ostvariti na troškovima obnove i tijekom razdoblja uporabe zgrada primjenom temperaturne metode za određivanje U vrijednosti, provest će se na primjerima vanjskih zidova postojećih zgrada. Izbor ekonomski opravdanih tehnologija obnove vanjskih zidova postojećih zgrada analizirat će se na primjerima vanjskih zidova postojećih zgrada.

U nastavku teksta dan je kratki prikaz metodologije istraživanja:

1. Izrada modela zidova u mjerilu 1:1.
2. Eksperimentalno ispitivanje izoliranih i neizoliranih zidova. Ukupno će se ispitati 18 modela u različitim uvjetima, s ciljem unaprijeđenja temperaturne metode za in situ određivanje U vrijednosti vanjskih zidova postojećih zgrada.

3. Prikaz rezultata eksperimentalnih ispitivanja.
4. Numeričko modeliranje zida, analiza i usporedba rezultata numeričkih simulacija s eksperimentalnim rezultatima.
5. Obrada rezultata eksperimentalnih ispitivanja. Vrednovanje eksperimentalne in situ temperaturne metode za određivanje U vrijednosti analizom utjecaja razlike temperature između unutarnjeg i vanjskog zraka ostvarene tijekom ispitivanja (ΔT), točnosti mjerne opreme i vremena trajanja ispitivanja na točnost izmjerenih U vrijednosti te usporedba s teorijskim U vrijednostima određenima prema HRN EN ISO 6946:2017 [9].
6. Analiza utjecaja plošnog koeficijenta prijelaza topline na rezultate in situ ispitivanja.
7. Analiza rezultata primjenom Co-heating testa.
8. Utjecaj rezultata in situ ispitivanja U vrijednosti na izbor ekonomski opravdanih tehnologija obnove vanjskih zidova te analiza ušteda koje je moguće ostvariti na troškovima obnove i tijekom razdoblja uporabe zgrada.
9. Razvoj matematičkih modela procjene U vrijednosti na temelju rezultata in situ ispitivanja temperaturnom metodom.
10. Definiranje smjernica za provođenje in situ ispitivanja temperaturnom metodom.

Metodologija za in situ ispitivanje U vrijednosti neprozirnih građevnih dijelova – vanjskih zidova eksperimentalne zgrade, koristit će se s ciljem:

- Utvrđivanja usklađenosti rezultata dobivenih temperaturnom metodom s teorijskim izračunom prema normi HRN EN ISO 6946:2017 [9] i HFM metodom prema ISO 9869-1:2014 [27];
- Vrednovanja primjenjivosti metode na različitim vrstama zidovima (lagani, masivni, izolirani i neizolirani);
- Izrade pojednostavljenog matematičkog modela predviđanja U vrijednosti temperaturnom metodom.
- Izrade smjernica i uputa za praktičnu primjenu temperaturne metode s ciljem povećanja pouzdanosti pri procjeni stvarnih toplinskih svojstava zgrada prilikom provođenja energetskih pregleda zgrada;
- Analize ušteda, koje je moguće ostvariti na troškovima obnove i tijekom razdoblja uporabe zgrada primjenom temperaturne metode za određivanje U vrijednosti;
- Izboru ekonomski opravdanih tehnologija obnove vanjskih zidova postojećih zgrada.

1.4 Očekivani izvorni znanstveni doprinos

Izvorni znanstveni doprinos se sastoji u:

1. Unaprijeđenju temperaturne metode za određivanje koeficijenta prolaska topline vanjskih zidova s ciljem smanjenja troškova, povećanja točnosti i brzine ispitivanja.
2. Doprinosu izboru ekonomski opravdanih tehnologija energetske obnove vanjskih zidova.
3. Doprinosu smanjenju troškova uporabe postojećih zgrada nakon energetski učinkovite obnove zgrada.
4. Izradi smjernica i uputa za praktičnu primjenu temperaturne metode s ciljem povećanja pouzdanosti pri procjeni stvarnih toplinskih svojstava zgrada prilikom provođenja energetskih pregleda zgrada.

5. Doprinosu spoznaji o kritičnim ulaznim podacima s obzirom na točnost izmjerenih U vrijednosti sa svrhom pronalaženja pojednostavljenog matematičkog modela. Studijom osjetljivosti definirat će se kritični parametri koji utječu na rezultate mjerenja koeficijenta prolaska topline vanjskih zidova.

2 TOPLINSKA ZAŠTITA U GRAĐEVINARSTVU

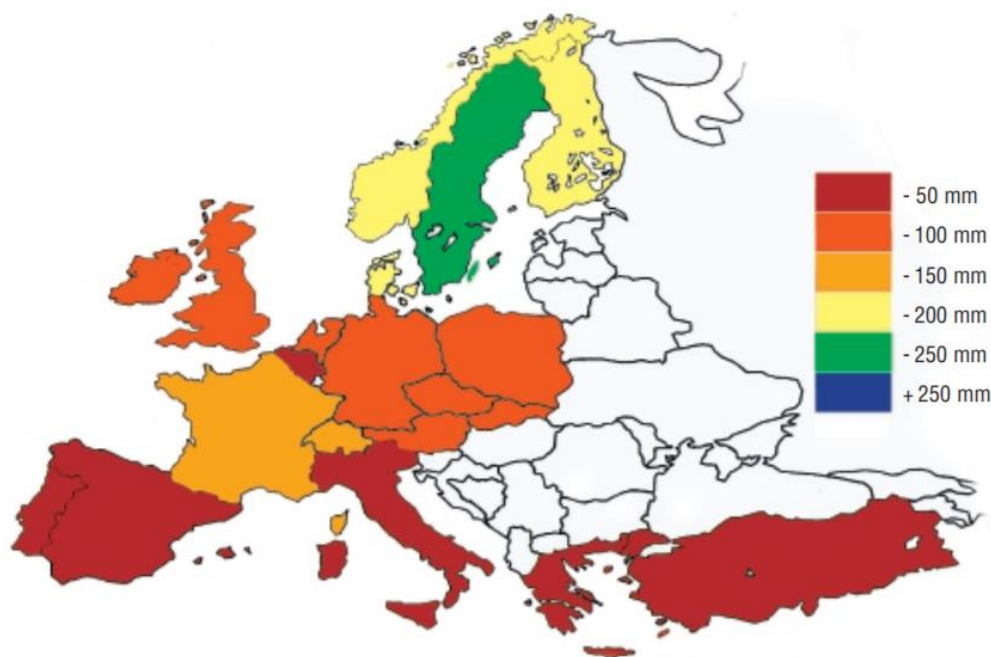
Toplinska zaštita jedno je od osnovnih područja građevinske fizike, a podrazumijeva poduzimanje arhitektonsko-građevinskih mjera u cilju osiguranja optimalnih uvjeta zdravog i udobnog boravka te racionalne i ekonomične potrošnje energije, sprječavanja kondenzacije vodene pare i pojave građevinskih šteta konstrukcija kao posljedica lošeg projektiranja i izvođenja [60, 61]. Prema *Novaković* [62] toplinska zaštita tehnička je mjera kojom se sprječavaju gubici topline i održava projektirana temperatura u prostorijama pri srednjim najnižim temperaturama vanjskog zraka definiranih propisom.

Problematika toplinske zaštite značajna je jer se odnosi na ljude i njihov boravak u zgradama. Zgrada se u kontekstu toplinske zaštite promatra kao objekt zaštite ljudi od neželjenih vanjskih utjecaja [63]. Na zgrade se dakle, osim zahtjeva u pogledu nosivosti i trajnosti postavljaju dodatni zahtjevi za postizanje odgovarajuće toplinske i zvučne ugodnosti u prostorijama u kojima borave ljudi. Današnji osnovni konstrukcijski materijali, koji zgradi osiguravaju nosivost i krutost, zbog loših toplinsko izolacijskih svojstava ne zadovoljavaju aktualne propise u pogledu toplinske zaštite i racionalne uporabe energije. Stoga je potrebno, kako bi se zaštitili od vanjskih utjecaja i njihovih posljedica, dodatno zaštititi zgradu odnosno dodatno ju toplinski izolirati primjenom toplinskoizolacijskih materijala. Pravilnom primjenom odgovarajuće toplinske izolacije smanjuju se toplinski gubici preko ovojnice zgrade tijekom zimskog razdoblja, što posredno utječe na smanjenje troškova za grijanje, a neposredno na čovjekov boravak u prostoru jer su površine zidova toplije. Također, tijekom ljetnog razdoblja toplinska izolacija štiti nosivu konstrukciju od jakih temperaturnih naprezanja, a prostorije od pregrijavanja.

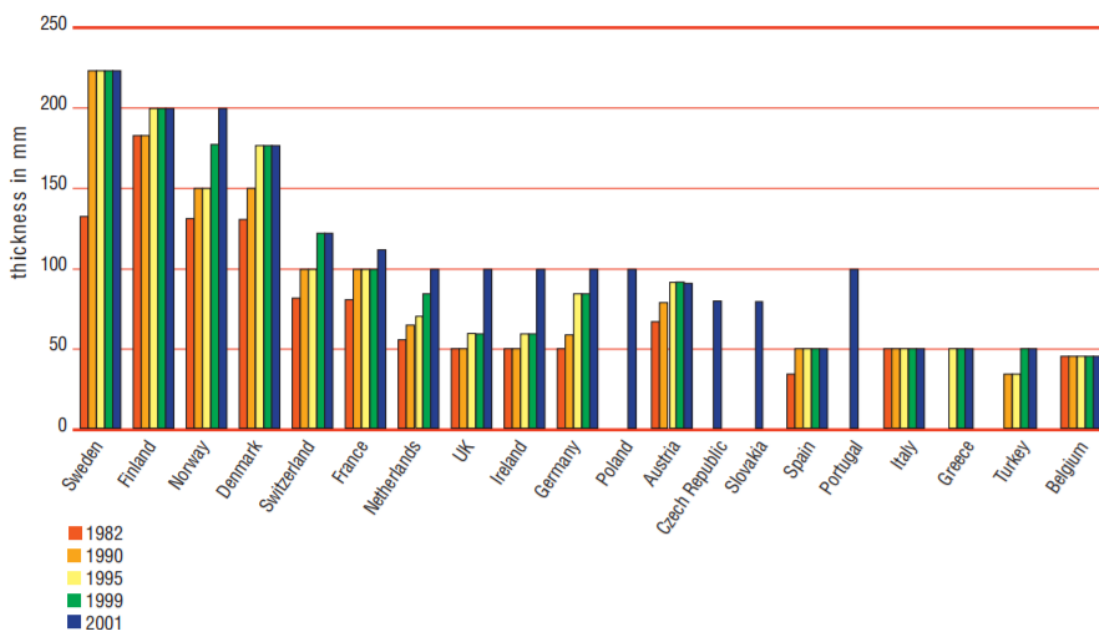
Toplinska zaštita zgrada ima dakle dvije uloge, funkcionalnu i ekonomsku [63]. Funkcionalna uloga toplinske zaštite je osiguranje povoljnih mikroklimatskih uvjeta u prostoru zgrade i dovoljne trajnosti zgrade. S druge strane, ekonomska uloga toplinske zaštite zasniva se na činjenici da se s višom razinom toplinske zaštite smanjuju troškovi grijanja kroz cijelo razdoblje korištenja zgrade, ali uz veće investicijske troškove pri čemu je potrebno provesti optimizaciju s obzirom na glavne ciljeve toplinske zaštite [63].

Na ostvarivanje ciljeva toplinske zaštite, uz kvalitetu izvedbe i debljinu upotrebljenoga materijala, značajan utjecaj imaju karakteristike građevinskih elemenata od kojih su najznačajnije koeficijent prolaska topline (U vrijednost) odnosno toplinski otpor građevinskih elemenata, specifični toplinski gubici zgrade, akumulacija topline građevinskih elemenata, difuzija vodene pare kroz građevinske elemente i toplinska stabilnost vanjskih građevnih dijelova [60].

Debljina odnosno razina primijenjene toplinske izolacije mijenjala se tijekom povijesti s obzirom na važeći propis i propisane minimalne zahtjeve toplinske zaštite te stupanj razvoja tehnologije. Za razdoblje od 1982. do 2001. godine europsko udruženje proizvođača izolacije – EURIMA proučilo je razvoj standarda toplinske izolacije u novim stanovima u Europi pri čemu su se usredotočili na debljinu (mm) toplinske izolacije od mineralne vune, propisane i primijenjene u novogradnji. Istraživanje je pokazalo kontinuirani napredak u povećanju standarda izolacije u nekoliko zemalja, osobito u središnjoj Europi, a rezultati studije prikazani su na slici 2.1 i slici 2.2 [64].



Slika 2.1 Debljina toplinske izolacije zidova u 2001. godini [64]

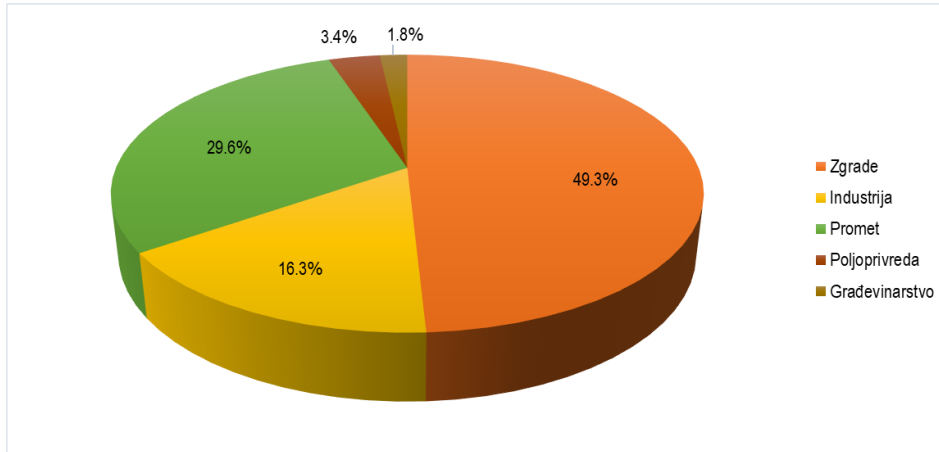


Slika 2.2 Debljina toplinske izolacije zidova za pojedine zemlje Europe od 1982. do 2001. godine [64]

2.1 Energetsko stanje zgrada u Republici Hrvatskoj

Zgrade su u Republici Hrvatskoj, u usporedbi s dva najznačajnija područja - prometom i industrijom, najveći potrošači energije. Prema posljednjem objavljenom godišnjem energetsom pregledu iz 2019. godine, udio ukupne potrošnje energije u zgradama, koje čine kućanstva i usluge, u ukupnoj potrošnji finalne energije smanjio se u odnosu na prethodnu 2018. godinu te iznosi 49,3 %, slika 2.3. [65]. Najveći udio pri tome, u potrošnji energije, ali i u ukupnoj izgradnji imaju stambene zgrade koje čine 86% ukupnog fonda zgrada Republike Hrvatske [66].

Najznačajniji dio energetske potrošnje tih zgrada predstavlja potrošnja toplinske energije za grijanje prostora i pripremu potrošne tople vode, a porastom standarda života raste i potrošnja energije za hlađenje. U tablici 2.1 prikazan je trend potrošnje finalne energije po sektorima potrošnje od 2009. do 2019. godine.



Slika 2.3 Udio ukupne potrošnje u zgradama u 2019. godini u ukupnoj potrošnji finalne energije [65]

Tablica 2.1 Struktura ukupno potrošene energije po godinama i sektorima potrošnje u PJ [65, 67, 68]

Godina	2009.	2010.	2011.	2012.	2013.	2014.	2015.	2016.	2017.	2018.	2019.
Sektor											
Kućanstva	75,75	116,02	110,73	107,32	104,38	93,76	101,83	100,85	100,15	96,23	93,71
Industrija	51,14	50,3	46,96	41,56	40,92	40,63	40,42	40,30	44,48	44,62	44,75
Promet	89,84	86,8	85,39	84,02	85,49	84,53	88,37	90,71	98,04	97,54	101,84
Uslužni sektor	30,06	32,13	31,6	30,36	29,49	28,07	30,75	31,65	33,22	33,73	34,05
Poljoprivreda	10,47	10,27	10,49	9,61	9,47	9,7	9,64	9,78	9,65	9,84	9,94
Građevinarstvo	6,72	5,39	5,16	4,79	4,6	4,16	4,16	4,05	4,00	4,32	4,56
Ukupna potrošnja	263,98	300,91	290,33	277,66	274,35	260,85	275,17	277,34	289,54	286,28	288,85

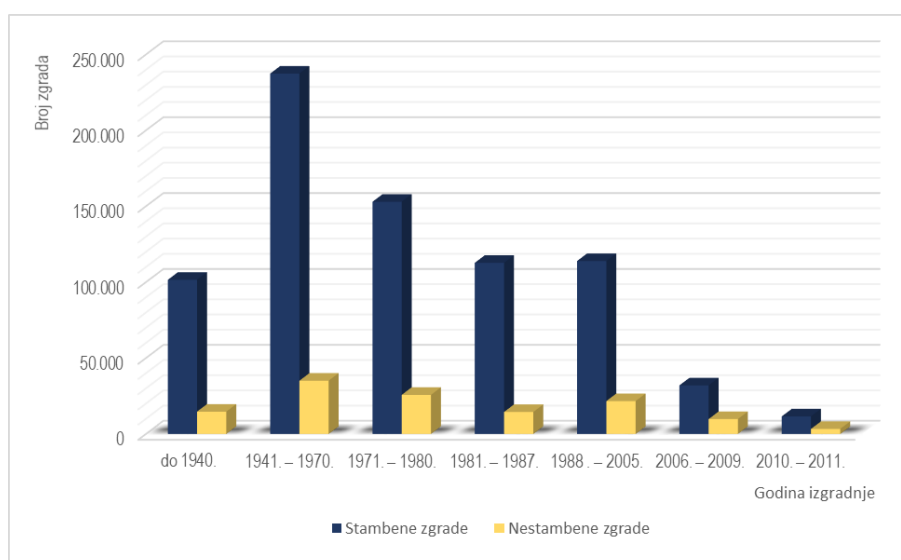
Energetska svojstva, karakteristike i energetska potrošnja zgrada u velikoj mjeri određuje razdoblje izgradnje kao i postojanje odnosno primjena propisa o toplinskoj zaštiti zgrada. Nepostojanje te kasnije nepotpunost regulative razlozi su što značajan dio postojećih zgrada izgrađenih prije nekoliko desetljeća ima veliki utjecaj na okoliš i potrošnju energije. Opća kvaliteta zgrada u Republici Hrvatskoj mijenjala se tijekom različitih razdoblja izgradnje kao posljedica različitih klimatskih, gospodarskih, tehničko-tehnoloških i socioloških utjecaja, a poseban utjecaj na kvalitetu i samim tim potrošnju energije imala je cijena energije potrebna za zagrijavanje i propisi iz područja toplinske zaštite zgrada [7]. Prije donošenja prvog propisa koji je uređivao područje uštede energije i toplinske zaštite u zgradama izgrađeno je gotovo 50% fonda zgrada Republike Hrvatske od čega 40% čine stambene zgrade, tablica 2.2 i slika 2.4 [66]. Prema procjenama, navedene stambene zgrade za grijanje troše između 230 i 250 kWh/m² korisne energije [66]. Pod korisnom energijom podrazumijeva se energija za zadovoljavanje potreba krajnjih korisnika (npr. toplina radijatora). Potrošnja korisne energije zgrada po m² stana ovisno o godini izgradnje za ekstremne procijenjene vrijednosti potrošnje prikazana je na slici 2.5, a u tablici 2.3 prikazana je procijenjena

godišnja potrebna toplinska energija za grijanje i godišnja potrošnja finalne energije za grijanje, hlađenje, potrošnu toplu vodu i rasvjetu po m² za primorsku i kontinentalnu Hrvatsku s obzirom na godinu izgradnje i namjenu zgrade.

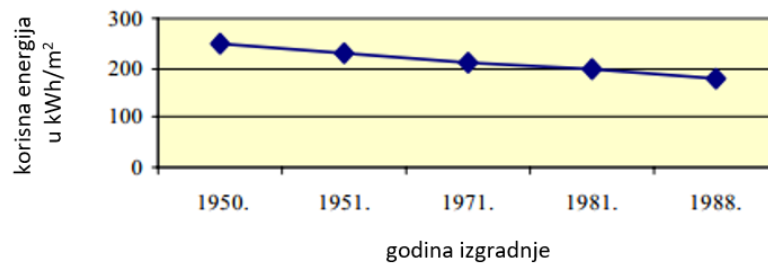
Tablica 2.2 Pregled nacionalnog fonda zgrada Republike Hrvatske prema godini izgradnje i namjeni [66]

Stambeni fond Republike Hrvatske prema godini izgradnje				
Godina izgradnje	Višestambene zgrade		Obiteljske kuće	
	Broj	Površina	Broj	Površina
do 1940.	37.201	5.830.983	64.391	10.092.805
1941. – 1970.	85.959	13.473.337	151.507	23.747.572
1971. – 1980.	59.882	10.398.113	93.109	16.167.887
1981. – 1987.	44.434	9.401.527	68.348	14.461.473
1988. – 2005.	38.358	8.177.401	75.615	16.120.249
2006. – 2009.	18.256	6.199.252	13.762	4.673.079
2010. – 2011.	6.600	1.957.449	4.976	1.475.551
Ukupno	290.690	55.438.062	471.708	86.738.616

Nestambeni fond Republike Hrvatske prema godini izgradnje				
Godina izgradnje	Zgrade komercijalne namjene		Zgrade javne namjene	
	Broj	Površina	Broj	Površina
do 1940.	2.338	1.498.159	12.365	1.545.813
1941. – 1970.	12.587	8.064.602	22.525	2.815.845
1971. – 1980.	6.733	5.251.934	19.021	1.882.000
1981. – 1987.	4.323	5.108.279	10.158	2.152.000
1988. – 2005.	10.596	8.107.287	11.059	2.722.497
2006. – 2009.	6.199	6.352.000	3.673	2.073.747
2010. – 2011.	1.952	2.158.198	1.395	610.000
Ukupno	44.728	36.540.459	80.196	13.801.902



Slika 2.4 Pregled stambenog i nestambenog fonda prema godini izgradnje



Slika 2.5 Procijenjena potrošnja korisne energije po m² stana u odnosu na godinu izgradnje [69]

Tablica 2.3 Godišnja potrebna toplinska finalna energija za grijanje i godišnja potrošnja finalne energije za kontinentalnu i primorsku Hrvatsku (kWh/m²a) [66]

Namjena zgrade	Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje [kWh/m ² a]													
	Kontinentalna Hrvatska							Primorska Hrvatska						
	do 1940.	1941.-1970.	1971.-1980.	1981.-1987.	1988.-2005.	2006.-2009.	2010.-2011.	do 1940.	1941.-1970.	1971.-1980.	1981.-1987.	1988.-2005.	2006.-2009.	2010.-2011.
Višestambene zgrade	270	200	190	180	150	90	70	122	90	86	81	68	41	32
Obiteljske kuće	300	320	304	288	240	144	112	141	150	143	135	113	68	53
Nestambene zgrade javne namjene	190	247	271	169	125	102	62	95	125	135	87	79	65	32
Nestambene zgrade komercijalne namjene	229	298	326	204	150	123	75	115	150	163	105	95	78	38
Namjena zgrade	Godišnja potrošnja finalne energije za grijanje, hlađenje, pripremu potrošne tople vode i rasvjetu [kWh/m ² a]													
	Kontinentalna Hrvatska							Primorska Hrvatska						
	do 1940.	1941.-1970.	1971.-1980.	1981.-1987.	1988.-2005.	2006.-2009.	2010.-2011.	do 1940.	1941.-1970.	1971.-1980.	1981.-1987.	1988.-2005.	2006.-2009.	2010.-2011.
Višestambene zgrade	477	354	336	318	265	159	124	216	159	152	143	120	72	57
Obiteljske kuće	530	566	537	509	424	255	198	249	265	253	239	200	120	94
Nestambene zgrade javne namjene	237	367	473	374	332	282	148	119	224	336	281	385	305	139
Nestambene zgrade komercijalne namjene	286	443	570	451	400	340	178	143	270	404	339	464	368	167

Problem postojećih stambenih zgrada građenih prije donošenja prvih propisa u pogledu toplinske zaštite te prema istraživanjima i stambenih zgrada građenih sve do 1987. godine, jest taj da takve zgrade imaju gotovo nikakvu ili samo minimalnu toplinsku izolaciju te ne ispunjavaju trenutno važeće zahtjeve vezane uz energetske učinkovitost. Upravo te stambene zgrade građene do 1987. godine, koje čine 68% ukupnog fonda zgrada, troše najveću količinu energije [66]. Problem zgrada građenih prije nekoliko desetljeća predstavljaju i toplinski gubici koji se, prema istraživanjima, kod takvih starih zgrada kreću i do 300 kWh/m² godišnje [70].

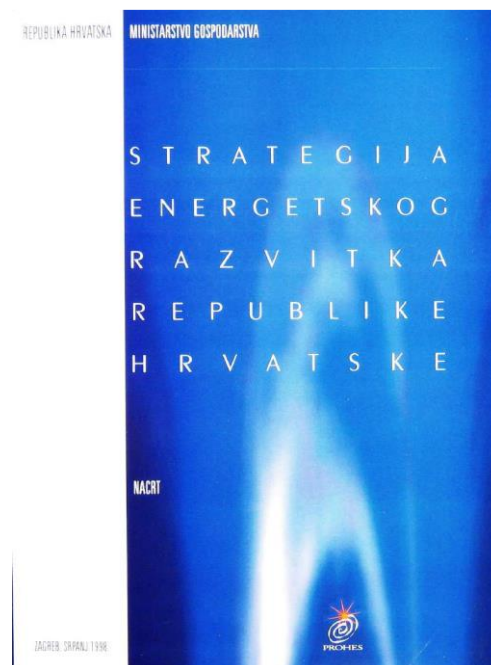
2.2 Strategije energetskog razvitka Republike Hrvatske

Energetski sektor svake zemlje utječe na njezinu gospodarsku aktivnost i ekonomski rast te je usko povezan i ima značaj utjecaj na okoliš. Najveći problemi s kojima se, u pogledu energije, svijet suočava vezani su uz povećanu potrošnju energije, nesigurnost u opskrbi energijom, stalni porast cijena energije i energenata, zagađenje okoliša i klimatske promjene uzrokovane neracionalnom potrošnjom. S obzirom na ozbiljnost problema u svim zemljama Europske unije, pa tako i u Republici Hrvatskoj, narasla je svijest o potrebi jasnog upravljanja energetskim razvojem, smanjenju uvozne ovisnosti i racionalnoj potrošnji energije, donesene su određene mjere, a dosadašnji

nekontrolirani pristup potrošnji energije prepoznat je i prihvaćen kao neodrživ. Povećanje energetske učinkovitosti postalo je glavni cilj svih strategija na globalnoj i nacionalnoj razini, a u zakonodavni i institucionalni okvir energetskega sektora uvrštena je energetska učinkovitost i uporaba obnovljivih izvora energije.

Značajnu ulogu u pogledu energetike i promjena u energetskega sektoru u cilju izgradnje organiziranog sustava gospodarenja energijom u Republici Hrvatskoj imaju strategije energetskega razvitka. Prva Strategija energetskega razvitka Republike Hrvatske usvojena je 2002. godine (NN 38/02), druga 2009. godine (NN 130/2009), a 2020. godine objavljena je važeća Strategija energetskega razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu.

Prvi nacrt *Strategije energetskega razvitka Republike Hrvatske* objavljen je 1998. godine, slika 2.6. Prema nacrtu, Strategija razvitka energetskega sektora definira se kao dokument o promjeni i izgradnji novog sustava gospodarenja energijom u Republici Hrvatskoj [71].



Slika 2.6 Nacrt Strategije energetskega razvitka Republike Hrvatske, 1998. godina [71]

Podlogu za izradu nacrtu Strategije činio je niz znanstvenih istraživanja provedenih u razdoblju od 1995. do 1998. godine, a početkom 1997. godine pokrenuti su i Nacionalni energetskega programi od kojih je za područje zgradarstva posebno značajan KUEN_{zgrada} (Program energetskega efikasnosti u zgradarstvu). Osim zgradarstva, Nacionalnim energetskega programima obuhvaćena su sva značajna područja energetskega potrošnje. Temelj strategije su održivi razvoj i zaštita okoliš, a njezino donošenje bilo je izraz nacionalnih potreba. Strategijom su predložena rješenja u cilju postizanja promjena u energetskega sektoru u skladu s interesima Republike Hrvatske vodeći računa o potrebi da Republika Hrvatska razvija svoja energetskega tržišta usklađeno sa standardima razvijenih zemalja. Načela Strategije temeljena su, između ostalog, na zakonodavnom reguliranju energetskega sektora s četiri zakona (Zakon o energiji i tri zakona o tržištima električne energije, plina i derivata nafte), restrukturiranju HEP-a i INE, poticanju

plinifikacije, poticanju korištenja obnovljivih izvora i korištenju čistih tehnologija, jačanju pozicije potrošača, obrazovanju, informiranju, savjetovanju i radu s javnošću.

Intenzivna reforma energetskega sektora započela je 2001. godine kada je uz *Zakon o energiji* donesen prvi paket energetskega zakona kojima je postavljen pravni okvir za reformu energetskega sektora u skladu sa zakonodavstvom Europske Unije. Kao dio ukupne strategije gospodarskega razvitka Republike Hrvatske, nakon nacrtu Strategije iz 1998. godine, Hrvatski sabor donio je 2002. godine *Strategiju energetskega razvitka Republike Hrvatske* [72]. *Zakonom o energiji* Strategija energetskega razvoja definirana je kao osnovni akt kojim se utvrđuje energetska politika i planira energetskega razvoj Republike Hrvatske [72]. Donošenje Strategije bilo je potrebno zbog preuzetih međunarodnih obveza u zaštiti okoliša, te zbog prilagodbe energetskega sektora uvjetima gospodarenja energijom u Europskoj uniji. Naime, cilj strategije bio je stvoriti nužne preduvjete za uključivanje Republike Hrvatske u Europsku Uniju kada se za to stvore politički i gospodarski uvjeti te su predložena rješenja koja omogućavaju promjene u energetskega sektoru prilagođeno potrebama i specifičnostima Republike Hrvatske. Strategijom su utvrđeni ciljevi i aktivnosti za razdoblje do 2010. godine, ocrtni su mogući problemi i rješenja za razdoblje nakon 2010. godine odnosno do 2030. godine, obuhvaćene su tadašnje i buduće tehnologije u cijelom procesu proizvodnje, transformacije, prijenosa i distribucije i potrošnje energije, promjene odnosa i načina gospodarenja energijom te razdoblje u kojem će Hrvatska biti izvan, ali i u Europskoj uniji. U navedenom razdoblju postavljeni su ciljevi: povećanja energetske efikasnosti, sigurne dobave i opskrbe, diverzifikacije energenata i izvora, korištenja obnovljivih izvora energije, realnih cijena energije i razvitka energetskega tržišta i poduzetništva te zaštite okoliša, koji se odnose na harmoniziranje održivog razvitka i organiziranog sustava gospodarenja energijom [73]. Kroz strategiju se također analiziraju i: značajke i stanje energetskega sektora, osnovne pretpostavke društvenog i gospodarskega razvitka, mogućnosti razvitka energetskega sektora, ciljevi i politika energetske efikasnosti, ciljevi i politika korištenja obnovljivih izvora, energetika i zaštita okoliša, privatni sektor u energetici, financiranje, zakonodavstvo, organizacija na državnoj te lokalnoj i područnoj razini, tehnološki razvitak, obrazovanje i međunarodna suradnja, javnost, informiranje i savjetovanje, mjere za realizaciju energetske strategije te ekonomske i administrativne posljedice.

U Strategiji iz 2002. godine uočena je i potreba i strateška važnost osnivanja *Fonda zaštite okoliša i energetske efikasnosti* za financiranje energetske efikasnosti i obnovljivih izvora energije te za daljnji razvitak energetskega sektora i zaštite okoliša. Fond za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost osnovan je donošenjem *Zakona o Fondu za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost* objavljenog u Narodnim novinama br. 107/03, a na temelju odredbi *Zakona o zaštiti okoliša* (NN 82/94 i 128/99) i *Zakona o energiji* (NN 68/01).

Prije isteka *Zakonom o energiji* propisanog desetogodišnjeg razdoblja od usvajanja Strategije energetskega razvitka iz 2002. godine, Hrvatski sabor donio je krajem 2009. godine, *Strategiju energetskega razvoja Republike Hrvatske* (NN 130/09) [74]. Strategija je donesena kao rezultat bitnih međunarodnih i unutarnjih promjena. Naime, od usvajanja Strategije iz 2002. godine Republika Hrvatska postala je kandidat za punopravno članstvo u Europskoj uniji, prihvatila je sporazum o Energetskega zajednici te potpisala i ratificirala Kyotski protokol uz Okvirnu konvenciju

UN o promjeni klime. Navedene promjene utjecale su na energetske stanje u Republici Hrvatskoj i potrebu prilagodbe i nadogradnje nacionalne energetske strategije. Tako je potpisivanjem Sporazuma o stabilizaciji i pridruživanju, Republika Hrvatska preuzela obveze u energetske sektoru koje se odnose na preuzimanje pravne stečevine Europske unije u području energetike, otvaranje i razvoj hrvatskog tržišta energije i njegovu integraciju u unutarnje tržište energije Europske unije, a ratifikacijom Kyotskog protokola preuzela je obvezu smanjenja emisija stakleničkih plinova za 5% u razdoblju od 2008. do 2012. godine [74]. Usvojena Strategija energetske razvoja Republike Hrvatske donesena je za razdoblje do 2020. godine, a sama provedba predviđena je programom energetske učinkovitosti u razdoblju od 2009. do 2016. godine. Strategijom, Republika Hrvatska slijedi tri temeljna energetska cilja: sigurnost opskrbe energijom, konkurentnost energetske sustava i održivost energetske razvoja. Odrednica i cilj Strategije je povećanje energetske učinkovitosti u svim segmentima energetske sektora, a posebice u sektorima neposredne potrošnje energije. Pod neposrednom potrošnjom energije podrazumijeva se energija predana krajnjim korisnicima u industriji, prometu i općoj potrošnji koja obuhvaća kućanstva, usluge, graditeljstvo i poljoprivredu [74]. Prema Strategiji, učinkovita uporaba energije smatra se temeljem razvoja svih sektora energetske sustava te se povećanje energetske učinkovitosti promatra kao novi izvor energije [74]. Načini i aktivnosti kojima će se ciljevi vezani uz energetske učinkovitosti u pojedinim sektorima neposredne potrošnje ispuniti, prema Strategiji, određuju se u Programu energetske učinkovitosti koji predstavlja podlogu na temelju koje se donosi Nacionalni akcijski plan energetske učinkovitosti za provođenje navedenih mjera za trogodišnje razdoblje. Do danas, u Republici Hrvatskoj donesena su četiri Nacionalna akcijska plana energetske učinkovitosti (NAPEnU) i jedan Nacionalni programa energetske učinkovitosti, a u listopadu 2019. objavljen je Nacrt Integriranog nacionalnog energetske i klimatskog plana za Republiku Hrvatsku za razdoblje od 2021. do 2030. godine. Nacionalni program energetske učinkovitosti donesen je za razdoblje od 2008. do 2016. godine, Prvi NAPEnU za razdoblje od 2008. do 2010. godine, Drugi za razdoblje do kraja 2013. godine, Treći za razdoblje od 2014. do 2016. godine te Četvrti za razdoblje od 2017. do 2019. godine.

Hrvatska je u Strategiji, osim kvalitativnih, odredila i specifične kvantitativne ciljeve politike energetske učinkovitosti usklađene s ciljevima Europske Unije za razdoblje do 2020. godine. Postavljeni kvantitativni ciljevi su smanjivanje emisija za 5% u razdoblju od 2008. do 2010. godine, smanjivanje emisije iz velikih izvora (obveznika sheme trgovanja emisijama) za 21% do 2020. u odnosu na 2005. godinu, smanjivanje emisije stakleničkih plinova za 20% u 2020. godini u odnosu na 1990. godinu, povećanje udjela obnovljivih izvora energije u bruto neposrednoj potrošnji na 20% u 2020. godini (uključujući i velike hidroelektrane), održavanje udjela proizvodnje el. energije iz obnovljivih izvora u razdoblju do 2020. godine na razini od 35% (uključujući velike hidroelektrane), 10% obnovljivih izvora energije 2020. godine u prijevozu i 9% smanjivanje neposredne potrošnje do 2016. godine primjenom mjera energetske učinkovitosti u odnosu na prosjek 2001. do 2005. godine [74]. U razdoblju do 2020. Hrvatska je postavila cilj smanjivanja neposredne potrošnje za 10%.

Budući da Strategija iz 2009. godine obuhvaća razdoblje do 2020. godine izradi nove energetske strategije pristupilo se 2018. godine imajući u vidu potrebu za dugoročnim energetske planiranjem, kao i sve stroža ograničenja u pogledu emisija stakleničkih plinova. Analitičke podloge za izradu Strategije energetske razvoja

Republike Hrvatske do 2030. s pogledom do 2050. odnosno zelenu i bijelu knjigu s konkretnim pokazateljima i scenarijima izradio je Energetski institut Hrvoje Požar sukladno smjernicama Povjerenstva, a za koje je provedeno javno savjetovanje. Na temelju analiza i podloga izrađen je Nacrt prijedloga Strategije i Strateške procjene utjecaja na okoliš, a tijekom 2019. godine provedena je javna rasprava. Strategija energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu [75] stupila je na snagu 2020. godine, a glavni ciljevi trenutno važeće Strategije su ojačanje sigurnosti opskrbe energijom, postupno smanjenje gubitaka energije i povećavanje energetske učinkovitosti, smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima, povećanje domaće proizvodnje i korištenje obnovljivih izvora energije.

2.3 Razvoj propisa o toplinskoj zaštiti zgrada

Pravno tehnička regulativa u pogledu uštede energije počinje s primjenom na našem području 1962. godine kada je donesena *Naredba o određivanju građevinskog materijala za koji se mora pribaviti atest ili se mora ispitati*, objavljena u Službenom listu SFRJ br. 15 [61]. Prema Naredbi je u materijale za koje treba pribaviti atest citiran i materijal za toplinsku zaštitu [61]. Pet godina poslije, objavljen je *Pravilnik o minimalnim tehničkim uvjetima za izgradnju stanova* (Službeni list SFRJ br. 45) kojim je po prvi puta određena minimalna toplinska zaštita objekta. Prema *Dančević* [76], navedeni pravilnik predstavlja kod nas početak detaljnijeg rješavanja i shvaćanja važnosti problematike toplinske zaštite i zaštite od buke prilikom projektiranja zgrada. Međutim, u pogledu toplinske i zvučne zaštite smatra da je vrlo oskudan te da se pridržavajući zahtjevima pravilnika ne može ništa pozitivno učiniti u smislu rješavanja problematike toplinske zaštite i buke, ali da i kao takav ipak predstavlja pozitivan napredak u ovome području [76].

Prvi propis o toplinskoj zaštiti donesen je 1970. godine pod nazivom *Pravilnik o tehničkim mjerama i uvjetima za toplotnu zaštitu zgrada*, Službeni list SFRJ broj 35/70 [77]. Navedeni pravilnik imao je veliku važnost za projektante i druge tehničke kadrove u pogledu rješavanja toplinske udobnosti prostora u kojima borave ljudi u okviru tadašnjeg trenda montažne i polumontažne tehnologije građenja uz primjenu novih materijala. Pravilnikom su određene građevinsko klimatske zone za područje tadašnje SFRJ sa srednjim vrijednostima najnižih temperatura, minimalna toplinska izolacija zgrada ograničenjem koeficijenata prolaza topline k [$\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$] (danas U vrijednost, $\text{W/m}^2\text{K}$) odnosno koeficijenata otpora prolasku topline $1/\lambda$ [$\text{W/m}^2\text{K}$] i vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za građevinske materijale. Za upotrebu materijala koji nisu definirani u propisu uvjetuje se da su računске vrijednosti toplinske provodljivosti tih materijala potvrđene atestom izdanim od strane stručne radne organizacije ovlaštene za ispitivanje toplinske provodljivosti materijala.

Deset godina kasnije, 1980. godine, donesena je norma JUS U.J5.600 – *Toplotna tehnika u građevinarstvu - Tehnički uslovi za projektovanje i građenje zgrada* [78]. Ova norma bila je iskorak u području smanjenja toplinskih gubitaka u zgradama smanjenjem dopuštenih vrijednosti koeficijenata prolaska topline građevnih dijelova u prosjeku za 30%.

Revizijom norme iz 1980. godine, 1987. godine je doneseno novo dopunjeno izdanje s pooštrenim zahtjevima u pogledu toplinske zaštite zgrada i obaveznom primjenom od 23. prosinca 1987. godine [79]. U odnosu na prethodnu normu, racionalna uporaba energije dodatno je, uz propisanu minimalnu toplinsku zaštitu zgrada, osigurana propisivanjem dopuštenih specifičnih transmisijskih toplinskih gubitaka zgrade i minimalnih gubitaka zbog prirodne ili umjetne ventilacije zgrada.

Norma pod oznakom HRN U.J5.600 vrijedila je do 2006. godine kada je zbog zastarjelosti propisa, obveze usklađivanja tehničkog zakonodavstva Republike Hrvatske (države kandidatkinje za članstvo u EU) s tehničkim zakonodavstvom Europske Unije te međunarodne obveze iz područja zaštite okoliša (Kyoto protokol) stupio na snagu novi *Tehnički propis o uštedi toplinske energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* objavljen je u Narodnim novinama broj 79/05 [80]. Donošenje *Tehničkog propisa o uštedi toplinske energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* predviđeno je za 2005. godinu u Nacionalnom programu za pridruživanje Europskoj Uniji, a odredbama Zakona o gradnji osigurao se i pravni okvir za donošenje ovog tehničkog propisa u skladu s potrebama usklađivanja s pravnim naslijeđem Europske unije. Tehničkim propisom započela je primjena Direktive o energijskim svojstvima zgrada (2002/91/EZ), obuhvaćen je bitni zahtjev «uštede energije i toplinske zaštite» naveden u Zakonu o gradnji iz Direktive o građevnim proizvodima (89/106/EEZ), a u jednom dijelu obuhvaćen je i zahtjev «higijena, zdravlje i zaštita okoliša» također naveden u Zakonu o gradnji. Zahtjevi i kriteriji vezani na uštedu energije i toplinsku zaštitu u zgradama dodatno su pooštreni u odnosu na prethodni propis te se potiče korištenje obnovljivih izvora energije i korištenje pasivnog sunčevog zračenja. Tehničkim propisom po prvi put je ograničena najveća dopuštena potrošnja toplinske energije, propisano je održavanje zgrade u odnosu na uštedu toplinske energije i toplinsku zaštitu, iskaznica potrebne topline za grijanje zgrade te su smanjene dopuštene vrijednosti koeficijenta prolaska topline građevnih dijelova. Također, Tehničkim propisom preuzete su europske norme za izradu građevno-fizikalnih proračuna iz područja toplinske zaštite, uštede energije, difuzije i kondenzacije vodene pare.

Tehnički propis o uštedi toplinske energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 79/05, 155/05, 74/06) zamijenjen je 2008. godine *Tehničkim propisom o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama*, skraćeno TPRUETZZ [81]. U propis je implementirana Direktiva 2002/91/EC o energetskim svojstvima zgrada Europskog parlamenta od 16. prosinca 2002. godine i Direktiva 89/108/EEC Europskog parlamenta od 22. prosinca 1989. godine. U usporedbi s prethodnim propisom uvedena je obveza izračunavanja potrebne toplinske energije za hlađenje ako se zgrada hladi dok su vrijednosti ograničenja najveće potrebne godišnje topline za grijanje ostale iste. Norma za proračun potrebne toplinske energije za grijanje HRN EN 832:2000 zamijenjena je stoga normom HRN EN 13790:2008 prema kojoj se, osim potrebne toplinske energije za grijanje, računa i potrebna energija za hlađenje.

Prije stupanja na snagu novog *Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* (NN 97/14) objavljene su izmjene Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 89/09, 79/13, 90/13). Izmjenama je, između ostalog, uvedeno po prvi puta ograničenje primarne energije za nove jednoobiteljske zgrade i veće rekonstrukcije postojećih zgrada u iznosu od 90 kWh/m² godišnje za gradove i mjesta

koji imaju manje od 2200 stupanj dana grijanja godišnje, odnosno 160 kWh/m² godišnje za gradove i mjesta koji imaju više ili jednako 2200 stupanj dana grijanja godišnje.

Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 97/14) objavljen je u kolovozu 2014. godine [82]. Zahtjevi ovoga propisa za racionalnu upotrebu energije i toplinsku zaštitu u zgradama, u odnosu na prethodni propis, su prošireni te se utvrđuju dodatno najvećom dopuštenom primarnom energijom po jedinici ploštine korisne površine zgrade ovisno o namjeni zgrade, najvećim dopuštenim koeficijentima prolaska topline pojedinih građevnih dijelova između grijanih dijelova zgrade različitih korisnika, učinkovitošću tehničkog sustava grijanja, hlađenja, ventilacije, klimatizacije i pripreme potrošne tople vode, najvećom dopuštenom godišnjom potrebnom energijom za rasvjetu zgrade (osim jednoobiteljskih stambenih zgrada i višestambenih zgrada), razredom učinkovitosti sustava automatizacije i upravljanja zgrade te udjelom obnovljivih izvora energije u ukupnoj potrošnji primarne energije. S obzirom na značajan utjecaj toplinskih mostova na ukupnu potrošnju energije, veliki napredak u području energetske učinkovitosti i toplinske zaštite zgrada predstavlja i novi prilog u kojemu je sadržan katalog s grafičkim prikazima dobro riješenih toplinskih mostova na zgradama. U odnosu na prethodni propis, kojim se započela obveza proračuna godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje, *Tehničkim propisom o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* (NN 97/14, NN 130/14) dodatno su propisane i vrijednosti najveće dopuštene godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje po jedinici ploštine korisne površine zgrade, najveće dopuštene godišnje potrebne primarne energije ovisno o namjeni, a vrijednosti najveće dopuštene godišnje potrebne toplinske energije za grijanje definirane su s obzirom na namjenu zgrade te su bitno izmijenjene. Najveće dopuštene vrijednosti godišnje potrebne primarne energije ovisno o namjeni definirane su i za rekonstrukciju zgrada. U skladu s daljnjim usklađivanjem s Direktivom o energetskim svojstvima zgrada 2010/31/EU u dijelu koji se odnosi na zgrade približno nulte energije TPRUETZZ propisani su rokovi i zahtjevi za projektiranje i gradnju stambenih i nestambenih zgrada približno nulte energije. Najveće dopuštene vrijednosti koeficijenata prolaska topline TPRUETZZ, za područje kontinentalne Hrvatske dodatno su umanjene za 15 do 60 % dok su za područje primorske Hrvatske izmjene koeficijenata puno manje te su u malom broju slučajeva čak i uvećane u odnosu na prethodni propis.

Posljednja izmjena tehničkog propisa trenutno je važeći *Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* („Narodne novine“ broj 128/15, 70/18, 73/18, 86/18, 102/20) [83]. Propis je stupio na snagu 1. siječnja 2016. godine, a izmjene, dopune i ispravci objavljeni su u 2018. i 2020. godini. Tehnički zahtjevi u pogledu racionalne uporabe energije i toplinske zaštite zgrade novim su propisom utvrđeni za nove zgrade, zgrade gotovo nulte energije i postojeće zgrade prilikom rekonstrukcije koje se griju i/ili hlade na temperaturu višu od 12 °C. U Tehničkom propisu, pored ostalih uvjeta i zahtjeva, propisane su najveće dopuštene vrijednosti godišnje potrebne toplinske energije za grijanje, godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje, godišnje primarne energije i godišnje isporučene energije.

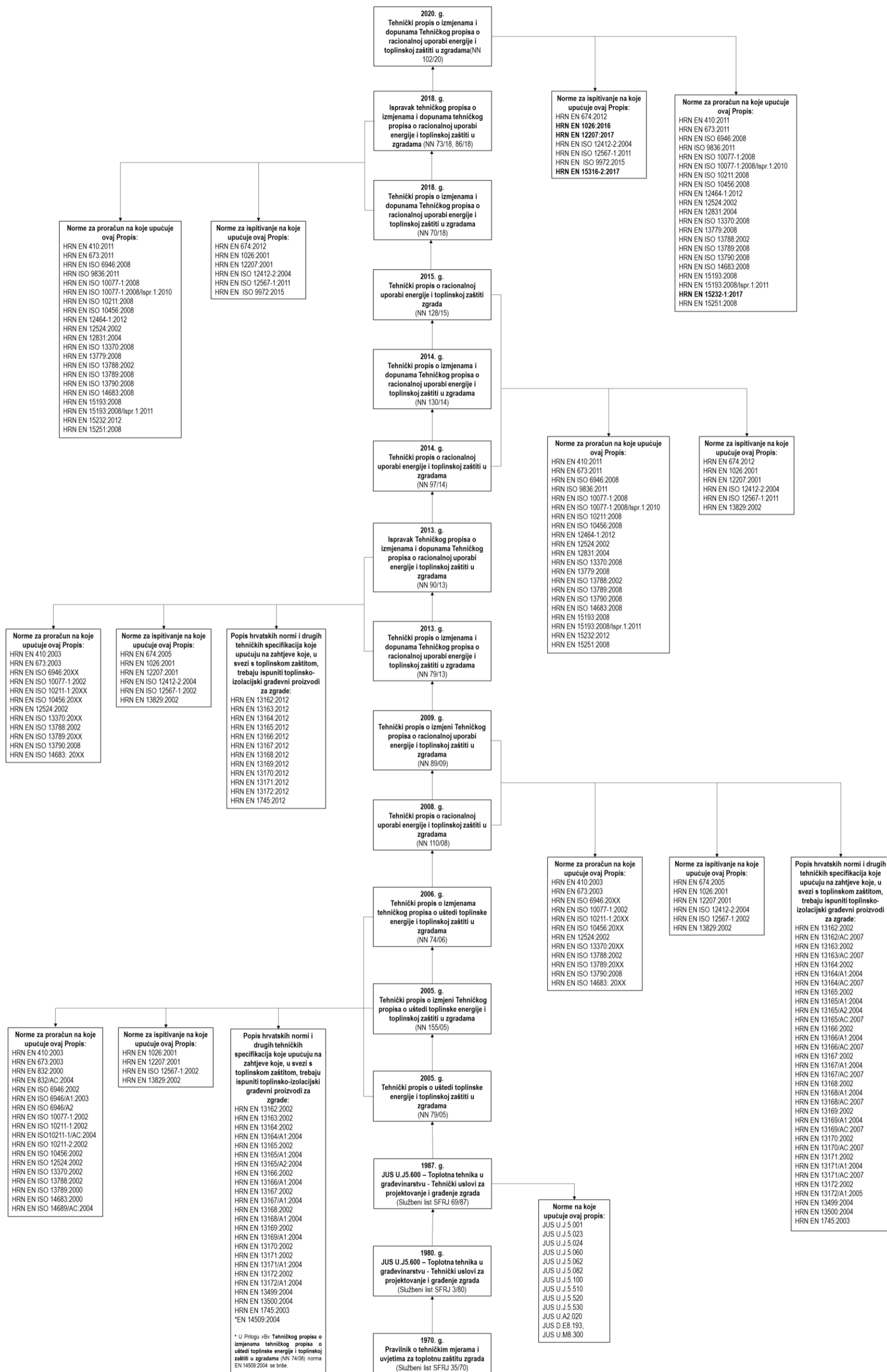
U cilju jasnijeg i preglednijeg uvida u promjene zakonske regulative i traženih zahtjeva u nastavku su dani sažeti tablični prikaz traženih zahtjeva u pogledu toplinske zaštite zgrada u ovisnosti o izmjenama zakonske regulative (tablica 2.4) i grafički prikaz razvoja propisa u području uštede energije i toplinske zaštite u zgradama (slika 2.7).

Tablica 2.4 Traženi zahtjevi u pogledu racionalne uporabe energije i toplinske zaštite u zgradama u ovisnosti o promjenama zakonske regulative

PROPIS TRAŽENI ZAHTJEVI	Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 128/15, 70/18, 73/18, 86/18, 102/20)	Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 97/14, 130/14)	Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 79/13, 90/13)	Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 110/08, 89/09)	Tehnički propis o uštedi toplinske energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 79/05, 155/05, 74/06)	JUS U.J5.600: Toplinska tehnika u građevinarstvu: tehnički uvjeti za projektiranje i građenje zgrada (Službeni list SFRJ 69/87)	JUS U.J5.600 – Toplotna tehnika u građevinarstvu - Tehnički uslovi za projektovanje i građenje zgrada (Službeni list SFRJ 3/80)	Pravilnik o tehničkim mjerama i uvjetima za toplotnu zaštitu zgrada (Službeni list SFRJ 35/70)
Zahtjevi za minimalnom toplinskom izolacijom (zaštitom) zgrada	+	+	+	+	+	+	+	+
Zahtjevi na građevne proizvode	+	+	+	+	+	+	+	+
Zahtjevi u pogledu difuzije vodene pare kroz građevinske konstrukcije	+	+	+	+	+	+	+	
Dopušteni specifični transmisivni toplinski gubici	+	+	+	+	+	+		
Dopušteni specifični gubici zbog prirodne ili umjetne ventilacije zgrada *	+	+	+	+	+	+		
Zahtjevi u pogledu toplinske stabilnosti vanjskih građevinskih konstrukcija za ljetno razdoblje	+	+	+	+	+			
Sadržaj projekta zgrade u odnosu na racionalnu uporabu energije i toplinsku zaštitu u zgradama **	+	+	+	+	+			
Iskaznica energetskih svojstava zgrade - potrebna toplinska energija za grijanje zgrade/ hlađenje zgrade / potrebna primarna energija	+ / + / +	+ / + / +	+ / +	+ / +	+			
Održavanje zgrade u odnosu na uštedu toplinske energije i toplinsku zaštitu	+	+	+	+	+			
Zahtjevi za toplinske mostove	+	+	+	+	+			
Izračun potrebne energije za grijanje	+	+	+	+	+			
Ograničenje godišnje potrebne toplinske energije za grijanje	+	+	+	+	+			
Korištenje obnovljivih izvora energije	+	+	+	+	+			
Izračun potrebne energije za hlađenje	+	+	+	+				
Ograničenje primarne energije	+	+	+					
Ograničenje godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje	+	+						
Zahtjevi za učinkovitostu tehničkog sustava grijanja, hlađenja, ventilacije, klimatizacije i pripreme potrošne tople vode	+	+						
Najveća dopuštena godišnja potrebna energija za rasvjetu zgrade	+	+						
Razred učinkovitosti sustava automatizacije i upravljanja zgrade	+	+						
Zahtjevi za zgrade gotovo nulte energije	+	+						
Ograničenje isporučene energije	+							

* Od Tehničkog propisa o uštedi toplinske energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 79/05) - zahtjevi u pogledu zrakopropusnosti omotača zgrade i provjetravanja prostora zgrade

** - Tehnički propis o uštedi toplinske energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 79/05, 155/05 74/06) - sadržaj projekta zgrade u odnosu na uštedu toplinske energije i toplinsku zaštitu toplinsku zaštitu
- Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 110/08, 89/09, 79/13, 90/13) - sadržaj projekta zgrade u odnosu na racionalnu uporabu energije za grijanje i hlađenje te toplinsku zaštitu
- Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 97/14, 130/14) - sadržaj projekta zgrade u odnosu na racionalnu uporabu energije za grijanje i hlađenje te toplinsku zaštitu
- Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 128/15, 70/18, 73/18, 86/18, 102/20) - sadržaj projekta zgrade u odnosu na racionalnu uporabu energije te toplinsku zaštitu



Slika 2.7 Grafički prikaz razvoja propisa u području uštede energije i toplinske zaštite u zgradama

U Republici Hrvatskoj, u ovisnosti o zakonskoj regulativi mijenjale su se i propisane najveće dopuštene vrijednosti koeficijenta prolaska topline za pojedine građevne dijelove. Trenutno važeće najveće dopuštene vrijednosti koeficijenta prolaska topline za pojedine građevne dijelove određene su u Republici Hrvatskoj Tehničkim propisom o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 128/15, 70/18, 73/18, 86/18, 102/20). Prema Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama koeficijenti prolaska topline, U vrijednosti $[W/(m^2K)]$, određuju se [83]:

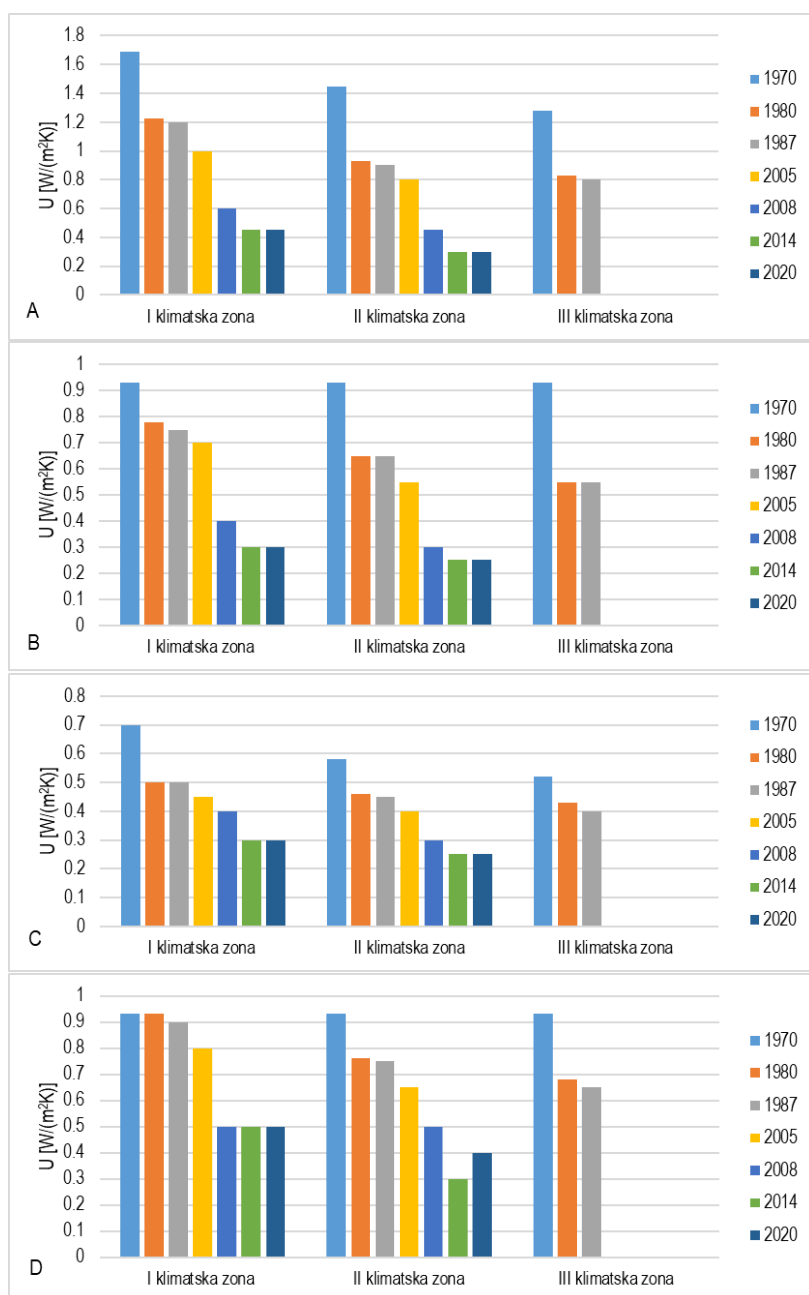
- za neprozirne građevne dijelove prema HRN EN ISO 6946:2008, a za građevne dijelove koji graniče s tlom uzima da je $R_e = 0$,
- za prozore, balkonska i ostakljena vrata prema HRN EN ISO 10077-1:2008 i HRN EN ISO 10077-1:2008/Ispr.1:2010, s tim da se mogu koristiti izmjerene U vrijednosti okvira prema HRN EN 12412-2:2004 i ostakljenja prema HRN EN 674:2012, ili prema tehničkim specifikacijama za proizvode, odnosno mjerenjem prema HRN EN ISO 12567-1:2011 i
- za ostakljenje prema HRN EN 673:2011, ili prema tehničkim specifikacijama za proizvode.

Prilikom rekonstrukcije i veće rekonstrukcije zgrade, na rekonstruiranu zgradu primjenjuju se uvjeti kao na novu zgradu pri čemu U vrijednost $[W/(m^2 \cdot K)]$, čitavog građevnog dijela na kojem je proveden građevinski zahvat ne smije biti veća od vrijednosti utvrđenih Tehničkim propisom [83].

Od svih elemenata ovojnice, vanjski zidovi najčešće čine najveći postotak površine ovojnice zgrada [4, 7] te samim tim imaju i najveći utjecaj na energetske bilancu zgrade (HRN EN ISO 52016-1:2017) [84]. Iz tog razloga, prilikom energetske obnove postojećih zgrada najčešća primijenjena troškovno učinkovita mjera jest rekonstrukcija vanjskih zidova izvedbom dodatne toplinske izolacije. S obzirom na to da se najveći dio toplinske energije gubi upravo kroz vanjske zidove te da svako precjenjivanje ili podcjenjivanje toplinskih svojstava direktno utječe na energetske učinkovitost i potrošnju energije u zgradama, a samim time na troškove uporabe zgrade, izuzetno je važno prilikom energetskog pregleda utvrditi stvarne vrijednosti koeficijenta prolaska topline vanjskih zidova. Za vanjske zidove vrijednost koeficijenta prolaska topline koju je potrebno zadovoljiti u Republici Hrvatskoj prilikom rekonstrukcije definirana je s obzirom na klimatske uvjete u kojima se zgrada nalazi te s obzirom na temperaturu na koju se zgrada zagrijava. Najveća dopuštena vrijednost koeficijenta prolaska topline mijenjala se tijekom vremena, a trenutno za vanjske zidove iznosi $0,30 W/(m^2 \cdot K)$ kada je srednja mjesečna temperatura vanjskog zraka najhladnijeg mjeseca na lokaciji zgrade, $\theta_{e,mj,min} \leq 3^\circ C$ za zgradu grijanu na temperaturu $18^\circ C$ ili više [83].

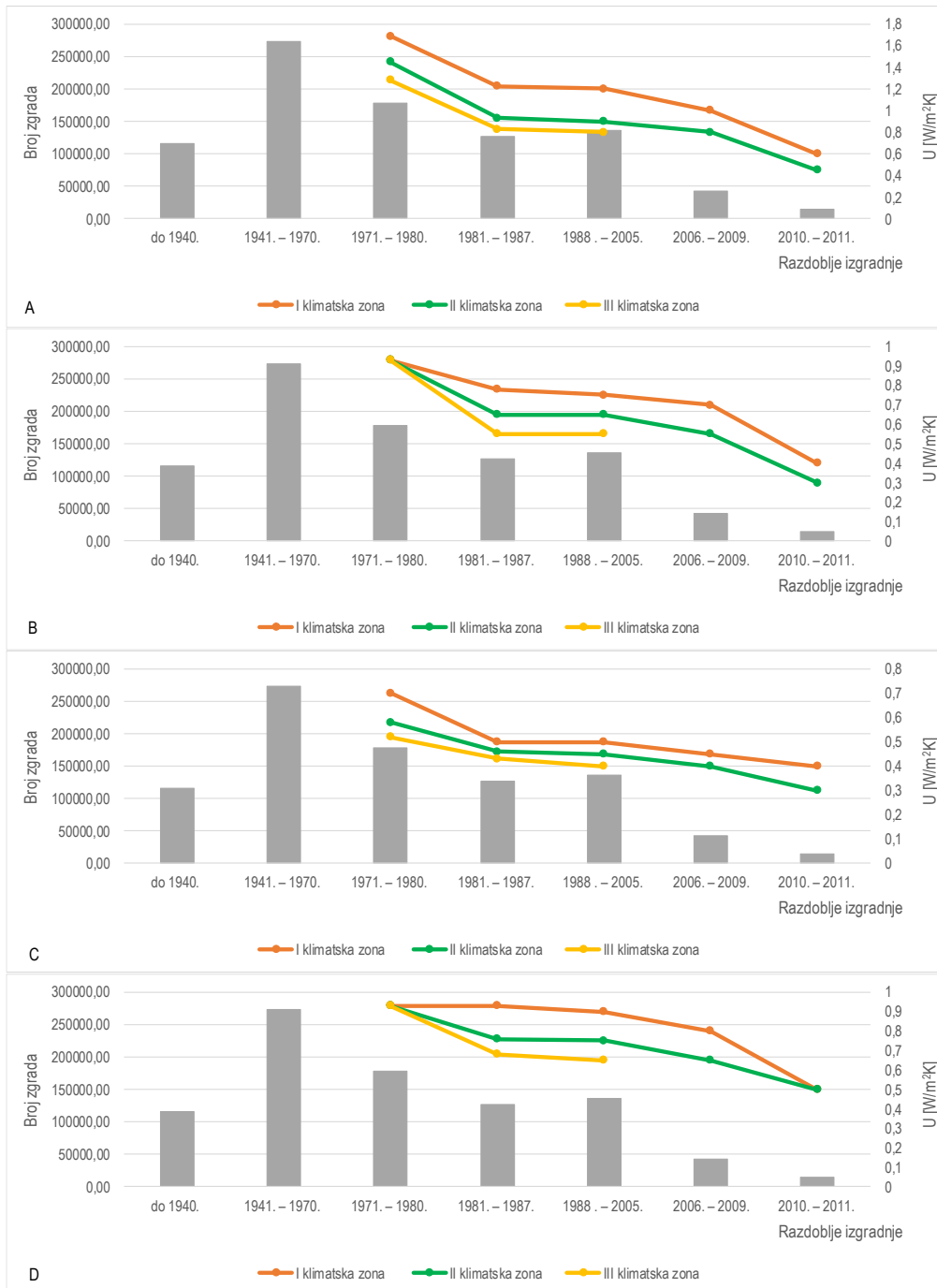
Promjene najvećih dopuštenih vrijednosti koeficijenta prolaska topline ovisno o važećoj zakonskoj regulativi u Republici Hrvatskoj grafički su prikazane na slici 2.8 za četiri karakteristična građevna dijela: vanjski zid, krov, strop iznad vanjskog zraka i pod na tlu. Najveće dopuštene vrijednosti koeficijenta prolaska topline definirane su kroz postojeće propise u ovisnosti o klimatskim uvjetima u kojima se zgrada nalazi te s obzirom na temperaturu na koju se zgrada zagrijava. Kako je u propisima do 2005. godine vrijedila podjela bivše SFRJ na tri građevinsko klimatske zone te se nakon toga u Republici Hrvatskoj uvela podjela na dvije zone, kontinentalnu i primorsku Hrvatsku, za karakteristične građevne dijelove, na slici 2.8, prikazane su najveće dopuštene vrijednosti koeficijenta prolaska

topline za tri građevinsko klimatske zone do 2005. godine, a nakon toga za dvije klimatske zone. Pri tome se smatra da prva klimatska zona odgovara primorskoj, a druga klimatska zona kontinentalnoj Hrvatskoj. Od 2008. godine do danas uspoređene su vrijednosti iz pojedinih propisa za građevne dijelove zgrada grijanih na temperaturu od 18°C i više, a za 2005. godinu korištene su vrijednosti za usporedbu propisane za građevne dijelove s plošnom masom većom od 100 kg/m². Prema slici 2.8 vidljivo je da su u pravilu, svakim novim propisom postavljeni stroži kriteriji odnosno propisane najveće dopuštene vrijednosti koeficijenta prolaska topline su se smanjivale, čime se povećavala minimalna toplinska zaštita zgrada. Trenutno propisane najveće dopuštene vrijednosti koeficijenta prolaska topline U za vanjski zid, krov, strop iznad vanjskog zraka i pod na tlu manje su za 42 do 69% u odnosu na prve propise o toplinskoj zaštiti zgrada.



Slika 2.8 Najveće dopuštene U vrijednosti za: a) vanjski zid, b) krov, c) strop iznad vanjskog zraka i d) pod na tlu, ovisno o zakonskoj regulativi

S obzirom na to da velik broj postojećih zgrada izgrađenih prije nekoliko desetljeća troši velike količine energije i ne zadovoljava trenutno važeće propise vezane uz toplinsku zaštitu zgrada u nastavku su prikazane i povezane promjene najvećih dopuštenih vrijednosti koeficijenta prolaska topline s obzirom na karakteristična razdoblja izgradnje zgrada u Republici Hrvatskoj. Prema slici 2.9 vidljivo je kako je najveći udio zgrada s lošim toplinskim karakteristikama izgrađen do 2005. godine pri čemu su najveće dopuštene U vrijednosti za analizirane građevne dijelove veće u prosjeku za 2,4 puta od danas propisanih. Iz navedenih podataka, vidljiv je energetska potencijal u postojećem fondu zgrada u Republici Hrvatskoj.



Slika 2.9 Najveće dopuštene U vrijednosti za: a) vanjski zid, b) krov, c) strop iznad vanjskog zraka i d) pod na tlu, ovisno o zakonskoj regulativi prema karakterističnim razdobljima izgradnje zgrada

3 STANJE ISTRAŽIVAČKOG PODRUČJA

3.1 Prijenos topline

U inženjerskoj praksi razumijevanje procesa prijenosa topline postaje sve važnije jer utječe na odluke prilikom projektiranja zgrada. Između ostalog, prilikom projektiranja zgrada uz ekonomsku analizu, analiza procesa prijenosa topline utječe na projektiranje optimalne debljine toplinske izolacije vanjske ovojnice.

Osnovni uvjet za prijenos topline, Q [J] je postojanje temperaturne razlike, a što je veća temperaturna razlika veća je i brzina prijenosa topline [85]. Toplinska energija prenosi se uvijek iz područja više temperature prema području niže temperature do uspostavljanja toplinske ravnoteže. Količina topline koja se izmjenjuje pri dodiru dvaju tijela različitih temperatura jednaka je:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (3.1)$$

gdje je m [kg] masa tijela, c [J/(kgK)] specifični toplinski kapacitet, a ΔT [K] promjena temperature.

Toplinski tok definira se kao količina topline prenesene u vremenu, a može se odrediti prema:

$$\phi = \frac{Q}{t} \quad (3.2)$$

gdje je ϕ [W] toplinski tok, Q [J] toplina, a t [s] vrijeme.

Gustoća toplinskog toka je količina topline koja uslijed razlike temperatura na dvije granične površine elementa prijeđe u jedinici vremena okomito po jedinici površine promatranog elementa:

$$q = \frac{\phi}{A} \quad (3.3)$$

gdje je q [W/m²] gustoća toplinskog toka, ϕ [W] toplinski tok, a A [m²] površina materijala.

Općenito razlikujemo tri osnovna načina prijenosa topline: vođenje (kondukciju), strujanje (konvekciju) i zračenje (radijaciju). No, u većini inženjerskih problema javlja se kombinacija sva tri načina prijenosa topline.

3.2 Prijenos topline vođenjem

Prijenos topline vođenjem (kondukcijom) ostvaruje se gibanjem molekula i atoma uslijed postojanja temperaturnih razlika. Kinetička energija prenosi se kod vođenja s čestice više temperature na čestice niže temperature, a sredstvo kroz koje se obavlja prijenos miruje. Vođenje je karakteristično za kruta tijela, ali se može odvijati i u tekućinama ili plinovima. U plinovima, kondukcija je posljedica sudara molekula tijekom njihovog nasumičnog kretanja, a u tekućinama elastičnih titranja molekula. U krutim tijelima kondukcija nastaje zbog kombinacije vibracija molekula u rešetki i transporta energije preko slobodnih elektrona koji imaju glavnu ulogu u vođenju topline kroz metale.

Prijenos topline kondukcijom ovisi o geometriji tijela, njegovoj debljini i materijalu te o lokalnim razlikama u temperaturi [85]. Brzina prijenosa topline ovisi o temperaturnoj razlici, a što je veća temperaturna razlika veća je i brzina prijenosa topline.

Vođenje topline kroz ravni homogeni sloj definira se Fourierovim zakonom toplinske vodljivosti iz 1882. godine pri čemu se toplinski tok može odrediti pomoću izraza [85]:

$$\dot{Q} = \lambda \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.4)$$

gdje je \dot{Q} [W] toplinski tok, λ [W/(mK)] koeficijent toplinske provodljivosti materijala, A [m²] površina okomita na smjer izmjene topline, ΔT [K] temperaturna razlika, Δx [m] debljina sloja, a veličina $\Delta T/\Delta x$ temperaturni gradijent. Prema Fourierovom zakonu je brzina prenesene topline proporcionalna negativnom gradijentu temperature te površini okomitoj na taj gradijent, kroz koju toplina protječe. Predznak minus označava da toplina prelazi iz područja više u područje niže temperature.

3.3 Prijenos topline strujanjem

Strujanje ili konvekcija je način prijenosa topline uzrokovan gibanjem fluida (tekućina i plinova). Prijenos topline konvekcijom odvija se između krutog tijela (npr. površina građevinskog dijela) i fluida u gibanju. Za razliku od vođenja gdje se prienos topline ostvaruje molekularnim gibanjem pri čemu sredstvo koje obavlja prienos miruje, pri prenošenju topline konvekcijom giba se i samo sredstvo. Što je brže gibanje fluida, to je i veći konvekcijski prienos topline.

Ovisno o načinu pobude gibanja fluida, razlikujemo slobodnu (prirodnu) konvekciju i prisilnu konvekciju. Kod slobodne konvekcije strujanje fluida uzrokovano je nejednolikom raspodjelom gustoće zbog nejednolike temperaturne raspodjele. S druge strane, prisilna konvekcija uzrokovana je umjetnim putem nametnutom razlikom tlakova korištenjem ventilatora, pumpi i sličnih uređaja.

Prijenos topline konvekcijom opisuje se Newtonovim zakonom hlađenja [85] prema kojemu je gustoća toplinskog toka:

$$q = h_c \cdot (T_s - T_f), \quad (3.5)$$

gdje je h_c [W/(m²K)] koeficijent prijelaza topline konvekcijom, T_s [K] temperatura čvrste plohe uz koju struji fluid, a T_f [K] temperatura fluida dalje od granične plohe. Koeficijent prijelaza topline konvekcijom je eksperimentalno određen parametar čija vrijednost ovisi o svim varijablama koje utječu na konvekciju, poput geometrije površine, oblika i položaja plohe, prirode gibanja fluida, svojstava fluida, brzine strujanja i temperaturne razlike [85]. Karakteristične vrijednosti koeficijenta prijelaza topline konvekcijom prikazane su u tablici 3.1.

Tablica 3.1 Karakteristične vrijednosti koeficijenta prijelaza topline konvekcijom [85]

Koeficijent prijelaza topline konvekcijom	Slobodna konvekcija		Prisilna konvekcija	
	Plinovi	Tekućine	Plinovi	Tekućine
h_c [W/(m ² K)]	2 - 25	50-1.000	25-250	100-20.000

3.4 Prijenos topline zračenjem

Prijenos topline s tijela s visokom temperaturom na tijelo s nižom temperaturom, kada tijela nisu u izravnom dodiru jedna s drugima ili kada su razdvojena u prostoru, naziva se toplinskim zračenjem. Prijenos topline zračenjem (radijacijom) odvija se emisijom elektromagnetskih valova između dviju površina različite temperature. Za razliku od kondukcije i konvekcije, za prijenos topline zračenjem nije potreban medij.

Bilo koji objekt koji ima temperaturu višu od 0 K, emitira elektromagnetsko zračenje u cjelokupnom spektru valnih duljina [85, 86]. Neki materijali bolje, a neki lošije emitiraju zračenje, a količina emitirane energije s površine tijela ovisi o temperaturi tijela, vrsti materijala i stanju površine.

Proces emisije smatra se vrlo jednostavnim: atomi su sastavljeni od negativno nabijenih elektrona i pozitivno nabijenih jezgri te pri sudaru s drugim atomima dolazi do oscilacije pozitivnih i negativnih naboja [86]. Prema Maxwellovoj teoriji, oscilirajući naboji emitiraju (a mogu i apsorbirati) elektromagnetsko zračenje [86]. Intenzitet zračenja ovisi o temperaturi i valnoj duljini. Elektromagnetni se val širi brzinom c , ima valnu duljinu λ i frekvenciju ν te vrijedi izraz:

$$c = \lambda \cdot \nu, \quad (3.6)$$

Tijelo može toplinsko zračenje apsorbirati, reflektirati ili propustiti. Tijela koja apsorbiraju cjelokupnu dozračenu energiju nazivaju se crna tijela. Kako crno tijelo na određenoj temperaturi maksimalno apsorbira, ono na toj temperaturi i maksimalno emitira. Ukupni intenzitet zračenja idealnoga crnog tijela definira se Stefan-Boltzmannovim zakonom pri čemu je ukupni intenzitet zračenja, odnosno energija koju zrači metar kvadratni površine tijela u sekundi, proporcionalan je četvrtoj potenciji apsolutne temperature crnog tijela. Prema Stefan-Boltzmannovom zakonu gustoća toplinskog toka može se odrediti prema [85]:

$$q = \sigma \cdot T^4, \quad (3.7)$$

gdje je q [W/m²] gustoća toplinskog toka uzrokovana zračenjem, σ ($5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴) Stefan-Boltzmannova konstanta, a T [K] apsolutna temperatura tijela.

Zračenje koje emitiraju realna tijela manje je od zračenja koje emitira crno tijelo na istoj temperaturi te je gustoća toplinskog toka za realna tijela prema Stefan-Boltzmannovom zakonu jednaka:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (3.8)$$

gdje je ε [-] koeficijent emisivnosti površine. Koeficijent emisije definira se kao omjer vlastitog emitiranog zračenja realnog tijela i vlastitog emitiranog zračenja crnog tijela pri istoj temperaturi [87]. Koeficijenti emisije većine građevinskih materijala (beton, opeka, žbuka i slično) kreću se od 0,8 do 0,9, što znači da dobro emitiraju i apsorbiraju zračenje.

Općenito, koeficijent emisije i apsorpcije ovise o temperaturi i valnoj duljini. Prema Kirchhoffovom zakonu zračenja tijelo koje je sposobno apsorbirati zračenje pri nekoj valnoj duljini, jednako je sposobno emitirati zračenje pri toj valnoj duljini [88]. Iz Kirchhoffovog zakona zračenja proizlazi stoga da je koeficijent emisije tijela ε jednak koeficijentu apsorpcije tijela α pri istoj valnoj duljini λ .

Ako je brzina apsorpcije zračenja veća od brzine emitiranja zračenja, kaže se da je površina apsorpira energiju zračenjem, u suprotnom površina gubi energiju zračenjem.

Za primjer zračenja između površine na temperaturi T_s i znatno veće okolne površine temperature T_0 između kojih se nalazi plinovito sredstvo poput zraka, neto izmijenjena gustoća toplinskog toka zračenjem između ove dvije površine može se odrediti prema izrazu:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_0^4), \quad (3.9)$$

Uzme li se u obzir činjenica da se temperatura zida i površine okoliša ne razlikuju značajno vrijedi izraz:

$$q = h_r \cdot (T_s - T_0), \quad (3.10)$$

gdje je h_r [W/m²K] koeficijent prijelaza topline zračenjem.

Prijenos topline zračenjem između površine i zraka odvija se paralelno s provođenjem ili konvekcijom. Ukupni prijenos topline u tom slučaju određuje se uzimajući u obzir doprinose oba mehanizma za prijenos topline. Radi jednostavnosti i praktičnosti, to se često provodi definiranjem kombiniranog koeficijenta prijelaza topline, koji uključuje utjecaje konvekcije i zračenja.

3.5 Prijenos topline kroz građevinske elemente

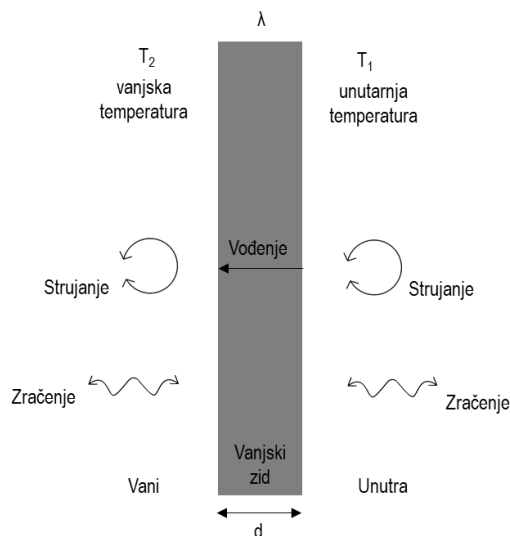
U građevinarstvu, prijenos topline sastoji se od kombinacije sva tri načina prijenosa topline: vođenja, strujanja i zračenja. Iz zagrijane prostorije toplinska energija se gubi kroz ovojnici zgrade odnosno građevne elemente (zid, strop, pod) ili prozore i odlazi u atmosferu.

Osim o fizikalnim karakteristikama materijala, toplinski tok ovisi i o unutarnjim i vanjskim uvjetima odnosno temperaturama okoliša.

Ako promatramo prijenos topline u stacionarnom stanju kroz vanjski zid (slika 3.1) pri čemu vrijedi da je unutarnja temperatura viša od vanjske temperature ($T_1 > T_2$) prijenos topline sastoji se od:

- prijenosa topline strujanjem i zračenjem od unutarnjeg okoliša prema unutarnjoj površini zida,
- prijenosa topline vođenjem preko unutarnje površine zida prema vanjskoj površini zida,

- prijenosa topline strujanjem i zračenjem od vanjske površine zida prema vanjskom okolišu.



Slika 3.1 Prijenos topline kroz vanjski zid

3.6 Toplinska svojstva materijala

3.6.1 Koeficijent toplinske provodljivosti

Koeficijent toplinske provodljivosti, λ mjeri je toplinske vodljivosti materijala [89]. Koeficijent toplinske provodljivosti materijala može se definirati kao količina topline koja u jedinici vremena prođe okomito kroz sloj materijala jedinične površine i debljine pri razlici temperature od 1K [90].

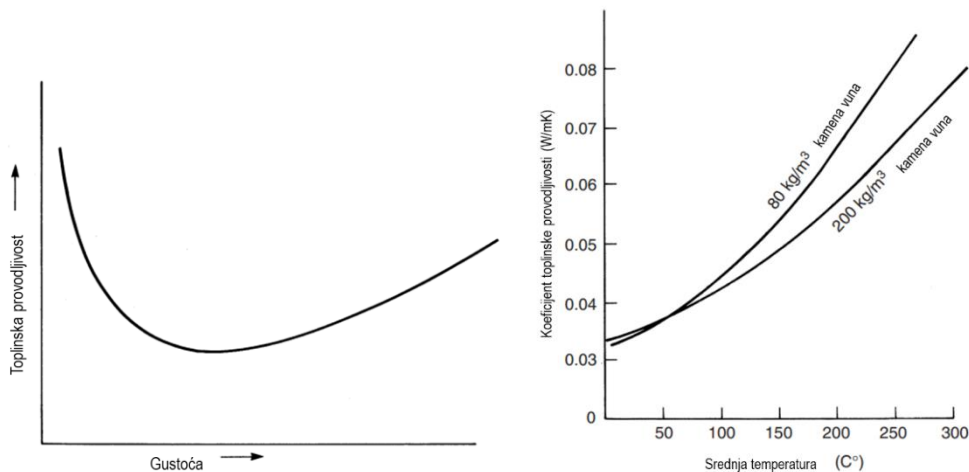
Toplinska provodljivost opisana je Fourierovim zakonom vođenja topline:

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{A (T_1 - T_2)} \cdot \Delta x \quad (3.11)$$

gdje je λ [W/(mK)] toplinska provodljivost materijala.

Vrijednost toplinske provodljivosti ovisi o sastavu materijala kroz koji se toplina provodi, obujamskoj masi odnosno poroznosti materijala, vlažnosti i temperaturi materijala [91]. Općenito, toplinska vodljivost građevinskog materijala raste s porastom temperature (slika 3.2) te povećanjem volumenske mase budući da svaki građevni materijal sadrži mnoštvo pora i šupljina ispunjenih zrakom koji ima znatno manju vrijednost toplinske provodljivosti u usporedbi s apsolutno gustim materijalom bez pora [92]. U tom kontekstu nije bitna samo poroznost, već i veličina, raspodjela, oblik i povezanost pora [93]. Materijali velike gustoće u pravilu imaju i veću vrijednost koeficijenta toplinske provodljivosti (slika 3.2), a toplinska provodljivost bitno ovisi i o sadržaju vlage [91]. Vrijednost toplinske vodljivosti poroznih građevinskih materijala naglo se povećava s povećanjem sadržaja vlage, što dovodi do povećanja gubitka topline [33, 91, 94-103]. Povećanje toplinske provodljivosti materijala povećanjem sadržaja vlage, rezultat je činjenice da voda na mjestu zraka u porama materijala ima vrijednost toplinske provodljivosti pri temperaturi zraka

od 0,613 W/(mK) [85], što je vrijednost dvadeset i četiri puta veća od vrijednosti toplinske provodljivosti zraka. Iako koeficijent toplinske provodljivosti neprekidno raste s porastom sadržaja vlage materijala, potrebno je naglasiti da početno povećanje sadržaja vlage uzrokuje nagli porast koeficijenta toplinske provodljivosti. Veće povećanje vrijednosti koeficijenta na nižoj razini vlage objašnjava se činjenicom da voda tijekom vlaženja materijala prvo ispunjava sitnije pore i kapilare, čiji je utjecaj na toplinsku provodljivost značajniji od utjecaja većih pora. Toplinska provodljivost se još više povećava u slučaju smrzavanja vode unutar materijala jer je vrijednost toplinske provodljivosti leda veća od 2,0 W/(mK) [104], što je vrijednost oko četiri puta veća od vrijednosti toplinske provodljivosti vode.



Slika 3.2 Odnos toplinske provodljivosti i: a) gustoće materijala b) srednje temperature [92]

S obzirom na vrijednosti toplinske provodljivosti, materijali se općenito mogu podijeliti na vodiče i izolatore. Materijali koji imaju visoku vrijednost toplinske provodljivosti dobro provode toplinu, dok materijali s niskom vrijednosti imaju bolja izolacijska svojstva zbog čega lošije vode toplinu. Za toplinske proračune u građevinarstvu koriste se vrijednosti toplinske provodljivosti pri srednjoj vrijednosti temperature od 10 °C [70].

3.6.2 Toplinski otpor

Ako je poznata vrijednost toplinske provodljivosti, toplinski otpor homogenog sloja računa se prema HRN EN ISO 6946:2017 [9] iz izraza:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (3.12)$$

gdje je d [m] debljina sloja materijala u građevnom dijelu, a λ [W/mK] projektna vrijednost toplinske provodljivosti materijala.

Budući da toplinski otpor sloja homogenog materijala ovisi o debljini sloja i o svojstvima materijala, povećanje toplinskog otpora odnosno toplinske zaštite, postiže se ili povećanjem debljine sloja ili izborom materijala s nižim vrijednostima toplinske provodljivosti [70].

Ukupni otpor zida prijelazu topline zbroj je otpora samoga zida i dva otpora između površina zida i njihove okoline: unutarnjeg otpora prijelazu topline i vanjskog otpora prijelazu topline. Naime, ako promatramo prijenos topline kroz vanjski zid iz unutarnjeg prostora prema vanjskom, toplina prvo prolazi kroz granični sloj zraka na površini s unutarnje strane zida, zatim kroz zid te naposljetku kroz granični sloj zraka na površini s vanjske strane zida.

Ukupni toplinski otpor građevnog dijela, koji se sastoji od toplinski homogenih slojeva okomitih na toplinski tok definira se pomoću izraza [9]:

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots R_n + R_{se} \quad (3.13)$$

gdje je R_T [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$] vrijednost ukupnog toplinskog otpora, R_{si} [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$] unutarnji plošni otpor prijelaza topline, R_1, R_2, \dots, R_n [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$] projektne vrijednosti toplinskog otpora svakog pojedinog sloja, a R_{se} vanjski plošni otpor prijelazu topline. Vrijednosti plošnih otpora koriste se isključivo na onim površinama koje su u dodiru sa zrakom, a prema HRN EN ISO 6946:2017 [9] plošni otpor dan je izrazom:

$$R_s = \frac{1}{h_c + h_r} \quad (3.14)$$

gdje je h_c [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$] koeficijent prijelaza topline konvekcijom, a h_r [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$] koeficijent prijelaza topline zračenjem.

Koeficijent prijelaza topline zračenjem pri tome je jednak [9]:

$$h_r = \varepsilon \cdot h_{r0} \quad (3.15)$$

pri čemu je:

$$h_{r0} = 4 \cdot \sigma \cdot T_m^3 \quad (3.16)$$

gdje je ε [-] koeficijent emisivnosti površine, h_{r0} koeficijent prijelaza topline zračenjem crnog tijela, σ [$5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$] Stefan-Boltzmann-ova konstanta, a T_m [K] srednja temperatura površine i njene okoline.

Na unutarnjim plohama, ili vanjskim plohama uz dobro provjetran sloj zraka koeficijent prijelaza topline konvekcijom jednak je [9]:

$$h_c = h_{ci} \quad (3.17)$$

pri čemu je: $h_{ci} = 5,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ za toplinski tok prema gore
 $h_{ci} = 2,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ za vodoravan toplinski tok
 $h_{ci} = 0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ za toplinski tok prema dolje.

Na vanjskim plohama, koeficijent prijelaza topline konvekcijom jednak je [9]:

$$h_c = h_{ce} \quad (3.18)$$

gdje je:

$$h_{ce} = 4 + 4v, \quad (3.19)$$

pri čemu je v [m/s] brzina vjetrova uz površinu građevnog elementa.

Projektne vrijednosti plošnog koeficijenta prijelaza topline definirane su u normi HRN EN ISO 6946:2017 [9]. Navedene vrijednosti predstavljaju samo procjenu te nisu nužno reprezentativne za stvarne prijenose topline između okoliša i zida. Pouzdane vrijednosti koeficijenta površinskog prijelaza topline mogu se odrediti mjerenjem dodatnih fizikalnih parametara.

3.6.3 Koeficijent prolaska topline (U vrijednost)

Najvažniji čimbenik koji se koristi za opisivanje toplinskih svojstava zgrada i razine toplinske zaštite zgrade, a time i ukupne energetske učinkovitosti neke zgrade je koeficijent prolaska topline (U vrijednost) [4]. Koeficijent prolaska topline predstavlja recipročnu vrijednost ukupnog toplinskog otpora, a definira se kao količina topline koju građevni dio gubi u 1 sekundi po m^2 površine kod razlike temperature od 1K [70]. Što je njegova vrijednost manja to je bolja toplinska izolacija zgrade [105].

Prema HRN EN ISO 6946:2017 [9] koeficijent prolaska topline može se izračunati prema izrazu:

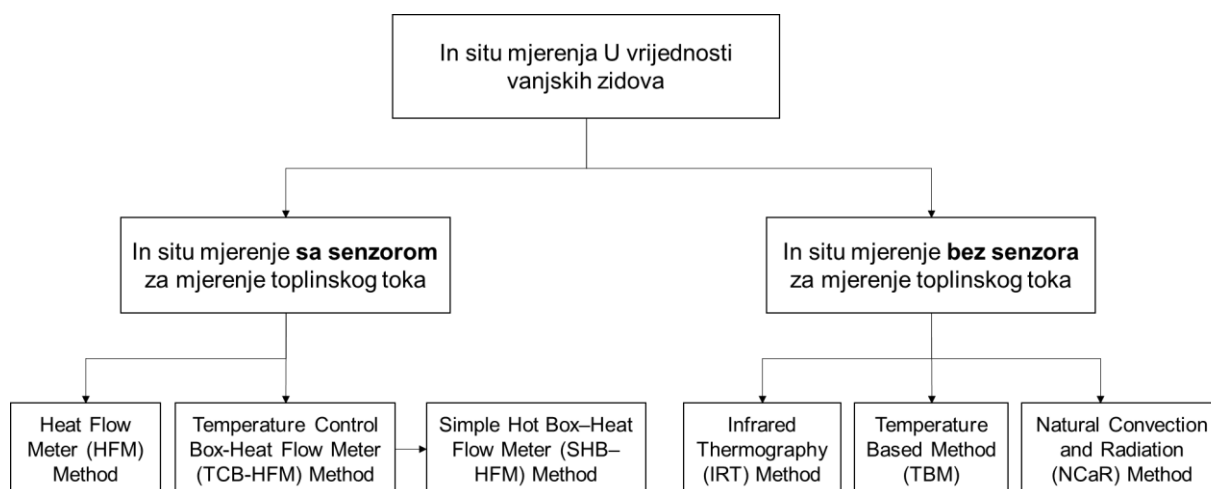
$$U = \frac{1}{R_T} \quad (3.20)$$

gdje je U [W/(m^2K)] U vrijednost, a R_T [m^2K/W] ukupan toplinski otpor građevnog dijela.

Trenutno se za utvrđivanje veličine U vrijednosti koriste proračunske i eksperimentalne metode (laboratorijske i in situ metode). Proračunska metoda za određivanje teorijske U vrijednosti definirana je normom HRN EN ISO 6946:2017 [9], a temelji se na odgovarajućim projektnim vrijednostima toplinske provodljivosti ili projektnim vrijednostima toplinskih otpora materijala i proizvoda obuhvaćenih proračunom. Ispitivanja toplinskih svojstava u laboratoriju opisuju prijenos topline u ustaljenom stanju, a mogu se prema normama provesti u vrućim komorama ili s uređajem sa zaštićenom vrućom pločom. S druge strane, eksperimentalne metode koje se temelje na mjerenju podataka in situ mogu biti provedene pomoću razornih postupaka kao što su metode uzorkovanja i endoskop ili nerazornih postupaka kao što je mjerenje toplinskog toka, kvantitativna metoda termografije itd.

3.7 Pregled stanja područja postojećih in situ metoda za mjerenje koeficijenta prolaska topline vanjskih zidova

Eksperimentalne nerazorne metode koje se temelje na mjerenju podataka in situ vrlo su korisne za određivanje stvarnih toplinskih karakteristika građevnih dijelova u postojećim zgradama. Postojeće metode mogu se podijeliti s obzirom na način određivanja U vrijednosti na metode koje koriste senzor za mjerenje toplinskog toka i metode koje ga ne koriste, slika 3.3. Na temelju pregleda literature, na slici 3.3 prikazane su postojeće metode koje se koriste za in situ mjerenja U vrijednosti vanjskih zidova s njihovim nazivima na engleskom jeziku.

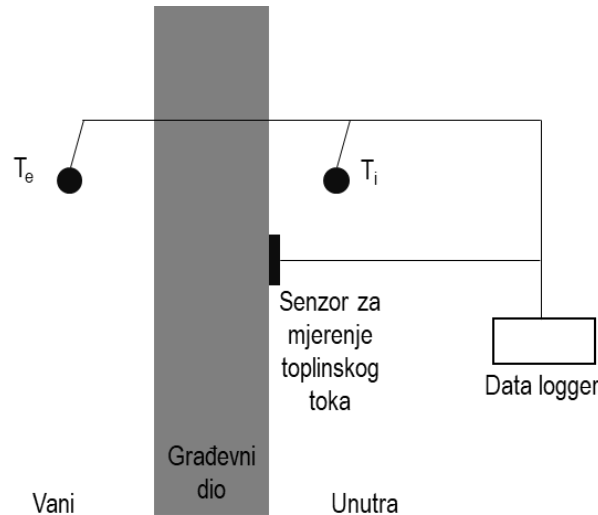


Slika 3.3 Grafički prikaz in-situ metoda za mjerenje U-vrijednosti

3.7.1 Metoda mjerenja toplinskog toka kroz građevne dijelove

Metoda mjerenja toplinskog toka kroz građevne dijelove (eng. Heat flow meter method, HFM method), u daljnjem tekstu HFM metoda, uobičajena je nerazorna i standardizirana metoda koja se koristi za mjerenje toplinskih svojstava građevnih dijelova zgrade in situ. Korištenje ove metode temelji se na uspostavljanju minimalnog temperaturnog gradijenta između unutarnje i vanjske temperature. Ova metoda prvenstveno je prikladna za ravne građevne dijelove s neprozirnim slojevima koji su okomiti na toplinski tok bez značajnog lateralnog toka [27]. Međutim, ova metoda može se koristiti i za građevne dijelove koji se sastoje od kvazi-homogenih slojeva koji su okomiti na toplinski tok i kada su dimenzije nehomogenosti blizu senzora za mjerenje toplinskog toka mnogo manje nego bočne dimenzije [27].

Prva ISO 9869 norma koja daje smjernice za in situ mjerenja U vrijednosti i toplinske otpornosti HFM metodom uvedena je 1994. Norma je kasnije tehnički revidirana normom ISO 9869-1:2014 [27], i prema toj normi, postupak mjerenja U vrijednosti temelji se na izravnom mjerenju toplinskog toka i temperatura s obje strane elementa u stabilnim uvjetima. Prilikom mjerenja potrebno je postaviti najmanje jedan senzor za mjerenje toplinskog toka na površinu elementa u kontaktu s prostorom stabilnije temperature, koristiti uređaj za pohranu podataka i dva senzora za mjerenje temperature okoline (T_e i T_i) kako bi se dobila U vrijednost elementa koji se ispituje, kako je prikazano na slici 3.4. S obzirom na to da je u stvarnosti teško odnosno nemoguće postići stabilne uvjete, normom se preporučuje korištenje ili metode vruće i hladne komore (koja se uobičajeno koristi u laboratorijskim uvjetima) ili jedne od predloženih statističkih metoda za analizu rezultata mjerenja (metode prosjeka ili dinamičke metode).



Slika 3.4 Shematski prikaz određivanja U vrijednosti metodom mjerenja toplinskog toka kroz građevne dijelove prema normi ISO 9869-1:2014

Metoda prosjeka pretpostavlja da se u stabilnim uvjetima U vrijednost građevnih dijelova može dobiti korištenjem prosjeka promatranih vrijednosti tijekom dovoljno dugog perioda. Kada se koristi metoda prosjeka, procjena U vrijednosti može se dobiti korištenjem sljedeće jednadžbe [27]:

$$U \left[\frac{W}{m^2K} \right] = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})} \quad (3.21)$$

gdje je q_j [W/m^2] gustoća toplinskog toka kroz jedinicu površine elementa, T_{ij} [K] i T_{ej} [K] su unutarnja i vanjska temperatura, pri čemu oznaka j označava pojedinačna mjerenja. Nakon dovoljno dugog perioda, U vrijednost teži ka asimptoti koja predstavlja njezinu stvarnu vrijednost samo ako je akumulirana toplina ista na kraju i na početku mjerenja i ako solarno zračenje ima zanemariv utjecaj na senzor za mjerenje toplinskog toka i senzore za mjerenje temperature. Za građevne dijelove s visokom toplinskom inercijom, metoda prosjeka također predlaže alternativnu metodologiju koja omogućuje korekciju podataka jer uzima u obzir učinke akumulacije topline. No bitno je naglasiti da, osim u slučajevima kada je učinak akumulacije topline zanemariv, rezultati dobiveni korištenjem metode prosjeka mogu biti prilično netočni. Iako metoda prosjeka nudi jednostavan pristup, ona može zahtijevati duge periode mjerenja u slučaju nestabilnih uvjeta.

S druge strane, dinamička metoda, koja je sofisticiranija i složenija u usporedbi s metodom prosjeka, uzima u obzir oscilacije temperature i toplinskog toka korištenjem toplinske jednadžbe i nekoliko parametara. Ovu metodu prvi su predložili Aittomäki i suradnici [106]. Prema dinamičkoj metodi koja je propisana u normi ISO 9869-1:2014 [27] toplinski tok u vremenu t_i funkcija je temperature u tom trenutku i u svim prethodnim vremenima te se definira na sljedeći način [27]:

$$q_i \left[\frac{W}{m^2} \right] = U(T_{L,i} - T_{E,i}) + K_1 T_{L,i} - K_2 T_{E,i} + \sum_n P_n \sum_{j=i-p}^{i-1} T_{L,j} (1 - \beta_n) \beta_n^{(i-j)} + \sum_n Q_n \sum_{j=i-p}^{i-1} T_{E,j} (1 - \beta_n) \beta_n^{(i-j)}, \quad (3.22)$$

gdje su T_I [K] i T_E [K] unutarnja i vanjska temperatura izmjerene u vremenima t , $\dot{T}_{I,i}$ i $\dot{T}_{E,i}$ vremenske su derivacije unutarnje i vanjske temperature, varijable β_n eksponencijalne su funkcije vremenske konstante τ_n , dok su K_1 , K_2 , P_n , i Q_n dinamičke karakteristike zida koje ovise o vremenskoj konstanti τ_n . Da bi se procijenila U vrijednost korištenjem dinamičke metode potrebno je: mjeriti gustoću toplinskog toka zajedno s unutarnjom i vanjskom temperaturom u nekoliko vremenskih intervala, izračunati vremenske derivacije unutarnje i vanjske temperature, uzeti jednu do tri vremenske konstante te izračunati eksponencijalnu funkciju svake vremenske konstante, što (pod pretpostavkom da je izabrano m vremenskih konstanti) rezultira s $2m+3$ nepoznatih parametara koji oblikuju matricu toplinskog toka, procijeniti vektore toplinskog toka te ocijeniti kvalitetu rezultata pomoću izračuna ukupnog kvadratnog odstupanja između procijenjenih i izmjerenih vrijednosti (uzimajući u obzir pri tome da je optimalni set vremenskih konstanti onaj koji daje najmanje kvadratno odstupanje). Zbog svoje složenosti, dinamička metoda ne koristi se često u praksi, iako su istraživanja pokazala da kada se koristi dinamička metoda su razlike između teorijskih i izmjerenih U vrijednosti manje [21] te da su rezultirajuće vrijednosti točnije i imaju nižu razinu varijabilnosti kada uvjeti testiranja nisu optimalni [21, 107, 108].

Norma ISO 9869-1:2014 [27] preporučuje da se mjerenja provode najmanje tri dana kako bi se procijenila U vrijednost elementa, no samo ako je temperatura oko senzora za mjerenje toplinskog toka stabilna. Ako temperatura nije stabilna, potrebno je produžiti vremenski interval što može rezultirati provođenjem mjerenja tijekom perioda dužeg od sedam dana. Nadalje, tijekom mjerenja, podaci se trebaju bilježiti kontinuirano u zadanim intervalima. Uz to, maksimalni vremenski period između dvaju zapisa i minimalno vrijeme trajanja testa trebaju se odrediti ovisno o vrsti elementa, unutarnjoj i vanjskoj temperaturi te metodama koje su korištene za analizu podataka. Tijekom mjerenja, potrebno je izbjeći izravan učinak kiše, snijega, solarne radijacije, uređaja za zagrijavanje ili hlađenje te uređaja za sušenje, ventilaciju i drugih tipova opreme koja izaziva prisilnu konvekciju. Lokaciju senzora toplinskog toka potrebno je istražiti infracrvenom termografijom kako bi se izbjeglo postavljanje senzora u blizini toplinskih mostova, pukotina, spojeva i sličnih mjesta koja mogu imati utjecaj na rezultate mjerenja. Konačno, prilikom provođenja mjerenja, prema rezultatima istraživanja pronađenim u literaturi [18, 19, 109, 110] razlika u temperaturi treba biti veća od 10 °C i treba ostati što je konstantnija moguće.

Prema normi EN ISO 9869: 2014-1 [27] duljina mjerenja ovisi o 3 uvjeta. Prvi uvjet definira da je minimalna duljina mjerenja 72 sata. Prema drugom uvjetu mjerenje se može završiti ako U vrijednost na kraju ispitivanja ne odstupa više od $\pm 5\%$ od vrijednosti izmjerene 24 h ranije, a treći uvjet je da se U vrijednost dobivena u prve dvije trećine mjerenja ne razlikuje više od $\pm 5\%$ od vrijednosti izmjerene u posljednje dvije trećine mjerenja. Ovim uvjetima se ograničava mjerna nesigurnost koja ovisi o nizu čimbenika, a u najvećoj mjeri o vanjskim uvjetima.

Na temelju istraživanja provedenih do danas, vidljivo je da na točnost mjerenja HFM metodom mogu utjecati brojni čimbenici pri čemu je potrebno naglasiti kako isti nisu specifični samo za HFM metodu, a najvažniji od njih su:

- oblik, veličina, lokacija i kut postavljanja HFM senzora [110-113],
- točnost opreme [114],
- orijentacija zida koji se ispituje [52],

- vremenski i klimatski uvjeti (brzina vjetra, solarno zračenje i padaline) [19, 21, 37, 52, 108],
- toplinska inercija [113],
- temperaturne razlike i toplinski tok [27, 28, 32, 110],
- smjer toplinskog toka [107, 115],
- sadržaj vlage [28, 34, 102, 112, 113],
- temperaturne oscilacije [34, 112, 113],
- trajanje ispitivanja [108],
- nesavršenosti u izvedbi vanjske ovojnice zgrade te starost materijala [47],
- naknadna obrada podataka i
- analitičke vještine [21, 108, 112, 116, 117].

Navedeni čimbenici općenito se mogu grupirati ovisno o uvjetima lokacije, stanja građevine i uporabe [39]. Prema autorima Albatici i suradnici [39], uvjeti lokacije uključuju vremenske uvjete prije i tijekom ispitivanja, kao što su brzina vjetra, solarna radijacija, padaline i karakteristična klima na lokaciji (posebice vlažnost), a koji mogu značajno utjecati na toplinsku učinkovitost građevinskih materijala. S obzirom na stanje građevine, autori navode utjecaj starenja građevinskih materijala i pravilne izvedbe elemenata tijekom građenja. Na kraju, po pitanju uvjeta uporabe, istaknuli su ponašanje korisnika građevine i radove održavanja kao najutjecajnije čimbenike.

Općenito, odstupanje između izmjerenih i izračunatih U vrijednosti značajno varira, a razina odstupanja značajno ovisi o tipu ispitivane građevine [31]. Prema normi ISO 9869-1:2014, mjerna nesigurnost in situ mjerenja dobivenih HFM metodom varira od 14% do 28% [27]. Kako bi se ocijenila točnost HFM metode, u tablici 3.2 prikazan je sažeti pregled prethodnih istraživanja provedenih na različitim tipovima zidova od 2000. do 2017. godine. Tablica 3.2 prikazuje imena autora te godine provedenih istraživanja, daje informacije o korištenim metodama (za obradu rezultata mjerenja dobivenih HFM metodom i analitičkim metodama koje su autori koristili za usporedbu), tipu ispitanog zida/materijala zida i godini izgradnje građevine, trajanju ispitivanja prema navodima autora rada, broju testiranih zidova (n), odstupanju između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti te razdoblju godine kada su mjerenja provedena.

Prikazano odstupanje između rezultata dobivenih korištenjem HFM metode i teorijske U vrijednosti izraženo je kao apsolutna vrijednost koristeći sljedeći izraz:

$$\sigma = \left| \frac{U_{HFM} - U_C}{U_C} \right| * 100 \quad (3.23)$$

Na temelju prethodnog pregleda istraživanja, općenito se može zaključiti da u slučaju tradicionalnih (povijesnih) građevnih dijelova, korištenje metode tabličnog proračuna i analitičkih izračuna često podcjenjuje toplinsku učinkovitost zida u usporedbi s rezultatima mjerenja HFM metodom [16, 33, 36, 109], odnosno izmjerene U vrijednosti niže su nego izračunate vrijednosti. S druge strane, za novije građevine, izmjerene U vrijednosti općenito su više nego teorijske U vrijednosti, što rezultira precjenjivanjem stvarne energetske učinkovitosti zgrade [19, 21,

35]. Izmjerene vrijednosti otprilike su 20% više [31], a u nekim slučajevima razlika je i do 100%, posebice ako je prisutan sloj izolacijskog materijala [17].

Analiza najutjecajnijih čimbenika koji utječu na točnost mjerenja U vrijednosti HFM metodom još uvijek je otvoreno pitanje. Primjerice, posljednja studija Gaspara i suradnika [108] fokusirala se na utjecaj trajanja ispitivanja na rezultate mjerenja te je ciljala ocijeniti i odrediti minimalno potrebno vrijeme trajanja ispitivanja kako bi se odredila U vrijednost fasada postojećih građevina. Rezultati su pokazali da minimalno trajanje eksperimentalnih ispitivanja ovisi o teorijskoj U vrijednosti fasade, stabilnosti klimatskih uvjeta i korištenoj metodi proračuna; točniji rezultati dobiveni su kada se koristila dinamička metoda. S obzirom na porast korištenja novih energetsko učinkovitih građevinskih materijala koji rezultiraju vrlo niskim U vrijednostima, Gaspar i suradnici [114] također su proveli in situ mjerenja fasada niskih U vrijednosti te su precizno definirali uvjete potrebne za provođenje mjerenja s ciljem poboljšanja točnosti mjerenja. Rezultati su pokazali da su temperaturni senzori imali velik utjecaj na točnost mjerenja te da temperaturne razlike prilikom ispitivanja moraju biti veće od onih koje su navedene u postojećoj literaturi. Nadalje, Evangelisti i suradnici [22] proučavali su učinak paljenja i gašenja sustava grijanja na točnost in situ izmjerenih U vrijednosti. Autori su predložili novu metodu obrade analize podataka pod nazivom „linearna linija trenda“. Predloženi pristup sastoji se od generiranja linearne linije trenda povezane s vrijednostima unutarnje temperature zraka, a podaci se obrađuju tako da se uklone vrijednosti koje su više od definirane linearne linije. Simulacijama i in situ mjerenjem, autori su dobili zadovoljavajuće preliminarnе rezultate na način da su smanjili razlike između izmjerenih i izračunatih U vrijednosti.

Trenutno se u postojećoj literaturi provode određena nastojanja da se predlože različiti pristupi dinamičke analize za procjenu U vrijednosti korištenjem HFM metode. Počevši od prvih dinamičkih metoda [106, 118], proteklih godina postignut je značajan napredak korištenjem naprednih dinamičkih metoda analize podataka u području povećanja točnosti te smanjenja potrebne duljine mjerenja u različitim sezonskim uvjetima. Anderlind [119] je predložio metodu višestruke regresije kako bi se eliminirao utjecaj varirajuće vanjske temperature koja je funkcionirala iznimno dobro i u hladnim i toplim klimama te je smanjila potrebno vrijeme mjerenja. Dodatni napredak u polju dinamičke analize podataka doveo je do korištenja dinamičkih modela crne komore koji se temelje na statističkom autoregresivnom pristupu [120-123] te različitim stohastičkim modelima sive komore [124-127] za identifikaciju fizikalnih karakteristika građevnih dijelova. Sve te metode imaju različite razine složenosti i točnosti te zahtijevaju prethodno modeliranje i identifikaciju sustava kako bi se dobili željeni parametri [128]. Do danas je u nekoliko studija razmatrano više raspoloživih metoda kako bi se provele komparativne analize između dobivenih rezultata ili su učinkovitosti testirane u različitim klimatskim uvjetima i pri različitim duljinama mjerenja [116, 126, 129]. Usporedba učinkovitosti svih analiza u funkciji duljine mjerenja i klimatskih uvjeta može se naći u radu autora Deconincka i Roelsa [130]. Rezultati studije pokazali su da polu-stacionarne i dinamičke metode analize imaju jednako dobru učinkovitost kada se razmatraju zimski setovi podataka, dok za proljetne i ljetne setove podataka samo dinamičke metode daju pouzdane procjene rezultata. Tijekom kratkotrajnih mjerenja, Anderlindov pristup imao je nešto bržu konvergenciju u točne procjene u usporedbi s ARX modelima i modelima sive komore. No, za podatke dužih perioda ispitivanja, točniji su bili ARX modeli i modeli sive komore. Konačno, prema studiji koju su proveli Deconinck i Roels

[130], stohastičko modeliranje sive komore zahtjevnije je u usporedbi s Anderlindovom metodom regresije i ARX metodom modeliranja, ali omogućuje korištenje seta alata za provjeru valjanosti koji nisu uključeni u ostale metode. Iako kada se koriste dinamičke metode analize podataka, sama analiza zahtjeva više vremena i složenija je, pokazalo se da su dinamičke metode manje osjetljive na duljinu mjerenja, daju točnije rezultate te skraćuju potrebno vrijeme mjerenja [21, 107, 130].

Iako su do sada provedene mnoge opsežne studije, HFM metoda ima jasna ograničenja po pitanju tipa analiziranih građevina te godišnjeg doba u kojem se provodi testiranje [51]. Kako Rasooli i suradnici [131] također navode u svom istraživanju, temperaturne oscilacije i toplinski tokovi s obje strane zidova još uvijek predstavljaju problem, kao i vrijeme kašnjenja toplinskog odziva zidova s većim toplinskim kapacitetom (budući da se u stvarnosti nikada ne postižu stabilni uvjeti).

Tablica 3.2 Sažeti prikaz prethodnih ispitivanja U vrijednosti korištenjem HFM metode

Autor i godina	Primijenjene metode	Tip zida/materijal zida Godina izgradnje	n	σ [%]	Razdoblje ispitivanja
Doran 2000 [31]	- HFM metoda – korekcija za utjecaj akumulacije topline - Metoda proračuna opisana normom BS EN ISO 6946	- Zidovi sa zračnim slojem i s drvenom okvirnom konstrukcijom - Prije 1998.g. - Minimalno 14 dana	21	1%–61% prosječno 21%	Prosinac 1998. – ožujak 1999.; studeni 1999., ožujak 2000.
Baker 2011 [32]	- HFM metoda – metoda prosjeka - Metoda proračuna opisana normom BS EN ISO 6946:1997 i u BRE publikaciji „Convention for U-value calculations”	- Zidovi sa zračnim slojem, od kamena i opeke - Prije 1919.g. - Minimalno 14 dana	57	0%–62% prosječno 24%	Studeni 2007. – svibanj 2010.g. (tijekom tri sezone grijanja)
Rye i Scott 2012 [29]	- HFM metoda – metoda prosjeka - Standardni proračun – računalni program BuildDesk v3.4., proračun prema BR 443 Conventions for U-value Calculations	- Kamen, drvena okvirna konstrukcija s različitim ispunom i zidovi sa zračnim slojem - Prije 1919.g. - Minimalno 14 dana	77	1%–126% prosječno 28%	Zima
Rhee- Duverne i Paul Baker 2013 [33]	- HFM metoda - Proračunske vrijednosti na temelju četiri karakteristične projektne vrijednosti toplinske provodljivosti (BS EN ISO 6946:1997 i BR443 Convention for U-value calculations)	- Tradicionalni zidovi od pune opeke u Velikoj Britaniji - 18. - 19. stoljeće - 3 do 4 tjedna	18	0%–62% prosječno 24%	Veljača – travanj 2010.g.
Asdrubali i sur. 2014 [19]	- HFM metoda - metoda prosjeka - Proračunska metoda - prema ISO 6946	- Zidovi projektirani prema principima bio-arhitekture od termoblokova - Između 2007. i 2008.g. - Minimalno 7 dana	6	4%–75% prosječno 30%	Sezone grijanja od 2010. do 2013.g.
Evangelisti i sur. 2015 [20]	- HFM metoda - metoda prosjeka - Proračunska metoda - prema UNI EN ISO 6946	- Tuf blok, šuplja opeka, šuplja opeka i beton - Krajem 1800-ih, ranih 1950-ih i 2000-ih - 8, 12 i 7 dana	3	14%–113% prosječno 58%	Prosinac 2014. - siječanj 2015.g.

Ficco i sur. 2015 [28]	- HFM metoda - metoda prosjeka (U_3) - Projektne vrijednosti i tehnički podaci dostupni u talijanskim normama (U_1) - Metoda uzorkovanja i endoskop (U_2)	- Zid od tuf bloka s i bez sloja toplinske izolacije od polistirena, prefabricirani s polistirenskim izolacijskim slojem, od dvostruke šuplje cigle s izolacijskim materijalom, od betonske opeke, od šuplje opeke i od laganih betonskih blokova - 1965., 1970., 1994., 2000., 2010. i 2015.g. - Duže od 72 h	6	1%–70%(163%*) prosječno 24% U_3-U_{1zima} 2%–55%(211%*) prosječno 13% U_3-U_{2zima} 45%–142% prosječno 90% U_3-U_{1jeto} 62%–264% prosječno 152% U_3-U_{2jeto}	Zima i ljeto
Walker i Pavia 2015 [34]	- HFM metoda - metoda prosjeka - Laboratorijska metoda - mjerene vrijednosti i vrijednosti od proizvođača	- Toplinsko izolirani povijesni zid od pune opeke sa 7 različitih vrsta izolacije: termalna boja, aerogel, vapno s dodatkom pluta, konopljino vapna, ploča od kalcijevog silikata, ploča s drvenim vlaknima i PIR izolacijska ploča - 1805.g., zgrada izolirana između prosinca 2013. i travnja 2014.g. - Podatci nisu dani	8	16%–33% prosječno 20%	Rujan 2014. - travanj 2015.g.
Gaspar i sur. 2016 [21]	- HFM metoda - metoda prosjeka (U_{HFMa}) i dinamička (U_{HFMD}) - Proračunska metoda - prema ISO 6946:2007	- Dvostruka fasada s neventiliranim zračnim slojem i unutarnjom izolacijom, jednostruka fasada bez zračnog sloja i izolacije - 1992., 1960., 2007.g. - 72 h	3	2%–20% prosječno 9% $U_{HFMa} - U_c$ 1%–10 % prosječno 3% $U_{HFMD} - U_c$	Prosinac - travanj
Bros Williamson i sur. 2016 [35]	- HFM metoda - Proračun prema projektnim vrijednostima	- Zid pasivne kuće s injektiranom poliuretanskom izolacijom i pločama od drvenih panela s izolacijom - 2012.g. - Između 14 i 21 dana	2	10%–65% prosječno 27%	Zima 2012./13. i 2014./15.g.
Lucchi 2016 [16]	- HFM metoda (U_{HFM}) – uglavnom metoda prosjeka - Metoda tabličnog proračuna (U_t) - Abacus zidanih konstrukcija (U_a) - Analitički proračun (U_c)	- Zidovi od opeke - 13. - 20. stoljeće - 7 dana za zidove debljine < 0.9 m i 14 dana za zidove debljine 0.9-1.1 m	14	7,7%–46,5% $U_t-U_{HFM}^{**}$ 1,6%–46,5% $U_a-U_{HFM}^{**}$ 4,6%–18% $U_c-U_{HFM}^{**}$	Dvije zimske sezone
Lucchi 2017 [36]	- HFM metoda (U_{HFM}) - uglavnom metoda prosjeka - Teorijske vrijednosti - prema UNI 10351 i UNI 1745 (U_t) - Proračunska metoda – prema ISO 6946 (U_c)	- Kameno zide - 12. - 18. stoljeće - 7 dana za zidove debljine < 0.9 m i 14 dana za zidove debljine 0.9-1.1 m	10	38%–47% $U_t-U_{HFM}^{**}$ 3%–54% $U_c-U_{HFM}^{**}$	Dvije zimske sezone
Hoffmann i Geissler 2017 [37]	- HFM metoda - Proračunska metoda – prema ISO 6946:2007	- Neizolirani zidovi podruma - ~1600., 1850., 1905., 1925., 1953., 1962./63. i 1965.g. - Minimalno 72 h	9	8%–54% prosječno 25%	Siječanj - veljača 2016.g.

* Najveće odstupanje od 163% i 211% dobiveno je za lagane građevne dijelove prilikom korištenja HFM indirektno metode.

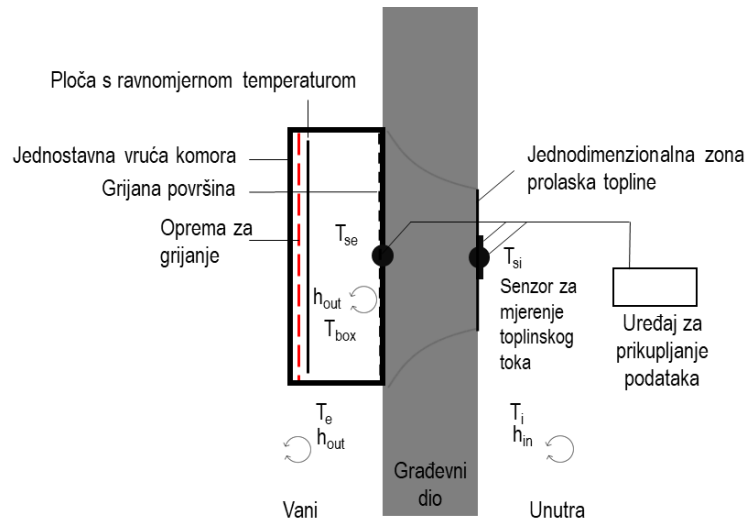
** Prosječnu vrijednost nije moguće odrediti, odstupanja navedena u tablici odgovaraju odstupanjima koja je autor naveo.

3.7.2 Metoda mjerenja toplinskog toka kroz građevne dijelove pomoću jednostavne vruće komore

In situ mjerenja U vrijednosti moraju se provesti u uvjetima minimalne temperaturne razlike između unutarnje i vanjske okoline kako bi se osiguralo da postoji mjerljiv toplinski tok kroz ovojnicu zgrade. Prema literaturi, preporuka je provesti ispitivanje pri temperaturnoj razlici većoj od 10 °C [30, 36, 40, 110, 132]. Kako bi se riješio ovaj problem, autori predlažu nove metode koje se bave jednostavnijom uspostavom i kontrolom minimalne temperaturne razlike između unutarnjeg i vanjskog zraka, a koje se temelje na pristupu HFM metode i vruće komore. Kombiniranjem prednosti metode vruće komore i HFM metode, istraživači iz Kine predložili su metodu mjerenja toplinskog toka kroz građevne dijelove pomoću komore za kontrolu temperature (eng. temperature control box-heat flow meter method, TCB-HFM method) [133-136], u daljnjem tekstu TCB-HFM metoda, koja osigurava relativno stabilno toplinsko okruženje, a postavlja se na unutarnju površinu elementa koji se ispituje. Ovisno o godišnjem dobu, komora za kontrolu temperature može zagrijati ili hladiti element koji se ispituje, čime se stvara temperaturna razlika između unutarnje i vanjske okoline. Međutim, glavno ograničenje ove metode jest u tome da kada se provode ljetna mjerenja, metoda zahtjeva dodatni sustav hlađenja komore za kontrolu temperature, što ju čini složenom za provođenje in situ mjerenja [137]. U literaturi postoji nekoliko istraživanja u kojima su provedena in situ mjerenja U vrijednosti zida TCB-HFM metodom i numeričke simulacije. U prvom od takvih istraživanja, dobivene su visoke razine točnosti mjerenja u usporedbi s projektnim vrijednostima. Istraživač Tian [133] je odredio U vrijednost zida od sinterirane glinene opeke te je dobio razliku između izmjerenih i projektiranih vrijednosti od samo 0,7%. U istraživanju kojeg su proveli Zhu i suradnici [136] na betonskom zidu, rezultati su pokazali devijaciju od +55% između projektirane i izmjerene U vrijednosti, a taj rezultat pripisan je visokoj vlažnosti. Budući da je do sada proveden mali broj istraživanja ova metoda još uvijek je u istraživačkoj fazi i istraživanja provedena do sada nisu dovoljna da bi se utvrdila primjenjivost i točnost metode.

Istraživači iz Kine predložili su još jednu metodu koja se naziva metoda mjerenja toplinskog toka kroz građevne dijelove pomoću jednostavne vruće komore (eng. simple hot box-heat flow meter method, SHB-HFM method) u daljnjem tekstu SHB-HFM metoda [51]. Predložena metoda kombinira principe HFM metode i prednosti TCB-HFM metode, a osnovna ideja istraživača je predložiti jednostavniju i točniju metodu koja se bavi vrlo složenim in situ uvjetima i stalnom urbanizacijom Kine zbog čega je potrebno provesti mjerenja na novim i ogromnim kompleksima zgrada. Metoda koristi jednostavnu eksperimentalnu opremu, izbjegava sezonska ograničenja HFM metode i tešku opremu metode vruće komore, stvarajući relativno stabilno toplinsko okruženje korištenjem jednostavne vruće komore. Jednostavna vruća komora, električni grijaći element, senzori za mjerenje toplinskog toka kroz građevne dijelove, termoparovi i uređaj za pohranu podataka glavni su instrumenti potrebni za mjerenje U vrijednosti, slika 3.5. Glavna razlika između SHB-HFM metode i TCB-HFM metode jest u tome da se SHB-HFM metoda temelji na originalnoj temperaturnoj razlici između unutarnje i vanjske okoline, zbog čega se metoda može koristiti neovisno o godišnjem dobu, a zagrijavanje omogućuje stvaranje temperaturnih razlika u svim okolnostima. Jednostavna vruća komora jednostavan je uređaj za kontrolu temperature koji se postavlja na stranu s višom temperaturom (na

unutarnju površinu tijekom zime i na vanjsku površinu tijekom ljeta, slika 3.5. Budući da ova metoda zahtjeva samo opremu za grijanje, pojednostavljen je proces ispitivanja i dobivanja rezultata, a troškovi sustava za ispitivanje su u usporedbi s TCB-HFM smanjeni.



Slika 3.5 Shematski prikaz određivanja U vrijednosti metodom mjerenja toplinskog toka kroz građevne dijelove pomoću jednostavne vruće komore u ljetnim uvjetima

Temeljno obilježje metode je da se vruća komora postavlja na površinu zida. Savjetuje se da se zid grije unutar komore do temperature od 20 °C [137] kako bi se uspostavila temperaturna razlika. Ovisno o veličini komore, formira se jednodimenzionalna (1D) zona prolaska topline u središnjem dijelu zida. Postavljanjem termoparova i senzora za mjerenje toplinskog toka kroz građevne dijelove na unutarnju i vanjsku površinu, mogu se dobiti vrlo točni podatci o U vrijednosti zidova [51].

SHB-HFM metoda koristi iste metode obrade podataka kao HFM metoda, a U vrijednost zida dobiva se korištenjem sljedeće jednadžbe [51]:

$$U = \left(\frac{1}{h_{out}} + \frac{\sum_{n=1}^N (T_{I,si,n} - T_{I,se,n})}{\sum_{n=1}^N q_{i,n}} + \frac{1}{h_{in}} \right)^{-1} \quad (3.24)$$

gdje su h_{out} [W/(m²K)] and h_{in} [W/(m²K)] vanjski i unutarnji koeficijenti prijelaza topline konvekcijom, $T_{I,si,n}$ [°C] i $T_{I,se,n}$ [°C] su n-te vrijednosti mjerenja temperature unutarnjih i vanjskih površina zida, $q_{i,n}$ [W/m²] je n-ta vrijednost mjerenja toplinskog toka na unutarnjoj površini zida, a N je ukupan broj mjerenja tijekom jednog ciklusa obrade podataka.

Prvo istraživanje kojeg su proveli Meng i suradnici [51] potvrdilo je primjenjivost korištenja SHB-HFM metode provođenjem in situ mjerenja U vrijednosti zida. Autori su proveli mjerenja U vrijednosti jednog zida od opeke na novoj zgradi, istražili su utjecaj raznih čimbenika na točnost ispitivanja (kao što su promjena lokacije senzora), uspostavili su i potvrdili matematički model te istražili utjecaj veličine komore na točnost rezultata mjerenja. Usporedbom izmjerenih U vrijednosti s projektnim pokazalo se da metoda daje točne rezultate, međutim uslijed

promjene lokacije senzora odstupanja između izmjerenih i projektnim U vrijednosti su se povećala sa -5,97% na -8,4% i -9,60%. U navedenom istraživanju, izmjerene U vrijednosti uvijek su bile niže od projektnih vrijednosti. Kako bi se dodatno poboljšala točnost mjerenja, autori su predložili korištenje dva senzora za mjerenje toplinskog toka kroz građevne dijelove na unutarnjoj i vanjskoj površini te su prosječnu dobivenu vrijednost definirali kao rezultat ispitivanja. Po pitanju matematičke simulacije, vrijednosti simulacije i mjerenja pokazale su dobru usklađenost u istim uvjetima mjerenja. Konačno, po pitanju veličine komore, autori su zaključili da veličina komore ima značajan učinak na točnost ispitivanja te da je umjereno povećanje dimenzija komore učinkovit način da se poboljša točnost in situ ispitivanja. U kasnijem istraživanju, Meng i suradnici [137] odredili su minimalne i optimalne dimenzije komore kada se uzmu u obzir tri utjecajna čimbenika (debljina zida, ekvivalentni koeficijent toplinske provodljivosti zida i razlika u temperaturi), s ciljem pojednostavljenja provođenja in situ mjerenja. Rezultati istraživanja su pokazali da se minimalne dimenzije komore trebaju linearno povećati s povećanjem debljine zida ili povećanjem ekvivalentnog koeficijenta toplinske provodljivosti. Po pitanju utjecaja temperaturne razlike na minimalne dimenzije komore, rezultati su pokazali da kada je razlika veća od 20 °C, minimalne dimenzije komore nije potrebno povećavati s povećanjem temperaturne razlike. Korištenjem metode višestruke linearne regresije, autori su definirali kvantitativan odnos između minimalnih dimenzija komore i debljine zida, ekvivalentnog koeficijenta toplinske provodljivosti zida te temperaturne razlike. Na temelju minimalnih dimenzija komore koje osiguravaju formiranje 1D zone prolaska topline, autori su također definirali optimalnu dimenziju komore, koja uzima u obzir dodatni prostor kojeg zauzimaju senzori za mjerenje toplinskog toka kroz građevne dijelove i temperaturni senzori. Drugo istraživanje koje je pronađeno u literaturi koristilo je sličnu metodu za mjerenje U vrijednosti na temelju HFM metode i pristupa vruće komore. Istraživanje su proveli Scarpa i suradnici [138] korištenjem dvije vruće komore postavljene na unutarnjoj strani ispitivanog elementa.

U tablici 3.3 prikazan je sažeti pregled rezultata prethodnih in situ mjerenja U vrijednosti zida SHB-HFM metodom. Prikazano odstupanje između rezultata dobivenih korištenjem SHB-HFM metode i teorijske U vrijednosti izraženo je kao apsolutna vrijednost koristeći sljedeći izraz:

$$\sigma = U_{SHB-HFM} - U_C = \left| \frac{U_{SHB-HFM} - U_C}{U_C} \right| * 100 \quad (3.25)$$

Tablica 3.3 Sažeti prikaz rezultata ispitivanja U vrijednosti korištenjem SHB-HFM metode

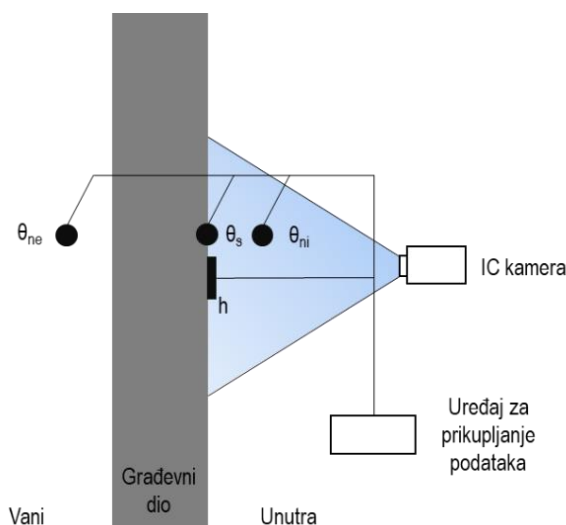
Autor i godina	Primijenjene metode	Tip zida/materijal zida Godina izgradnje	n	σ [%]	Razdoblje ispitivanja
Meng et al. 2015 [51]	- SHB-HFM metoda - Proračunska metoda	- Zid od opeke - Podatci nisu dani	1	4% - 7%	7. - 15.8.2013.g.

S obzirom na to da je SHB-HFM metoda relativno nova, do danas nije proveden velik broj istraživanja. Važno je naglasiti da su dosadašnja ispitivanja provedena samo u ljetnim uvjetima na samo jednoj vrsti zida. Iako su u preliminarnim istraživanjima dobivene visoke točnosti mjerenja u usporedbi s projektnim vrijednostima potrebno je dodatno istražiti ovu metodu kako bi se utvrdila njezina pouzdanost i primjenjivost.

3.7.3 Metoda infracrvene termografije

Uz HFM metodu, metoda infracrvene termografije (u daljnjem tekstu metoda IC termografije) jedna je od najčešće korištenih metoda za određivanje toplinskih svojstava zgrada. Primjena IC termografije postala je široko komercijalizirana početkom 1990-ih [42]. Kod analize zgrada, IC termografija se primarno koristila za kvalitativnu analizu i otkrivanje nedostataka na ovojnicama [132] kao što su pukotine [139], toplinski mostovi [140-142], vlaga i kondenzacija [139, 143-146], delaminacija [139, 147], mjesta prekida kontinuiteta toplinske izolacije [141, 148], mjesta na kojima je došlo do odvajanja žbuke [149], mjesta na kojima se pojavljuje propuštanje zraka [141, 145, 150, 151] te kao potpora provođenju HFM mjerenja po pitanju lokacije senzora za mjerenje toplinskog toka [27, 34, 152]. Međutim, primjena metode IC termografije danas je puno šira budući da se radi o nerazornom ispitivanju te da metoda omogućava brzo in situ ispitivanje relativno velikih površina u stvarnom vremenu. Osim za procjenu U vrijednosti, novija istraživanja vezana uz primjenu metode IC termografije u zgradarstvu bave se i poboljšanjima kvantitativnih procjena toplinskih mostova korištenjem različitim metodologijama i matematičkih alata [153-157].

Sve do nedavno, određivanje U vrijednosti ovojnice zgrade pomoću metode kvantitativne IC termografije bilo je tema mnogih istraživanja bez ikakve propisane norme [40, 158, 159]. No u kolovozu 2018. g., kao rezultat prethodno provedenih sveobuhvatnih studija, uvedena je međunarodna norma koja opisuje primjenu metode IC termografije za mjerenje toplinskog otpora i U vrijednosti neprozirnih građevnih dijelova u postojećim građevinama, opažanjem difuznih površina visoke emisivnosti [30]. Norma ISO 9869-2:2018 [30] definira i opisuje uređaje koji se koriste za mjerenje, postupke proračuna, metode mjerenja te povezane nesigurnosti. Ova metoda propisana je za okvirne sustave građevnih dijelova koji imaju relativno nizak toplinski kapacitet po jedinici površine od otprilike 30 kJ/(m²K) ili manje. Kako bi se izmjerila U vrijednost zidova, norma ISO 9869-2:2018 propisuje korištenje infracrvene kamere (s minimalnim mjernim područjem od -20 °C do 100 °C i s toplinskom osjetljivošću od najmanje 80 mK pri 30°), senzora za mjerenje koeficijenta prijelaza topline (h), senzora za mjerenje temperature zraka unutar i izvan građevine (θ_{ni} i θ_{ne}), termoparova te uređaja za prikupljanje i pohranu podataka, kako je prikazano na slici 3.6.



Slika 3.6 Shematski prikaz određivanja U vrijednosti metodom infracrvene termografije prema normi ISO 9869-2:2018

Određivanje U vrijednosti ovojnice zgrade pomoću metode IC termografije temelji se na mjerenju količine zračenja površina u kontaktu s vanjskim zrakom pomoću temperature površine zida, ukupnog koeficijenta prijelaza topline i temperature zraka. Toplinski tok kroz građevni dio izračunava se množenjem ukupnog koeficijenta prijelaza topline s razlikom između plošne unutarnje temperature građevnog dijela i temperature unutarnjeg zraka, pomoću sljedeće jednadžbe [30]:

$$Q = h (\theta_n - \theta_s) A \quad (3.26)$$

gdje je h [W/(m² K)] ukupni koeficijent prijelaza topline, A [m²] je površina mjernog područja prijelaza topline, θ_n [°C] je temperatura zraka, a θ_s [°C] je temperatura površine zida.

U vrijednost u stacionarnim uvjetima tada se izračunava korištenjem razlike između unutarnje i vanjske temperature zraka, korištenjem sljedeće jednadžbe [76]:

$$U = \frac{Q}{(\theta_{ni} - \theta_{ne}) \cdot A} \quad (3.27)$$

gdje je Q [W] toplinski tok, a θ_{ni} [°C] i θ_{ne} [°C] su unutarnja i vanjska temperatura zraka s obje strane mjernog područja.

Raspodjela temperature infracrvenom kamerom mjeri se na unutarnjoj površini mjernog područja. Pretpostavlja se da temperatura površine senzora za mjerenje temperature zraka postavljenog u blizini građevnog dijela predstavlja temperaturu unutarnjeg zraka, dok se ukupni koeficijent prijelaza topline građevnog dijela mjeri korištenjem senzora za mjerenje koeficijenta prijelaza topline. U slučaju kada temperatura površine mjerenog područja varira, potrebno je koristiti prosječnu temperaturu pojedinih površina mjernog područja.

Kako bi se dobili točni rezultati, potrebno je izbjeći izravne utjecaje ventilatora i uređaja za grijanje i hlađenje, područje koje se mjeri treba osloboditi od svih vizualnih smetnji koje ometaju vidno polje infracrvene kamere (kao što su zastori, zidne pregrade/vješalice i biljke), a razlika između unutarnje i vanjske temperature tijekom mjerenja mora biti viša od 10 °C kada je uređaj za grijanje uključen [19, 30, 40, 42, 158]. Kako bi se smanjile temperaturne oscilacije, unutarnji prostor u kojem se nalazi mjerno područje potrebno je izolirati zatvaranjem vrata zgrade, a ostali otvori (kao što su prozori) trebaju biti zatvoreni zastorima i roletama.

Za lagane zidove, norma navodi da se mjerenja provedu najmanje tijekom tri uzastopne noći u periodu od jedan sat nakon zalaska sunca do izlaska sunca, u intervalima od 30 minuta ili manje, dok za teške zidove vrijeme mjerenja treba biti duže. Mjerenja se trebaju provoditi sve dok rezultati uzastopnih trodnevnih mjerenja ne padnu unutar raspona od ±10%. U slučajevima kada uzastopna mjerenja nije moguće provesti, prihvatljivo je koristiti minimalni period vremena mjerenja od jednoga dana. U slučaju građevina s okvirnim sustavom i toplinskim kapacitetom 30 kJ/(m²K) ili manje, period mjerenja treba biti tri do šest sati između ponoći i 6 sati ujutro.

Prema normi, glavna ograničenja metode IC termografije koja utječu na točnost mjerenja su sljedeća [30]:

- mjerenje samo temperature unutarnje površine zida infracrvenom kamerom zbog vanjskih vremenskih uvjeta i učinaka kao što su lokalna sjena, solarno zračenje i brzina vjetra,
- provođenje mjerenja samo tijekom noći jer su vanjske temperature i temperature prostorija tijekom noći relativno stabilne, a na temperaturu ne utječu sunčeva svjetlost i prijelaz topline kroz građevne dijelove,
- otežano prikupljanje pouzdanih rezultata mjerenja u slučaju niskih U vrijednosti.

Uz ograničenja definirana normom, pojedini autori također su definirali nedostatke i ograničenja metode IC termografije na temelju provedenih istraživanja, a oni uključuju potrebu za potpunom evakuacijom zgrade prilikom provođenja mjerenja [131], troškove korištene opreme [160], potrebu za kvalificiranim i iskusnim osobljem [161] i poteškoću postizanja toplinske stimulacije na velikim površinama [160].

Do danas je proveden značajan broj istraživanja u području primjene IC termografije u zgradarstvu te je objavljeno nekoliko preglednih radova. Godine 2002., Balaras i Argiriou [162] detaljno su prikazali glavna područja u kojima se IC koristi za analizu zgrada. Nadalje, Kylili i suradnici [163] proučili su najnoviju literaturu i istraživanja korištenjem pasivne i aktivne termografije te su prikazali osnove IC termografije i termografskih procesa koji se koriste za analizu zgrada. Autori navode da iako je IC termografija koristan alat, moguće je razviti naprednije i točnije pristupe. Meola i suradnici [164] dali su pregled primjene IC termografije za vrednovanje materijala ili konstrukcija. Autori su opisali postupke mjerenja, parametre mjerenja i korištene metode obrade termograma. Nadalje, Nardi i suradnici [165] opisali su metodu IC termografije i njezin razvoj tijekom godina te su predstavili ponavljajuće probleme povezane s energijom zajedno s perspektivama dobivenim iz građevinskog sektora. Kirimtat i Krejcar [166] napravili su detaljan pregled primjene IC termografije za otkrivanje nedostataka u vanjskoj ovojnici zgrada. Opsežan pregled primjene IC termografije za energetski pregled građevina objavila je 2018. godine Lucchi [167]. U njezinom radu vidljivo je da su u prethodnim istraživanjima izmjerene U vrijednosti IC termografijom slične projektnim vrijednostima, a niže u usporedbi s vrijednostima dobivenim HFM metodom. Soares i suradnici [168] koristili su rezultate i znanje iz prethodnih studija kako bi opisali i naglasili glavne prednosti i nedostatke korištenja metode IC termografije za određivanje U vrijednosti građevnih dijelova.

Kako bi se ocijenila točnost postupka mjerenja U vrijednosti metodom IC termografije, u tablici 3.4 dan je sažeti pregled prethodno provedenih istraživanja na različitim tipovima zidova, zajedno s kratkim popisom korištenih eksperimentalnih metoda i odstupanjima u rezultatima u ovisnosti o primijenjenoj metodi.

Prikazano odstupanje između rezultata dobivenih korištenjem metode IC termografije i teorijske ili vrijednosti dobivene ispitivanjem u zaštićenoj vrućoj komori (eng. Guarded Hot Box, GHB) izraženo je kao apsolutna vrijednost koristeći sljedeći izraz:

$$\sigma = U_{IRT} - U_{C,HFM \text{ or } GHB} = \left| \frac{U_{IRT} - U_{C,HFM \text{ or } GHB}}{U_{C,HFM \text{ or } GHB}} \right| * 100 \quad (3.28)$$

U danom pregledu istraživanja, metoda IC termografije korištena je za mjerenje U vrijednosti unutarnjih [42, 45, 49, 50] i vanjskih [17, 40, 46, 159] zidova. Prema istraživanjima provedenima do danas, parametri koji utječu na točnost

rezultata ispitivanja U vrijednosti metodom IC termografije su emisivnost [34, 42, 160, 161, 169, 170], reflektivnost [34], boja [34], solarna radijacija [40, 159], vjetar [40, 159], infracrveno zračenje okoline [159], vrijednost plošnog koeficijenta prijelaza topline [43, 171-174] te razlika između unutarnje i vanjske temperature [40]. Prema istraživanjima, koeficijent prijelaza topline konvekcijom ima značajan utjecaj na rezultate [43]. Stoga, kada se provode mjerenja metodom IC termografije, preporučuje se izmjeriti i koristiti stvarnu vrijednost koeficijenta prijelaza topline konvekcijom, a ne vrijednost propisanu normom [43]. Osim ispitivanja na vanjskim zidovima, u literaturi postoje i istraživanja U vrijednosti metodom IC termografije na krovovima [42, 175] i staklenim površinama [42, 176].

Tablica 3.4 Sažeti prikaz rezultata ispitivanja U vrijednosti korištenjem metode IC termografije

Autor i godina	Primijenjene metode	Tip zida/materijal zida Godina izgradnje	n	σ [%]	Razdoblje ispitivanja
Kato i sur. 2007 [38]	- IC termografija - zaštićena vruća komora, GHB - prema ISO 8990 - Proračunska metoda (U_c)	- Drveni zid s ispunom od staklene vune - Podatci nisu dani	2	5,5% IRT- U_c 4% IRT-GHB	2. - 7.11.2006.g.
Albatici i Tonelli 2008 [39]	- IC termografija - Proračunska metoda (U_c) - HFM metoda	- Lagani vanjski zidovi - Podatci nisu dani	3	31% IRT- U_c 17% IRT-HFM	Prosinac 2007. - siječanj 2008.g.; 23 siječnja 2008.g.
Albatici i Tonelli 2010 [40]	- IC termografija - Proračunska metoda (U_c) - HFM metoda	- 2 lagana i 1 masivni vanjski zid - Podatci nisu dani	3	27–31%(162%*) Average 30% IRT- U_c 17% IRT-HFM	Siječanj i veljača
Grinzato i sur. 2010 [41]	- IC termografija - Proračunska metoda (U_c) - HFM metoda	- Izolirani vanjski zidovi - Podatci nisu dani	1	1%–37% IRT- U_c	15.3.2010.g.
Fokaides i Kalogirou 2011 [42]	- IC termografija - Proračunska metoda (U_c) - Termohigrometar - HFM metoda	- Zidovi od opeke, kamena i izolirano zidano žiđe - 1920., 1971., 1989., 2004. i 2008.g.	5	0%–12% Average 9% IRT _{zima} - U_c 1%–24% Average 13% IRT _{ljet} - U_c	Ljeto i zima, Kolovoz 2009. i veljača 2010.g.
Dall'O i sur. 2013 [43]	- IC termografija - Proračunska metoda (U_c) - koristeći 3 različite vrijednosti koeficijenta vanjskog prijelaza topline	- Zid od pune opeke, s zračnim slojem i sa izoliranim zračnim slojem - 1800., 1960., 1970., 1980., 1997., 2003., 2006., i 2009.g.	14	1,5%–154%** Average 36% IRT- U_c	Siječanj 2013.g.
Tzifa i sur. 2014 [44]	- IC termografija - Proračunska metoda - prema ISO 6946:2007	- višeslojni zid ovojnice zgrade s toplinskom izolacijom od mineralne vune - Podatci nisu dani	1	2%–68% Average 29% IRT _{zima} - U_c 10%–286% Average 97% IRT _{ljet} - U_c	4.2.2011.g. i 21.7.2011.g.
Danielski i Fröling 2015 [45]	- IC termografija - HFM metoda	- Lamelirani drveni zid - Podatci nisu dostupni	1	3%–11% IRT-HFM	Siječanj i veljača

Albatici i sur. 2015 [17]	- IC termografija - Proračunska metoda (U_c) - prema UNI EN ISO 6946:2008 - HFM metoda	- Drveni zid, od opeke, unutarnje i vanjski izolirani zid od opeke - Podatci nisu dani (eksperimentalna zgrada)	10	8%–19% Average 14% IRT- U_c	Studen 2010. - ožujak 2011.g.; Studen 2011 - ožujak 2012.g.; Studen 2012. - ožujak 2013.g.
Nardi i sur. 2014 [46]	- IC termografija - HFM metoda	- Perforirana opeka s izolacijskim slojem od polistirena - 1970-te; obnovljena	1	16%–28% Average 22% IRT- U_c 2%–37% IRT-HFM	Veljača 2013.g.
Nardi i sur. 2015 [47]	- IC termografija - Proračunska metoda (U_c) - prema ISO 6946:2007 - HFM metoda	- Zid od kamena, zid od betona izoliran s unutarnje strane EPS-om, zid od opeke sa zračnim slojem, izolacijskom pločom i dvostrukom ili jednostrukom ovješenoj fasadom - Druga polovica 1800., početak 90-ih i 2011.g.	3	4%–46% Average 20% IRT- U_c 1%–48% IRT-HFM	Ispitivanja u trajanju od 72 i 144 h
Nardi 2016 [48]	- IC termografija - u zaštićenoj vrućoj komori (GHB) koristeći metode prema autorima [17, 42, 43, 177] - Proračunska metoda (U_c) - HFM metoda	- Izolirani zid od opeke - Karakteristični zid talijanskog fonda zgrada građenog 1970-ih	1	0%–96% Average 22% IRT- U_c 0%–77% IRT-HFM	22.2.2013.g. i 27.2.2013.g.
Tejedor i sur. 2017 [49]	- IC termografija - Proračunska metoda (U_c) - prema UNE-EN ISO 6946:2012 - Nominalna vrijednost (U_i) - prema UNE-EN ISO 10456:2012 - HFM metoda	- Jednoslojni i višeslojni zid - 1979. i 2006.g.	2	4%–20% (2%-3% ^{***}) Average 12% IRT- U_c 13%-39% (11% ^{***}) IRT-HFM	Siječanj i veljača 2016.g.
Tejedor i sur. 2018 [50]	- IC termografija - Proračunska metoda (U_c) - prema UNE-EN ISO 6946:2012	- Masivni višeslojni zid - Podatci nisu dani	4	0,2%–9% Average 4% IRT- U_c	Siječanj - veljača 2017.g.

* Odstupanje od 162% dobiveno je pri brzini vjetrova od $v=1$ m/s.

** Postotno apsolutno odstupanje izvan prihvatljive razine (preko 50%) dobiveno je kod zgrada s toplinskom izolacijom postavljenoj sa vanjske strane.

*** Odstupanja od 4% do 20% i od 13% do 39% dobivena su provođenjem mjerenja bez grijanja zgrade, dok su odstupanja od 2% do 3% i 11% dobivena tijekom ispitivanja s uključenim sustavom grijanja 48 sati prije početka ispitivanja.

3.7.4 Temperaturna metoda

Temperaturna metoda (eng. Temperature based method, TBM) je relativno nova i jednostavna nestandardizirana metoda koja se koristi za provođenje mjerenja U vrijednosti in situ. U literaturi se ova metoda također naziva i termometrijska metoda (eng. Thermometric method, THM) [53] ili metoda omjera temperature zraka i površine (eng. Air-surface temperature ratio method, ASTR method) [58]. U nastavku će se radi lakšeg razumijevanja koristiti samo naziv temperaturna metoda odnosno skraćeno TBM.

Za određivanje U vrijednosti temperaturnom metodom potrebno je izmjeriti tri temperature: unutarnju temperaturu (T_i), vanjsku temperaturu (T_e) i temperaturu unutarnje površine zida (T_{si}). Stoga se od uređaja prilikom ispitivanja koriste: dva temperaturna senzora, uređaj za pohranu podataka i senzor za mjerenje temperature površine zida.

Metodologija provođenja mjerenja ovom metodom temelji se na Newtonovom zakonu hlađenja prema kojemu je brzina prijenosa topline proporcionalna temperaturnoj razlici između tijela i njegove okoline [85]. U stabilnim uvjetima, Newtonov zakon hlađenja izražava se korištenjem izraza:

$$Q = hA(T_s - T), \quad (3.29)$$

gdje je Q [W] toplinski tok, h [W/(m²K)] je plošni koeficijent prijelaza topline, A [m²] je površina, T_s [K] je temperatura površine tijela, a T [K] je temperatura okoline.

Uzimajući u obzir da je $T_i > T_e$, Newtonov zakon hlađenja može se za vanjski zid izraziti pomoću sljedećeg izraza:

$$Q = h_i A (T_i - T_{si}), \quad (3.30)$$

gdje je h_i [W/(m²K)] unutarnji plošni koeficijent prijelaza topline, T_i [K] je unutarnja temperatura zraka, a T_{si} [K] je unutarnja temperatura površine zida.

U pogledu U vrijednosti, toplinski tok kroz omotač građevine jednak je:

$$Q = AU(T_i - T_e); \quad (3.31)$$

te se U vrijednost može na temelju tri mjerenja temperature odrediti koristeći sljedeću jednadžbu:

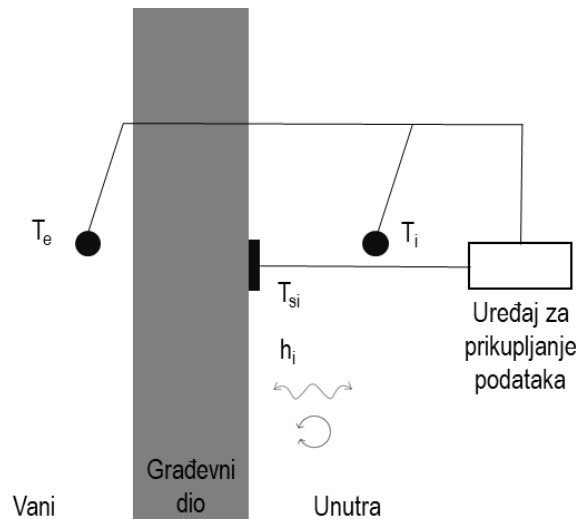
$$U = h_i \frac{T_i - T_{si}}{T_i - T_e} \quad (3.32)$$

gdje je T_e [K] vanjska temperatura zraka.

Poznati komercijalni sustavi koji izračunavaju U vrijednost na temelju mjerenja unutarnje i vanjske temperature zraka, unutarnje površinske temperature zida i plošnog koeficijenta unutarnjeg prijelaza topline obično koriste projektnu vrijednost plošnog koeficijenta prijelaza topline definiranu u normi HRN EN ISO 6946:2017 [9]. Međutim, istraživanja su pokazala da navedena vrijednost predstavlja samo procjenu i nije nužno reprezentativna za stvarne prijenose topline između okoliša i zida [178]. Stoga, da bi se dobio pouzdaniji rezultat, ključno je plošni koeficijent prijelaza topline odrediti mjerenjem dodatnih fizikalnih parametara.

Kao i kod drugih metoda, temperaturna metoda se također temelji na uspostavljanju temperaturnog gradijenta te je prema proizvođaču uređaja preporučena minimalna temperaturna razlika prilikom provođenja mjerenja od najmanje 15 °C [53]. Nadalje, preporučuje se provođenje mjerenja u stabilnim uvjetima, izbjegavajući temperaturne oscilacije između unutarnje i vanjske temperature koje mogu utjecati na rezultate mjerenja te pohrana podataka za kasniju obradu.

Osnovna razlika između temperature i standardizirane HFM metode odnosi se na način određivanja toplinskog toka. Kada se provodi HFM metoda, svi parametri potrebni za dobivanje U vrijednosti se mjere direktno (gustoća toplinskog toka mjeri se pomoću senzora koji je postavljen na površinu zida koji se ispituje, a temperature zraka mjere se pomoću dva temperaturna senzora) dok se kod upotrebe TBM toplinski tok aproksimira mjerenjem unutarnje temperature površine zida (T_{si}), unutarnje (T_i) i vanjske (T_e) temperature zraka, slika 3.7.



Slika 3.7 Shematski prikaz određivanja U vrijednosti primjenom temperature metode

Jedno od prvih istraživanja korištenjem temperature metode proveli su 2009. Vučićević i suradnici [54]. Autori su ocijenili simulaciju toplinskih svojstava stambene zgrade s četiri kata u predgrađu Beograda. Mjerenja unutarnje temperature zraka, vanjske temperature zraka i U vrijednosti ovojnice stana provedena su primjenom temperature metode tijekom četiri dana u prosincu, a rezultati su uspoređeni s rezultatima simulacije za slično vremensko razdoblje. Cuerda i suradnici [55] su za potrebe istraživanja nesrazmjera između izmjerenih i simuliranih toplinskih svojstava dviju stambenih zgrada u uporabi temperature metode koristili za određivanje U vrijednosti fasada. U provedenom istraživanju, U vrijednosti dobivene mjerenjem razlikovale su se 31% u odnosu na teorijski dobivene vrijednosti. Nadalje, Buzatu i suradnici [56] proveli su usporedbu U vrijednosti dobivenih mjerenjem temperature metodom s proračunskim vrijednostima dobivenima prema metodologiji proračuna u skladu s MC001/2009 koja uzima u obzir utjecaj toplinskih mostova. Autori su proveli mjerenja na dva vanjska zida i dobili postotne razlike od 44,19% i 40,18% između teorijskih i izmjerenih U vrijednosti primjenom temperature metode. Autori navode da ove razlike mogu biti posljedica nepoznatog sastava zida ili netočno definiranih vrijednosti toplinske provodljivosti materijala. U istraživanjima koja su proveli Vučićević, Cuerda, Buzatu i suradnici vidljivo je da je temperature metoda je korištena samo za mjerenje U vrijednosti, bez provedbe detaljne analize pouzdanosti i primjenjivosti metode. Međutim, nekoliko novijih istraživanja provedeno je upravo s tim ciljem. Primjerice, Andújar Márquez i suradnici [57] razvili su uređaj koji se temelji na metodologiji mjerenja triju temperatura u realnom vremenu s automatskim podešavanjem trajanja ispitivanja. U svom istraživanju autori su usporedili izmjerene U vrijednosti dobivene korištenjem temperature metode s vrijednostima dobivenim primjenom HFM metode prema ISO 9869-1 kako bi ocijenili točnost i pouzdanost razvijenog sustava. Rezultati su pokazali zanemarivu razliku od manje od 2%

između U vrijednosti dobivenih dvjema metodama kada su primijenjene istovremeno. S obzirom na dobivene male razlike, smatraju da su razvijeni uređaj i metoda idealni za primjenu prilikom energetske obnove zgrada jer omogućuju mjerenje U vrijednosti u zgradama na jeftin, brz, pouzdan i jednostavan način. U istraživanju koje su proveli Bienvenido-Huertas et.al., u Španjolskoj [53] analizirana je mogućnost primjene TBM provođenjem mjerenja tijekom zime, ljeta i jeseni na osam zidova iz različitih razdoblja gradnje. Rezultati su pokazali kako je provođenjem mjerenja u ljetnom periodu teško ostvariti pouzdane rezultate. S druge strane, prema rezultatima mjerenja u zimskim uvjetima dobivene razlike su između 6 % i 13 % u usporedbi s projektnim vrijednostima. Nadalje, za provjeru točnosti temperaturne metode, Kim i suradnici [58] proveli su terenska mjerenja temperaturnom i HFM metodom na četiri postojeće kuće, prije i nakon izvedbe energetske učinkovite izolacije. Usporedbom vrijednosti dobivenih pomoću HFM i temperaturne metode rezultati su pokazali razliku između mjerenja od prosječno 3,32 % i 3,09 % prije i nakon postavljanja toplinske izolacije. Osim toga, autori su usporedili rezultate dugotrajnih (sedam dana) i kratkotrajnih (jedan dan od 02:00 do 06:00) mjerenja. Dobivena razlika između kratkotrajnih i dugotrajnih mjerenja od približno $\pm 2,63$ % pokazala je da je TBM primjenjiva i za kratkotrajna mjerenja. U svom drugom istraživanju, Kim i suradnici [59] istražili su mogućnost poboljšanja točnosti mjerenja U vrijednosti in situ temperaturnom metodom. Autori su usporedili rezultate dobivene temperaturnom i HFM metodom pri čemu su dobivene razlike od 6-17 %. Autori su kao parametre koji najviše utječu na pouzdanost izmjerene U vrijednosti naveli plošni koeficijent prijelaza topline i temperaturne oscilacije.

U tablici 3.5 u nastavku je dan sažeti prikaz provedenih istraživanja s dobivenim odstupanjima u rezultatima mjerenja U vrijednosti u usporedbi s teorijskim vrijednostima ili U vrijednostima dobivenim primjenom HFM metode. Prikazano odstupanje između rezultata dobivenih s temperaturnom metodom i teorijskih vrijednosti ili U vrijednosti dobivenih HFM metodom određeno je pomoću sljedećeg izraza:

$$\sigma = U_{TBM} - U_{C \text{ or } HFM} = \left| \frac{U_{TBM} - U_{C \text{ or } HFM}}{U_{C \text{ or } HFM}} \right| * 100 \quad (3.33)$$

Iako se temperaturna metoda često koristi u praksi, pregledom literature pronađen je mali broj istraživanja primjene temperaturne metode za određivanje U vrijednosti. Nadalje, nedostaju istraživanja koja uključuju detaljnu analizu i mjerenje plošnog koeficijenta prijelaza topline kao ključnog parametra u ovoj metodi. S obzirom na velik broj faktora koji utječu na mjerenja U vrijednosti, a koji su detaljno većim dijelom istraženi za metode opisane normama, nedostaju ispitivanja na različitim vrstama građevnih elemenata i u različitim uvjetima kako bi se definirala ograničenja, uklonili mogući negativni utjecaji i donijeli dublji zaključci o pouzdanosti temperaturne metode. Međutim, iz prikazanog pregleda istraživanja o procjenama U vrijednosti građevinskih zidova primjenom temperaturne metode, vidljivo je da metoda daje obećavajuće rezultate [57-59] te bi stoga trebala biti predmet budućih istraživanja s obzirom na značajne prednosti u odnosu na standardizirane metode poput brzine provođenja mjerenja, jednostavnosti obrade podataka i smanjenih troškova ispitivanja.

Tablica 3.5 Sažeti pregled ispitivanja TBM-om za određivanje U vrijednosti vanjskih zidova

Autor i godina	Primijenjene metode	Tip zida/materijal zida Godina izgradnje	n	σ [%]	Razdoblje ispitivanja
Cuerda i sur. 2016 [55]	- TBM - metoda proračuna prema Španjolskoj regulativi i bazama podataka	- Puna opeka + 4 cm toplinske izolacije - Izgrađena 1972. godine, rekonstruirana 2011	1	31% TBM-U _c	7 dana tijekom ljeta
Buzatu i sur. 2017 [56]	- TBM - metoda proračuna prema MC001/2009	- Toplinski izolirani zidovi - Podatci nisu dani	2	40%,44% TBM-U _c	Podatci nisu dani
Andújar Márquez i sur. 2017 [57]	- TBM - HFM metoda - prema ISO 9869-1	- Zidovi s ETICS sustavom - Podatci nisu dani	1	2% TBM-HFM	Ljeto
Bienvenido-Huertas i sur. 2018 [53]	- TBM - Proračunska metoda - prema ISO 6946	- 5 izoliranih i 3 neizolirana višeslojna zida od opeke - 1966., 1981. i 2004. g.	8	4%-37%* TBM _{zima} -U _c 7%-62%* TBM _{ljeto} -U _c 19%-83%* TBM _{jesen} -U _c	Zima, ljeto i jesen
Kim et al. 2018 [58]	- TBM - HFM metoda - prema ISO 9869-1	- Višeslojni zidovi od opeke - 1978., 1979., 1989. i 1991. g	4	0,3%-5% TBM-HFM	1.11.2015. - 31.12.2015.g.
Kim et al. 2018 [59]	- TBM - HFM metoda - prema ISO 9869-1	- zidovi od opeke s toplinskom izolacijom - 1982, 1983, 1988, i 1994. g.	12	6%-17% TBM-HFM	15.11.2017. - 15.12.2017.g.

* Prikazana odstupanja uključuju mjerenja s dva data logger-a za koja su autori dobili značajne razlike između rezultata. Dobivene razlike između rezultata posljedica su varijacija unutarnjih i vanjskih temperatura zraka zabilježenih s oba seta opreme. Optimalno ponašanje dobiveno je mjerenjem tijekom zime s kada je korišten jedan data logger-a, s odstupanjima između 6% i 13%.

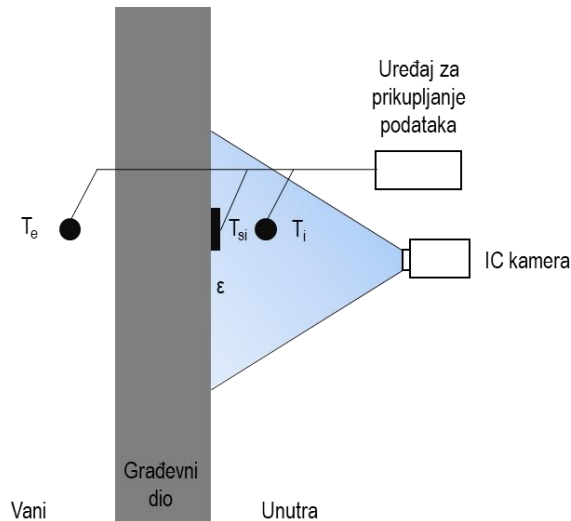
3.7.5 Metoda mjerenja koeficijenta prolaska topline pomoću prirodne konvekcije i radijacije

Kako bi se izbjegli nedostaci i ograničenja HFM metode predložena je još jedna nova metoda pod nazivom metoda mjerenja koeficijenta prolaska topline pomoću prirodne konvekcije i radijacije (eng. Natural Convection and Radiation method, NCaR method), u daljnjem tekstu NCaR metoda [179]. Eksperimentalna metodologija NCaR metode za in situ određivanje U vrijednosti temelji se na mjerenjima unutarnje i vanjske temperature zraka, unutarnje temperature površine zida i emisivnosti unutarnje površine zida korištenjem infracrvene kamere, slika 3.8. Metoda zahtjeva kontinuirano praćenje temperatura, a U vrijednost na kraju ispitivanja može se izračunati pomoću jednadžbe [179]:

$$U = \frac{C \cdot \sum_j (T_i - T_{si})_j^{n+1} + \varepsilon \cdot \sigma \cdot \sum_j (T_i^4 - T_{si}^4)_j}{\sum_j (T_i - T_e)_j} \quad (3.34)$$

gdje su C i n konstante izraza za proračun koeficijenta prijelaza topline konvekcijom, T_i [K] je unutarnja temperatura zraka, T_{si} [K] je temperatura površine zida, ε [-] je emisivnost, σ je Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ [W·m⁻²K⁻⁴]), a T_e [K] je vanjska temperatura zraka. U literaturi postoji nekoliko jednadžbi za proračun koeficijenta prijelaza topline konvekcijom sa različitim vrijednostima parametara C i n koje su definirali autori koji su proučavali

prirodnu konvekciju. Međutim, zbog utjecaja koeficijenta prijelaza topline na U vrijednost, a time i na energetske potrošnje građevine, izuzetno je važno odrediti stvarne vrijednosti koeficijente prijelaza topline konvekcijom i radijacijom mjerenjem dodatnih fizikalnih parametara [178].



Slika 3.8 Shematski prikaz određivanja U vrijednosti primjenom NCaR metode

Kako bi se dobili pouzdani rezultati, NCaR metoda zahtjeva stabilne uvjete tijekom vremena mjerenja od najmanje 72 sata i uz najmanju temperaturnu razliku od 10 °C između unutarnje i vanjske temperature. Interval bilježenja podataka NCaR metode isti je kao kod HFM metode, a prilikom mjerenja U vrijednosti potrebno je izbjeći prisilnu konvekciju.

NCaR metodu predložili su Janković i suradnici [179] 2017. godine kada su proveli HFM mjerenja koristeći metodu progresivne srednje vrijednosti te su usporedili izmjerene U vrijednosti s vrijednostima dobivenim korištenjem NCaR metode. Autori su također usporedili rezultate dobivene korištenjem različitih izraza raspoloživih u literaturi za izračun koeficijent prijelaza topline konvekcijom. Rezultati njihova istraživanja pokazali su dobro poklapanje između izmjerenih U vrijednosti dobivenih korištenjem objiju metoda, a dobivena odstupanja su iznosila od 5% do 29%. Autori su kao prednosti NCaR metode naveli da metoda ne ostavlja tragove niti oštećuje površinu građevinskog elementa te da je jednako pouzdana kao normirana HFM metoda, no značajno jednostavnija i jeftinija. Autori su kao značajnu prednost u usporedbi s HFM metodom naveli mogućnost mjerenja laganih zidova zgrada budući da senzori koji se koriste za mjerenje temperature ne mijenjaju značajno toplinski tok i temperaturna polja na površini građevinskog elementa.

U tablici 3.6 dan je sažeti prikaz rezultata provedenih istraživanja U vrijednosti NCaR metodom. Prikazano odstupanje između rezultata dobivenih s NCaR metodom i teorijskih vrijednosti ili U vrijednosti dobivenih HFM metodom određeno je pomoću sljedećeg izraza:

$$\sigma = U_{TBM} - U_{C \text{ or } HFM} = \left| \frac{U_{TBM} - U_{C \text{ or } HFM}}{U_{C \text{ or } HFM}} \right| * 100 \quad (3.35)$$

Tablica 3.6 Sažeti pregled ispitivanja provedenog NCaR metodom za određivanje U vrijednosti vanjskih zidova

Autor i godina	Primijenjene metode	Tip zida/materijal zida Godina izgradnje	n	σ [%]	Razdoblje ispitivanja
Janković i sur. [179]	- NCaR metoda – primjenom numeričkih vrijednosti konstanti C i n izvedenih iz izraza za koeficijent prijelaza topline konvekcijom definiranih od strane nekoliko autora [180-186] i normi [187] - Proračunska metoda (U_c) - HFM metoda	- Ožbukani zid od šuplje opeke - Podatci nisu dani	1	5%–29% Avg. 12% NCaR–HFM 0,5%-26% Avg. 9% NCaR– U_c	10.2. - 13.2.2015.g.

Eksperimentalna metodologija NCaR metode može se usporediti s eksperimentalnom metodologijom temperaturne metode budući da je jedina razlika u određivanju koeficijenta prijelaza topline konvekcijom. Razlika je u tome da su kod NCaR metode potrebna dodatna mjerenja kako bi se dobila stvarna vrijednost koeficijenta prijelaza topline konvekcijom koja može biti drugačija od one koju predlaže norma. Budući da su NCaR metodu testirali samo autori metode, potrebno je provesti dodatna ispitivanja na različitim tipovima građevinskih elemenata i u različitim uvjetima kako bi se definirala ograničenja, eliminirali mogući negativni učinci i kako bi se donijeli jasniji zaključci o pouzdanosti metode.

3.7.6 Usporedba postojećih in situ metoda za mjerenje koeficijenta prolaska topline vanjskih zidova

Usporedba metoda u pogledu točnosti, troškova, složenosti postupka ispitivanja i vremena potrebnog za provođenje mjerenja prikazana je u tablici 3.7. Na temelju usporedbe, moguće je ocijeniti složenost svake metode, a kriteriji na temelju kojih je provedena usporedba detaljno su objašnjeni u nastavku.

Točnost svake metode ocijenjena je na temelju raspona odstupanja, odnosno na temelju, minimalnih i maksimalnih odstupanja objavljenih u postojećoj dostupnoj literaturi. Pokazalo se da na točnost i veličinu izmjerene U vrijednosti svih metoda mogu utjecati razni čimbenici kao što su operativni uvjeti tijekom mjerenja i karakteristike materijala ovojnice [28], a pojedina objavljena odstupanja zapravo su rezultat tih utjecaja. Tijekom ljeta, pokazalo se da je teže postići minimalnu potrebnu temperaturnu razliku za provođenje mjerenja [53] te je potrebno posvetiti posebnu pozornost prilikom odabira orijentacije zida. Čimbenike koji značajno utječu na temperaturu vanjske površine zida istražili su Lehmann i suradnici [159]. Na temelju mjerenja provedenih na odabranoj zgradi i kasnijih studija osjetljivosti korištenjem simulacija pokazalo se da ponašanje vanjske površine zida ovisi o toplinskim svojstvima korištenih materijala te da solarno i infracrveno zračenje uzrokuju značajna ograničenja u pogledu termografije [159]. Autori su također naglasili da što je veća masa izložena suncu, više se solarne energije akumulira u slojeve uz površinu zbog čega je duže vidljiv solarni učinak, čak i nakon zalaska sunca [159]. Zbog navedenog, za HFM metodu i metodu IC termografije dobivena odstupanja objavljena u literaturi prikazana su odvojeno za ljetne i zimske uvjete, zajedno s prosječnim vrijednostima. Treba imati na umu činjenicu da nije proveden isti broj istraživanja za sve metode, odnosno, velik broj istraživanja proveden je koristeći normirane metode, dok za novije metode postoji samo ograničen broj istraživanja. Stoga podatci prikazani u tablici 3.7 prikazuju točnost rezultata

provedenih istraživanja, a ne točnost samih metoda. Za sve metode, prikazana su odstupanja u odnosu na teorijske U vrijednosti. Odstupanja za TBM i NCaR metodu prikazana su i u usporedbi s rezultatima dobivenim korištenjem HFM metode, budući da je za usporedbu i ocjenu točnosti novih metoda najčešće korištena upravo HFM metoda. U pogledu troškova, promatrani su troškovi opreme, materijala potrebnog za instalaciju uređaja i osposobljavanja osoblja za provođenje ispitivanja. Primjerice, za metodu IC termografije, definirane su tri razine programa izobrazbe za ovlaštene termografiste koji obavljaju termografska mjerenja [188]. Za potrebno vrijeme trajanja ispitivanja, prikazani su minimalni definirani periodi pronađeni u literaturi ili minimalni propisani periodi. Naposljetku, postupak ispitivanja ocijenjen je kao ili jednostavan ili složen uzimajući u obzir potrebnu opremu, ograničenja prilikom uporabe (npr. utjecaj korisnika) i potrebno vrijeme za postavljanje samih uređaja (prije korištenja i na lokaciji).

Tablica 3.7 Usporedba metoda za in situ mjerenje U vrijednosti s obzirom na točnost, troškove, trajanje i postupak ispitivanja

Metoda	Točnost Raspon [%]	Troškovi Niski/Visoki	Trajanje ispitivanja	Postupak ispitivanja Jednostavan/Složen
HFM	0%–163% (45%–142%*) Avg. 24% (90%*)	Visoki	Min. 3 dana	Složen
ICT	0%–162% (1%–286%*) Avg. 19% (55%*)	Visoki	Min. 3 noći	Složen
TBM	4%–37% (2%–62%*) 0,3%–17%**	Niski	Manje od 1 dana	Jednostavan
NCaR	0,5%–26% 5%–29%**	Niski	Min. 3 dana	Jednostavan
SHB-HFM	4%–7%	Visoki	Podatak nije dostupan	Složen

* Odstupanja dobivena za mjerenja provedena u ljetnim uvjetima.

** Postotna razlika u usporedbi s U-vrijednosti dobivenim primjenom HFM metode.

Kako bi se definirao točniji model koji će pomoći istraživačima prilikom odabira odgovarajućeg postupka mjerenja ovisno o parametrima kao što su tip zida (lagani, masivni itd.), period ispitivanja (sezona grijanja ili hlađenja), trajanje mjerenja, složenost, metode naknadne obrade podataka i svrha istraživanja (certifikacija, pregled itd.), nužno je provesti dodatna istraživanja svih postojećih metoda, posebice novijih metoda za koje postoji samo ograničen broj istraživanja.

4 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Eksperimentalna ispitivanja koeficijenta prolaska topline provedena su u sklopu internog znanstvenoistraživačkog projekta Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek pod nazivom "Vrednovanje eksperimentalnih metoda za određivanje koeficijenta prolaska topline u kontroliranim uvjetima", voditelja izv.prof.dr.sc. Hrvoja Krstića. Istraživanjem se usmjerilo na mjerenje U vrijednosti vanjskih zidova kao karakterističnih građevnih dijelova koji čine najveći postotak površine omotača zgrada. Za mjerenje U vrijednosti korištene su dvije nerazorne in situ metode: metoda mjerenja protoka topline kroz građevne dijelove (eng. Heat flow meter method, HFM method) i temperaturna metoda (eng. Temperature Based Method, TBM). Eksperimentalno istraživanje sastojalo se od izvedbe i ispitivanja zida načinjenog od zidnih elemenata karakterističnih za područje Republike Hrvatske, a utjecaj toplinske izolacije ispitan je za dva najčešće korištena sustava - sustav s ekspanziranom polistirenom (EPS-om) i kamenom vunom (KV). Izrađeno je i ispitano ukupno 18 modela zidova, od čega 6 modela toplinski neizoliranih i 12 modela toplinski izoliranih zidova. Ispitivanja modela provedena su u kontroliranim uvjetima unutar komore dok su s vanjske strane komore simulirani vanjski uvjeti odnosno temperature, ali bez nepoželjnog sunčevog zračenja (izravnog i reflektirajućeg), oborina i strujanja zraka. Kako bi se tijekom ispitivanja ostvarila preporučena temperaturna razlika od najmanje 15 °C između temperature unutarnjeg i vanjskog zraka eksperimentalna ispitivanja su provedena tijekom zimskih i ljetnih mjeseci. Ispitivanja modela provedena su u različitim uvjetima; održavanjem temperaturne razlike od 15 °C prosječno između unutarnjeg i vanjskog zraka u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i s održavanjem konstantne unutarnje temperature od 30°C tijekom sezone grijanja i 18°C tijekom sezone hlađenja.

4.1 Pregled i opis eksperimentalnih modela

S obzirom na dostupne materijale te pregled literature usvojeno je 18 različitih vrsta zidova. Dimenzije zidova definirane su uvjetom da se izbjegne utjecaj toplinskih mostova i rubnih dijelova zidova [189] na provođenje i rezultate ispitivanja. Za potrebe ispitivanja zidovi su izvedeni u stvarnoj veličini u mjerilu 1:1, visine 240 cm i duljine 220 cm.

Eksperimentalno su ispitani zidovi načinjeni od pune opeke (dimenzija 25/12/6,5 cm), šuplje blok opeke (dimenzija 29/19/19 cm), brušene šuplje blok opeke (dimenzija 37,5/25/24,9 cm), blokova od porastog betona (dimenzija 62,5/20/25 cm), betonskih blokova s recikliranom opekrom razvijenih na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek (dimenzija 19/12/9 cm) i brušene šuplje blok opeke s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune u vertikalnim šupljinama (dimenzija 37,5/25/24,9 cm).

Budući da je u okviru doktorske disertacije cilj bio i istražiti doprinos toplinske izolacije, nakon ispitivanja neizoliranih zidova provedeno je ispitivanje toplinski izoliranih zidova. Eksperimentalni dio istraživanja proveden je stoga u tri faze. U prvoj fazi istraživanja ispitan je zid bez toplinske izolacije, u drugoj fazi zid s ekspanziranom polistirenom (EPS) kao toplinskom izolacijom, a u trećoj fazi zid s kamenom vunom (KV) kao toplinskom izolacijom. Eksperimentalna ispitivanja zidova provedena su u različitim temperaturnim uvjetima, tijekom sezone grijanja i

hlađenja. Mjerenja U vrijednosti provedena su za sve vrste zidova TBM-om, a dodatno je na izabranim zidovima provedeno usporedno ispitivanje HFM metodom u svrhu vrednovanja temperaturne metode.

Pregled ispitanih tipova zidova prikazan je u tablici 4.1. S ciljem pojednostavljenja i postizanja lakše orijentacije, uvedene su oznake za ispitane zidove s obzirom na vrstu zidnog elementa, materijal i debljinu toplinske izolacije te uvjete ispitivanja. S obzirom na vrstu zidnog elementa ispitanim uzorcima su dodijeljene oznake od 1 do 6. Budući da su ispitivanja provedena u 3 faze, prvo toplinski neizoliranih zidova, a nakon toga toplinski izoliranih uvedene su oznake I, II i III pri čemu oznaka I označava toplinski neizolirani zid, oznaka II toplinski izoliran zid s 10 cm ekspaniranog polistirena (EPS-a), a oznaka III toplinski izoliran zid s 10 cm kamene vune. Oznakama a, b i c opisana su ispitivanja zidova u različitim temperaturnim uvjetima. Oznaka a odnosi se na ispitivanje s održavanjem temperaturne razlike od 15 °C prosječno između unutarnjeg i vanjskog zraka u ovisnosti o vanjskoj temperaturi, oznaka b na ispitivanje s održavanjem konstantne unutarnje temperature od 30°C tijekom sezone grijanja, a oznaka c na ispitivanje s održavanjem konstantne unutarnje temperature od 18°C tijekom sezone hlađenja.

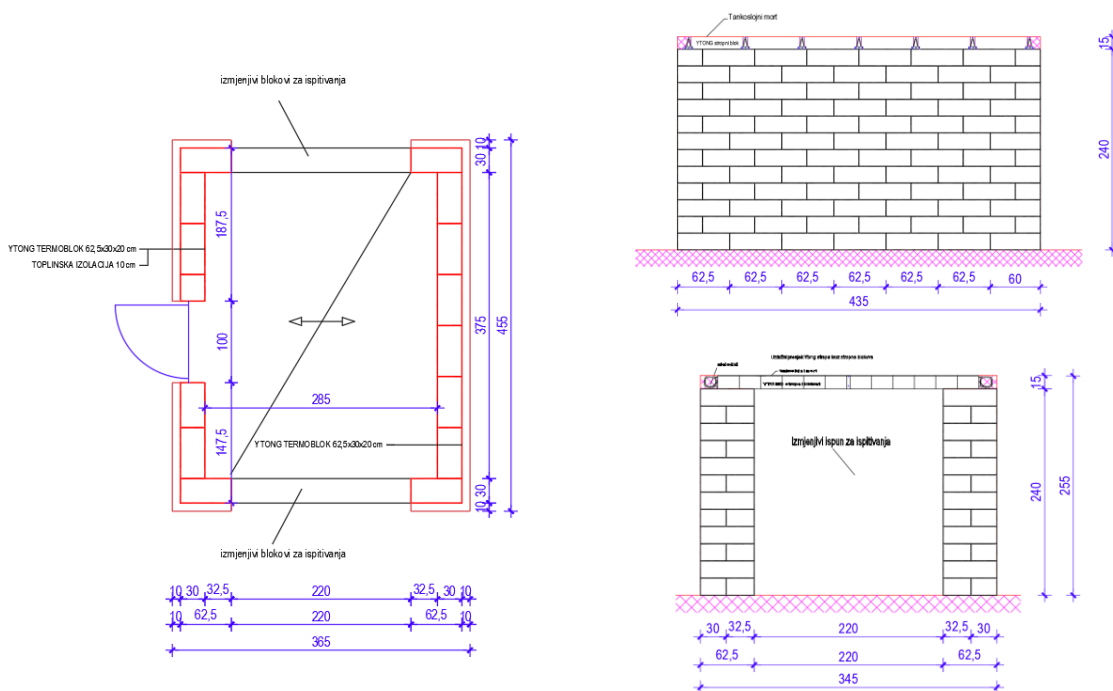
Tablica 4.1 Pregled eksperimentalno ispitanih zidova

Ispitani zidovi		Vrsta toplinske izolacije		Uvjeti ispitivanja	
Vrsta zidnog elementa	Oznaka	Materijal i debljina izolacije	Oznaka	Temperatura	Oznaka
Šuplja blok opeka	TIP 1	Neizolirani	I	$\Delta T=15^{\circ}\text{C}$	a
		Ekspanirani polistiren (EPS) 10 cm	II	$T_i=30^{\circ}\text{C}$	b
		Kamena vuna (KV) 10 cm	III	$T_i=18^{\circ}\text{C}$	c
Puna opeka	TIP 2	Neizolirani	I	$\Delta T=15^{\circ}\text{C}$	a
		Ekspanirani polistiren (EPS) 10 cm	II	$T_i=30^{\circ}\text{C}$	b
		Kamena vuna (KV) 10 cm	III	$T_i=18^{\circ}\text{C}$	c
Brušena šuplja blok opeka	TIP 3	Neizolirani	I	$\Delta T=15^{\circ}\text{C}$	a
		Ekspanirani polistiren (EPS) 10 cm	II	$T_i=30^{\circ}\text{C}$	b
		Kamena vuna (KV) 10 cm	III	$T_i=18^{\circ}\text{C}$	c
Blok od porastog betona	TIP 4	Neizolirani	I	$\Delta T=15^{\circ}\text{C}$	a
		Ekspanirani polistiren (EPS) 10 cm	II	$T_i=30^{\circ}\text{C}$	b
		Kamena vuna (KV) 10 cm	III	$T_i=18^{\circ}\text{C}$	c
Brušena šuplja blok opeka s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune	TIP 5	Neizolirani	I	$\Delta T=15^{\circ}\text{C}$	a
		Ekspanirani polistiren (EPS) 10 cm	II	$T_i=30^{\circ}\text{C}$	b
		Kamena vuna (KV) 10 cm	III	$T_i=18^{\circ}\text{C}$	c
Betonski blok s recikliranom opekom	TIP 6	Neizolirani	I	$\Delta T=15^{\circ}\text{C}$	a
		Ekspanirani polistiren (EPS) 10 cm	II	$T_i=30^{\circ}\text{C}$	b
		Kamena vuna (KV) 10 cm	III	$T_i=18^{\circ}\text{C}$	c

4.2 Opis komore

Dimenzije komore za ispitivanje određene su na temelju izrađenog detaljnog pregleda literature, količinu opreme koja je predviđena za provođenje eksperimentalnog istraživanja te ograničenja uređaja korištenih za ispitivanje. Za potrebe provođenja in situ ispitivanja izgrađena je komora bruto površine 16,6 m². S obzirom na to da se normama prilikom ispitivanja U vrijednosti zahtijevaju stabilni meteorološki uvjeti (bez sunčevog zračenja, bez oborina uz što manji utjecaj vjetra), komora je izvedena unutar negrijane zgrade. Unutar komore je reguliran mikro okoliš (vlaga i temperatura) dok su s vanjske strane komore simulirane vanjske temperature bez nepoželjnog sunčevog zračenja (izravnog i reflektirajućeg), oborina i strujanja zraka. Eksperimentalno istraživanje provedeno je na taj način u kontroliranim meteorološkim uvjetima u izvedenoj komori za ispitivanje dimenzija 3,65/4,55/2,55 m. Na slici 4.1 prikazana je geometrija izvedene komore za potrebe provođenja ispitivanja, a slici 4.2 fotodokumentacija izvođenja komore.

U unutrašnjosti komore omogućeno je postizanje temperaturnih uvjeta potrebnih za ispitivanje kao što je najmanje 15°C razlike u temperaturi između unutarnjeg i vanjskog zraka ugradnjom i korištenjem računalno kontroliranog uređaja za grijanje i hlađenje. Dvije dulje, nasuprotne strane komore izvedene su od laganih betonskih termoblokova debljine 30 cm te su s vanjske strane obložene toplinskom izolacijom debljine 10 cm. Druge dvije nasuprotne strane komore izvedene su na način da omoguće ispitivanje i naizmjenično postavljanje različitih zidnih elemenata i vrsta toplinskih izolacija. Strop komore izveden je od stropnih gredica i laganih betonskih blokova s toplinskom izolacijom debljine 10 cm.



Slika 4.1 Geometrija komore



Slika 4.2. Izvedba komore za ispitivanje

4.3 Tehnologija izvođenja ispitanih modela zidova

Za potrebe eksperimentalnog ispitivanja izvedeni su zidovi od opečnih zidnih elemenata (pune opeke, šuplje blok opeke, brušene šuplje blok opeke i brušene šuplje opeke s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune u vertikalnim šupljinama), zidovi od zidnih elemenata od porastog betona i zidovi od betonskih zidnih elemenata s recikliranom opekom koji su razvijeni na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek.

Prije zidanja svih modela zidova provjerena je dokumentacija koja prati građevni proizvod i oznake građevnih proizvoda sukladno posebnim propisima kojima se uređuju građevni proizvodi, provjerena je usklađenost objavljenih svojstava građevnog proizvoda u odnosu na njegove bitne značajke te je provedena vizualna kontrola zidnih elemenata i morta zbog utvrđivanja mogućih odstupanja od svojstava i/ili oštećenja. Također, prije početka zidanja zidova provjerena je ravnina podloge te izvedena horizontalna hidroizolacija u obliku ljepenke kako bi se spriječila pojava vlage u zidovima. Kako prilikom izmjene ispitivanog zida ne bi došlo do oštećenja konstrukcije komore, između ispitivanog zida i komore postavljen je sloj ekspaniranog polistirena (EPS-a) debljine 2 cm. S unutarnje strane ispitivanog zida od opečnih zidnih elemenata i od betonskih zidnih elemenata s recikliranom opekom izveden je sloj žbuke (slika 4.3) kako bi se umanjio utjecaj strujanja zraka kroz horizontalne i vertikalne sljubnice morta. Unutarnji sloj žbuke nije izveden jedino u slučaju zida od zidnih elemenata od porastog betona s obzirom na specifičnost tehnologije izvođenja zida pomoću tankoslojnog morta i samim time smanjeni utjecaj strujanja zraka kroz horizontalne i vertikalne sljubnice morta.



Slika 4.3 Prikaz izvedbe unutarnjeg sloja žbuke

Za drugu fazu ispitivanja toplinski izoliranog zida izvedena je toplinska izolacija od ekspaniranog polistirena (EPS-a) u skladu sa zahtjevima HRN EN 13163:2016 [190], slika 4.4. Nakon ispitivanja zida s toplinskom izolacijom od ekspaniranog polistirena (EPS-a) toplinska izolacija je uklonjena te je za treću fazu ispitivanja postavljena toplinska izolacija od kamene vune (KV) u skladu sa zahtjevima HRN EN 13162:2015 [191], slika 4.5.



Slika 4.4 Postavljanje toplinske izolacije od ekspaniranog polistirena



Slika 4.5 Postavljanje toplinske izolacije od kamene vune

Toplinska izolacija izvedena je s vanjske strane ispitivanog zida pri povoljnim vremenskim uvjetima tijekom cjelokupne faze izvedbe, sušenja i stvrdnjavanja (pri temperaturama između 5 i 30 °C). Lijepljenje toplinsko-izolacijskih ploča od ekspaniranog polistirena i kamene vune izvedeno je tvornički pripremljenim polimer-cementnim mortom. S obzirom na to da je zide izvedeno u kontroliranom okolišu toplinska izolacija nije dodatno mehanički učvršćena. Kako bi se umanjio utjecaj strujanja zraka kroz spojeve toplinsko-izolacijskih ploča izveden je armaturni sloj od alkalno postojane staklene mrežice utisnute u polimer-cementni mort.

4.3.1 Tehnologija izvođenja zidova opečnim zidnim elementima od pune i šuplje blok opeke

Za potrebe eksperimentalnog ispitivanja, zidovi od opečnih zidnih elemenata izvedeni su u skladu s Tehničkim propisom za građevinske konstrukcije (NN 17/17, 75/20) [192]. Zid od šuplje blok opeke blokovima dimenzija 29/19/19 cm, a zid od pune opeke izveden je opekom dimenzija 25/12/6,5 cm, slike 4.6 i 4.7. Nakon postavljanja hidroizolacije i prije početka zidanja oba zida provjerena je ravnina podloge nakon čega je postavljen izravnavajući sloj morta debljine do 1,5 cm. Prilikom ugradnje zidanog ispuna od pune opeke i šuplje blok opeke zidni elementi povezani su vapneno-cementnim mortom čvrstoće M5 (najmanja tlačna čvrstoća nakon 28 dana, N/mm²). Horizontalne i vertikalne sljubnice morta izrađene su u debljini od 6 mm do 15 mm. Pri zidanju zida zidni elementi u pravilu su preklapljeni za pola duljine zidnog elementa, mjereno u smjeru zida, a iznimno za 0,4 visine zidnog elementa, ali ne manje od 4 cm.



Slika 4.6 Zidanje zida od šuplje blok opeke



Slika 4.7 Zidanje zida od pune opeke

4.3.2 Tehnologija izvođenja zidova opečnim zidnim elementima od brušene šuplje blok opeke i brušene šuplje blok opeke s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune u vertikalnim šupljinama

Za potrebe eksperimentalnog ispitivanja, zidovi od opečnih zidnih elemenata izvedeni su u skladu s Tehničkim propisom za građevinske konstrukcije (NN 17/17, 75/20) [192]. Zid od brušene šuplje blok opeke i brušene šuplje blok opeke s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune izveden je blokovima dimenzija 37,5/25/24,9 cm.

Nakon postavljanja hidroizolacije i prije početka zidanja oba zida provjerena je ravnina podloge nakon čega je postavljen izravnavajući sloj morta debljine do 1,5 cm. Prema uputama proizvođača, prije početka zidanja horizontalna površina opeke očišćena je od prašine zidarskom četkom namočenom vodom. Prvi red blokova postavljen je na vlažan sloj izravnavajućeg morta, a korekcija ravnine izvedena je pomoću aluminijske letve. U usporedbi sa zidovima od opeke i šuplje blok opeke koji su zidani vapneno-cementnim mortom, zidovi od brušene šuplje blok opeke i brušene šuplje blok opeke s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune zidani su sistemom pero-utor te nanošenjem ljepila na horizontalne sljubnice. Prilikom zidanja zida od brušene šuplje blok opeke ljepilo je nanoseno na horizontalne sljubnice paralelno u 2 trake udaljene 2 cm od ruba blok opeke (slika 4.8), dok je pri zidanju zida od brušene šuplje blok opeke s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune ljepilo nanoseno u dvije male trake sa svake strane blok opeke (ukupno 4 niza ljepila) na keramički dio bloka u debljini stijenke bloka oko 1,5 cm (slika 4.9).

Pri zidanju oba zida blok opeka je preklapljena za pola duljine zidnog elementa. Dimenzije blokova prilagođene su dimenziji zida, a za njihovo rezanje korištena je električna pila kako bi se povećala brzina, kvaliteta i preciznost oblikovanja.



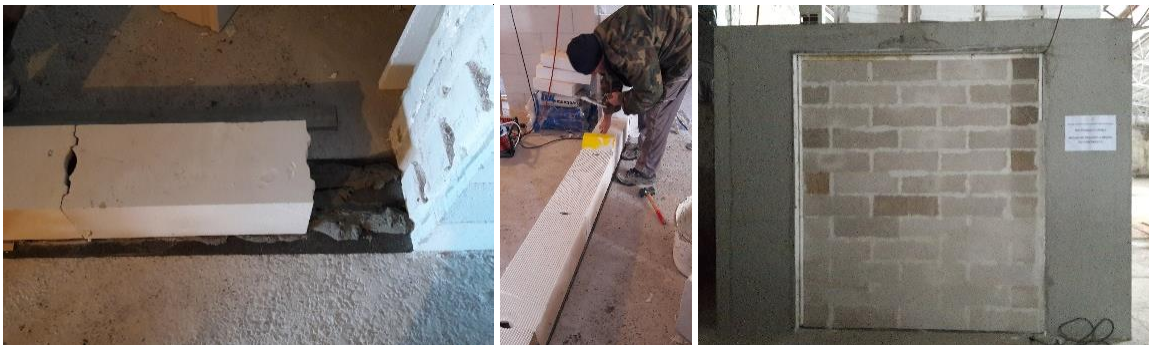
Slika 4.8 Zidanje zida od brušene šuplje blok opeke



Slika 4.9 Zidanje zida od brušene šuplje blok opeke s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune

4.3.3 Tehnologija izvođenja zidova zidnim elementima od porastog betona

Za potrebe eksperimentalnog ispitivanja, zid od zidnih elemenata od porastog betona izveden je blokovima dimenzija 62,5/20/25 cm prema uputama proizvođača, u skladu s Tehničkim propisom za građevinske konstrukcije (NN 17/17, 75/20) [192]. Nakon što je provjerena ravnina podloge te izvedena horizontalna hidroizolacija, prvi red blokova postavljen je na vapneno-cementni mort od kuteva prema sredini (slika 4.10). Korekcija ravnine izvedena je pomoću gumenog bata. Preostali redovi zidani su pomoću tankoslojnog morta. Tankoslojni mort pripremljen je u skladu s uputama proizvođača, a prije njegova nanošenja površina blokova očišćena je od prašine te je provjerena njihova čvrstoća i ravnina. Tankoslojni mort nanesen je u debljini od 2 do 3 mm na horizontalne sljubnice u dužini do 2 m i po cijeloj površini vertikalnih sljubnica (fuga). Za nanošenje tankoslojnog morta korištena je nazubljena lopatica.

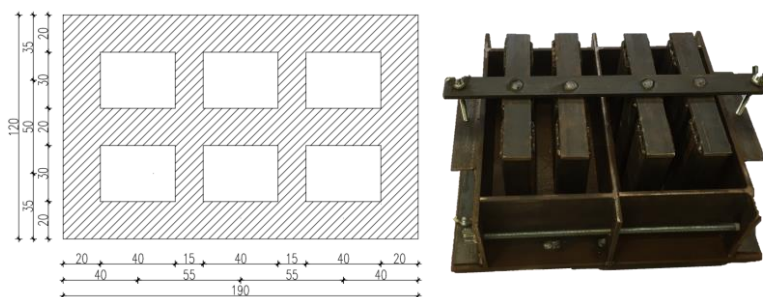


Slika 4.10 Zidanje zida od zidnih elemenata od porastog betona

Pri zidanju zida zidni elementi su preklapljeni za pola duljine zidnog elementa, mjereno u smjeru zida, a iznimno za 0,4 visine zidnog elementa, ali ne manje od 4 cm. Prilikom zidanja horizontalnost postavljenih blokova u uzdužnom i poprečnom smjeru provjerena je libelom. Dimenzije blokova prilagođene su dimenziji zida, a za njihovo oblikovanje korištena je električna pila kako bi se povećala brzina i preciznost oblikovanja.

4.3.4 Tehnologija izvođenja zidova betonskim zidnim elementima s recikliranom opekom

Zid od betonskih zidnih elemenata s recikliranom opekom izveden je blokovima dimenzija 19/12/9 cm (slika 4.11) koji su razvijeni na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek. Specifičnost zidnih elemenata s recikliranom opekom je ta da je prirodni agregat u potpunosti zamijenjen recikliranom drobljenom opekom dobivenom kao industrijski otpadni proizvod, i kombinacijom reciklirane drobljene glinene opeke i mljevenog ekspaniranog polistirena dobivenog mehaničkom reciklažom ekspaniranog polistirena. Za projektiranje sastava zidnih elemenata korištena je voda, dvije vrste veziva i različite vrste agregata i punila (filera). Kao vezivo korišteni su portlandski kompozitni cement CEM II /B-M (V-L) 32,5 N [193] i kalcij-vapnenac CL 90-S [194], a kao punilo prašinate čestice opeke i dolomita. Sastav betona projektiran je u skladu s preporukama Europskih smjernica za samozbijajući beton [195] s ciljem postizanja samozbijajućeg betona male čvrstoće, kako je definirano u ACI [196].



Slika 4.11 Dimenzije betonskih blokova s recikliranom opekom i kalupi korišteni za izradu betonskih blokova

Budući da se radi o novim zidnim elementima za potrebe eksperimentalnog ispitivanja izveden je zid u stvarnoj veličini (slika 4.12) te je u nastavku opisana tehnologija izvođenja.



Slika 4.12 Unutarnja (lijevo) i vanjska strana (desno) izvedenog zida od betonskih zidnih elemenata s recikliranom opekom

Tijekom izvođenja zida od betonskih zidnih elemenata s recikliranom opekom preporučuje se pridržavati sljedećih smjernica:

- Prije početka zidanja potrebno je izvesti horizontalnu izolaciju.
- Prilikom gradnje zidnim blokovima s recikliranom opekom prvi red blokova potrebno je postaviti na podlogu od morta pri čemu debljina morta ovisi o ravnini površine.
- Tijekom zidanja potrebno je kontrolirati vertikalnost i horizontalnost svakog reda pomoću libele.
- Zidni elementi moraju biti povezani mortom u skladu s pravilima struke. Mort je potrebno nanijeti na horizontalne i vertikalne sljubnice, slike 4.12 i 4.13.
- Prilikom zidanja mort je na horizontalne sljubnice potrebno nanijeti u 2 trake rubno na betonski dio bloka, slika 4.13.
- U skladu s Tehničkim propisom za građevinske konstrukcije [192] prilikom zidanja temperatura svježeg morta za zidanje ne smije biti niža od +5°C, niti viša od +35°C. Kada je srednja dnevna temperatura zraka manja od +5°C ili viša od +35°C, zidanje zida treba izvoditi pod posebnim uvjetima sukladno projektu zidane konstrukcije.
- Pri zidanju zida zidni elementi u pravilu se preklapaju za pola duljine zidnog elementa, mjereno u smjeru zida, a iznimno za 0,4 visine zidnog elementa, ali ne manje od 4 cm u skladu s Tehničkim propisom za građevinske konstrukcije [192].



Slika 4.13 Zidanje zida od betonskih zidnih elemenata s recikliranom opekom

4.4 Toplinska svojstva ugrađenih zidnih elemenata

Toplinska svojstva zidnih elemenata od šuplje blok opeke, brušene šuplje blok opeke, blokova od porastog betona i brušene šuplje blok opeke s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune preuzeta su od proizvođača. Na temelju deklariranih vrijednosti toplinske provodljivosti u suhom stanju određene su projektne vrijednosti (λ_d) prema HRN EN ISO 10456:2008 [197]. Projektne vrijednosti toplinske provodljivosti zidnih elemenata od šuplje blok opeke, brušene šuplje blok opeke, blokova od porastog betona i brušene šuplje blok opeke s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune prikazane su u tablici 4.2.

Tablica 4.2 Koeficijenti toplinske provodljivosti ugrađenih zidnih elemenata preuzeti od proizvođača

Zidni element	Koeficijent toplinske provodljivosti [λ_d]
Šuplja blok opeka	0,41
Brušena šuplja blok opeka	0,15
Blokovi od porastog betona	0,12
Brušena šuplja blok opeka sa integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune	0,08

S obzirom na to da toplinska svojstva pune opeke nisu ispitana od strane proizvođača, u laboratoriju Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek ispitana je toplinska provodljivost suhe pune opeke prema HRN ISO 8301:1998 [198], a koja je kasnije korištena za potrebe daljnje analize. Na temelju rezultata ispitivanja koeficijenta toplinske provodljivosti pune opeke u suhom stanju, λ_{dry} prikazanih u tablici 4.3, za daljnju analizu i proračun teorijske U vrijednosti određena je projektna vrijednost pune opeke prema HRN EN ISO 10456:2008 [197]. Korekcijom vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti s obzirom na toplinu i vlagu prema HRN EN ISO 10456:2008 [197] usvojena je projektna vrijednost toplinske provodljivosti od 0,80 W/mK.

Tablica 4.3 Podatci o ispitnim uzorcima i rezultati ispitivanja toplinske provodljivosti pune opeke

Rezultati ispitivanja uzorka 1				
Izmjere [mm] 150 x 150 x 35,20				
Naziv veličine	Jedinica	Mjerna točka		
		1	2	3
Srednja temperatura toplije strane uzorka	°C	23,37	18,39	13,40
Srednja temperatura hladnije strane uzorka	°C	16,97	12,07	7,11
Srednja temperatura uzorka	°C	20,17	15,23	10,25
Srednja temperaturna razlika	K	9,92	10,00	9,99
Srednja toplinska provodljivost pri +10°C, u suhom stanju [$\lambda_{10,dry}$]	W/mK	0,667	0,661	0,656
Rezultati ispitivanja uzorka 2				
Izmjere [mm] 150 x 150 x 32,74				
Naziv veličine	Jedinica	Mjerna točka		
		1	2	3
Srednja temperatura toplije strane uzorka	°C	23,42	18,43	13,44
Srednja temperatura hladnije strane uzorka	°C	18,19	13,26	8,31
Srednja temperatura uzorka	°C	20,81	15,84	10,88
Srednja temperaturna razlika	K	9,91	10,00	10,00
Srednja toplinska provodljivost pri +10°C, u suhom stanju [$\lambda_{10,dry}$]	W/mK	0,700	0,695	0,691
Rezultati ispitivanja uzorka 3				
Izmjere [mm] 150 x 150 x 35,62				
Naziv veličine	Jedinica	Mjerna točka		
		1	2	3
Srednja temperatura toplije strane uzorka	°C	23,22	18,23	13,26
Srednja temperatura hladnije strane uzorka	°C	17,91	12,98	8,05
Srednja temperatura uzorka	°C	20,56	15,60	10,65
Srednja temperaturna razlika	K	9,96	10,00	10,00
Srednja toplinska provodljivost pri +10°C, u suhom stanju [$\lambda_{10,dry}$]	W/mK	0,777	0,774	0,771

Budući da su betonski blokovi s recikliranom opekom razvijeni na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek, a kako bi se odredio koeficijent toplinske provodljivosti, ploča samozbijajućeg betona s recikliranom opekom ispitana je u ovlaštenom laboratoriju Instituta IGH. Ispitivanja su provedena prema normama HRN EN 12667:2002 (EN 12667:2001) [199] i HRN ISO 8302:1998 (ISO 8302:1991) [200]. Podatci o ispitnom uzorku prije ispitivanja kao i rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.4. Budući da je ispitivanjem određen koeficijent toplinske provodljivosti ploča samozbijajućeg betona s recikliranom opekom, a da betonski blokovi sadrže i šupljine, proveden je proračun koeficijenta toplinske provodljivosti betonskih blokova s recikliranom opekom uzimajući u obzir šupljine prema HRN EN ISO 6946:2017 [9]. Korekcijom dobivene vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti s obzirom na toplinu i vlagu prema HRN EN ISO 10456:2008 [197] usvojena je projektna vrijednost toplinske provodljivosti betonskih blokova s recikliranom opekom 0,36 W/mK.

Tablica 4.4 Podatci o ispitnom uzorku i rezultati ispitivanja toplinske provodljivosti ploče samozbijajućeg betona s recikliranom opekom

Podatci o ispitnom uzorku u suhom stanju prije ispitivanja				
Izmjere [mm]	Izmjerena gustoća [kg/m ³]	Izmjerena plošna masa [kg/m ²]	Period sušenja pri 105 °C	
497 x 499 x 99,44	1250,53	124,35	9 dana	
Rezultati ispitivanja				
Naziv veličine	Jedinica	Mjerna točka		
		1	2	3
Srednja temperatura toplije strane uzorka	°C	13,8	23,9	35,5
Srednja temperatura hladnije strane uzorka	°C	5,3	15,4	25,6
Srednja temperatura uzorka	°C	9,6	19,7	30,5
Srednja temperaturna razlika	K	8,5	8,5	9,9
Gustoća toplinskog toka [q]	W/m ²	15,040	15,044	17,716
Srednja toplinska provodljivost [λ]	W/mK	0,353	0,354	0,356
Srednja toplinska provodljivost pri +10°C, u suhom stanju [$\lambda_{10, dry}$]	W/mK	0,352		

4.5 Teorijske U vrijednosti eksperimentalno ispitanih zidova

Na temelju projektnih vrijednosti toplinske provodljivosti ugrađenih zidnih elemenata određene su teorijske U vrijednosti (U_t) eksperimentalno ispitanih zidova proračunom prema normi HRN EN ISO 6946:2017 [9], tablica 4.5.

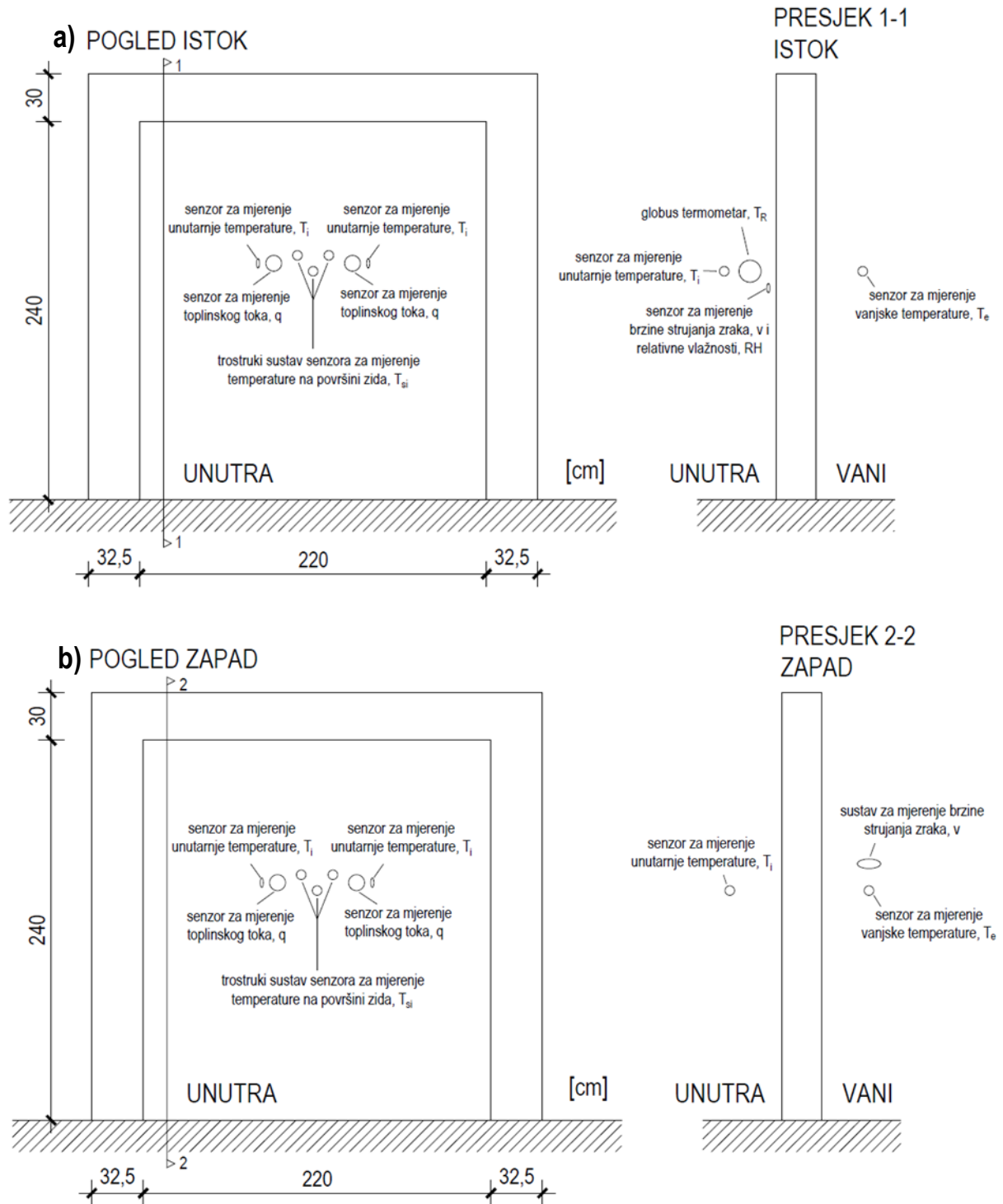
Tablica 4.5 Pregled eksperimentalno ispitanih zidova i U vrijednosti dobivenih proračunom

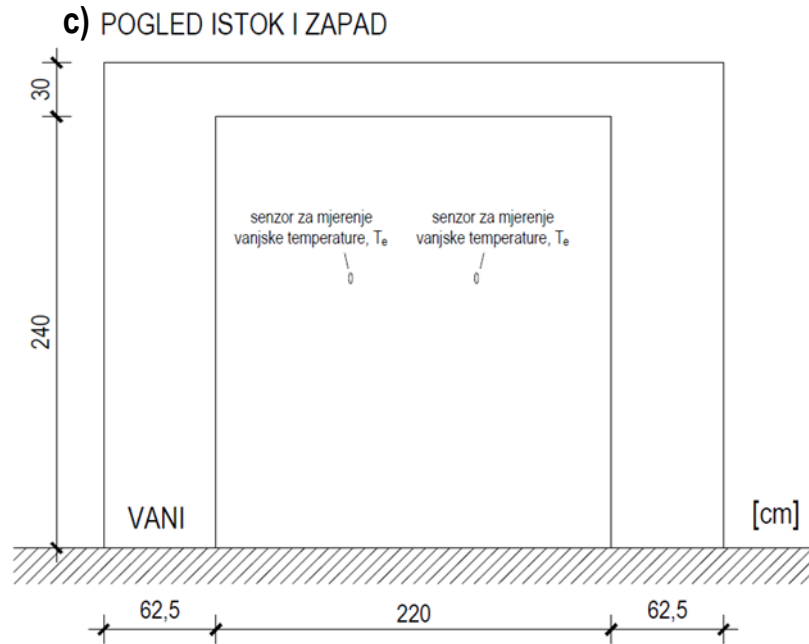
MODEL	DEBLJINA ZIDA	SLOJEVI I DEBLJINE SLOJEVA ZIDA (UNUTRA PREMA VAN)	λ_d [W/mK]	U_t [W/m ² K]
1/I	31 cm	Unutarnja žbuka – 2 cm	0,66	1,10
		Šuplja blok opeka – 29 cm	0,41	
1/II	43 cm	Unutarnja žbuka – 2 cm	0,66	0,28
		Šuplja blok opeka – 29 cm	0,41	
		Ljepilo za lijepljenje ploča EPS-a – 1,5 cm	0,80	
		Ekspandirani polistiren (EPS) – 10 cm	0,038	
		Ljepilo za armiranje ploča EPS-a (1.sloj) – 0,3 cm	0,80	
		Armatura mrežica	/	
1/III	44,5 cm	Ljepilo za armiranje ploča EPS-a (2.sloj) – 0,2 cm	0,80	0,26
		Unutarnja žbuka – 2 cm	0,66	
		Šuplja blok opeka – 29 cm	0,41	
		Ljepilo za lijepljenje ploča EPS-a 1,5 cm	0,80	
		Ljepilo za lijepljenje ploča kamene vune – 1,5 cm	0,80	
		Kamena mineralna vuna – 10 cm	0,035	
2/I	27 cm	Ljepilo za armiranje ploča kamene vune – 0,3 cm	0,80	1,96
		Armatura mrežica	/	
		Ljepilo za armiranje ploča kamene vune – 0,2 cm	0,80	
		Unutarnja žbuka – 2 cm	0,66	
		Puna opeka – 25 cm	0,80	
		2/II	39 cm	
Puna opeka – 25 cm	0,80			
Ljepilo za lijepljenje ploča EPS-a – 1,5 cm	0,80			
Ekspandirani polistiren (EPS) – 10 cm	0,038			
Ljepilo za armiranje ploča EPS-a (1.sloj) – 0,3 cm	0,80			
Armatura mrežica	/			
2/III	40,5 cm	Ljepilo za armiranje ploča EPS-a (2.sloj) – 0,2 cm	0,80	0,29
		Unutarnja žbuka – 2 cm	0,66	
		Puna opeka – 25 cm	0,80	
		Ljepilo za lijepljenje ploča EPS-a 1,5 cm	0,80	
		Ljepilo za lijepljenje ploča kamene vune – 1,5 cm	0,80	
		Kamena mineralna vuna – 10 cm	0,035	
3/I	27 cm	Ljepilo za armiranje ploča kamene vune – 0,3 cm	0,80	0,52
		Armatura mrežica	/	
3/II	39 cm	Ljepilo za armiranje ploča kamene vune – 0,2 cm	0,80	0,22
		Unutarnja žbuka – 2 cm	0,50	
		Brušena šuplja blok opeka – 25 cm	0,15	
		Ljepilo za lijepljenje ploča EPS-a – 1,5 cm	0,66	
		Ekspandirani polistiren (EPS) – 10 cm	0,039	
		Ljepilo za armiranje ploča EPS-a (1.sloj) – 0,3 cm	0,66	
3/III	40,5 cm	Armatura mrežica	/	0,21
		Ljepilo za armiranje ploča EPS-a (2.sloj) – 0,2 cm	0,66	
		Unutarnja žbuka – 2 cm	0,50	
		Brušena šuplja blok opeka – 25 cm	0,15	
		Ljepilo za lijepljenje ploča EPS-a 1,5 cm	0,66	
		Ljepilo za lijepljenje ploča kamene vune – 1,5 cm	0,80	
		Kamena mineralna vuna – 10 cm	0,039	

		Ljepilo za armiranje ploča kamene vune – 0,3 cm	0,80	
		Armatura mrežica	/	
		Ljepilo za armiranje ploča kamene vune – 0,2 cm	0,80	
4/I	25 cm	Blokovi od porastog betona – 25 cm	0,12	0,44
		Blokovi od porastog betona – 25 cm	0,12	
		Ljepilo za lijepljenje ploča EPS-a – 1,5 cm	0,66	
		Ekspandirani polistiren (EPS) – 10 cm	0,039	0,21
4/II	37 cm	Ljepilo za armiranje ploča EPS-a (1.sloj) – 0,3 cm	0,66	
		Armatura mrežica	/	
		Ljepilo za armiranje ploča EPS-a (2.sloj) – 0,2 cm	0,66	
		Blokovi od porastog betona – 25 cm	0,12	
		Ljepilo za lijepljenje ploča EPS-a 1,5 cm	0,66	
		Ljepilo za lijepljenje ploča kamene vune – 1,5 cm	0,80	
4/III	38,5 cm	Kamena mineralna vuna – 10 cm	0,035	0,19
		Ljepilo za armiranje ploča kamene vune – 0,3 cm	0,80	
		Armatura mrežica	/	
		Ljepilo za armiranje ploča kamene vune – 0,2 cm	0,80	
5/I	27 cm	Unutarnja žbuka – 2 cm	1,00	
		Šuplja blok opeke s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune – 25 cm	0,08	0,29
		Unutarnja žbuka – 2 cm	1,00	
		Šuplja blok opeke s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune – 25 cm	0,08	
		Ljepilo za lijepljenje ploča EPS-a – 1,5 cm	0,039	0,17
5/II	39 cm	Ekspandirani polistiren (EPS) – 10 cm	0,80	
		Ljepilo za armiranje ploča EPS-a (1.sloj) – 0,3 cm	/	
		Armatura mrežica	0,80	
		Ljepilo za armiranje ploča EPS-a (2.sloj) – 0,2 cm		
		Unutarnja žbuka – 2 cm	1,00	
		Šuplja blok opeke s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune – 25 cm	0,08	
		Ljepilo za lijepljenje ploča EPS-a 1,5 cm	0,80	
5/III	40,5 cm	Ljepilo za lijepljenje ploča kamene vune – 1,5 cm	0,035	0,16
		Kamena mineralna vuna – 10 cm	0,80	
		Ljepilo za armiranje ploča kamene vune – 0,3 cm	/	
		Armatura mrežica	0,80	
		Ljepilo za armiranje ploča kamene vune – 0,2 cm		
6/I	14 cm	Unutarnja žbuka – 2 cm	1,00	
		Betonski blok s recikliranom opekrom – 12 cm	0,36	1,92
		Unutarnja žbuka – 2 cm	1,00	
		Betonski blok s recikliranom opekrom – 12 cm	0,36	
		Ljepilo za lijepljenje ploča EPS-a – 1,5 cm	0,80	
6/II	26 cm	Ekspandirani polistiren (EPS) – 10 cm	0,039	0,32
		Ljepilo za armiranje ploča EPS-a (1.sloj) – 0,3 cm	0,80	
		Armatura mrežica	/	
		Ljepilo za armiranje ploča EPS-a (2.sloj) – 0,2 cm	0,80	
		Unutarnja žbuka – 2 cm	1,00	
		Betonski blok s recikliranom opekrom – 12 cm	0,36	
		Ljepilo za lijepljenje ploča EPS-a 1,5 cm	0,80	
6/III	27,5 cm	Ljepilo za lijepljenje ploča kamene vune – 1,5 cm	0,80	0,29
		Kamena mineralna vuna – 10 cm	0,035	
		Ljepilo za armiranje ploča kamene vune – 0,3 cm	0,80	
		Armatura mrežica	/	
		Ljepilo za armiranje ploča kamene vune – 0,2 cm	0,80	

4.6 Lokacije mjernih uređaja i postupak ispitivanja

Svi modeli su ispitani u komori pri čemu su istovremeno provedena ispitivanja dva zida ugrađena na dvije kraće strane komore. Prilikom ispitivanja mjerna oprema postavljena je unutar i izvan komore te okomito na zidove koji se ispituju, slika 4.14.





Slika 4.14 Shematski prikaz lokacija mjerne opreme: a) pogled i presjek istok unutra, b) pogled i presjek zapad unutra i c) pogled istok i zapad vani

Za potrebe ispitivanja korišteni su sljedeći instrumenti:

- DAIKIN klima uređaj FTXZ25N/RXZ25N za hlađenje, grijanje, pročišćavanje zraka, ventilaciju, ovlaživanje i odvlaživanje,
- termokamera Testo 882 za određivanje lokacije senzora kako bi se izbjegla mjesta toplinskih mostova, nepravilnosti, pukotina i sl. što značajno može utjecati na rezultate mjerenja,
- multifunkcijski uređaj Testo 435-4 s pripadajućim sondama i senzorima (temperaturnom bežičnom sondom i trostrukim sustavom senzora za mjerenje površinske temperature) za mjerenje U vrijednosti,
- multifunkcijski uređaj Testo 480 s globusnim termometrom za mjerenje topline zračenja i sondom za mjerenje brzine strujanja zraka i vlažnosti,
- HD37AB17D uređaj za mjerenje kvalitete zraka, uređaj mjeri i bilježi podatke o relativnoj vlažnosti (RH) zraka, temperaturi zraka, ugljik monoksidu (CO) i ugljik dioksidu (CO₂),
- termoparovi zajedno sa NI Compact RIO kontrolerom za mjerenje površinskih temperatura građevnih dijelova komore,
- OMEGA OM-CP-WIND101A za mjerenje brzine vjetra s vanjske strane komore,
- uređaj za mjerenje potrošene energije u kWh za održavanje zahtijevane temperature unutar komore,
- Hukseflux TRSYS01 sustav za mjerenje U vrijednosti,
- Minneapolis BlowerDoorUređaj za mjerenje zrakopropusnosti komore.

Tehničke specifikacije korištene opreme prikazane su u tablici 4.6.

Tablica 4.6. Glavne tehničke specifikacije korištene opreme

Oprema	Mjerno područje	Razlučivost	Točnost
Termokamera Testo 882	Vidno polje (FOV) Spektralni raspon Temperaturna razlučivost (NETD)	32° x 23° 7,5 do 14 μm <50 mK na +30 °C	- ±2 °C; ±2% od izmjerene vrijednosti
Testo 435-4 s termoparovima tip K	Temperatura na površini zida	-20 do +70 °C	0,1 °C ±0,1 °C
	Unutarnja temperatura zraka	-20 do +70 °C	0,1 °C ±0,1 °C
	Vanjska temperatura zraka	-60 do 400 °C	0,1 °C ±0,3 °C
Testo 480	Globus termometar s termoparom tip K	0 do 120 °C	0,1 °C
	Brzina strujanja zraka	0 do 20 m/s	Razred 1 prema HRN EN 60584-2 ±(0,3 m/s + 4% od izmjerene vrijednosti)
	Relativna vlažnost (RH) zraka	0 do 100%	0,1% ±2 %RH (+2 do +98% RH)
HD37AB17D	Relativna vlažnost (RH) zraka	5 do 98 %	0,1% ±2% (15-90% RH) pri 20°C, ±2,5% za preostalo mjerno područje
	Temperatura	-40 do +60 °C	0,1 °C ±(0,2°C ± 0,15% od izmjerene vrijednosti)
NI Compact RIO kontroler s termoparovima tip T	Temperatura	0 do 260 °C	0,1 °C ±0,5 °C
OMEGA OM-CP-WIND101A	Brzina vjetra	0 do 100 mph (0 do 45 m/s)	0,085 mph ±2,0 mph od 0 do 10 mph; ±2,5% od izmjerene vrijednosti od >10 do 100 mph
Hukseflux TRSYS01	Gustoća toplinskog toka, q	± 2000 W/m²	0.02 W/m² ±5%
	Temperatura	-30 do 70 °C	0.02 °C ± 0.1 °C

Eksperimentalni dio istraživanja proveden je tijekom zimskih mjeseci kada se s vanjske strane komore mogu osigurati niže temperature, odnosno simulirati zimski uvjeti. Na ovaj način definirani su rezultati mjerenja U vrijednosti u zimskim mjesecima. Budući da je tijekom ljetnih mjeseci također bilo moguće ostvariti temperaturnu razliku od 15°C, ispitivanja su provedena i u ljetnim uvjetima s ciljem utvrđivanja mogućnosti primjene i potencijalnih ograničenja metode. Sva ispitivanja provedena su u uvjetima bez oborina i izravnog sunčevog zračenja na vanjsku površinu ispitanih zidova, pri brzini vjetra manjoj od 1 m/s.

Za utvrđivanje veličine U vrijednosti korištene su dvije nerazorne metoda ispitivanja – temperaturna metoda i HFM metoda. Za in situ mjerenje U vrijednosti temperaturnom metodom korišten je uređaj Testo 435-4 s pripadajućim sondama i senzorima [201], slika 4.15. Testo 435-4 višenamjenski je mjerni uređaj koji na temelju temperature vanjskog zraka, temperature unutarnjeg zraka i temperature na unutarnjoj površini građevnog elementa izračunava U vrijednost građevnog dijela prema izrazu:

$$U = \alpha \times \frac{(\theta_i - \theta_{si})}{(\theta_i - \theta_e)} \quad (4.1)$$

pri čemu je α [W/m²K] koeficijent unutarnjeg prijelaza topline (prema normi HRN EN ISO 6946 za vodoravan smjer toplinskog toka odnosno vanjske zidove, $\alpha = 7,69$ W/m²K [9]), θ_i [°C] temperatura unutarnjeg zraka, θ_e [°C] temperatura vanjskog zraka i θ_{si} [°C] temperatura unutarnje površine građevnog elementa.

Budući da temperaturna metoda nije standardizirana, smjernice za provođenje mjerenja definirane su samo od strane proizvođača uređaja [202] i istraživača koji su proveli studije o pouzdanosti i primjenjivosti metode [53, 58, 59]. Prema uputama proizvođača uređaja prilikom provođenja mjerenja potrebno je [202]:

- postići temperaturnu razliku između unutarnjeg i vanjskog zraka od najmanje 15°C,
- osigurati stabilne meteorološke uvjete budući da promjenjivi (nestacionarni) uvjeti utječu na rezultate mjerenja što znači da se unutarnja ili vanjska temperatura ne bi trebale značajno mijenjati,
- postaviti termoparove koji mjere temperaturu unutarnje površine zida na međusobnom razmaku od 10 cm,
- postaviti sonde za mjerenje unutarnje i vanjske temperature na udaljenosti od 30 cm od ispitivanog zida te na istoj visini sa sondom za mjerenje temperature unutarnje površine građevnog elementa.

Kako je stabilne meteorološke uvjete teško postići preporučuju se dugotrajna mjerenja čime se na neki način simuliraju stabilni meteorološki uvjeti te mjerenja tijekom noći. Većina danih smjernica za provođenje ispitivanja temperaturnom podudara se sa zahtjevima i smjericama postavljenima u ISO 9869-1:2014 [27]. Zahtjevi poput provođenja mjerenja u stabilnim uvjetima, izbjegavanja izravnog sunčevog zračenja i provođenja mjerenja tijekom noći dani su i u ISO 9869-1:2014 [27].



Slika 4.15 Uređaj Testo 435-4, sonda s trostrukim sustavom senzora za mjerenje temperature površine zida (T_w) i senzorom na priključku sonde za određivanje unutarnje temperature zraka (T_i) te bežična sonda za određivanje vanjske temperature zraka (T_e) [201]

Za in situ mjerenje U vrijednosti HFM metodom korištene su dvije mjerne opreme Hukseflux TRSYS01 za mjerenje toplinskog otpora i U vrijednosti građevnih dijelova, certificiranih osjetljivosti 58,41 $\mu\text{V}/(\text{Wm}^2)$ i 62,54 $\mu\text{V}/(\text{Wm}^2)$ slika 4.16. Sustav TRSYS01 je opremljen uređajima visoke točnosti, s dva senzora HFP01 za mjerenje protoka topline kao i dva para termoparova za mjerenje unutarnje i vanjske temperature. Dvije mjerne lokacije osiguravaju visoku razinu pouzdanosti. Prilikom mjerenja mjerni podatci bilježeni su svakih 10 s, a 10-minutni prosjek podataka pohranjen je u memoriju.

Oprema TRSYS01 se sastoji od sljedećeg:

- dva HFP01 senzora za mjerenje protoka topline, mjernog raspona od $\pm 2000 \text{ W/m}^2$, rezolucije 0.02 W/m^2 , osjetljivosti $60 \times 10^{-6} \text{ V}/(\text{W/m}^2)$,
- MCU01 jedinice za mjerenje i upravljanje, raspona radne temperature -20 to +50 °C,
- dva TC termopara za mjerenje unutarnje i vanjske temperature,

- adhezivne trake za što bolju prionjivost senzora na površinu.



Slika 4.16 Uređaj TRSYS01 za mjerenje toplinskog otpora i U vrijednosti građevnih dijelova

Prije početka mjerenja, lokacija senzora korištenih prilikom in situ ispitivanja U vrijednosti TBM i HFM metodom istražena je infracrvenom termografijom kako bi se izbjegla mjesta toplinskih mostova, nepravilnosti, pukotina i sl. što može značajno utjecati na rezultate mjerenja.

5 REZULTATI PROVEDENIH EKSPERIMENTALNIH ISPITIVANJA

Kao izlazni podaci eksperimentalnog istraživanja nerazornom temperaturnom metodom in situ mjerenja U vrijednosti, za svaki model dobiveni su vremenski nizovi sljedećih numeričkih varijabli:

- U vrijednost [W/m^2K],
- Unutarnja temperatura zraka, T_i [$^{\circ}C$],
- Vanjska temperatura zraka, T_e [$^{\circ}C$],
- Temperatura na površini zida, T_w [$^{\circ}C$],

koji su korišteni kao ulazna baza podataka.

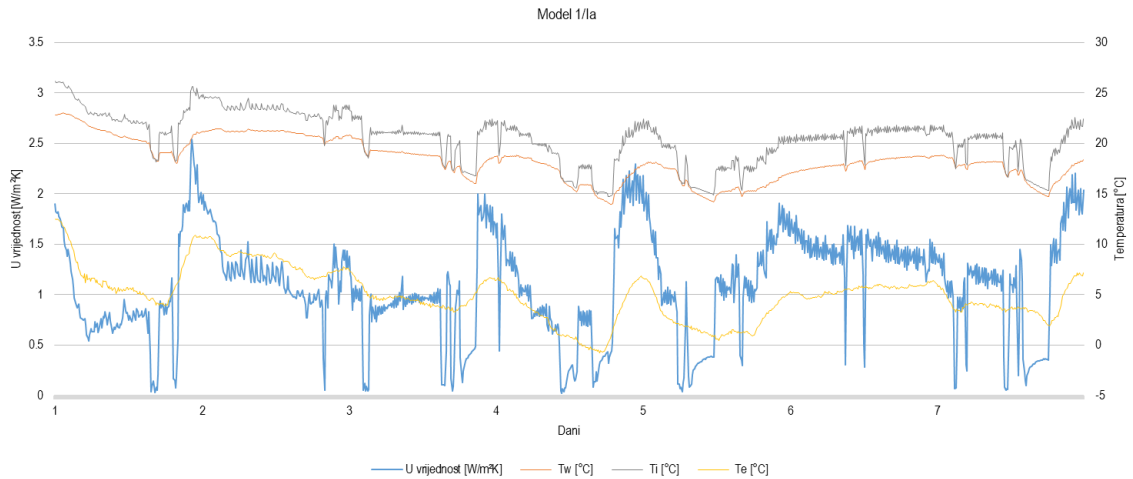
5.1 Rezultati ispitivanja temperaturnom metodom – Modeli TIP 1

Ispitivanje U vrijednosti temperaturnom metodom modela TIP 1 - zida od šuplje blok opeke, provedeno je u sve tri faze. Svako je ispitivanje provedeno u trajanju od sedam dana. Ispitivanja svih modela provedena su tijekom sezone grijanja. Sedmodnevnim mjerenjima ispitani su različiti zidovi, a provedeno je ukupno četiri ispitivanja, tablica 5.1. Ispitivanje zida od šuplje blok opeke s toplinskom izolacijom od kamene vune (model TIP 1/III) provedeno je dva puta pri čemu je prvi put održavana temperaturna razlika od $15^{\circ}C$ (prosječno) u ovisnosti o vanjskoj temperaturi, a drugi put je unutarnja temperatura, T_i postavljena na $30^{\circ}C$ i održavana konstantnom. Ispitivanja u različitim uvjetima provedena su sa svrhom vrednovanja metode i usporedbe dobivenih vrijednosti.

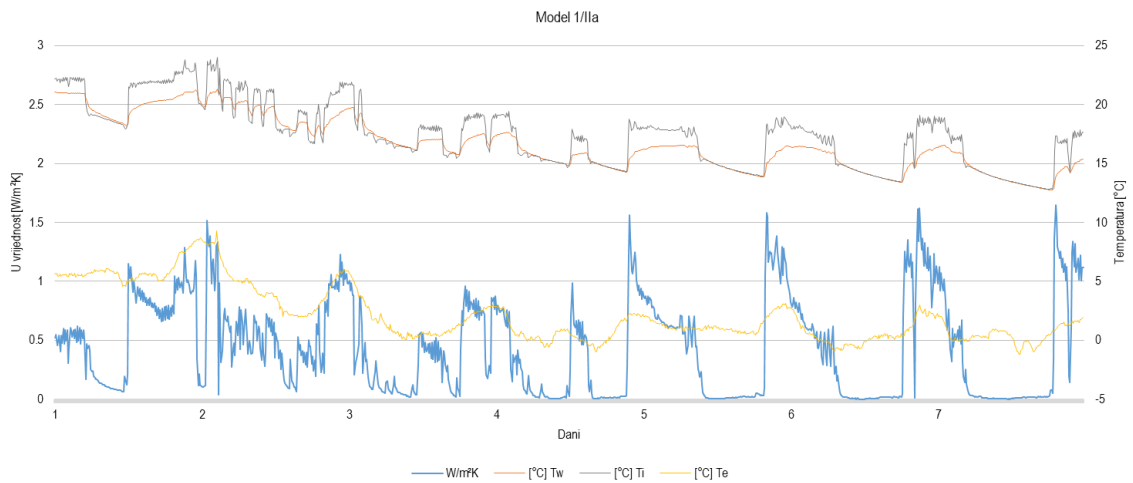
Tablica 5.1 Prikaz ispitanih modela TIP 1, uvjeta i trajanja ispitivanja

VRSTA ZIDA	MODELI	UVJETI ISPITIVANJA	SEZONA GRIJANJA/HLAĐENJA	TRAJANJE ISPITIVANJA
Neizolirani zid od šuplje blok opeke	TIP 1/Ia	$\Delta T=15^{\circ}C$	Sezona grijanja	7 dana
Zid od šuplje blok opeke s TI EPS	TIP 1/IIa	$\Delta T=15^{\circ}C$	Sezona grijanja	7 dana
Zid od šuplje blok opeke s TI KV	TIP 1/IIIa	$\Delta T=15^{\circ}C$	Sezona grijanja	7 dana
Zid od šuplje blok opeke s TI KV	TIP 1/IIIb	$T_i=30^{\circ}C$	Sezona grijanja	7 dana

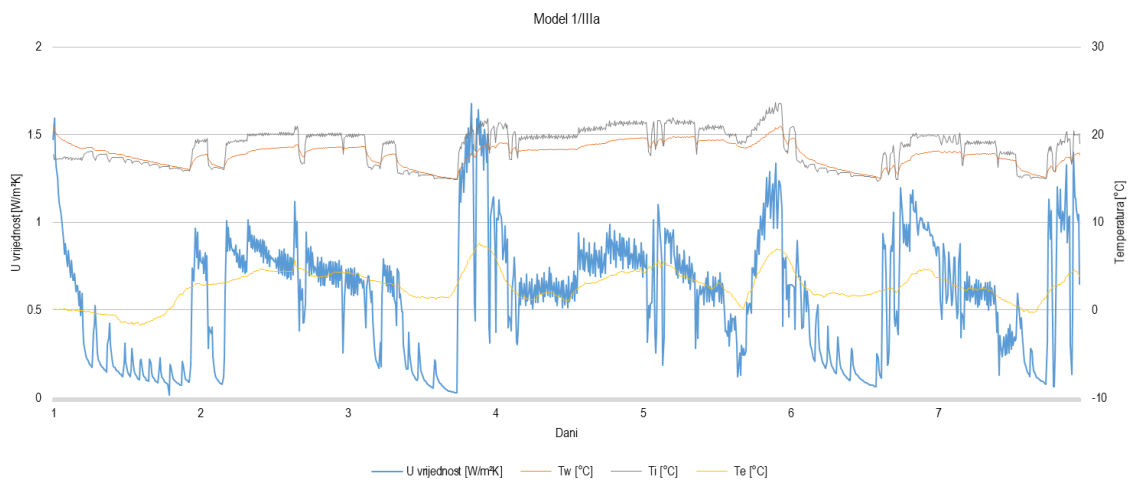
Na slikama 5.1 do 5.4 grafički su prikazani rezultati sedmodnevnih ispitivanja modela TIP 1 odnosno izmjerene U vrijednosti u ovisnosti o unutarnjoj temperaturi zraka (T_i), vanjskoj temperaturi zraka (T_e) i temperaturi površine zida (T_w). U usporedbi s ispitivanjem koje je provedeno kada je unutarnja temperatura, T_i postavljena na $30^{\circ}C$ i održavana konstantnom, prilikom ispitivanja U vrijednosti zidova održavanjem temperaturne razlike od $15^{\circ}C$ (prosječno) u ovisnosti o vanjskoj temperaturi, stalne promjene unutarnje i vanjske temperature rezultirale su izraženijim oscilacijama U vrijednosti tijekom vremena.



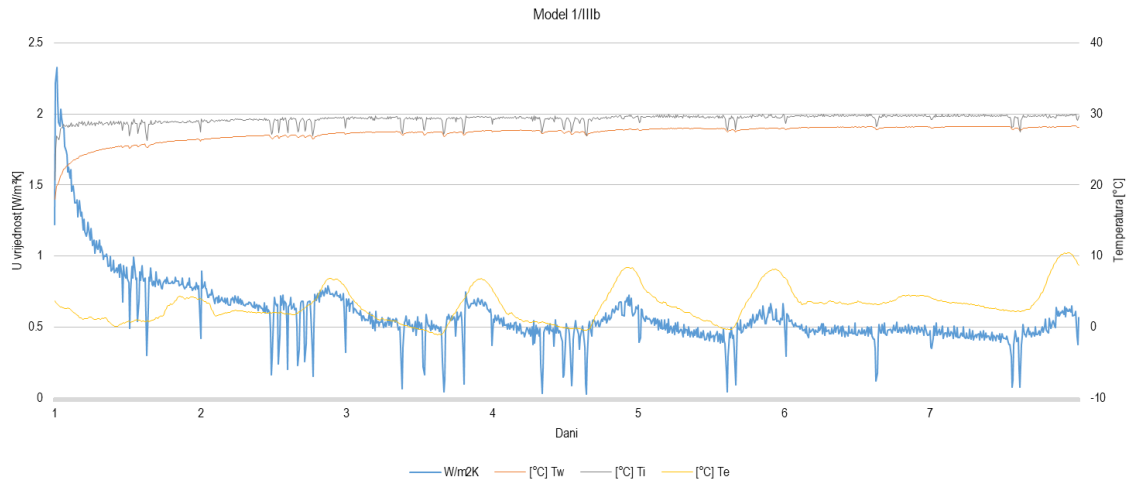
Slika 5.1 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 1/Ia



Slika 5.2 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 1/IIa



Slika 5.3 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 1/IIIa



Slika 5.4 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 1/IIIb

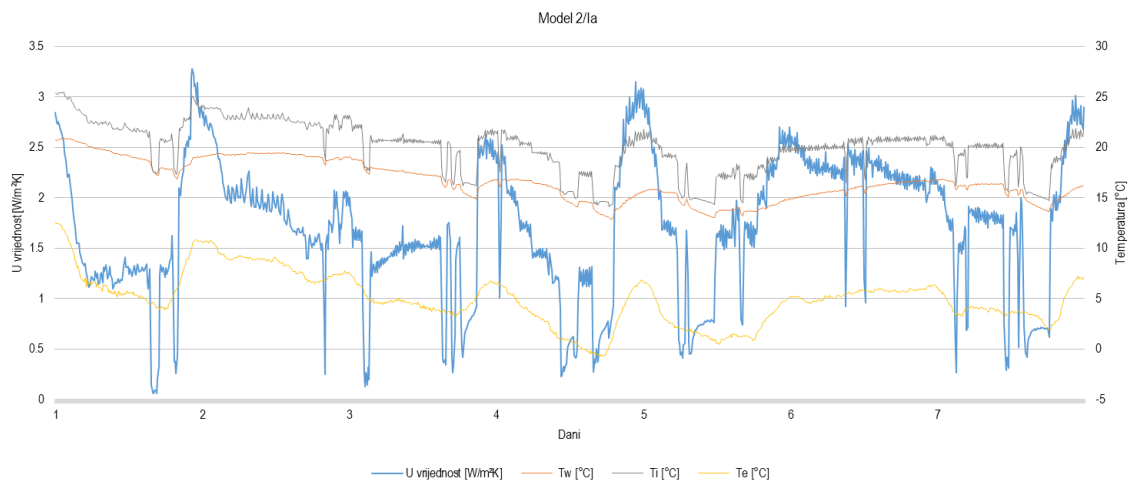
5.2 Rezultati ispitivanja temperaturnom metodom – Modeli TIP 2

Ispitivanje U vrijednosti modela TIP 2 - zida od pune opeke, provedeno je temperaturnom metodom u sve tri faze. Ispitivanja u sve tri faze provedena su u trajanju od sedam dana. Ispitivanja svih modela provedena su tijekom sezone grijanja. Sedmodnevnim mjerenjima ispitani su različiti zidovi, a provedeno je ukupno četiri ispitivanja, tablica 5.2. Ispitivanje modela TIP 2/III provedeno je dva puta pri čemu je prvi put održavana temperaturna razlika od 15 °C (prosječno) u ovisnosti o vanjskoj temperaturi, a drugi put je unutarnja temperatura, T_i postavljena na 30 °C i održavana konstantnom. Ispitivanja u različitim uvjetima provedena su sa svrhom vrednovanja metode i usporedbe dobivenih vrijednosti.

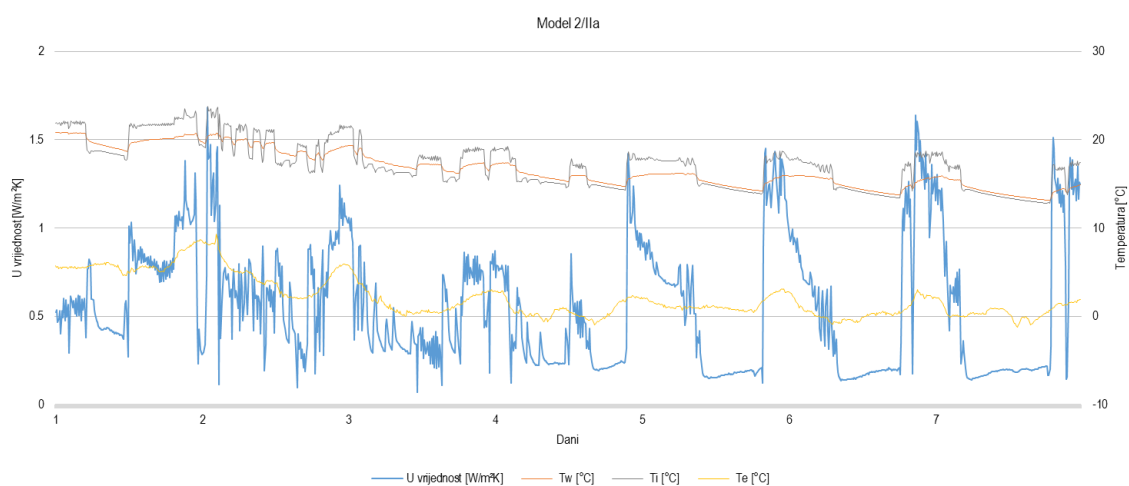
Tablica 5.2 Prikaz ispitanih modela TIP 2, uvjeta i trajanja ispitivanja

VRSTA ZIDA	MODELI	UVJETI ISPITIVANJA	SEZONA GRIJANJA/HLAĐENJA	TRAJANJE ISPITIVANJA
Neizolirani zid od pune opeke	TIP 2/Ia	$\Delta T=15\text{ °C}$	Sezona grijanja	7 dana
Zid od pune opeke s TI EPS	TIP 2/IIa	$\Delta T=15\text{ °C}$	Sezona grijanja	7 dana
Zid od pune opeke s TI KV	TIP 2/IIIa	$\Delta T=15\text{ °C}$	Sezona grijanja	7 dana
Zid od pune opeke s TI KV	TIP 2/IIIb	$T_i=30\text{ °C}$	Sezona grijanja	7 dana

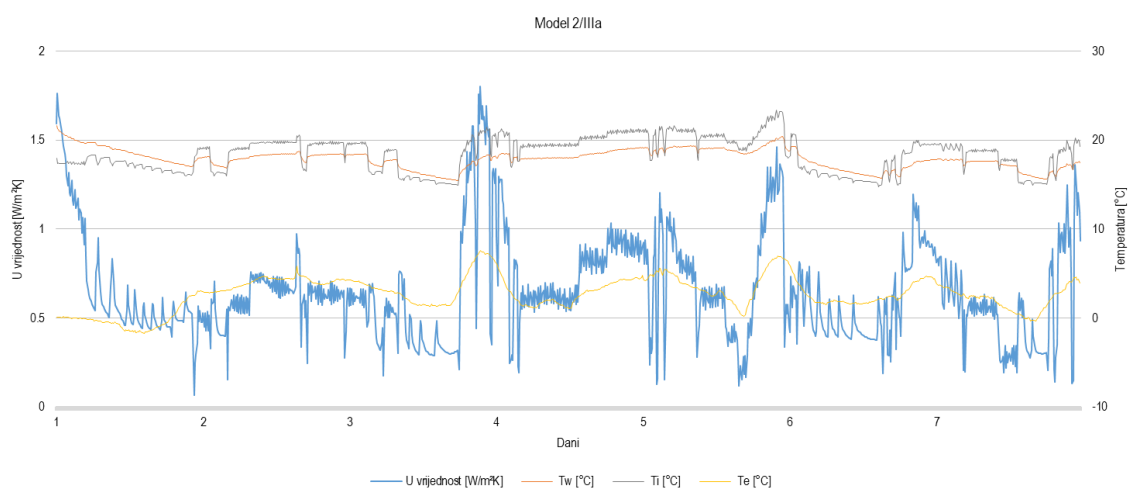
Na slikama 5.5 do 5.8 grafički su prikazani rezultati sedmodnevnih ispitivanja modela TIP 2 odnosno izmjerene U vrijednosti u ovisnosti o unutarnjoj temperaturi zraka (T_i), vanjskoj temperaturi zraka (T_e) i temperaturi površine zida (T_w). Kao i kod ispitivanja modela TIP 1, tijekom ispitivanja U vrijednosti zidova TIP 2 održavanjem temperaturne razlike od 15 °C (prosječno) u ovisnosti o vanjskoj temperaturi, stalne promjene unutarnje i vanjske temperature rezultirale su izraženijim oscilacijama U vrijednosti tijekom vremena.



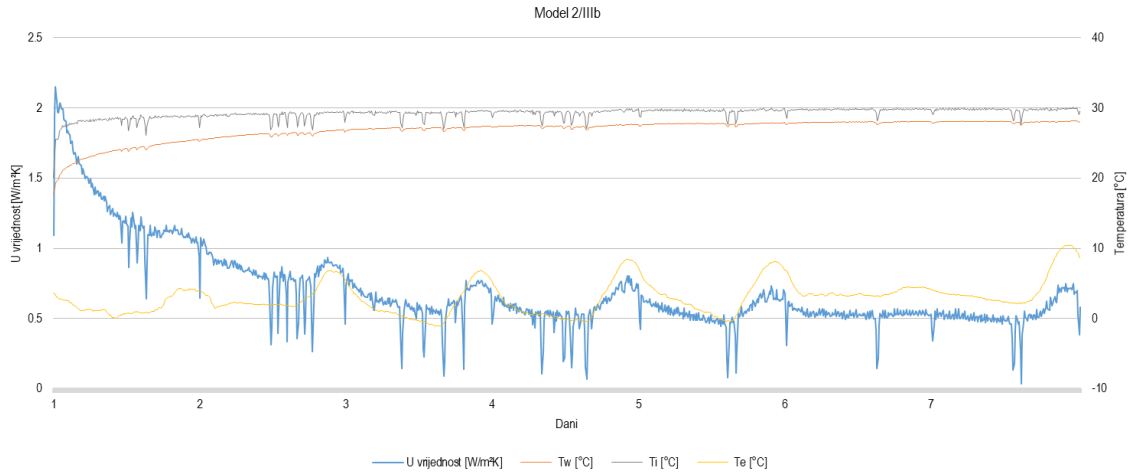
Slika 5.5 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 2/Ia



Slika 5.6 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 2/IIa



Slika 5.7 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 2/IIIa



Slika 5.8 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 2/IIIb

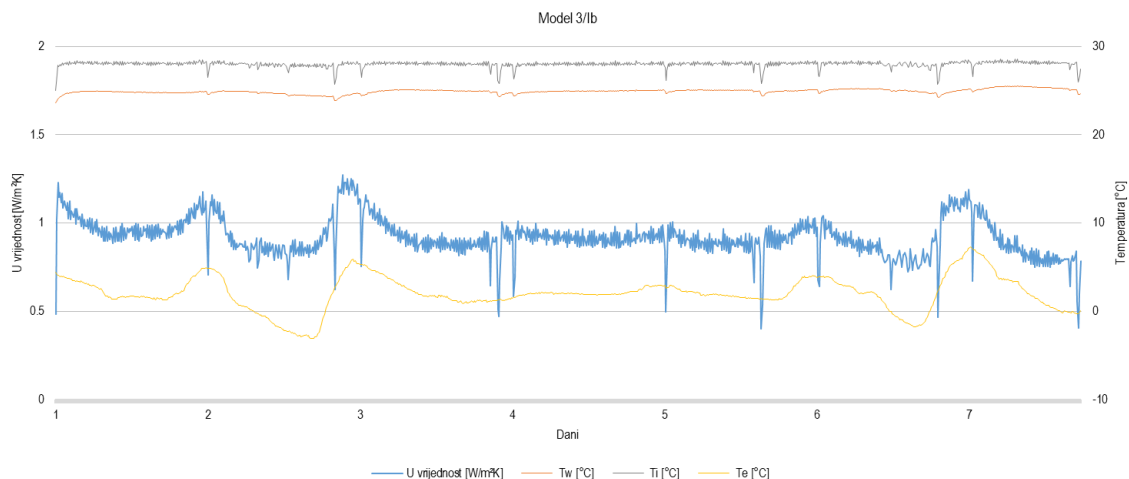
5.3 Rezultati ispitivanja temperaturnom metodom – Modeli TIP 3

Ispitivanje U vrijednosti modela TIP 3 - zida od brušene šuplje blok opeke, provedeno je temperaturnom metodom u sve tri faze. Ispitivanja u sve tri faze provedena su u trajanju od sedam dana. Sedmodnevnim mjerenjima ispitani su različiti modeli, a provedeno je ukupno četiri ispitivanja. Sažeti prikaz provedenih ispitivanja prikazan je u tablici 5.3. Ispitivanje modela TIP 3/I te nakon toga modela TIP 3/II provedeno je tijekom sezone grijanja pri čemu je unutarnja temperatura, T_i postavljena na 30 °C i održavana konstantnom. Nakon toga, ispitivanje modela 3/III s toplinskom izolacijom od kamene vune provedeno je u različitim uvjetima odnosno tijekom sezone grijanja i hlađenja. Tijekom sezone grijanja unutarnja temperatura, T_i postavljena je na 30 °C i održavana konstantnom, a u sezoni hlađenja na 18 °C te također održavana konstantnom tijekom cijelog perioda ispitivanja. Ispitivanja u različitim sezonama provedena su sa svrhom vrednovanja metode i usporedbe dobivenih vrijednosti.

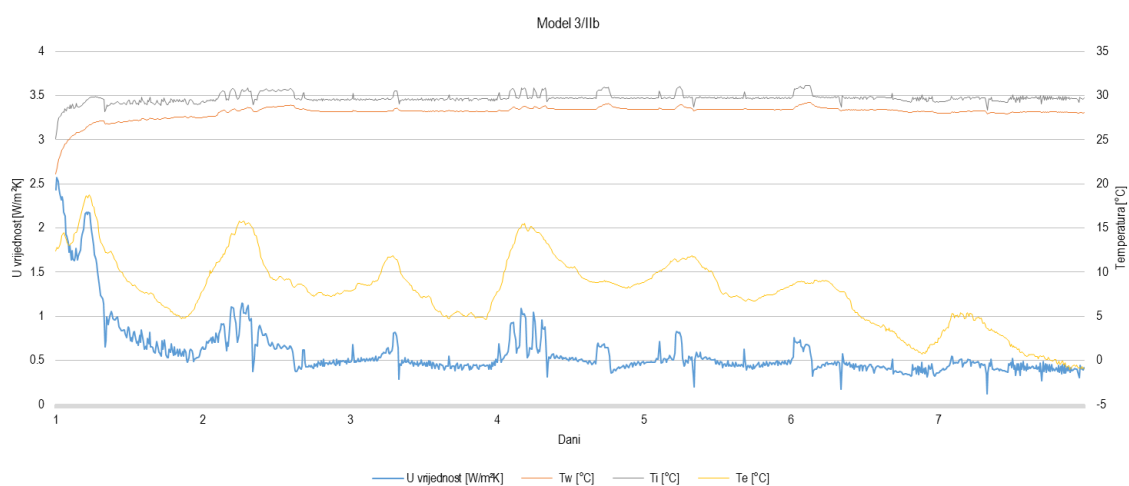
Tablica 5.3 Prikaz ispitanih modela TIP 3, uvjeta i trajanja ispitivanja

VRSTA ZIDA	MODELI	UVJETI ISPITIVANJA	SEZONA GRIJANJA/HLAĐENJA	TRAJANJE ISPITIVANJA
Neizolirani zid od brušene šuplje blok opeke	TIP 3/Ib	$T_i=30$ °C	Sezona grijanja	7 dana
Zid od brušene šuplje blok opeke s TI EPS	TIP 3/IIb	$T_i=30$ °C	Sezona grijanja	7 dana
Zid od brušene šuplje blok opeke s TI KV	TIP 3/IIIb	$T_i=30$ °C	Sezona grijanja	7 dana
Zid od brušene šuplje blok opeke s TI KV	TIP 3/IIIc	$T_i=18$ °C	Sezona hlađenja	7 dana

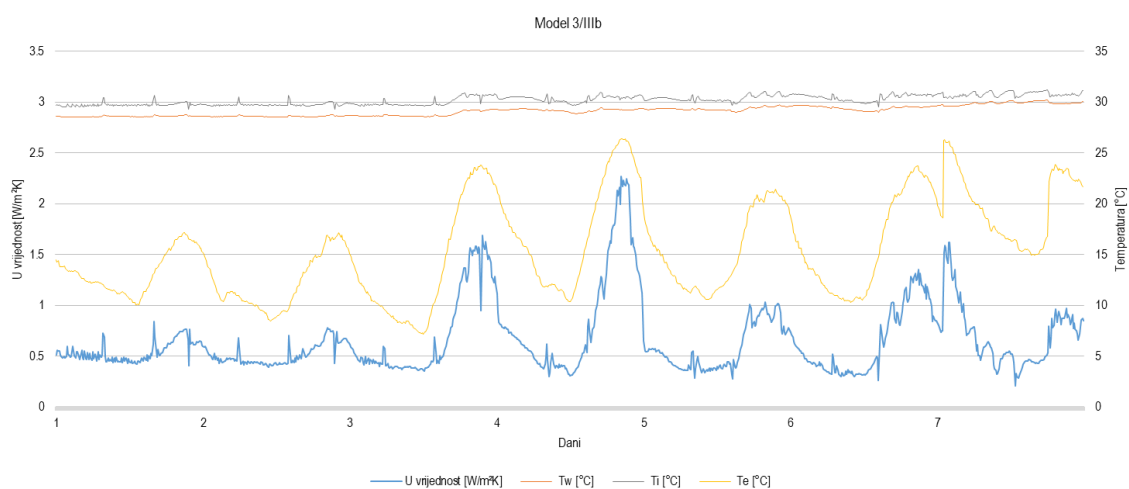
Na slikama 5.9 do 5.12 grafički su prikazani rezultati sedmodnevnih ispitivanja modela TIP 3 odnosno izmjerene U vrijednosti u ovisnosti o unutarnjoj temperaturi zraka (T_i), vanjskoj temperaturi zraka (T_e) i temperaturi površine zida (T_w). Najizraženije oscilacije vanjske temperature i U vrijednosti vidljive su kod ispitivanja modela TIP 3/IIIc, provedenog tijekom sezone hlađenja.



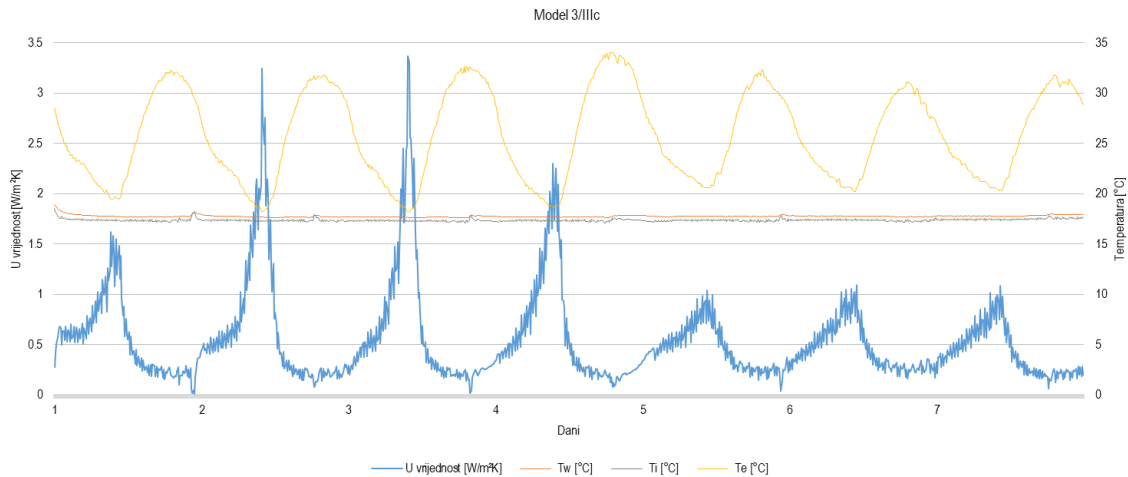
Slika 5.9 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 3/Ib



Slika 5.10 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 3/IIb



Slika 5.11 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 3/IIIb



Slika 5.12 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 3/IIIc

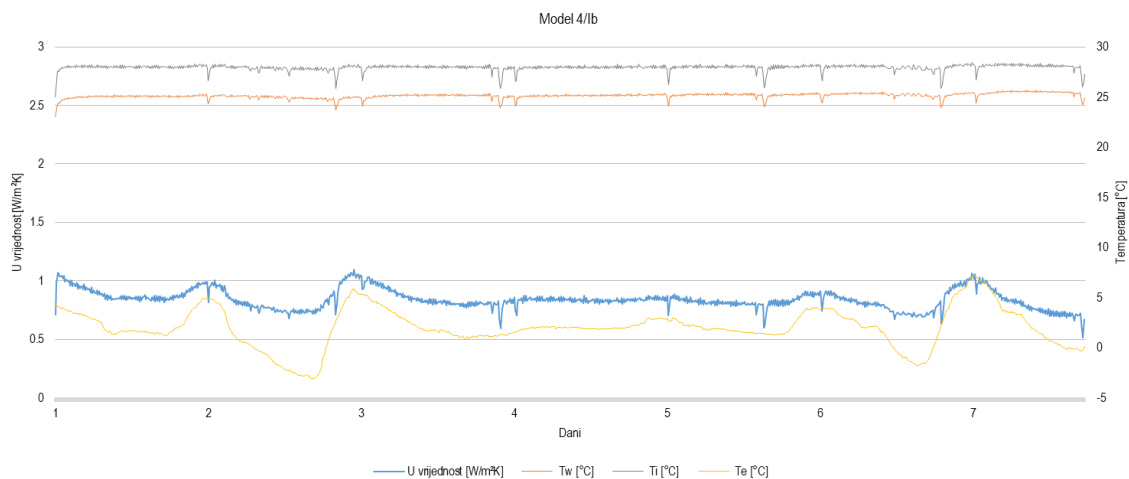
5.4 Rezultati ispitivanja temperaturnom metodom – Modeli TIP 4

Ispitivanje U vrijednosti modela TIP 4 - zida od blokova od porastog betona, provedeno je temperaturnom metodom u sve tri faze. Ispitivanja u sve tri faze provedena su u trajanju od sedam dana. Sedmodnevnim mjerenjima ispitani su različiti zidovi pri čemu je provedeno ukupno četiri ispitivanja. Sažeti prikaz provedenih ispitivanja prikazan je u tablici 5.4. Ispitivanje modela TIP 4/I te nakon toga modela TIP 4/II provedeno je tijekom sezone grijanja pri čemu je unutarnja temperatura, T_i postavljena na 30 °C i održavana konstantnom. Nakon toga, ispitivanje modela 4/III s toplinskom izolacijom od kamene vune provedeno je u različitim uvjetima odnosno tijekom sezone grijanja i hlađenja. Tijekom sezone grijanja unutarnja temperatura, T_i postavljena je na 30 °C i održavana konstantnom, a u sezoni hlađenja na 18 °C te također održavana konstantnom tijekom cijelog perioda ispitivanja. Ispitivanja u različitim sezonama provedena su sa svrhom vrednovanja metode i usporedbe dobivenih vrijednosti.

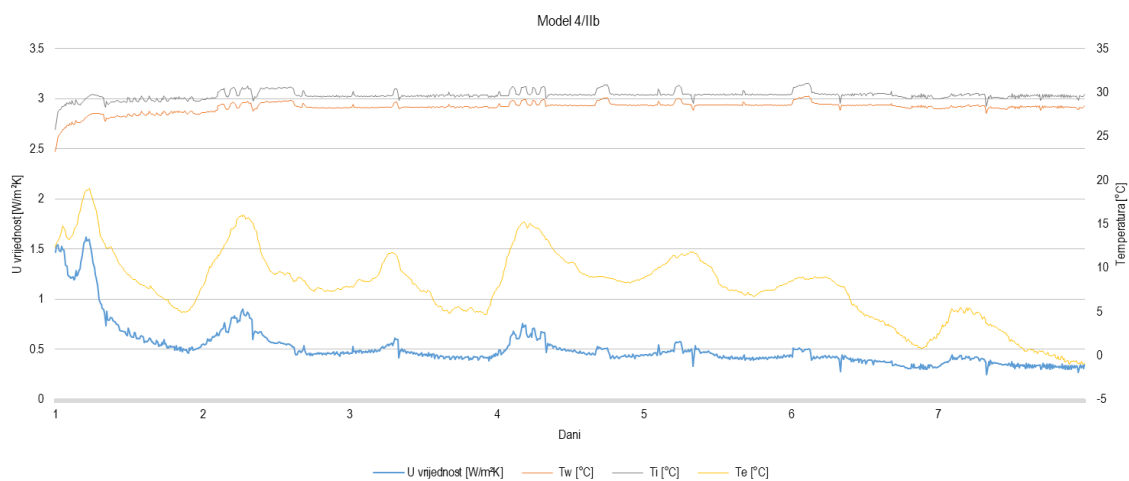
Tablica 5.4 Prikaz ispitanih modela TIP 4, uvjeta i trajanja ispitivanja

VRSTA ZIDA	MODELI	UVJETI ISPITIVANJA	SEZONA GRIJANJA/HLAĐENJA	TRAJANJE ISPITIVANJA
Neizolirani zid od laganih betonskih blokova	MODEL 4/Ib	$T_i=30$ °C	Sezona grijanja	7 dana
Zid od laganih betonskih blokova s TI EPS	MODEL 4/IIb	$T_i=30$ °C	Sezona grijanja	7 dana
Zid od laganih betonskih blokova s TI KV	MODEL 4/IIIb	$T_i=30$ °C	Sezona grijanja	7 dana
Zid od laganih betonskih blokova s TI KV	MODEL 4/IIIc	$T_i=18$ °C	Sezona hlađenja	7 dana

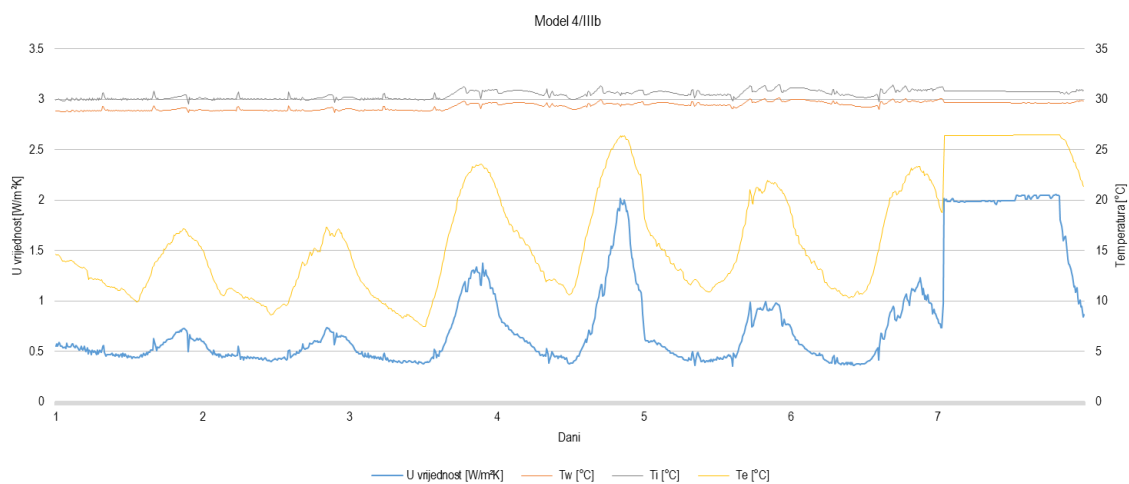
Na slikama 5.13 do 5.16 grafički su prikazani rezultati sedmodnevnih ispitivanja modela TIP 4 odnosno izmjerene U vrijednosti u ovisnosti o unutarnjoj temperaturi zraka (T_i), vanjskoj temperaturi zraka (T_e) i temperaturi površine zida (T_w). Najizraženije oscilacije vanjske temperature i U vrijednosti vidljive su kod ispitivanja modela TIP 4/IIIc, provedenog tijekom sezone hlađenja.



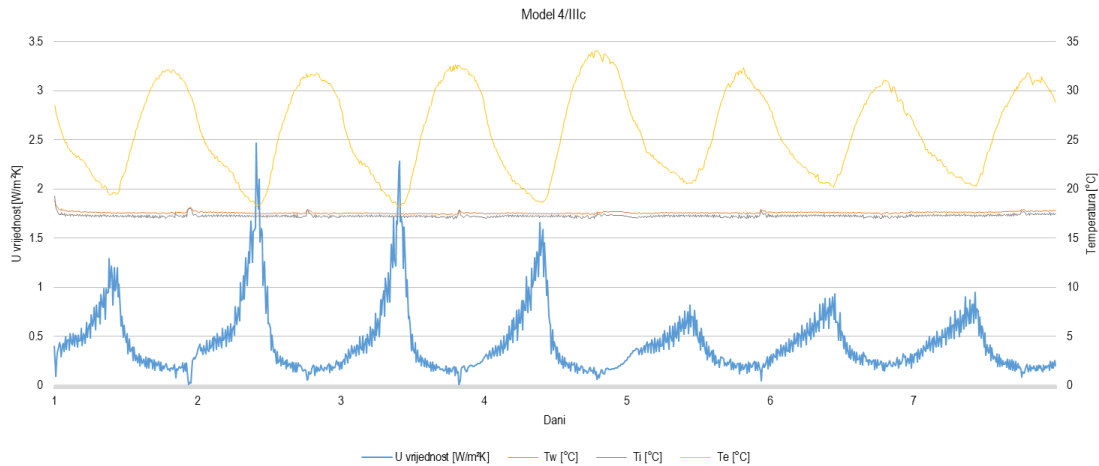
Slika 5.13 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 4/Ib



Slika 5.14 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 4/IIb



Slika 5.15 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 4/IIIb



Slika 5.16 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 4/IIIc

5.5 Rezultati ispitivanja temperaturnom metodom – Modeli TIP 5

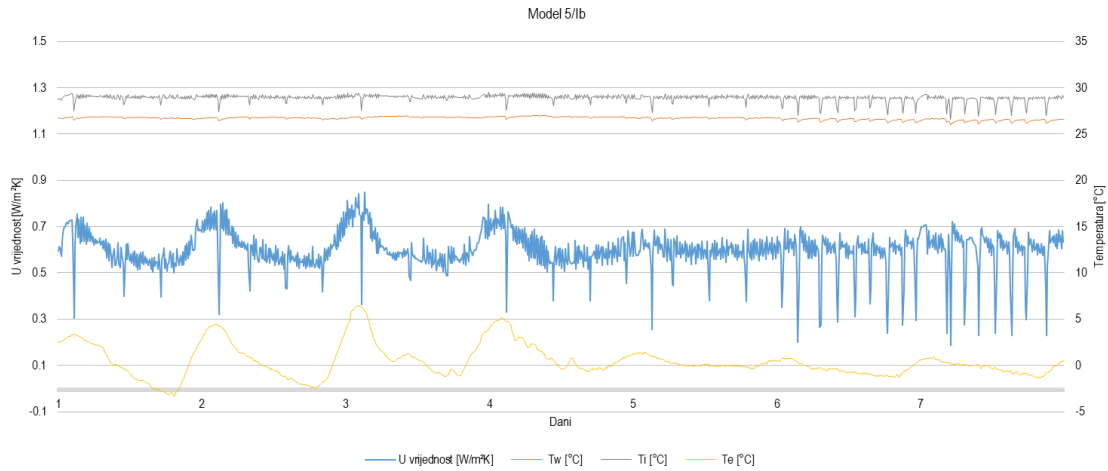
Ispitivanje U vrijednosti modela TIP 5 - zida od brušene šuplje blok opeke s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune, provedeno je temperaturnom metodom u sve tri faze. Ispitivanja u sve tri faze provedena su u trajanju od sedam dana. Sedmodnevnim mjerenjima ispitani su različiti zidovi pri čemu provedeno ukupno četiri ispitivanja, tablica 5.5. Ispitivanje modela TIP 5/I provedeno je tijekom sezone grijanja pri čemu je unutarnja temperatura, T_i postavljena na 30 °C i održavana konstantnom. Nakon toga, ispitivanje modela TIP 5/II s toplinskom izolacijom od ekspaniranog polistirena provedeno je tijekom sezone hlađenja pri čemu je unutarnja temperatura, T_i postavljena na 18 °C i održavana konstantnom. U trećoj fazi, ispitivanje modela TIP 5/III provedeno je dva puta odnosno tijekom sezone hlađenja i grijanja. Tijekom sezone hlađenja unutarnja temperatura, T_i postavljena je na 18 °C i održavana konstantnom, a u sezoni grijanja na 30 °C te također održavana konstantom tijekom cijelog perioda ispitivanja. Ispitivanja u različitim sezonama provedena su sa svrhom vrednovanja metode i usporedbe dobivenih vrijednosti.

Tablica 5.5 Prikaz ispitanih modela TIP 5, uvjeta i trajanja ispitivanja

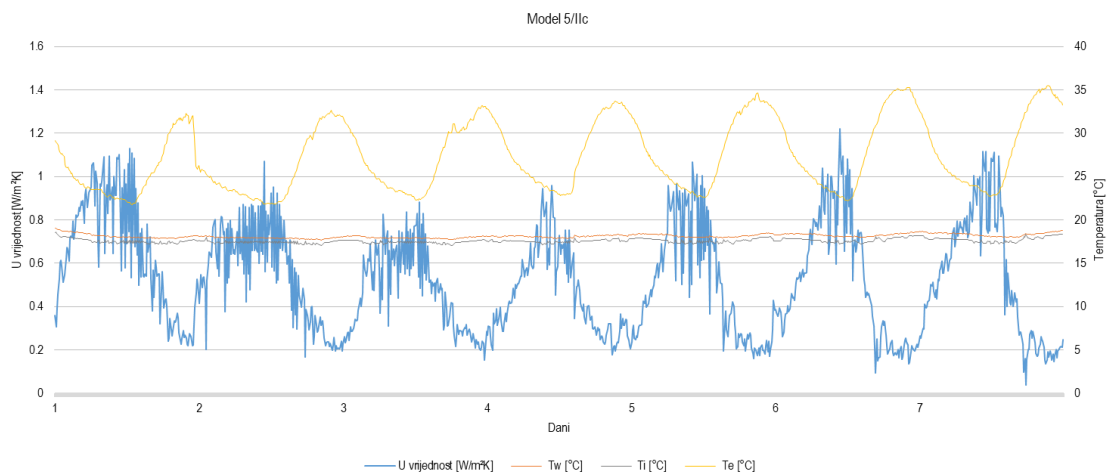
VRSTA ZIDA	MODELI	UVJETI ISPITIVANJA	SEZONA GRIJANJA/HLAĐENJA	TRAJANJE ISPITIVANJA
Neizolirani zid od šuplje blok opeke s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune	TIP 5/Ib	$T_i=30\text{ °C}$	Sezona hlađenja	7 dana
Zid od šuplje blok opeke s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune i s TI EPS	TIP 5/IIc	$T_i=18\text{ °C}$	Sezona hlađenja	7 dana
Zid od šuplje blok opeke s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune i s TI KV	TIP 5/IIIc	$T_i=18\text{ °C}$	Sezona hlađenja	7 dana
Zid od šuplje blok opeke s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune i s TI KV	TIP 5/IIIb	$T_i=30\text{ °C}$	Sezona grijanja	7 dana

Na slikama 5.17 do 5.20 grafički su prikazani rezultati sedmodnevnih ispitivanja modela TIP 5 odnosno izmjerene U vrijednosti u ovisnosti o unutarnjoj temperaturi zraka (T_i), vanjskoj temperaturi zraka (T_e) i temperaturi površine

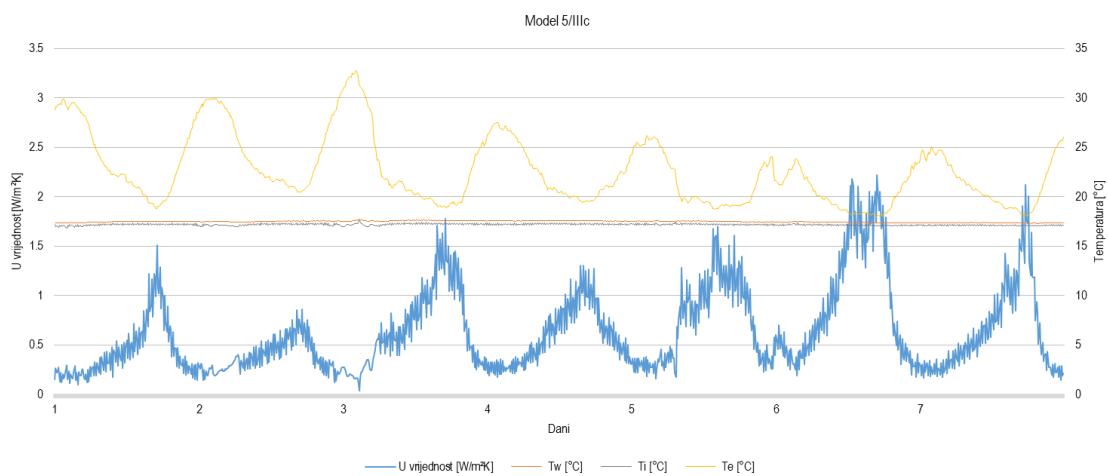
zida (T_w). Izraženije oscilacije vanjske temperature i U vrijednosti vidljive su kod ispitivanja modela TIP 5/IIc i 5/IIIc, provedenih tijekom sezone hlađenja.



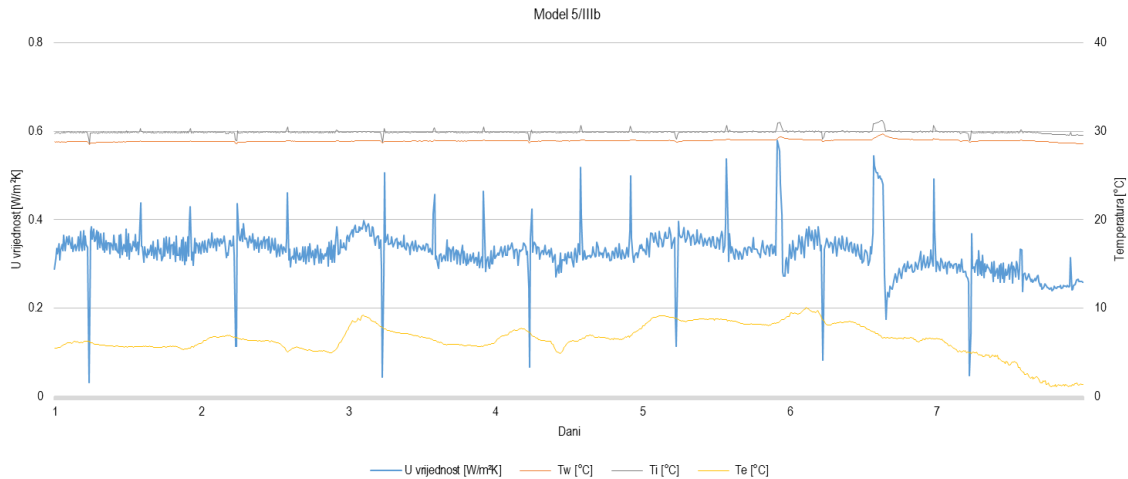
Slika 5.17 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 5/IIb



Slika 5.18 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 5/IIc



Slika 5.19 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 5/IIIc



Slika 5.20 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 5/IIIb

5.6 Rezultati ispitivanja temperaturnom metodom – Modeli TIP 6

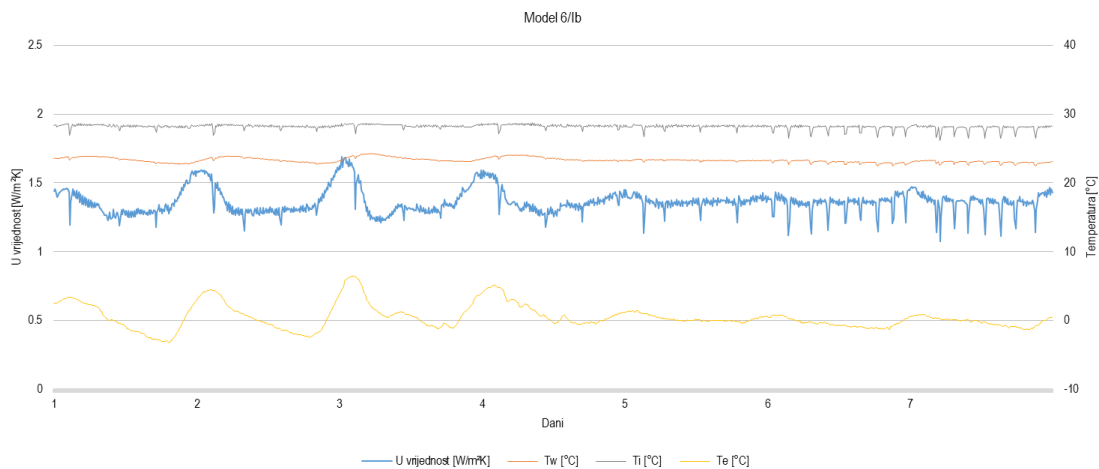
Ispitivanje U vrijednosti modela TIP 6 - zida od betonskih blokova s recikliranom opekom, provedeno je temperaturnom metodom u sve tri faze. Ispitivanja u sve tri faze provedena su u trajanju od sedam dana. Provedeno je ukupno četiri ispitivanja, a sažeti prikaz provedenih ispitivanja dan je u tablici 5.6. Ispitivanje modela TIP 6/I te nakon toga modela TIP 6/II provedeno je tijekom sezone hlađenja pri čemu je unutarnja temperatura, T_i postavljena na 18 °C i održavana konstantnom. Nakon toga, ispitivanje modela TIP 6/III s toplinskom izolacijom od kamene vune provedeno je dva puta odnosno tijekom sezone hlađenja i grijanja. Tijekom sezone hlađenja unutarnja temperatura, T_i postavljena je na 18 °C i održavana konstantnom, a u sezoni grijanja na 30 °C te također održavana konstantnom tijekom cijelog perioda ispitivanja. Ispitivanja u različitim sezonama provedena su sa svrhom vrednovanja metode i usporedbe dobivenih vrijednosti.

Tablica 5.6 Prikaz ispitanih modela TIP 6, uvjeta i trajanja ispitivanja

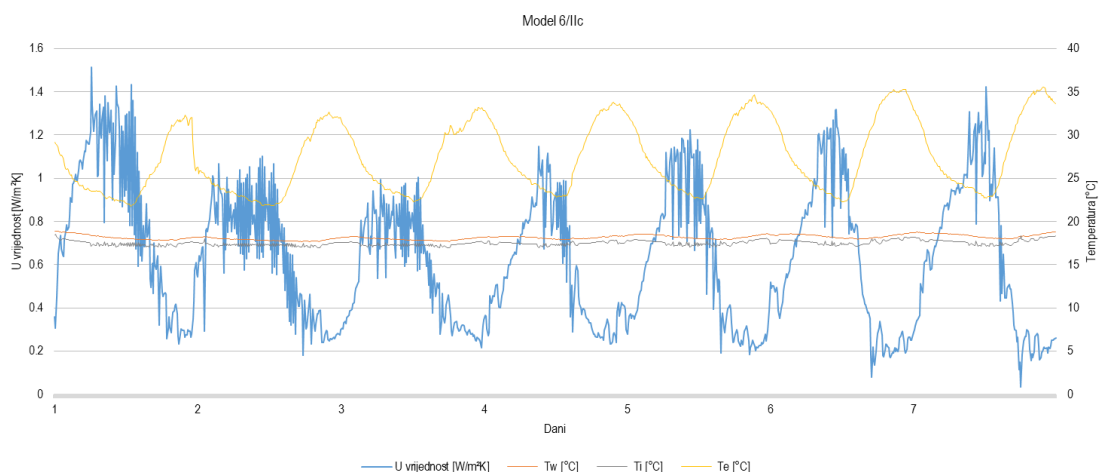
VRSTA ZIDA	MODELI	UVJETI ISPITIVANJA	SEZONA GRIJANJA/HLAĐENJA	TRAJANJE ISPITIVANJA
Neizolirani zid od betonskih blokova s recikliranom opekom	TIP 6/Ib	$T_i=30\text{ °C}$	Sezona hlađenja	7 dana
Zid od betonskih blokova s recikliranom opekom s TI EPS	TIP 6/IIc	$T_i=18\text{ °C}$	Sezona hlađenja	7 dana
Zid od betonskih blokova s recikliranom opekom s TI KV	TIP 6/IIIc	$T_i=18\text{ °C}$	Sezona hlađenja	7 dana
Zid od betonskih blokova s recikliranom opekom s TI KV	TIP 6/IIIb	$T_i=30\text{ °C}$	Sezona grijanja	7 dana

Na slikama 5.21 do 5.24 grafički su prikazani rezultati sedmodnevnih ispitivanja modela TIP 6 odnosno izmjerene U vrijednosti u ovisnosti o unutarnjoj temperaturi zraka (T_i), vanjskoj temperaturi zraka (T_e) i temperaturi površine

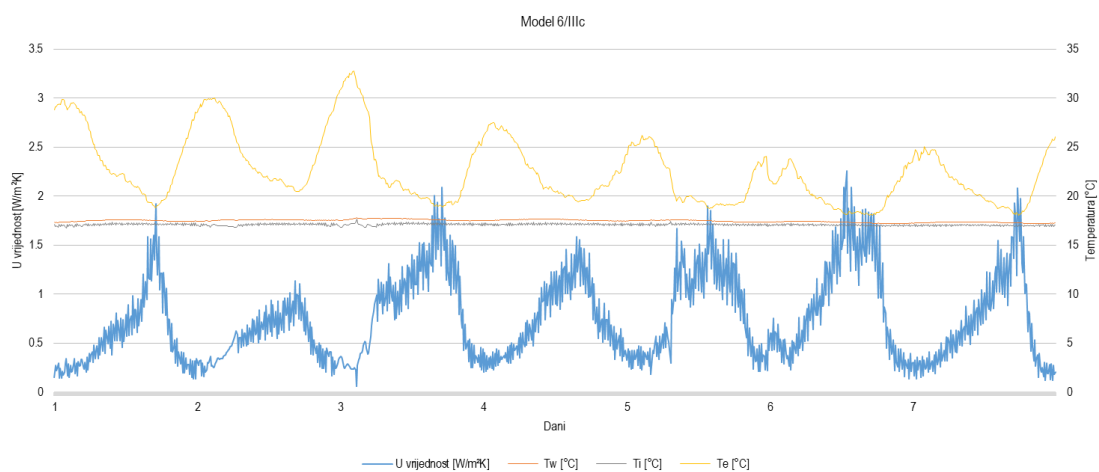
zida (T_w). Izraženije oscilacije vanjske temperature i U vrijednosti vidljive su kod ispitivanja modela TIP 6/IIc i 6/IIIc, provedenih tijekom sezone hlađenja.



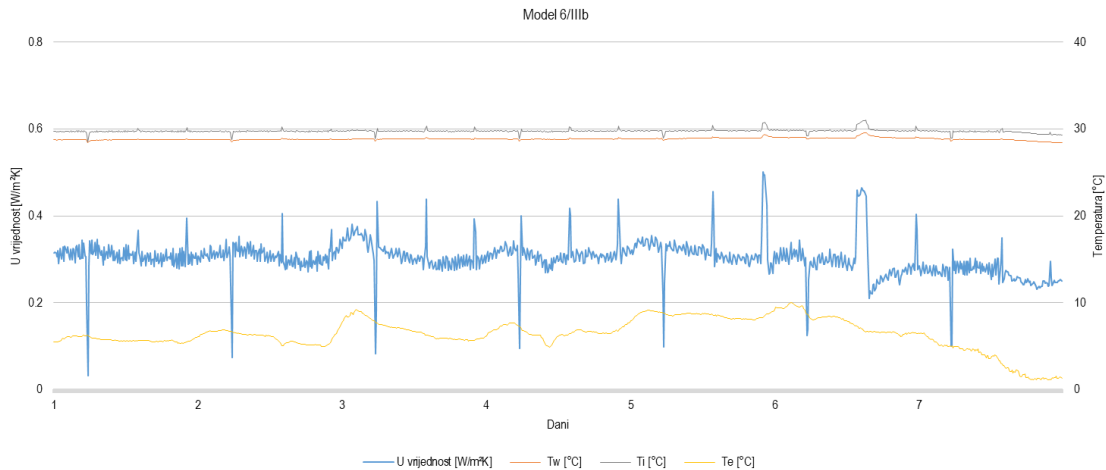
Slika 5.21 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 6/Ib



Slika 5.22 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 6/IIc



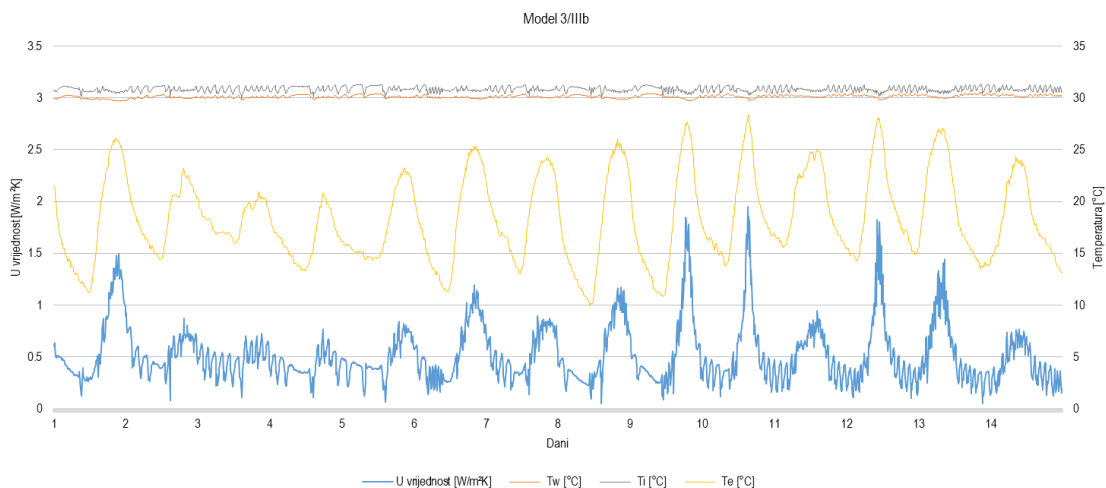
Slika 5.23 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 6/IIIc



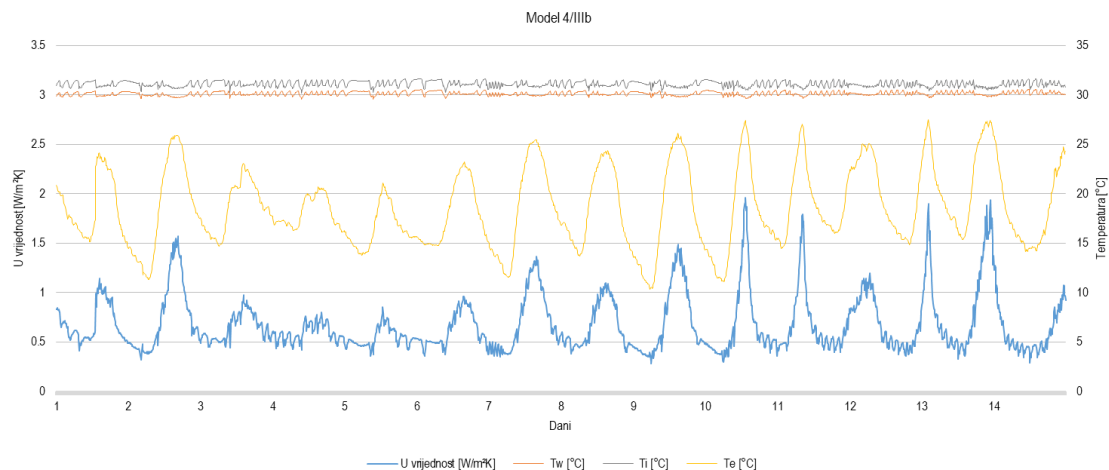
Slika 5.24 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model TIP 6/IIIb

5.7 Rezultati mjerenja U vrijednosti temperaturnom metodom različitih vremena trajanja

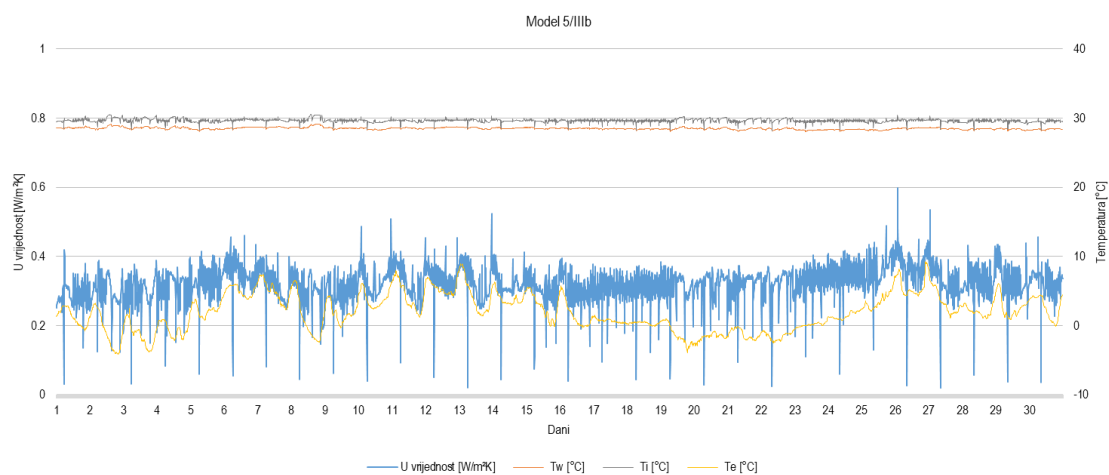
S ciljem analize potrebnog vremena trajanja ispitivanja U vrijednosti temperaturnom metodom te mogućnosti pouzdane procjene s obzirom na duljinu trajanja ispitivanja, na izabranim modelima provedena su dodatna ispitivanja različitih duljina trajanja. Za potrebe analize ukupno je ispitano četiri modela - model TIP 3/IIIb, 4/IIIb, 5/IIIb i 6/IIIb. Ispitivanja modela 3/IIIb i 4/IIIb provedena su u trajanju od 14 dana, a modela 5/IIIb i 6/IIIb u trajanju od 30 dana. Na slikama 5.25 do 5.28 grafički su prikazani rezultati dugotrajnih ispitivanja modela 3/IIIb, 4/IIIb, 5/IIIb i 6/IIIb odnosno dobivene U vrijednosti u ovisnosti o unutarnjoj temperaturi zraka (T_i), vanjskoj temperaturi zraka (T_e) i temperaturi površine zida (T_w).



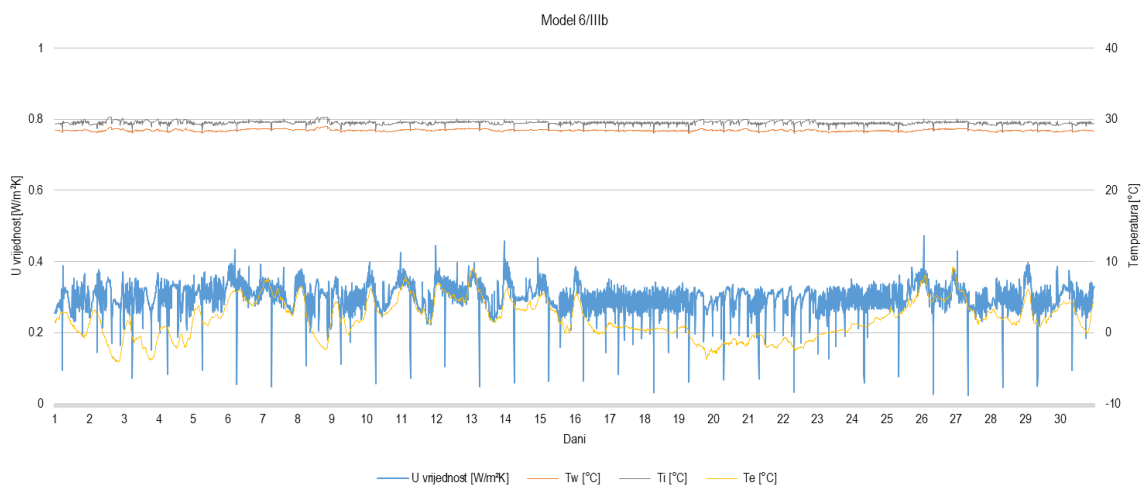
Slika 5.25 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model 3/IIIb



Slika 5.26 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model 4/IIIb



Slika 5.27 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model 5/IIIb

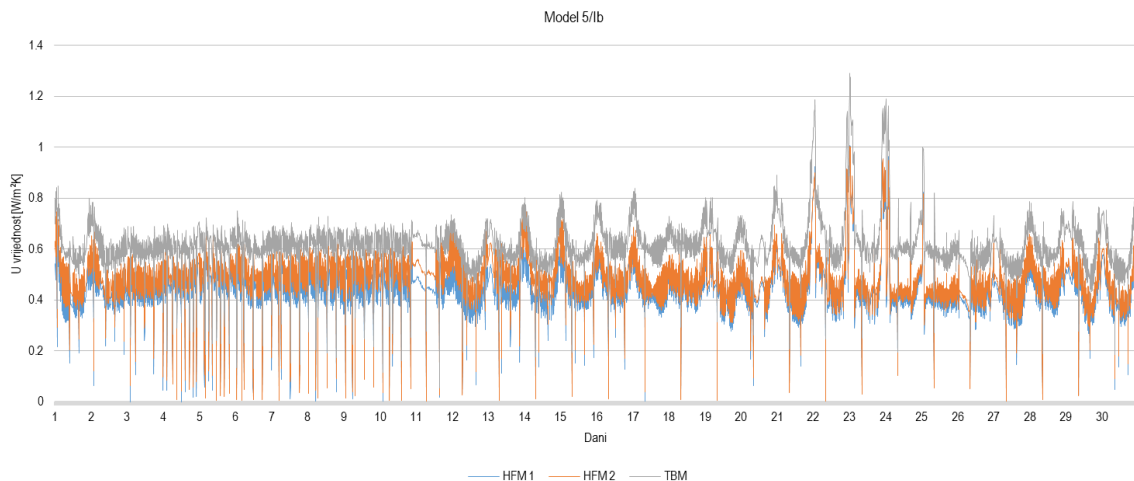


Slika 5.28 Prikaz U vrijednosti, unutarnje temperature zraka (T_i), vanjske temperature zraka (T_e) i temperature površine zida (T_w), model 6/IIIb

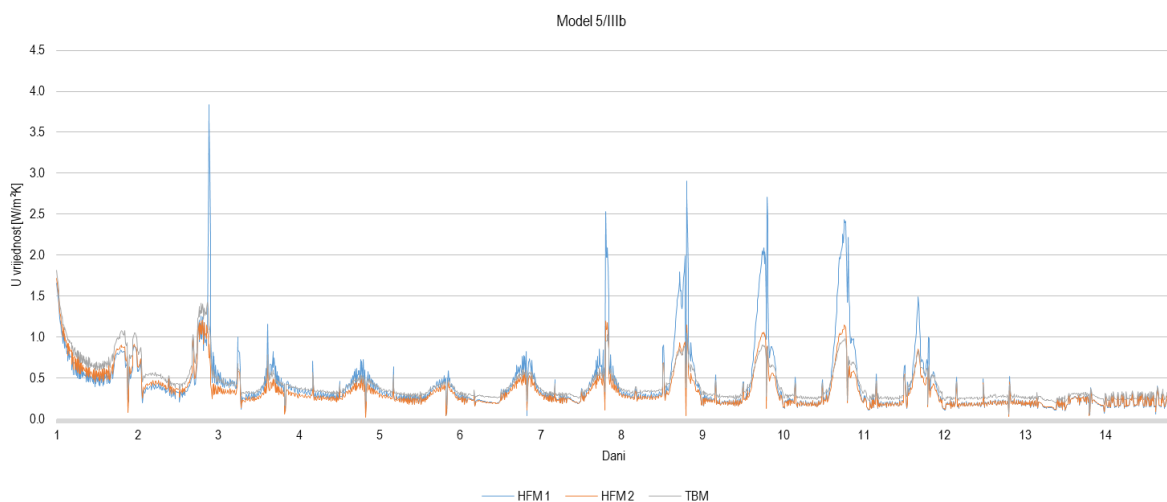
5.8 Rezultati usporednog ispitivanja modela temperaturnom metodom i metodom mjerenja toplinskog toka kroz građevne dijelove

Usporedno ispitivanje dvjema metodama – temperaturnom metodom (TBM) i metodom mjerenja toplinskog toka kroz građevne dijelove (HFM metodom) provedeno je na modelima TIP 5/lb, 5/IIIb, 6/lb i 6/IIIb s ciljem vrednovanja izmjerenih U vrijednosti temperaturnom metodom. Ispitivanja modela TIP 5/lb i 6/lb provedena su u trajanju od 30 dana, a modela TIP 5/IIIb i 6/IIIb u trajanju od 14 dana. Ispitivanja su provedena tijekom sezone grijanja pri čemu je unutarnja temperatura, T_i postavljena na 30 °C i održavana konstantnom.

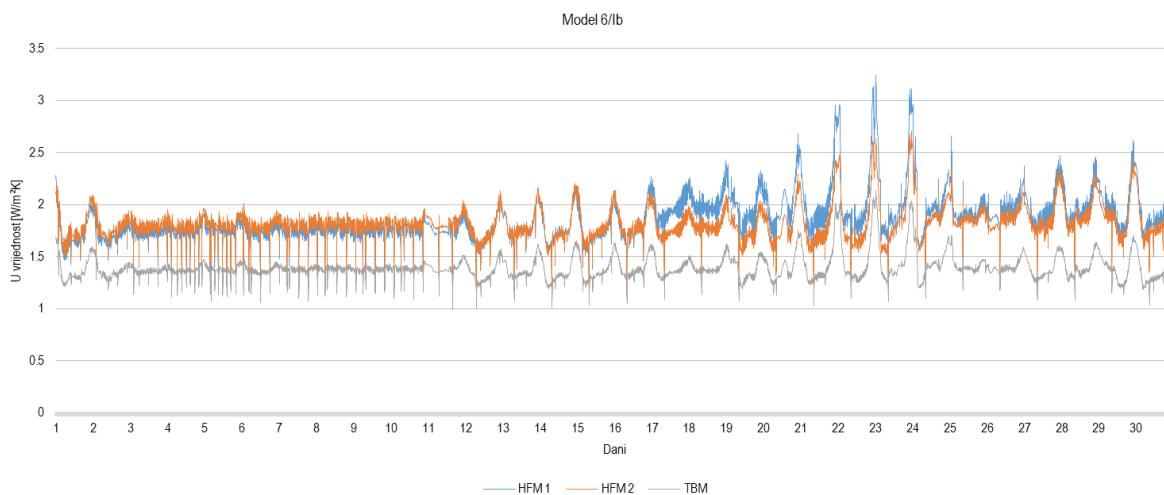
Na slikama 5.29 do 5.32 grafički su prikazani rezultati ispitivanja modela TIP 5/lb, 5/IIIb, 6/lb i 6/IIIb odnosno dobivene U vrijednosti HFM i temperaturnom metodom. Iako je vidljivo odstupanje u rezultatima s obzirom na metodu određivanja U vrijednosti, grafovi na slikama 5.29 do 5.32 pokazuju kako obje eksperimentalne metode imaju isti trend kretanja U vrijednosti tijekom ispitivanja.



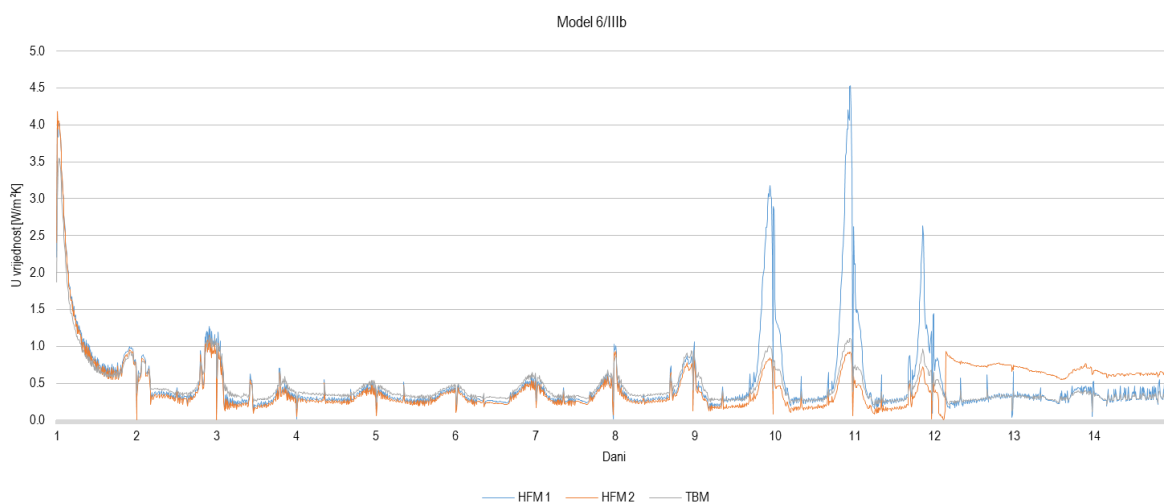
Slika 5.29 Prikaz dobivenih U vrijednosti HFM i temperaturnom metodom tijekom sezone grijanja, model 5/lb



Slika 5.30 Prikaz dobivenih U vrijednosti HFM i temperaturnom metodom tijekom sezone grijanja, model 5/IIIb



Slika 5.31 Prikaz dobivenih U vrijednosti HFM i temperaturnom metodom tijekom sezone grijanja, model 6/Ib



Slika 5.32 Prikaz dobivenih U vrijednosti HFM i temperaturnom metodom tijekom sezone grijanja, model 6/IIb

6 NUMERIČKO MODELIRANJE

Nakon provedenih eksperimentalnih ispitivanja, provedeno je numeričko modeliranje zida od materijala karakterističnih za područje kontinentalne Hrvatske te simulacija prijenosa topline korištenjem ulaznih parametara dobivenih mjerenjem. Numeričko modeliranje provedeno je za zidove od šupljeg bloka (modeli TIP 1) i pune opeke (modeli TIP 2). Pregled numerički modeliranih zidova prikazan je u tablici 6.1.

Tablica 6.1 Sažeti prikaz numerički modeliranih zidova

Numerički modeli	
TIP 1 – šuplji blok	TIP 1/Ia
	TIP 1/IIa
	TIP 1/IIIa
	TIP 1/IIIb
TIP 2 – puna opeka	TIP 2/Ia
	TIP 2/IIa
	TIP 2/IIIa
	TIP 2/IIIb

Numeričko istraživanje provedeno je u računalnom programu CHAMPS-BES za simulaciju prijenosa topline, zraka i vlage u zgradama [203]. Za potrebe izrade numeričkih modela te usporedbe s rezultatima eksperimentalnim ispitivanja kao ulazni podatci korištene su projektne toplinske karakteristike materijala, izmjerene vrijednosti unutarnje temperature i vanjske temperature te projektne vrijednosti unutarnjeg i vanjskog koeficijenta prijelaza topline definirane u normi HRN EN ISO 6946:2017 [9]. Numerička simulacija prijenosa topline provedena je za razdoblje od sedam dana koliko je trajalo i eksperimentalno ispitivanje analiziranih modela zidova.

6.1 Rezultati numeričkog modeliranja prijenosa topline

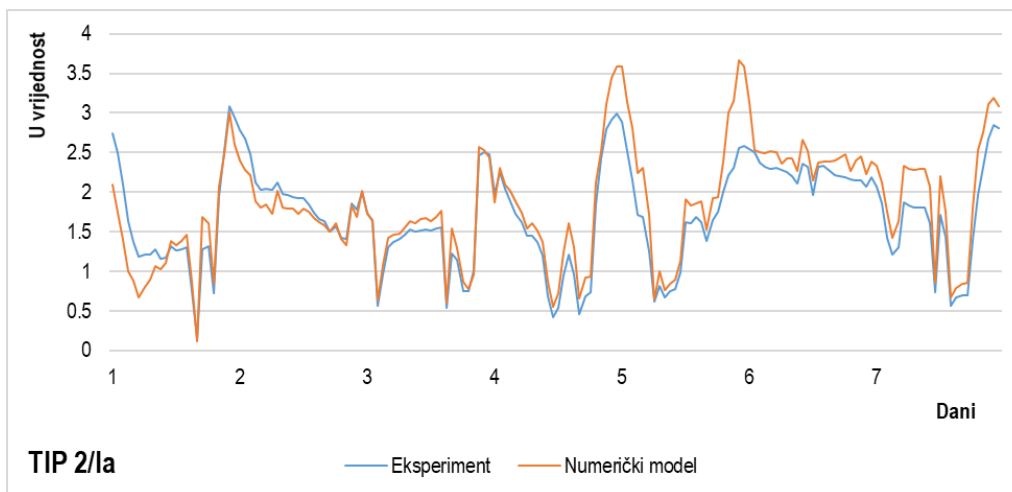
Srednje U vrijednosti dobivene numeričkim simulacijama, eksperimentalnim ispitivanjem te odstupanje između rezultata prikazani su u tablici 6.2. Prema tablici 6.2 vidljivo je da se razlike između U vrijednosti dobivenih numeričkim simulacijama i eksperimentalnim ispitivanjem kreću od 5% do 38%. Također, uspoređujući rezultate numeričkih simulacija i eksperimentalno izmjerenih U vrijednosti može se uočiti kako se dobiveni rezultati numeričkih simulacija u odnosu na eksperimentalne vrijednosti nalaze izvan intervala pouzdanosti kod modela TIP 1/Ia, 1/IIIb i 2/IIIb. Za sve ostale modele rezultati su pokazali kako numeričke simulacije daju procjenu srednje U vrijednosti unutar intervala pouzdanosti. Općenito, rezultati dobiveni numeričkim simulacijama pokazuju da su U vrijednosti u odnosu na in situ izmjerene vrijednosti TBM-om precijenjene za toplinski izolirane zidove, dok su za toplinski neizolirane vrijednosti podcijenjene.

Osim tablično, na slikama od 6.1 do 6.8 grafički je prikazano ponašanje numeričkih modela u odnosu na eksperimentalne rezultate za analizirano razdoblje od sedam dana. Iako je vidljivo odstupanje između simuliranih i in situ izmjerenih U vrijednosti, grafovi na slikama 6.1 do 6.8 pokazuju gotovo jednak trend kretanja U vrijednosti

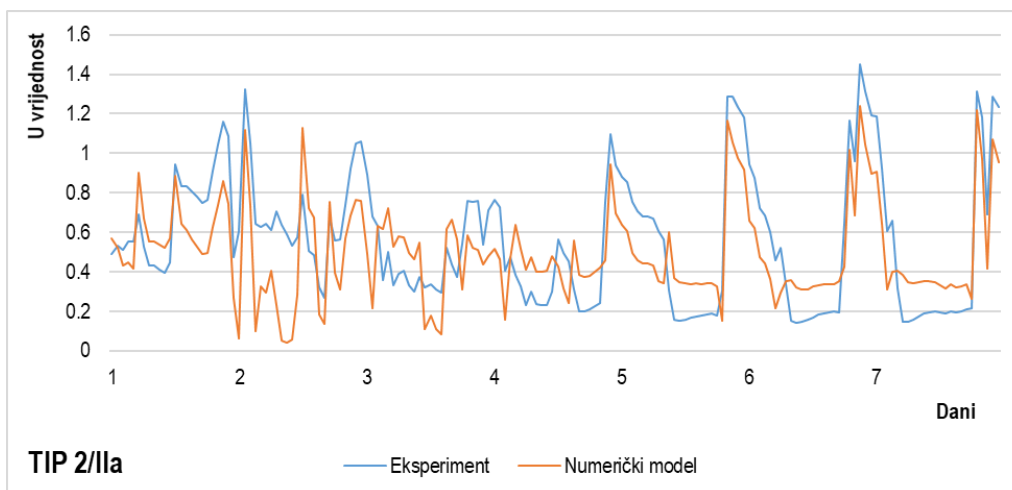
tijekom analiziranog vremena. Također, kao i u tabličnom prikazu, vidljivo je kako su simulirane U vrijednosti u slučaju neizoliranih zidova veće u odnosu na in situ izmjerene U vrijednosti, a u slučaju izoliranih zidova manje.

Tablica 6.2 Sažeti prikaz i usporedba rezultata eksperimentalno i numerički određenih U vrijednosti

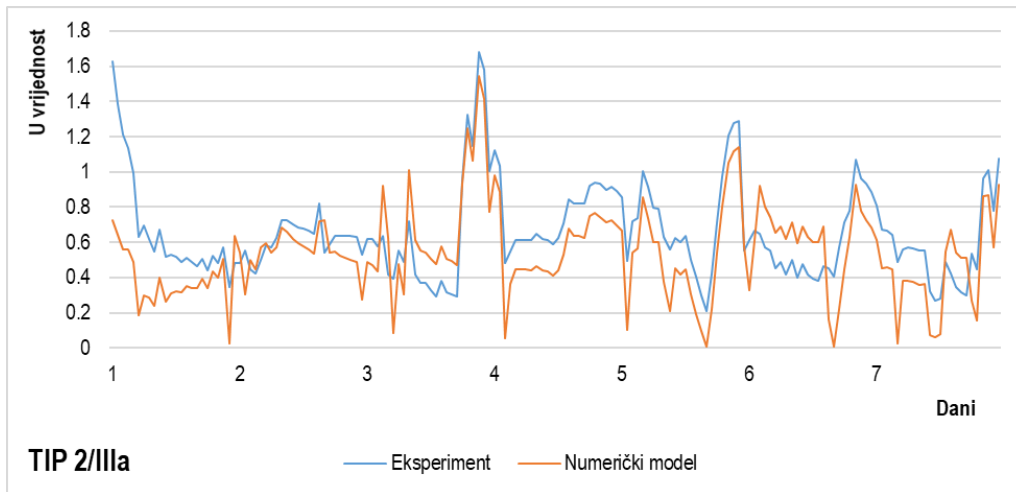
Model	Eksperiment	Numerički model	σ [%]
	U vrijednost [W/(m ² K)]	U vrijednost [W/(m ² K)]	
TIP 1/Ia	1,10	1,52	38%
TIP 1/IIa	0,44	0,42	-5%
TIP 1/IIIa	0,58	0,48	-17%
TIP 1/IIIb	0,59	0,37	-37%
TIP 2/Ia	1,71	1,85	8%
TIP 2/IIa	0,56	0,50	-11%
TIP 2/IIIa	0,65	0,54	-17%
TIP 2/IIIb	0,70	0,47	-33%



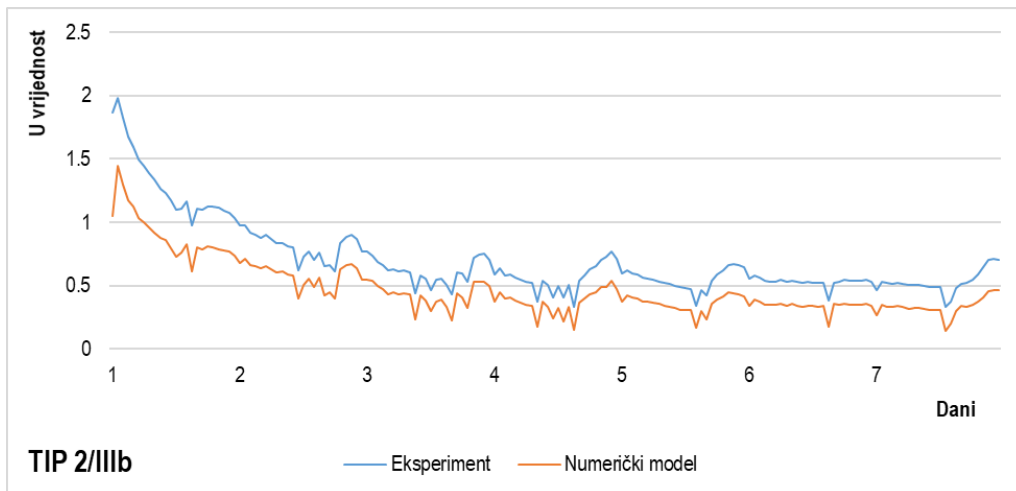
Slika 6.1 Usporedni prikaz rezultata numeričke simulacije U vrijednosti i in situ mjerenja TBM-om, model 2/Ia



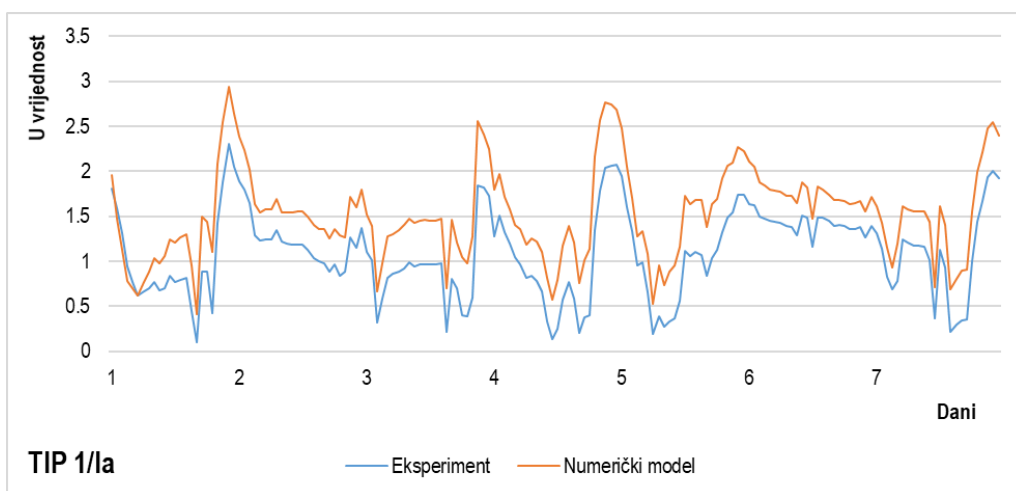
Slika 6.2 Usporedni prikaz rezultata numeričke simulacije U vrijednosti i in situ mjerenja TBM-om, model 2/IIa



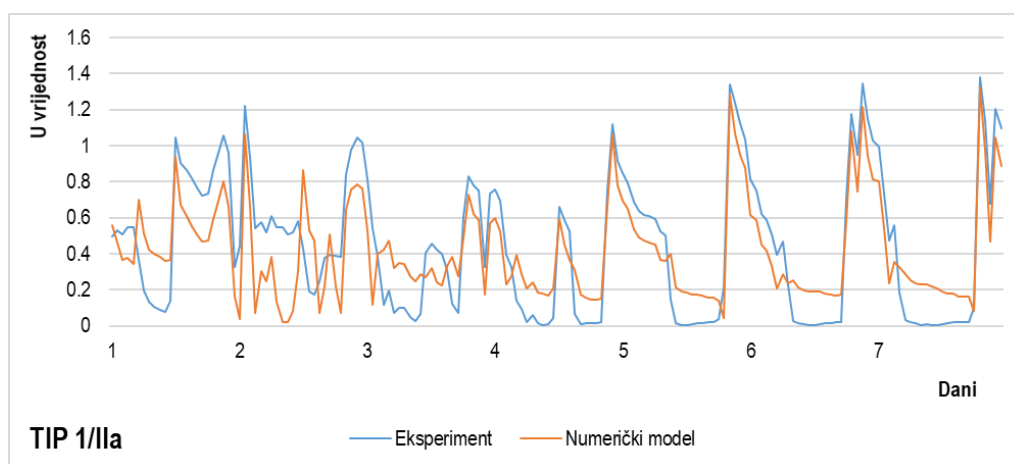
Slika 6.3 Usporedni prikaz rezultata numeričke simulacije U vrijednosti i in situ mjerenja TBM-om, model 2/IIIa



Slika 6.4 Usporedni prikaz rezultata numeričke simulacije U vrijednosti i in situ mjerenja TBM-om, model 2/IIIb



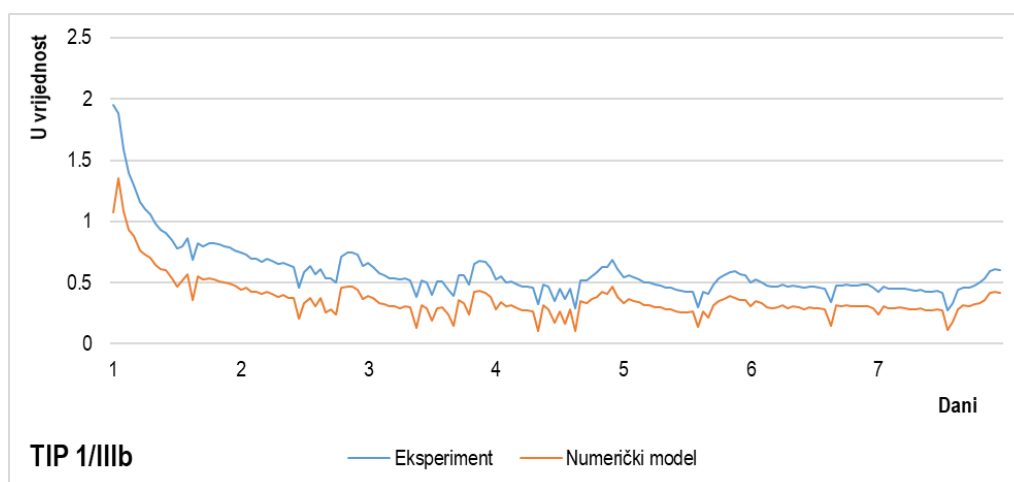
Slika 6.5 Usporedni prikaz rezultata numeričke simulacije U vrijednosti i in situ mjerenja TBM-om, model 1/Ia



Slika 6.6 Usporedni prikaz rezultata numeričke simulacije U vrijednosti i in situ mjerenja TBM-om, model 1/IIa



Slika 6.7 Usporedni prikaz rezultata numeričke simulacije U vrijednosti i in situ mjerenja TBM-om, model 1/IIIa



Slika 6.8 Usporedni prikaz rezultata numeričke simulacije U vrijednosti i in situ mjerenja TBM-om, model 1/IIIb

Na temelju usporedbe rezultata numeričkih simulacija prijenosa topline analiziranih modela s rezultatima in situ ispitivanja općenito se može zaključiti kako se in situ ispitivanjima TBM-om mogu odrediti stvarne U vrijednosti budući da metoda daje smislene i dosljedne rezultate. Također, iako se određene razlike između numeričkih

simulacija modela i rezultata in situ ispitivanja nalaze izvan intervala pouzdanosti, rezultati in situ ispitivanja TBM-om u skladu su s rezultatima provedenih istraživanja u postojećoj znanstvenoj literaturi prema kojima su često stvarne U vrijednosti izoliranih zidova u odnosu na projektne vrijednosti precijenjene [19, 21, 35], a u slučaju neizoliranih zidova podcijenjene [16, 33, 36, 109].

7 ANALIZA UVJETA EKSPERIMENTALNIH ISPITIVANJA I OBRADA REZULTATA

Vrednovanje eksperimentalne in situ temperature metode za određivanje U vrijednosti provedeno je analizom tri parametra: razlike temperature između unutarnjeg i vanjskog zraka ostvarene tijekom ispitivanja (ΔT), točnosti mjerne opreme i vremena trajanja ispitivanja. Svi mjerni podatci su za potrebe analize uprosječeni na interval od 10 min.

Mjerni podatci dobiveni ispitivanjem temperaturnom i HFM metodom su analizirani koristeći metodu prosjeka.

Kao rezultat in situ mjerenja temperaturnom metodom određene su i prikazane srednje U vrijednosti korištenjem metode prosjeka predložene u ISO 9869-1:2014 [27] prema sljedećoj jednadžbi:

$$U \left[\frac{W}{m^2 K} \right] = h_i \frac{\sum_{j=1}^n T_{i(j)} - T_{w(j)}}{\sum_{j=1}^n T_{i(j)} - T_{e(j)}} \quad (7.1)$$

pri čemu je h_i [W/m^2K] koeficijent unutarnjeg prijelaza topline (prema normi HRN EN ISO 6946:2017 [9] za vodoravan smjer toplinskog toka kroz vanjske zidove, $h_i = 7,69$ [W/m^2K]), T_i [K] temperatura unutarnjeg zraka, T_e [K] temperatura vanjskog zraka i T_w [K] temperatura unutarnje površine građevnog elementa.

Budući da je dodatno na izabranim zidovima provedeno usporedno ispitivanje i metodom mjerenja toplinskog toka kroz građevne dijelove (HFM metodom) kao rezultat mjerenja istom, određene su i prikazane srednje U vrijednosti korištenjem prosjeka promatranih vrijednosti prema normi ISO 9869-1:2014 [27]:

$$U \left[\frac{W}{m^2 K} \right] = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})} \quad (7.2)$$

gdje je q_j [W/m^2] gustoća toplinskog toka kroz jedinicu površine elementa, T_{ij} [K] i T_{ej} [K] su unutarnja i vanjska temperatura, a oznaka j označava pojedinačna mjerenja.

• Razlika temperature

Utjecaj postignute temperature razlike tijekom ispitivanja na točnost izmjerenih U vrijednosti analiziran je po danima. Srednje U vrijednosti izračunate su i prikazane u ovisnosti o ostvarenoj temperaturnoj razlici tijekom ispitivanja između unutarnjeg i vanjskog zraka. Za potrebe analize, srednje U vrijednosti izračunate su i prikazane za temperature razlike grupirane u šest intervala:

- temperaturna razlika manja od $8^\circ C$; $\Delta T < 8$,
- temperaturna razlika veća ili jednaka od $8^\circ C$, a manja od $10^\circ C$; $8 \leq \Delta T < 10$,
- temperaturna razlika veća ili jednaka od $10^\circ C$, a manja od $12^\circ C$; $10 \leq \Delta T < 12$,
- temperaturna razlika veća ili jednaka od $12^\circ C$, a manja od $14^\circ C$; $12 \leq \Delta T < 14$,
- temperaturna razlika veća ili jednaka od $14^\circ C$, a manja od $16^\circ C$; $14 \leq \Delta T < 16$,
- temperaturna razlika veća ili jednaka od $16^\circ C$; $\Delta T \geq 16$.

Sa svrhom evaluacije dobivenih vrijednosti, za prikazane srednje U vrijednosti po intervalima naveden je i udio podataka na temelju kojeg su izračunate srednje U vrijednosti u odnosu na ukupan broj podataka. Prilikom analize kao mjerodavni rezultati definirani su rezultati dobiveni u intervalima temperaturne razlike veće od 10 °C u kojima je zabilježeno najmanje 43% podataka što u odnosu na provedena sedmodnevna mjerenja predstavlja tri dana mjerenja, a što je definirano kao preporučeno minimalno vrijeme trajanja ispitivanja prema ISO 9869-1:2014 [27].

Na temelju rezultata eksperimentalnih ispitivanja prikazane su usporedbe in situ izmjerenih U vrijednosti s teorijskim vrijednostima izračunatim na temelju karakteristika materijala prema HRN EN ISO 6946:2017 [9]. Usporedba izmjerenih (U_m) i teorijskih (U_t) U vrijednosti prikazana je za svih šest intervala temperaturnih razlika. Za utvrđivanje pouzdanosti izmjerenih U vrijednosti korišten je kriterij predložen u ISO 9869-1:2014 [27] pri čemu se kao pouzdani podatci uzimaju izmjerene vrijednosti koje od teorijskih (proračunskih) odstupaju za manje od 20%. Prikazano relativno odstupanje između rezultata dobivenih mjerenjem i teorijski izračunatih U vrijednosti izraženo je kao apsolutna vrijednost koristeći sljedeći izraz:

$$\sigma (\%) = \left| \frac{U_m - U_t}{U_t} \right| * 100 \quad (7.3)$$

- **Vrijeme trajanja ispitivanja**

Točnost izmjerenih U vrijednosti analizirana je i u ovisnosti o duljini trajanja ispitivanja. Utjecaj duljine trajanja ispitivanja na točnost izmjerenih U vrijednosti analiziran je u odnosu na teorijske U vrijednosti.

Za određivanje potrebnog vremena trajanja mjerenja primijenjeni su kriteriji predloženi u ISO 9869-1:2014 [27]. Prema ISO 9869-1:2014 [27] preporučeno je da se mjerenja provode u trajanju od najmanje tri dana, a mjerenje se može završiti ako U vrijednost na kraju ispitivanja ne odstupa više od $\pm 5\%$ od vrijednosti izmjerene 24 h ranije. Za analizu mjerenja različitih vremena trajanja promatrani su dnevni podatci, a promjenljivost rezultata analizirana je izračunavanjem koeficijenta varijacije prema:

$$V(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_{mi} - \overline{U}_m)^2}{n - 1}} \cdot \frac{1}{\overline{U}_m} \cdot 100 \quad (7.4)$$

gdje n predstavlja ukupan broj podataka u uzorku, a \overline{U}_m srednju vrijednost podataka U_m (U vrijednosti) u uzorku.

- **Točnost mjerne opreme**

Kako bi se procijenila točnost mjernih rezultata dobivenih temperaturnom metodom, rezultatima mjerenja pridružena je mjerna nesigurnost. Budući da je izmjerena U vrijednost dobivena iz vrijednosti više neovisnih veličina (unutarnje temperature (T_i), vanjske temperature (T_e) i temperature unutarnje površine zida (T_w)), nesigurnost mjernog rezultata izražena je kao sastavljena standardna nesigurnost, u_c . Sastavljena standardna nesigurnost mjerenja izračunata je prema ISO/IEC Guide 98-3:2008 [204], uzimajući u obzir točnost mjerne opreme (uređaja i senzora) navedene u tehničkim specifikacijama proizvođača koje su prikazane u poglavlju 4.6 u tablici 4.6.

Prema ISO/IEC Guide 98-3:2008 [204], sastavljena je standardna nesigurnost $u_c(y)$ pozitivni drugi korijen sastavljene varijancije $u_c^2(y)$, koja je dana izrazom:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta f}{\delta x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (7.5)$$

pri čemu su $\left(\frac{\delta f}{\delta x_i} \right)^2$ koeficijenti osjetljivosti koji opisuju kako se procjena vrijednosti izlazne veličine mijenja s promjenama vrijednosti procjena x_1, x_2, \dots, x_n ulaznih veličina, a $u(x_i)$ su standardne nesigurnosti sastavnica (neovisnih mjerenih veličina). Izvori nesigurnosti prilikom mjerenja temperaturnom metodom povezani su s tri od četiri veličine budući da vrijednost koeficijenta unutarnjeg prijelaza topline nije mjerena veličina, pa su izražena i ukupno tri koeficijenta osjetljivosti. Koeficijenti osjetljivosti su parcijalne derivacije iz jednadžbe (7.5) veličina T_i, T_e i T_w , a sastavljena standardna nesigurnost u_c izračunata je prema izrazu:

$$\begin{aligned} u_c^2(U) &= \left(\frac{\delta U}{\delta T_i} \right)^2 \cdot u_c^2(T_i) + \left(\frac{\delta U}{\delta T_e} \right)^2 \cdot u_c^2(T_e) + \left(\frac{\delta U}{\delta T_{si}} \right)^2 \cdot u_c^2(T_w) \\ &= \left(\frac{-h_i(T_e - T_w)}{(T_i - T_e)^2} \right)^2 \cdot u_c^2(T_i) + \left(-\frac{h_i}{T_i - T_e} \right)^2 \cdot u_c^2(T_e) + \left(\frac{h_i(T_i - T_w)}{(T_i - T_e)^2} \right)^2 \cdot u_c^2(T_w) \end{aligned} \quad (7.6)$$

pri čemu je $u_c(T_i)$ mjerna nesigurnost povezana s mjernom opremom za mjerenje unutarnje temperature, $u_c(T_e)$ mjerna nesigurnost povezana s mjernom opremom za mjerenje vanjske temperature, a $u_c(T_w)$ mjerna nesigurnost povezana s mjernom opremom za mjerenje temperature unutarnje površine zida.

Rezultatima dobivenih mjerenjem HFM metodom također je pridružena mjerna nesigurnost. Prema ISO/IEC Guide 98-3:2008 [204], sastavljena je standardna nesigurnost izmjerene U vrijednosti HFM metodom izračunata prema:

$$\begin{aligned} u_c^2(U) &= \left(\frac{\delta U}{\delta q} \right)^2 \cdot u_c^2(q) + \left(\frac{\delta U}{\delta T_i} \right)^2 \cdot u_c^2(T_i) + \left(\frac{\delta U}{\delta T_e} \right)^2 \cdot u_c^2(T_e) \\ &= \left(\frac{1}{T_i - T_e} \right)^2 \cdot u_c^2(q) + \left(\frac{-q}{(T_i - T_e)^2} \right)^2 \cdot u_c^2(T_i) + \left(\frac{q}{(T_i - T_e)^2} \right)^2 \cdot u_c^2(T_e) \end{aligned} \quad (7.7)$$

pri čemu je $u_c(q)$ mjerna nesigurnost povezana s mjernom opremom za mjerenje gustoće toplinskog toka, $u_c(T_i)$ mjerna nesigurnost povezana s mjernom opremom za mjerenje unutarnje temperature zraka, a $u_c(T_e)$ mjerna nesigurnost povezana s mjernom opremom za mjerenje vanjske temperature zraka.

7.1 Rezultati analize podataka mjerenja - Modeli TIP 1

Na temelju podataka dobivenih mjerenjem temperaturnom metodom modela TIP 1, izračunate su i prikazane srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima prema metodi prosjeka, tablica 7.1. Rezultati ispitivanja pokazuju da je postotna razlika između teorijskih i izmjerenih U vrijednosti samo u slučaju modela TIP 1/Ia manja od 20% što je unutar definiranog kriterija prihvatljivosti. Najmanja postotna razlika između proračunskih i izmjerenih U vrijednosti na kraju sedmodnevnog ispitivanja zabilježena je kod modela TIP 1/Ia, a iznosi 1,0%. Iako je ispitivanjem kod modela TIP 1/II i TIP 1/III vidljiv doprinos toplinske izolacije kroz smanjenje srednje U vrijednosti zida u odnosu

na ispitivanje neizoliranog zida TIP 1/I, postotna razlika između izmjerenih U vrijednosti u odnosu na teorijske vrijednosti se povećala. Nakon izvedbe sloja toplinske izolacije odstupanje između izmjerenih U vrijednosti u odnosu na teorijske vrijednosti iznosi od 57,7% do 126,8%. U teoriji, doprinos toplinske izolacije u pogledu smanjenja U vrijednosti trebao bi iznositi 74,5% u slučaju modela TIP 1/II (nakon postavljanja toplinske izolacije od EPS-a) odnosno 76,4% u slučaju modela TIP 1/III (nakon postavljanja toplinske izolacije od KV). Prema rezultatima ispitivanja pokazalo se da je doprinos toplinske izolacije manji u odnosu na teoriju te da u odnosu na izmjerenu vrijednost modela TIP 1/Ia, smanjenje U vrijednosti kod modela TIP 1/IIa iznosi 59,6%, a kod modela TIP 1/IIIa i 1/IIIb 46,8% i 45,9%. Iako je preporuka ispitivanja provoditi u stacionarnim uvjetima, usporedbom rezultata ispitivanja modela TIP 1/III u uvjetima promjenjive unutarnje temperature (TIP 1/IIIa, $\Delta T=15^{\circ}\text{C}$) u odnosu na ispitivanje s održavanjem stabilne unutarnje temperature (TIP 1/IIIb, $T=30^{\circ}\text{C}$), izmjerene srednje U vrijednosti na kraju sedmodnevnih ispitivanja razlikuju se za samo 1,7%.

Tablica 7.1 Uvjeti ispitivanja, izmjerene srednje U vrijednosti, teorijske U vrijednosti i odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti modela TIP 1

Model	Trajanje ispitivanja	Uvjeti ispitivanja	Srednja vrijednost ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	U_m [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	U_t [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	σ [%]
TIP 1/Ia	7 dana	$\Delta T=15^{\circ}\text{C}$	15,6	$1,09\pm 0,15$	1,10	1,0
TIP 1/IIa	7 dana	$\Delta T=15^{\circ}\text{C}$	15,3	$0,44\pm 0,16$	0,28	57,7
TIP 1/IIIa	7 dana	$\Delta T=15^{\circ}\text{C}$	15,9	$0,58\pm 0,15$	0,26	123,8
TIP 1/IIIb	7 dana	$T_i=30^{\circ}\text{C}$	26,3	$0,59\pm 0,09$	0,26	126,8

S obzirom na to da točnost rezultata in situ ispitivanja U vrijednosti u velikoj mjeri ovisi o postignutoj temperaturnoj razlici između unutarnjeg i vanjskog zraka, radi detaljnije analize, na slikama 7.1, 7.3, 7.5 i 7.7 su nakon sedmodnevnog ispitivanja za sve modele TIP 1 srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima prikazane za šest intervala temperaturnih razlika prethodno definiranih u poglavlju 7. Za prikazane srednje U vrijednosti naveden je i udio podataka na temelju kojeg su izračunate srednje U vrijednosti u pojedinim intervalima u odnosu na ukupan broj podataka prikupljen prilikom mjerenja.

S obzirom na to da je kod ispitivanja zidova TIP 1/Ia, 1/IIa i 1/IIIa održavana temperaturna razlika od 15°C u ovisnosti o vanjskoj temperaturi, vidljivo je da je najveći broj podataka odnosno izmjerenih U vrijednosti prikupljen u posljednja dva intervala temperaturnih razlika ($14 \leq \Delta T < 16$ i $\Delta T \geq 16$).

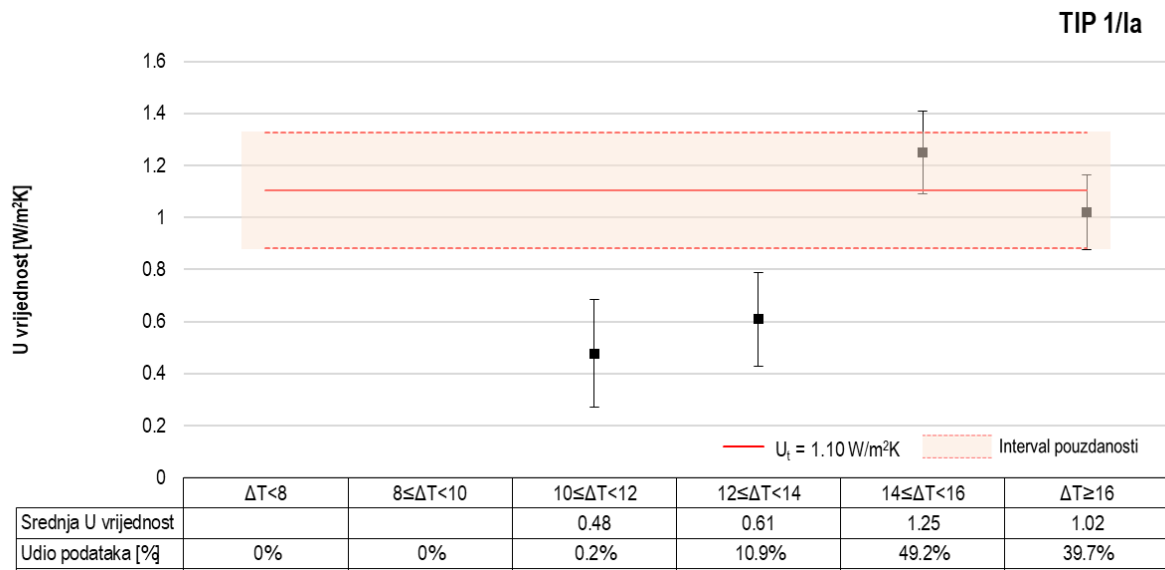
Rezultati ispitivanja neizoliranog modela TIP 1/Ia pokazuju da je prilikom cijelog ispitivanja ostvarena temperaturna razlika veća od 12°C za 99,8% podataka, dok je za gotovo 90% zabilježenih podataka ona veća ili jednaka od 14°C . Povećanje temperaturne razlike rezultiralo je smanjenjem odstupanja između teorijskih i izmjerenih U vrijednosti. Najmanja odstupanja izmjerenih U vrijednosti u odnosu na proračunske zabilježena su u posljednja dva intervala temperaturnih razlika ($14 \leq \Delta T < 16$ i $\Delta T \geq 16$), a izmjerene se srednje U vrijednosti nalaze unutar definiranog intervala pouzdanosti. Kod ispitivanja modela TIP 1/Ia bitno je uočiti kako jedino interval temperaturne razlike veće ili jednake od 14°C , a manje od 16°C obuhvaća više od 43% podataka, što zadovoljava kriterij za analizu podataka definiran u poglavlju 7 o najmanjem potrebnom broju podataka.

Rezultati ispitivanja toplinski izoliranih modela pokazuju značajno veća odstupanja srednjih U vrijednosti u usporedbi s teorijskim vrijednostima u svih šest intervala temperaturnih razlika. Iako se u slučaju ispitivanja modela TIP 1/IIIa izmjerena srednja U vrijednost pri temperaturnoj razlici većoj ili jednakoj od 12°C, a manjoj od 14°C nalazi unutar intervala pouzdanosti bitno je uočiti kako dobivena vrijednost obuhvaća samo 19,1% od ukupnog broja podataka. Također, za slučaj ispitivanja modela TIP 1/IIIa vidljivo je da niti u jednom intervalu definirane temperaturne razlike nije postignut udio podataka od minimalno 43%. Kod modela TIP 1/IIa i 1/IIIb u svim intervalima temperaturnih razlika izmjerene srednje U vrijednosti nalaze se izvan definiranog intervala pouzdanosti.

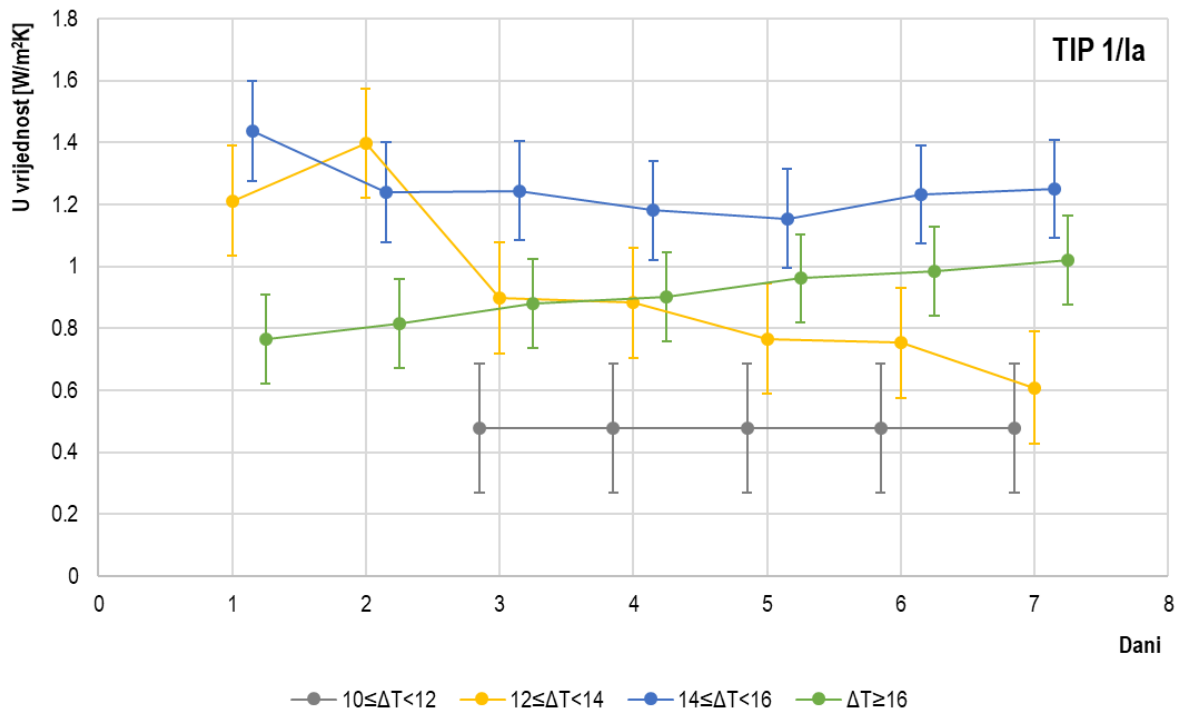
Na slikama 7.2, 7.4, 7.6 i 7.8 prikazan je trend kretanja srednje U vrijednosti s pripadnim mjernim nesigurnostima po danima i definiranim intervalima temperaturnih razlika između unutarnjeg i vanjskog zraka koristeći kumulativne vrijednosti. Analiza trenda kretanja srednje U vrijednosti u intervalima koji sadrže udio podataka veći od 43% pokazuje kako su ispitivanja modela TIP 1/IIa, 1/IIIa i 1/IIIb u uvjetima promjenjive unutarnje temperature rezultirala većim varijacijama srednje U vrijednosti u ovisnosti o vremenu trajanja ispitivanja. S druge strane, iako kod modela TIP 1/IIIb izmjerene srednje U vrijednosti značajno odstupaju od teorijske, rezultati ispitivanja pokazuju smanjenje U vrijednosti te postupno ujednačenje vrijednosti povećanjem vremena trajanja ispitivanja. Kod svih ispitanih modela TIP 1 porastom temperaturne razlike smanjuje se mjerna nesigurnost što je brojčano iskazano u tablici 7.2.

Detaljni prikaz analize pročišćenih rezultata mjerenja modela TIP 1/IIa, 1/IIIa i 1/IIIb prema kriterijima za analizu podataka definiranim u poglavlju 7 o najmanjem potrebnom broju podataka i minimalnoj potrebnoj temperaturnoj razlici između unutarnjeg i vanjskog zraka dan je u poglavlju 7.9.

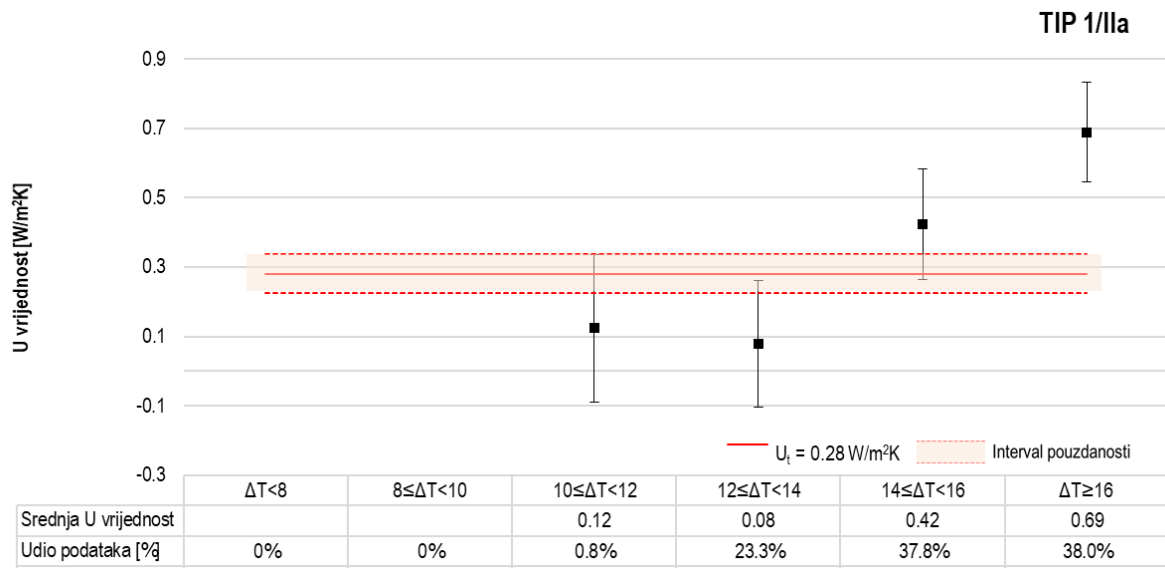
Osim grafički, u tablici 7.2 srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima prikazane su po danima za sve podatke ($\delta > \Delta T > 8$) i razvrstano za šest intervala temperaturnih razlika koristeći kumulativne vrijednosti. U tablici 7.2, dodatno su izmjerene srednje U vrijednosti ispitanih modela TIP 1 u svim intervalima temperaturnih razlika uspoređene s teorijskim U vrijednostima (U_i) te su dani koeficijenti varijacije za cijeli set podataka po danima. Koeficijenti varijacije izračunati su u odnosu na vrijednosti izmjerene 24 h ranije. Prema kriteriju definiranom u poglavlju 7 o vremenu trajanja ispitivanja, za modele TIP 1/IIa i TIP 1/IIIb pokazalo se kako je potrebno vrijeme trajanja ispitivanja tri dana, budući da je treći dan koeficijent varijacije manji od 5%. Prema istom kriteriju, za modele TIP 1/IIa i 1/IIIa potrebno vrijeme trajanja ispitivanja je pet dana.



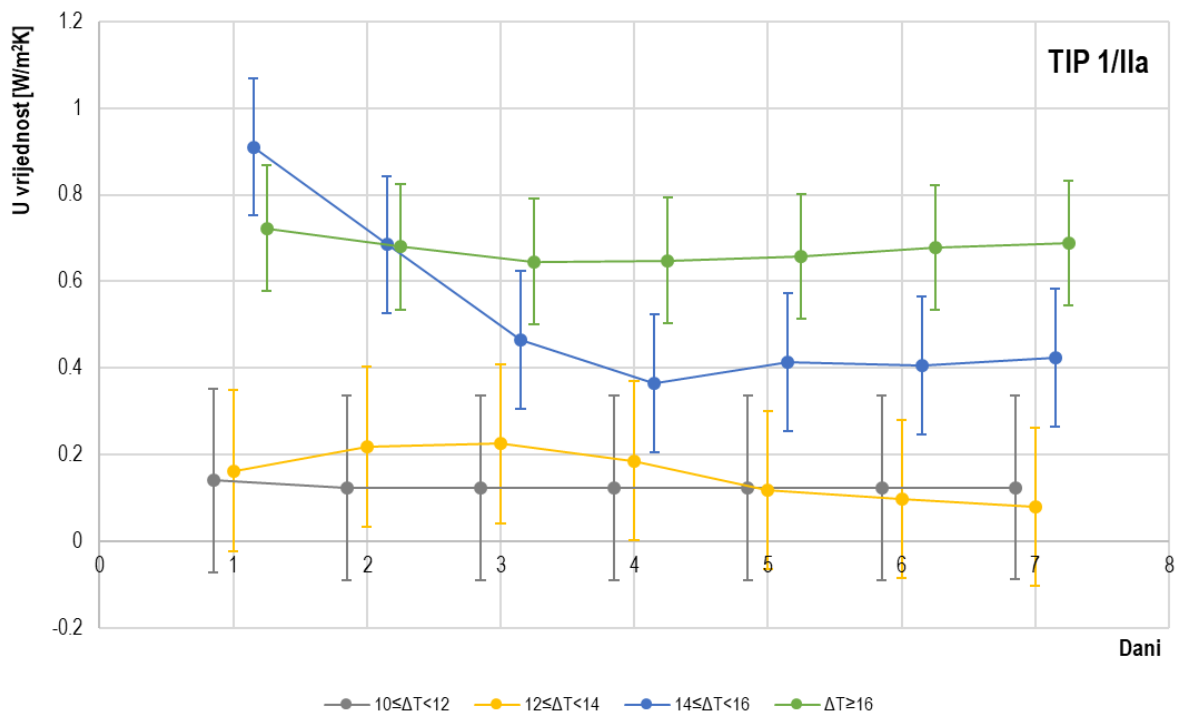
Slika 7.1 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 1/la



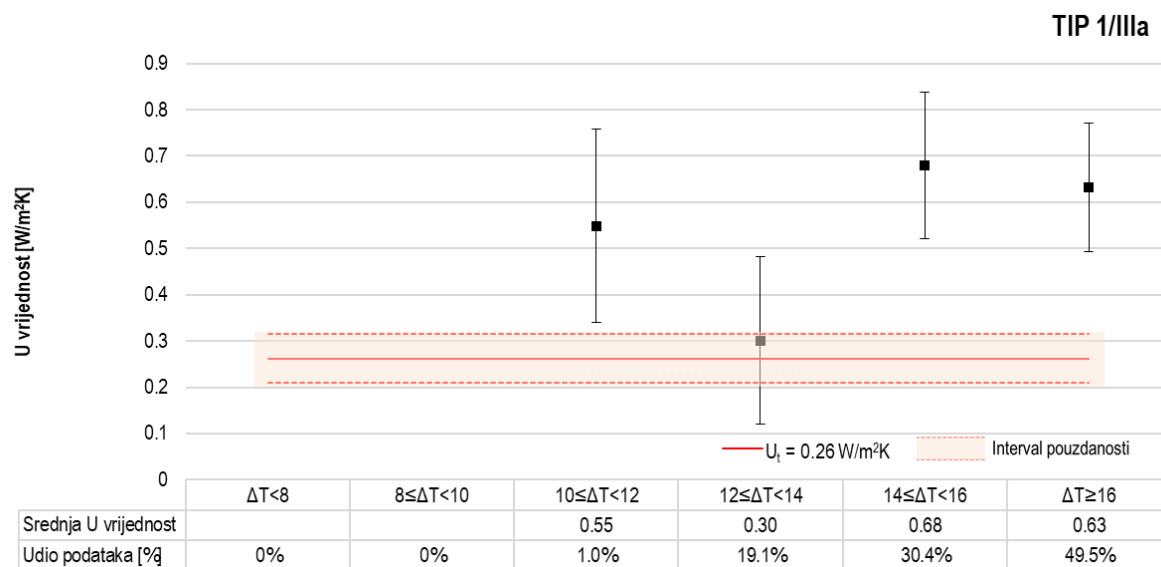
Slika 7.2 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 1/la



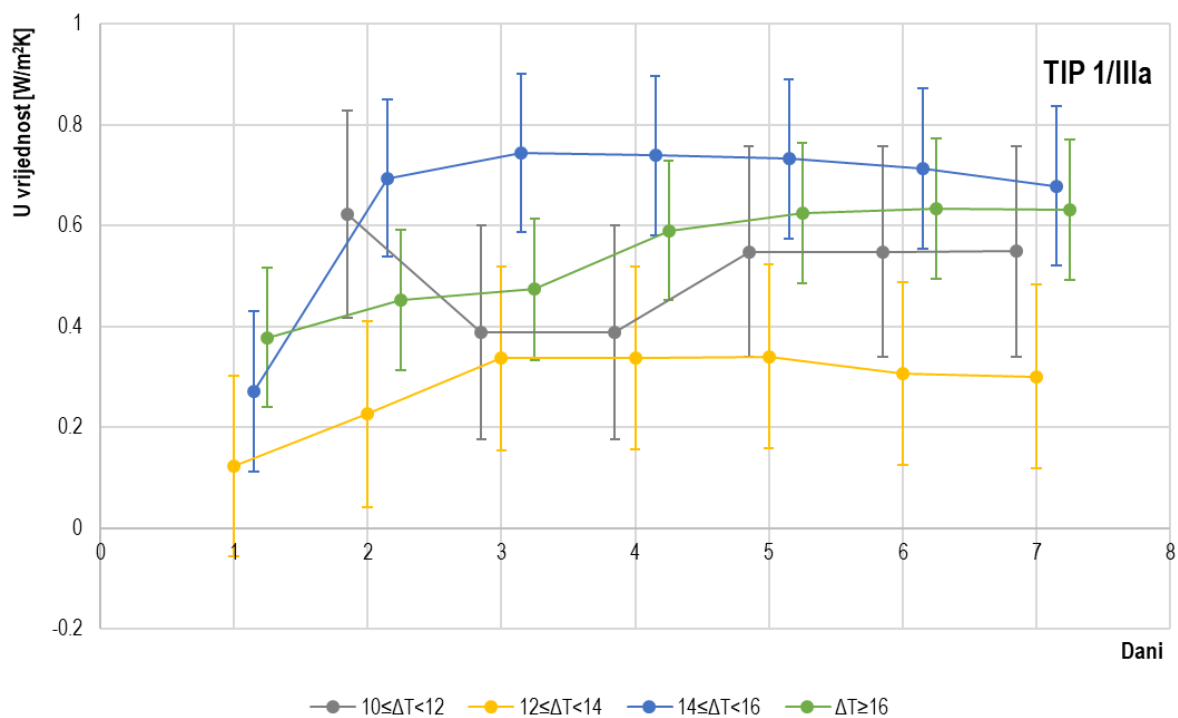
Slika 7.3 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 1/IIa



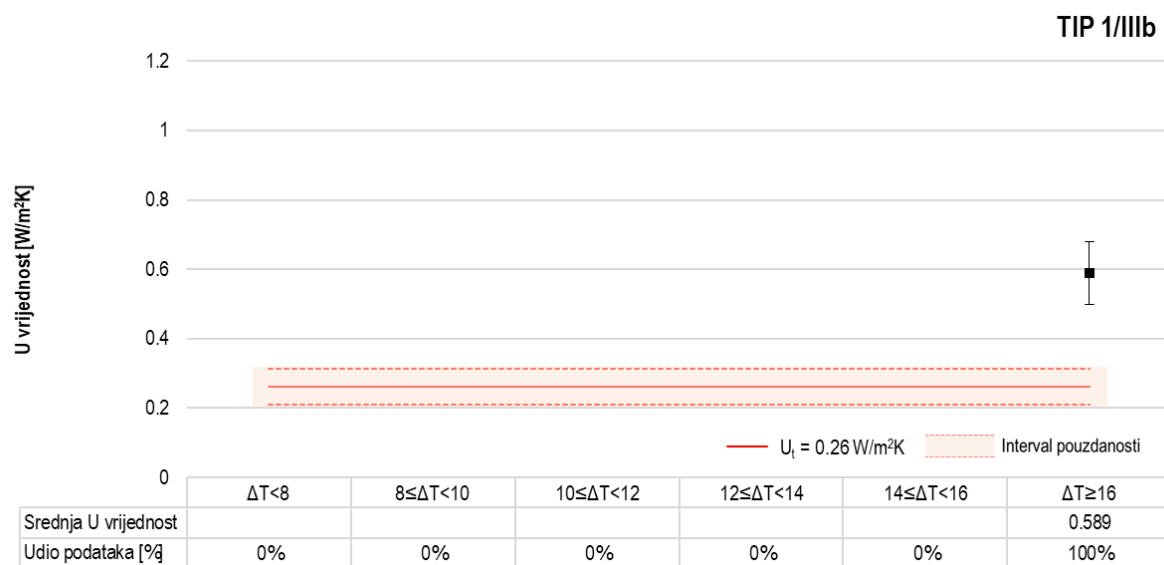
Slika 7.4 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 1/IIa



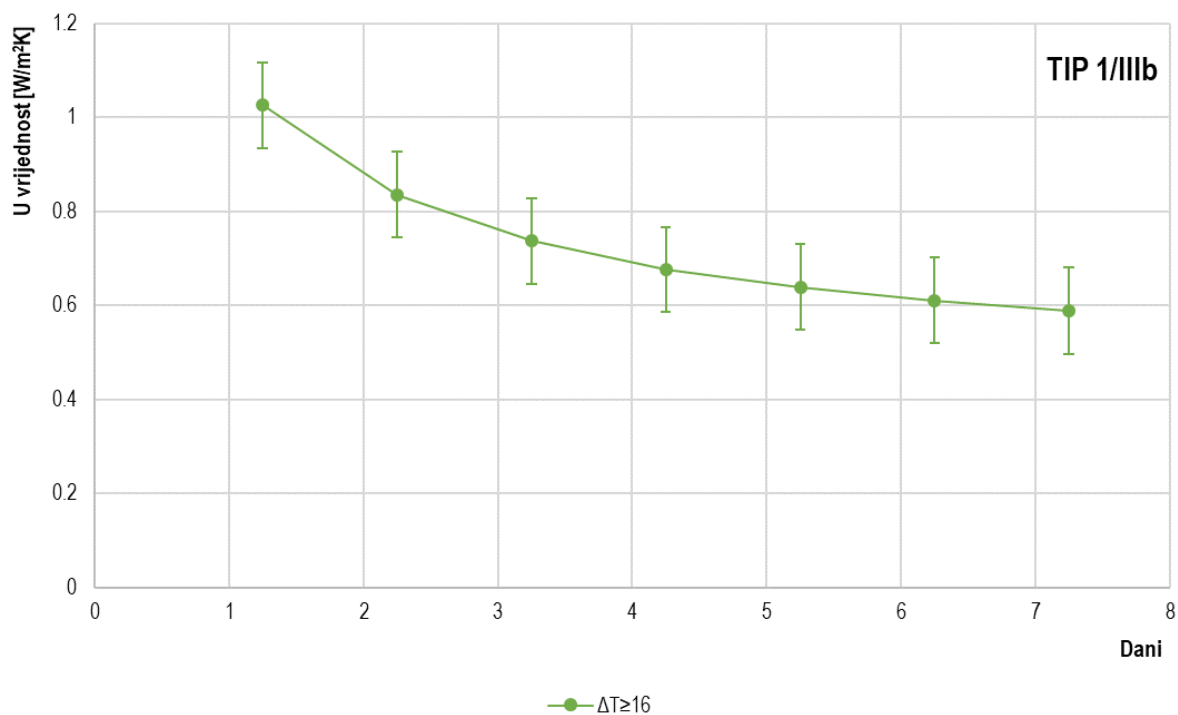
Slika 7.5 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 1/IIIa



Slika 7.6 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 1/IIIa



Slika 7.7 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 1/IIIb



Slika 7.8 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 1/IIIb

Tablica 7.2 Izmjerene U vrijednosti sa mjernim nesigurnostima, odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti i koeficijent varijacije U vrijednosti, modeli TIP 1

MODEL 1/Ia															
Duljina ispitivanja	$\Delta T < 8$		$8 \leq \Delta T < 10$		$10 \leq \Delta T < 12$		$12 \leq \Delta T < 14$		$14 \leq \Delta T < 16$		$\Delta T \geq 16$		$8 > \Delta T > 8$		V
	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	
	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	
1 (24 h)	-	-	-	-	-	-	1,21±0,18	10,1	1,44±0,16	30,7	0,77±0,14	30,4	1,01±0,15	8,3	
2 (48 h)	-	-	-	-	-	-	1,40±0,18	27,2	1,24±0,16	12,6	0,82±0,14	25,7	1,11±0,16	1,1	14,7
3 (72 h)	-	-	-	-	0,48±0,21	56,6	0,90±0,18	18,3	1,24±0,16	13,1	0,88±0,14	19,9	1,04±0,16	5,1	3,7
4 (96 h)	-	-	-	-	0,48±0,21	56,6	0,88±0,18	19,8	1,18±0,16	7,3	0,90±0,14	18,0	1,03±0,15	6,7	4,8
5 (120 h)	-	-	-	-	0,48±0,21	56,6	0,77±0,18	30,3	1,15±0,16	4,9	0,96±0,14	12,6	1,03±0,15	6,6	0,3
6 (144 h)	-	-	-	-	0,48±0,21	56,6	0,75±0,18	31,5	1,23±0,16	12,2	0,99±0,14	10,4	1,09±0,15	0,6	4,4
7 (168 h)	-	-	-	-	0,48±0,21	56,6	0,61±0,18	44,7	1,25±0,16	13,7	1,02±0,14	7,2	1,09±0,15	1,1	1,0

MODEL 1/IIa															
Duljina ispitivanja	$\Delta T < 8$		$8 \leq \Delta T < 10$		$10 \leq \Delta T < 12$		$12 \leq \Delta T < 14$		$14 \leq \Delta T < 16$		$\Delta T \geq 16$		$8 > \Delta T > 8$		V
	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	
	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	
1 (24 h)	-	-	-	-	0,14±0,21	50,0	0,16±0,19	42,0	0,91±0,16	225,1	0,72±0,15	158,2	0,57±0,16	104,7	
2 (48 h)	-	-	-	-	0,12±0,21	55,8	0,22±0,18	22,1	0,68±0,16	144,6	0,68±0,15	143,1	0,58±0,16	106,5	1,1
3 (72 h)	-	-	-	-	0,12±0,21	55,8	0,22±0,18	19,8	0,47±0,16	66,1	0,65±0,14	130,7	1,04±0,16	272,7	9,3
4 (96 h)	-	-	-	-	0,12±0,21	55,8	0,19±0,18	33,6	0,36±0,16	30,1	0,65±0,14	131,6	0,45±0,16	62,5	12,1
5 (120 h)	-	-	-	-	0,12±0,21	55,8	0,12±0,18	57,5	0,41±0,16	48,1	0,66±0,14	134,8	0,46±0,16	62,9	3,9
6 (144 h)	-	-	-	-	0,12±0,21	55,8	0,10±0,18	65,3	0,41±0,16	45,0	0,68±0,14	142,6	0,46±0,16	62,6	4,0
7 (168 h)	-	-	-	-	0,12±0,21	55,7	0,08±0,18	71,8	0,42±0,16	51,4	0,69±0,14	146,1	0,44±0,16	57,7	5,9

MODEL 1/IIIa															
Duljina ispitivanja	$\Delta T < 8$		$8 \leq \Delta T < 10$		$10 \leq \Delta T < 12$		$12 \leq \Delta T < 14$		$14 \leq \Delta T < 16$		$\Delta T \geq 16$		$8 > \Delta T > 8$		V
	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	
	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	
1 (24 h)	-	-	-	-	-	-	0,12±0,18	52,4	0,27±0,16	4,4	0,38±0,14	45,4	0,35±0,14	34,9	
2 (48 h)	-	-	-	-	0,62±0,21	139,6	0,23±0,19	13,0	0,69±0,16	166,8	0,45±0,14	74,4	0,52±0,15	101,8	33,4
3 (72 h)	-	-	-	-	0,39±0,21	49,5	0,34±0,18	29,7	0,74±0,16	186,1	0,47±0,14	82,2	1,04±0,16	301,4	8,6
4 (96 h)	-	-	-	-	0,39±0,21	49,5	0,34±0,18	29,9	0,74±0,16	184,2	0,59±0,14	127,0	0,58±0,15	125,0	11,6
5 (120 h)	-	-	-	-	0,55±0,21	111,0	0,34±0,18	31,1	0,73±0,16	181,6	0,62±0,14	140,3	0,61±0,15	133,1	4,3
6 (144 h)	-	-	-	-	0,55±0,21	111,0	0,31±0,18	17,9	0,71±0,16	174,4	0,63±0,14	143,6	0,59±0,15	125,9	2,7
7 (168 h)	-	-	-	-	0,55±0,21	111,2	0,30±0,18	15,8	0,68±0,16	161,2	0,63±0,14	143,1	0,58±0,15	123,8	0,2

MODEL 1/IIIb															
Duljina ispitivanja	$\Delta T < 8$		$8 \leq \Delta T < 10$		$10 \leq \Delta T < 12$		$12 \leq \Delta T < 14$		$14 \leq \Delta T < 16$		$\Delta T \geq 16$		$8 > \Delta T > 8$		V
	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	
	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	
1 (24 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,03±0,09	294,7	1,03	294,7	
2 (48 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,84±0,09	221,5	0,84	221,5	4,4
3 (72 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,74±0,09	183,5	1,04	301,4	2,7
4 (96 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,68±0,09	160,2	0,68	160,2	1,5
5 (120 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,64±0,09	146,0	0,64	146,0	0,3
6 (144 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,61±0,09	135,2	0,61	135,2	0,6
7 (168 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,59±0,09	126,8	0,59	126,8	0,4

7.2 Rezultati analize podataka mjerenja - Modeli TIP 2

Na temelju podataka dobivenih mjerenjem temperaturnom metodom modela TIP 2, izračunate su i prikazane srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima prema metodi prosjeka, tablica 7.3. Rezultati ispitivanja pokazuju da je postotna razlika između teorijskih i izmjerenih U vrijednosti samo u slučaju modela TIP 2/Ia manja od 20% što je unutar definiranog kriterija prihvatljivosti. Rezultati ispitivanja pokazuju da je postotna razlika između teorijskih i izmjerenih U vrijednosti na kraju sedmodnevnog ispitivanja najmanja kod modela TIP 2/Ia te iznosi 12,7%. Kao i kod prethodno opisanih modela TIP 1, dodavanjem sloja toplinske izolacije postotna razlika između izmjerenih U vrijednosti u odnosu na teorijske vrijednosti se povećala te kod modela TIP 2/II i 2/III iznosi od 75% do 141,4% ovisno o uvjetima ispitivanja. Doprinos toplinske izolacije kroz smanjenje srednje U vrijednosti zida vidljiv je i kod modela TIP 2. U teoriji, doprinos toplinske izolacije u pogledu smanjenja U vrijednosti trebao bi iznositi 83,7% u slučaju modela 2/II (nakon postavljanja toplinske izolacije od EPS-a) odnosno 85,2% u slučaju modela 2/III (nakon postavljanja toplinske izolacije od KV). Prema rezultatima ispitivanja pokazalo se da je doprinos toplinske izolacije manji u odnosu na teoriju te da u odnosu na izmjerenu vrijednost modela TIP 2/Ia, smanjenje U vrijednosti kod modela TIP 1/IIa iznosi 67,3%, a kod modela TIP 2/IIIa i 2/IIIb 61,7% i 59,2%. Usporede li se ispitivanja modela TIP 2/III koja su provedena u različitim uvjetima vidljivo je da se dobivene srednje U vrijednosti nakon sedam dana ispitivanja razlikuju za samo 7,7%.

Tablica 7.3 Uvjeti ispitivanja, izmjerene srednje U vrijednosti, teorijske U vrijednosti i odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti modela TIP 2

Model	Trajanje ispitivanja	Uvjeti ispitivanja	Srednja vrijednost ΔT [°C]	U_m [W/m ² K]	U_t [W/m ² K]	σ [%]
TIP 2/Ia	7 dana	$\Delta T=15$ °C	15,0	1,71±0,16	1,96	12,7
TIP 2/IIa	7 dana	$\Delta T=15$ °C	15,1	0,56±0,16	0,32	75,0
TIP 2/IIIa	7 dana	$\Delta T=15$ °C	15,8	0,65±0,15	0,29	125,8
TIP 2/IIIb	7 dana	$T_i=30$ °C	26,3	0,70±0,09	0,29	141,4

S obzirom na to da točnost rezultata in situ ispitivanja U vrijednosti u velikoj mjeri ovisi o postignutoj temperaturnoj razlici tijekom ispitivanja, radi detaljnije analize, na slikama 7.9, 7.11, 7.13 i 7.15 su nakon sedmodnevnog ispitivanja za sve modele TIP 2 srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima prikazane za šest intervala temperaturnih razlika prethodno definiranih u poglavlju 7. Za prikazane srednje U vrijednosti naveden je i udio podataka na temelju kojeg su izračunate srednje U vrijednosti u pojedinim intervalima u odnosu na ukupan broj podataka prikupljen prilikom mjerenja.

S obzirom na to da je kod ispitivanja zidova TIP 2/Ia, 2/IIa i 2/IIIa održavana temperaturna razlika od 15 °C u ovisnosti o vanjskoj temperaturi, kao i kod modela TIP 1, vidljivo je da je najveći broj podataka odnosno izmjerenih U vrijednosti prikupljen u posljednja dva intervala temperaturnih razlika ($14 \leq \Delta T < 16$ i $\Delta T \geq 16$).

Rezultati ispitivanja neizoliranog modela TIP 2/Ia pokazuju da je prilikom cijelog ispitivanja ostvarena temperaturna razlika veća od 12°C za 98,2% podataka, dok je za gotovo 80% zabilježenih podataka ona veća ili jednaka od

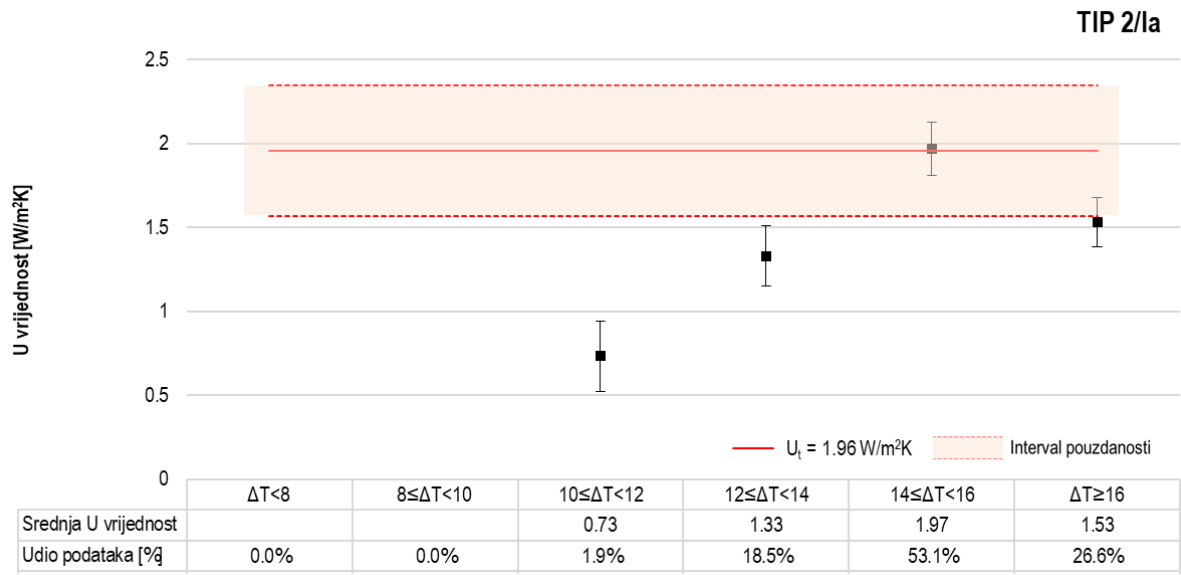
14°C. Povećanje temperaturne razlike rezultiralo je smanjenjem odstupanja između proračunskih i izmjerenih U vrijednosti. Najmanja odstupanja izmjerenih U vrijednosti u odnosu na proračunske zabilježena su u posljednja dva intervala temperaturnih razlika ($14 \leq \Delta T < 16$ i $\Delta T \geq 16$). Bitno je uočiti kako jedino interval temperaturne razlike veće ili jednake od 14°C, a manje od 16°C obuhvaća više od 43% podataka te se jedino u istom izmjerena srednja U vrijednosti nalazi unutar definiranog intervala pouzdanosti.

Rezultati ispitivanja toplinski izoliranih modela TIP 2 pokazuju značajno veća odstupanja srednjih U vrijednosti u usporedbi s proračunskim vrijednostima u svih šest intervala temperaturnih razlika. Iako se u slučaju ispitivanja modela TIP 2/IIa izmjerene srednje U vrijednosti pri temperaturnoj razlici većoj ili jednakoj od 10°C, a manjoj od 14°C nalaze unutar intervala pouzdanosti bitno je uočiti kako dobivene vrijednosti obuhvaćaju u oba intervala samo 27,8% od ukupnog broja podataka. Također, za slučaj ispitivanja modela TIP 2/IIa vidljivo je da niti u jednom intervalu definirane temperaturne razlike nije postignut udio podataka od minimalno 43%. Kod modela TIP 2/IIIa i 2/IIIb u svim intervalima temperaturnih razlika izmjerene srednje U vrijednosti nalaze se izvan definiranog intervala pouzdanosti.

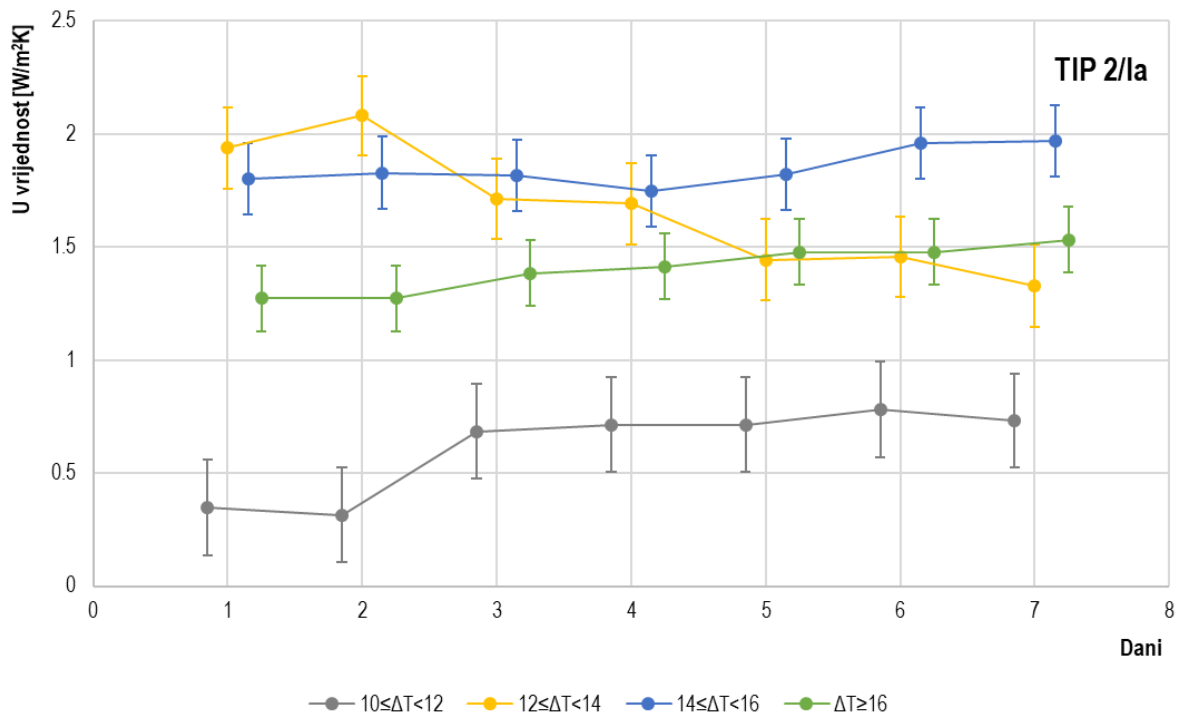
Dodatno je na slikama 7.10, 7.12, 7.14 i 7.16 prikazan trend kretanja srednje U vrijednosti s pripadnim mjernim nesigurnostima po danima i za svih šest definiranih intervala temperaturnih razlika koristeći kumulativne vrijednosti. Analiza trenda kretanja srednje U vrijednosti u intervalima koji sadrže udio podataka veći od 43% pokazuje kako su ispitivanja modela TIP 2/IIa, 2/IIIa i 2/IIIb u uvjetima promjenjive unutarnje temperature rezultirala većim varijacijama srednje U vrijednosti u ovisnosti o vremenu trajanja ispitivanja. S druge strane, iako kod modela TIP 2/IIIb izmjerene srednje U vrijednosti značajno odstupaju od teorijske, rezultati ispitivanja pokazuju smanjenje U vrijednosti te postupno ujednačenje vrijednosti povećanjem vremena trajanja ispitivanja. Kod svih ispitanih modela TIP 1 porastom temperaturne razlike smanjuje se mjerna nesigurnost što je brojčano iskazano u tablici 7.4.

Detaljni prikaz analize pročišćenih rezultata mjerenja modela TIP 2/IIa, 2/IIIa i 2/IIIb prema kriterijima za analizu podataka definiranim u poglavlju 7 o najmanjem potrebnom broju podataka i minimalnoj potrebnoj temperaturnoj razlici između unutarnjeg i vanjskog zraka dan je u poglavlju 7.9.

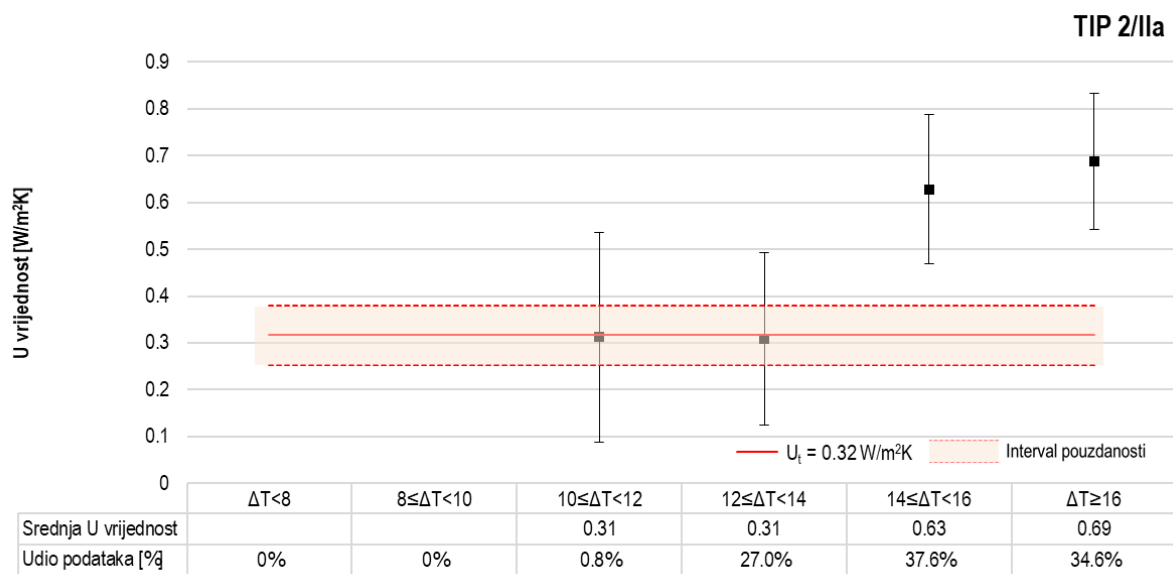
Osim grafički, u tablici 7.4 srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima prikazane su po danima za sve podatke ($\delta > \Delta T > 8$) i razvrstano za šest intervala temperaturnih razlika koristeći kumulativne vrijednosti. U tablici 7.4, dodatno su izmjerene srednje U vrijednosti ispitanih modela TIP 2 u svim intervalima temperaturnih razlika uspoređene s proračunskim odnosno teorijskim U vrijednostima (U_t) te su dani koeficijenti varijacije po danima za cijeli set izmjerenih podataka. Koeficijenti varijacije izračunati su u odnosu na vrijednosti izmjerene 24 h ranije. Prema kriteriju definiranom u poglavlju 7 i rezultatima ispitivanja, pokazalo se da je za modele TIP 2/IIa i TIP 2/IIIa potrebno vrijeme trajanja ispitivanja tri dana, za model TIP 2/IIIa pet dana, a za model TIP 1/IIIb četiri dana.



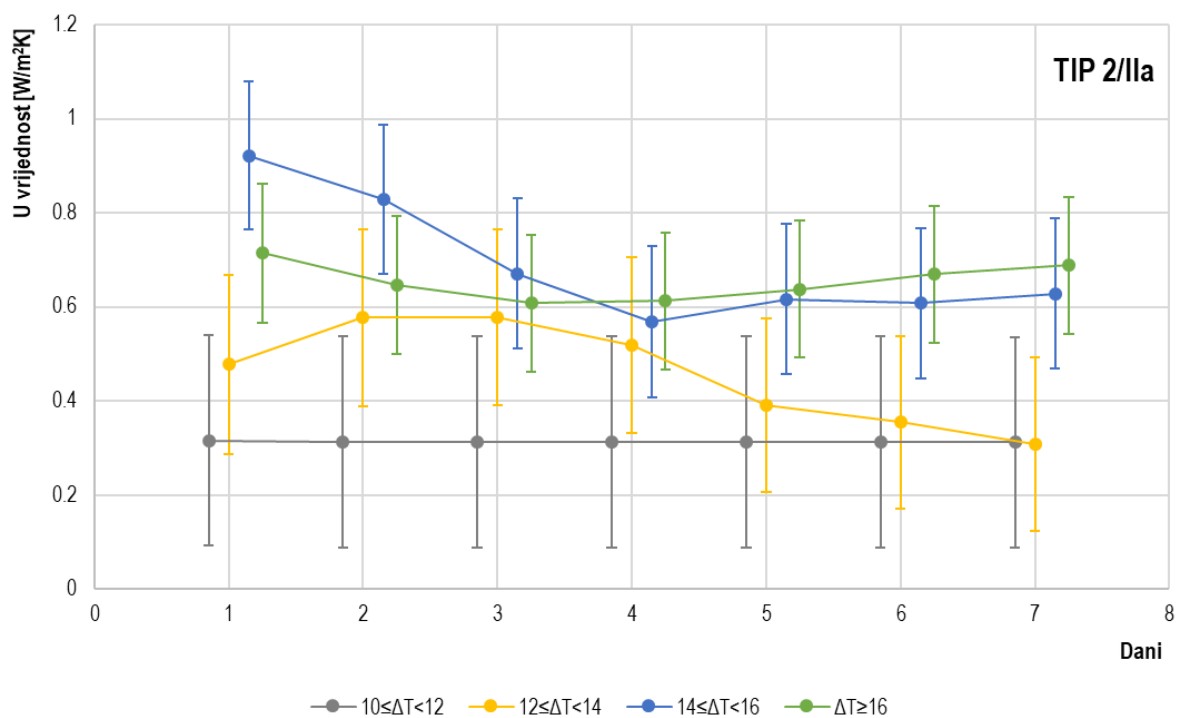
Slika 7.9 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 2/1a



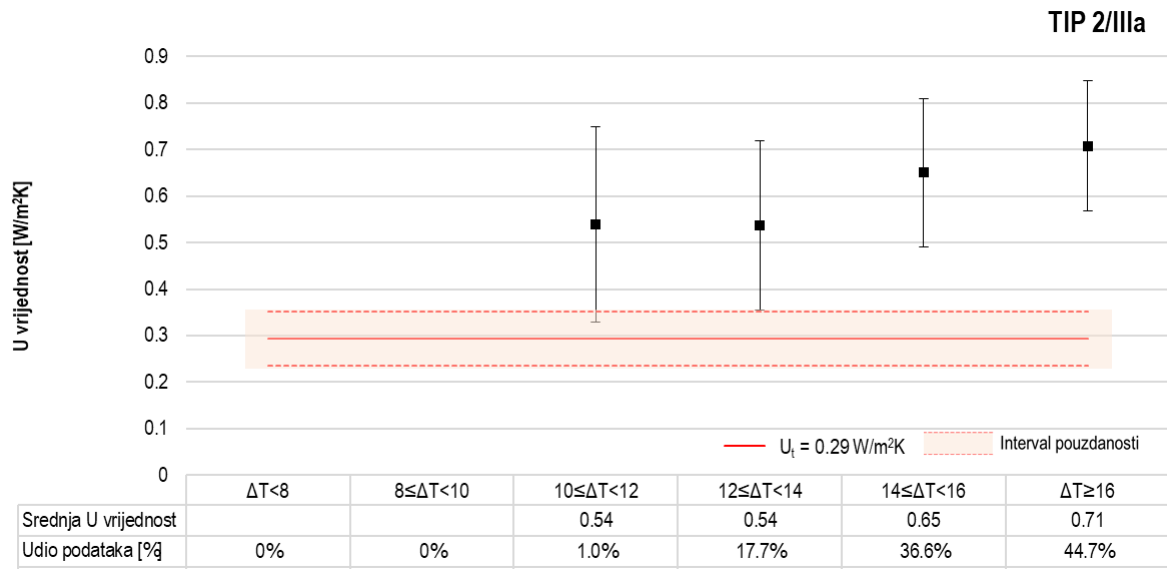
Slika 7.10 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 2/1a



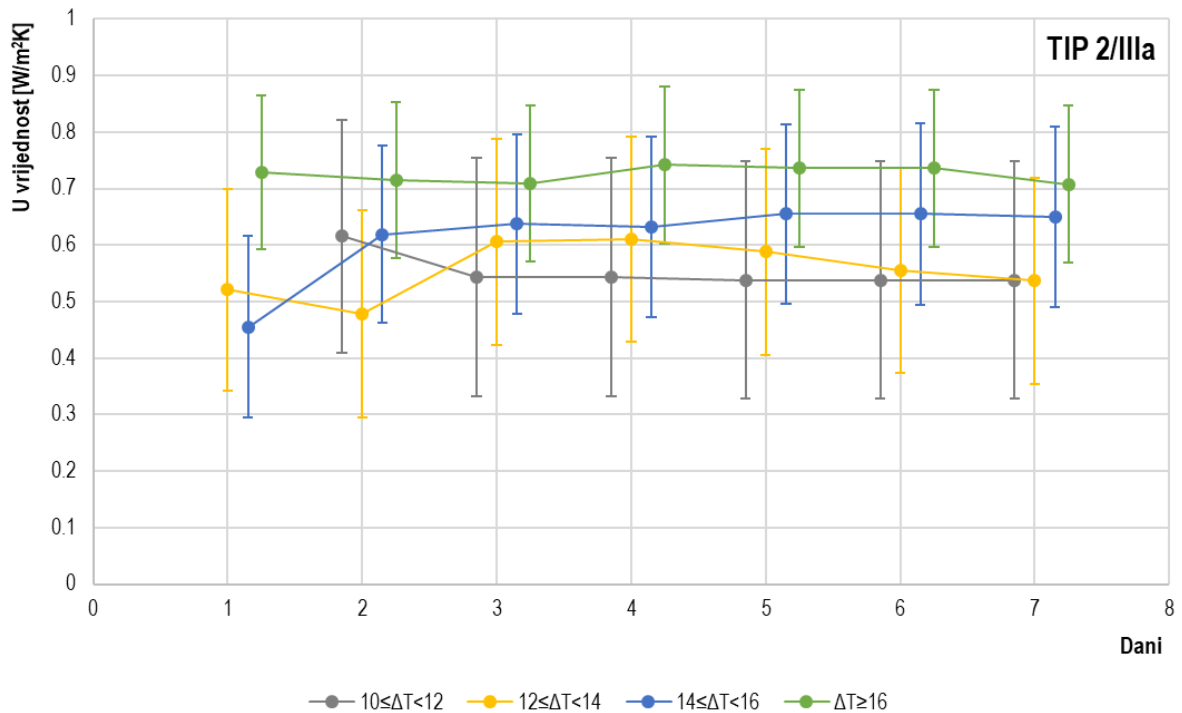
Slika 7.11 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 2/IIa



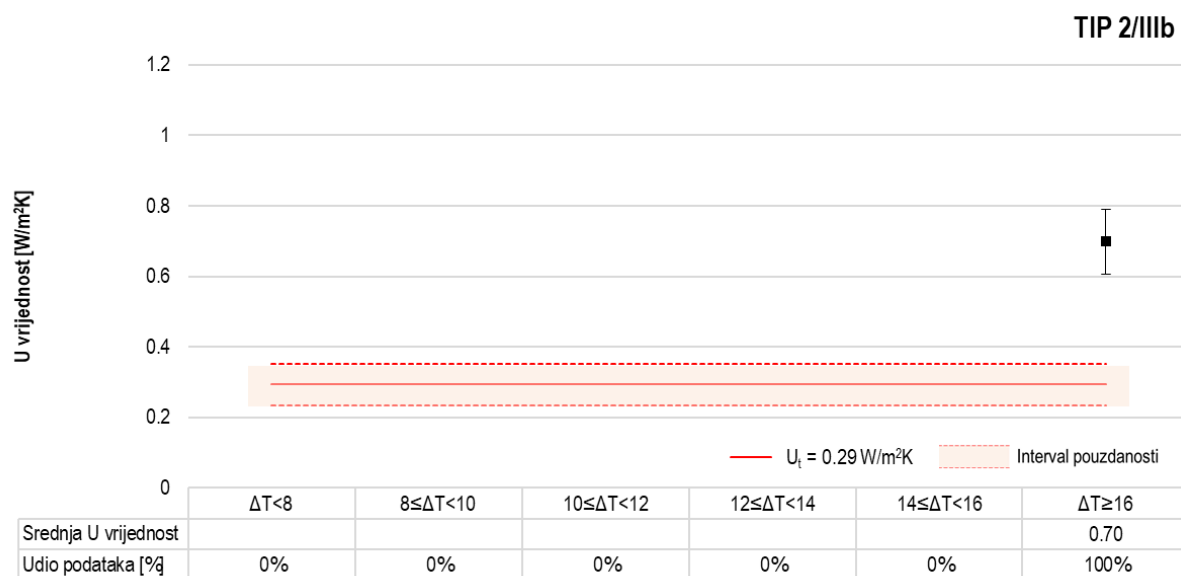
Slika 7.12 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 2/IIa



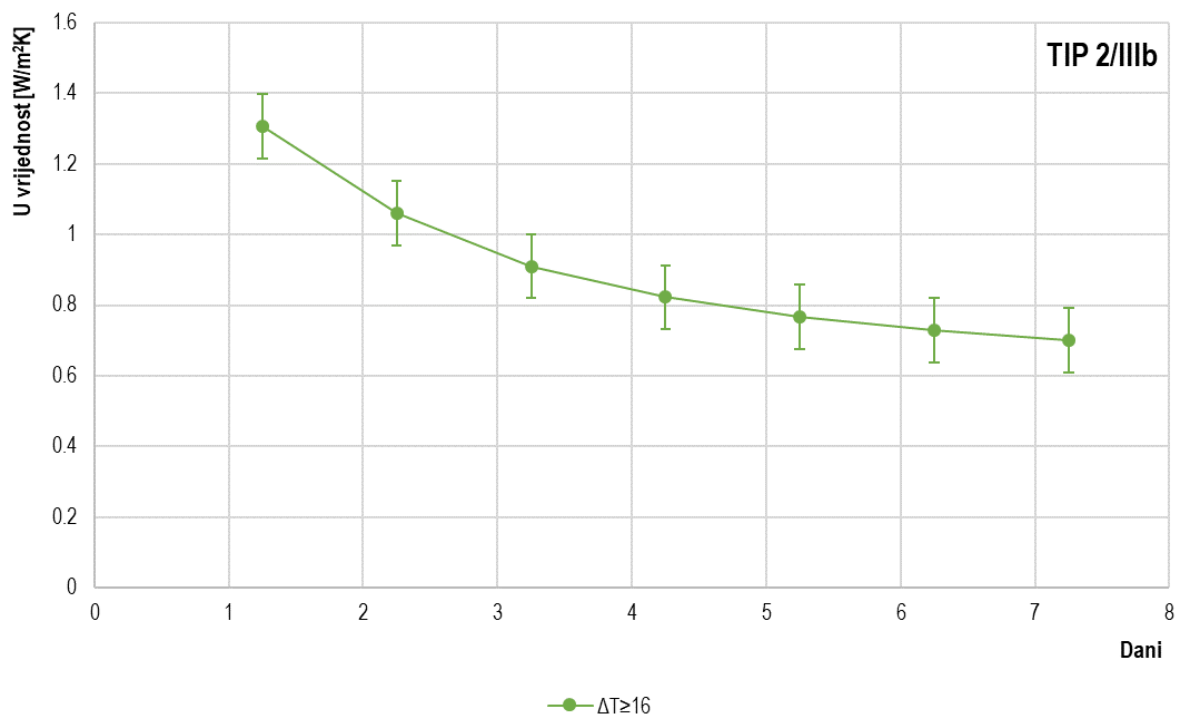
Slika 7.13 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 2/IIIa



Slika 7.14 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 2/IIIa



Slika 7.15 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 2/IIIb



Slika 7.16 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 2/IIIb

Tablica 7.4 Izmjerene U vrijednosti sa mjernim nesigurnostima, odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti i koeficijent varijacije U vrijednosti, modeli TIP 2

MODEL 2/Ia															
Duljina ispitivanja	$\Delta T < 8$		$8 \leq \Delta T < 10$		$10 \leq \Delta T < 12$		$12 \leq \Delta T < 14$		$14 \leq \Delta T < 16$		$\Delta T \geq 16$		$8 > \Delta T > 8$		V
	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	
	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	
1 (24 h)	-	-	-	-	0,35±0,21	82,2	1,94±0,18	1,1	1,80±0,16	8,1	1,27±0,15	35,1	1,56±0,16	20,5	-
2 (48 h)	-	-	-	-	0,31±0,21	83,9	2,08±0,18	6,2	1,83±0,16	6,7	1,27±0,15	35,1	1,75±0,16	10,9	12,5
3 (72 h)	-	-	-	-	0,69±0,21	65,0	1,71±0,18	12,6	1,82±0,16	7,4	1,38±0,15	29,4	1,04±0,16	46,8	2,8
4 (96 h)	-	-	-	-	0,71±0,21	63,5	1,69±0,18	13,6	1,75±0,16	10,8	1,41±0,15	27,9	1,61±0,16	17,9	3,7
5 (120 h)	-	-	-	-	0,71±0,21	63,5	1,44±0,18	26,3	1,82±0,16	6,9	1,48±0,15	24,5	1,62±0,16	17,4	0,1
6 (144 h)	-	-	-	-	0,78±0,21	60,5	1,46±0,18	25,6	1,96±0,16	0,0	1,48±0,15	24,5	1,73±0,16	12,0	3,1
7 (168 h)	-	-	-	-	0,73±0,21	62,6	1,33±0,18	32,2	1,97±0,16	0,5	1,53±0,15	21,8	1,71±0,16	12,7	0,6

MODEL 2/IIa															
Duljina ispitivanja	$\Delta T < 8$		$8 \leq \Delta T < 10$		$10 \leq \Delta T < 12$		$12 \leq \Delta T < 14$		$14 \leq \Delta T < 16$		$\Delta T \geq 16$		$8 > \Delta T > 8$		V
	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	
	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	
1 (24 h)	-	-	-	-	0,32±0,22	1,2	0,48±0,19	49,3	0,92±0,16	188,2	0,71±0,15	123,4	0,68±0,16	113,7	-
2 (48 h)	-	-	-	-	0,31±0,22	2,4	0,58±0,19	80,3	0,83±0,16	159,0	0,65±0,15	102,2	0,68±0,16	113,9	4,3
3 (72 h)	-	-	-	-	0,31±0,22	2,4	0,58±0,19	80,5	0,67±0,16	109,6	0,61±0,15	89,9	0,62±0,16	94,1	3,6
4 (96 h)	-	-	-	-	0,31±0,22	2,4	0,52±0,19	62,4	0,57±0,16	77,7	0,61±0,14	91,4	0,57±0,16	79,1	6,1
5 (120 h)	-	-	-	-	0,31±0,22	2,4	0,39±0,18	22,0	0,62±0,16	92,7	0,64±0,15	99,2	0,57±0,16	78,6	4,7
6 (144 h)	-	-	-	-	0,31±0,22	2,4	0,35±0,18	10,7	0,61±0,16	89,9	0,67±0,15	109,1	0,57±0,16	78,3	4,4
7 (168 h)	-	-	-	-	0,31±0,22	2,5	0,31±0,18	3,4	0,63±0,16	96,3	0,69±0,15	115,0	0,56±0,16	75,0	4,2

MODEL 2/IIIa															
Duljina ispitivanja	$\Delta T < 8$		$8 \leq \Delta T < 10$		$10 \leq \Delta T < 12$		$12 \leq \Delta T < 14$		$14 \leq \Delta T < 16$		$\Delta T \geq 16$		$8 > \Delta T > 8$		V
	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	
	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	
1 (24 h)	-	-	-	-	-	-	0,52±0,18	79,6	0,46±0,16	57,0	0,73±0,14	151,3	0,68±0,14	135,4	-
2 (48 h)	-	-	-	-	0,62±0,21	112,3	0,48±0,18	65,0	0,62±0,16	113,5	0,71±0,14	146,4	0,65±0,15	123,1	9,8
3 (72 h)	-	-	-	-	0,54±0,21	87,2	0,61±0,18	109,1	0,64±0,16	119,9	0,71±0,14	144,4	0,65±0,16	124,4	10,3
4 (96 h)	-	-	-	-	0,54±0,21	87,2	0,61±0,18	110,5	0,63±0,16	118,1	0,74±0,14	155,8	0,68±0,15	133,8	5,2
5 (120 h)	-	-	-	-	0,54±0,21	85,6	0,59±0,18	102,7	0,66±0,16	125,9	0,74±0,14	153,8	0,69±0,15	136,5	0,1
6 (144 h)	-	-	-	-	0,54±0,21	85,6	0,56±0,18	91,4	0,66±0,16	125,9	0,74±0,14	153,9	0,67±0,15	131,2	0,5
7 (168 h)	-	-	-	-	0,54±0,21	85,5	0,54±0,18	85,2	0,65±0,16	124,1	0,71±0,14	144,1	0,65±0,15	125,8	0,8

MODEL 2/IIIb															
Duljina ispitivanja	$\Delta T < 8$		$8 \leq \Delta T < 10$		$10 \leq \Delta T < 12$		$12 \leq \Delta T < 14$		$14 \leq \Delta T < 16$		$\Delta T \geq 16$		$8 > \Delta T > 8$		V
	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	
	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	
1 (24 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,31±0,09	351,1	1,31±0,09	351,1	-
2 (48 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,06±0,09	265,5	1,06±0,09	265,5	9,5
3 (72 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,91±0,09	214,0	0,91±0,09	214,0	7,1
4 (96 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,82±0,09	183,8	0,82±0,09	183,8	3,4
5 (120 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,77±0,09	164,9	0,77±0,09	164,9	1,0
6 (144 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,73±0,09	151,2	0,73±0,09	151,2	0,2
7 (168 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,70±0,09	141,4	0,70±0,09	141,4	0,1

7.3 Rezultati analize podataka mjerenja - Modeli TIP 3

Na temelju podataka dobivenih mjerenjem temperaturnom metodom modela TIP 3, izračunate su i prikazane srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima prema metodi prosjeka, tablica 7.5. Rezultati ispitivanja pokazuju da je postotna razlika između teorijskih i izmjerenih U vrijednosti kod svih ispitanih modela TIP 3 veća od 20% što je izvan definiranog kriterija prihvatljivosti odstupanja od teorijskih vrijednosti. Rezultati ispitivanja također pokazuju da je postotna razlika između proračunskih i izmjerenih U vrijednosti na kraju sedmodnevnog ispitivanja najmanja kod modela TIP 3/lb te iznosi 76,5%. U odnosu na ispitivanja modela TIP 1/I i TIP 2/I, u slučaju modela TIP 3/I vidljivo je znatno veće odstupanje između in situ izmjerenih i teorijskih U vrijednosti. Dodavanjem sloja toplinske izolacije postotna razlika između izmjerenih U vrijednosti i teorijskih vrijednosti se povećala u odnosu na rezultate ispitivanja neizoliranog modela zida. Kod modela TIP 3/IIb razlika između izmjerene i teorijske U vrijednosti iznosi 170,5%, kod modela TIP 3/IIIb 214%, a u slučaju modela TIP 3/IIIc 156,8%. Iako se postotna razlika između izmjerenih U vrijednosti u odnosu na teorijske vrijednosti povećala, nakon dodavanja sloja toplinske izolacije vidljiv je doprinos toplinske izolacije kroz smanjenje izmjerene srednje U vrijednosti zida. U teoriji, smanjenje U vrijednosti nakon postavljanja sloja toplinske izolacije u odnosu na neizolirani zid trebalo bi iznositi 57,7% u slučaju modela 3/II (nakon postavljanja toplinske izolacije od ekspaniranog polistirena) odnosno 59,6% u slučaju modela 3/III (nakon postavljanja toplinske izolacije od kamene vune). Prema rezultatima ispitivanja pokazalo se da je doprinos toplinske izolacije manji u odnosu na teoriju te da u odnosu na izmjerenu vrijednost modela TIP 3/lb, smanjenje U vrijednosti kod modela TIP 3/IIb iznosi 35,2%, a kod modela TIP 3/IIIb i 3/IIIc 28,2% i 41,3%.

Iako rezultati ispitivanja modela 3/IIIc u sezoni hlađenja pokazuju manje odstupanje od proračunskih vrijednosti u usporedbi s ispitivanjem modela 3/IIIb koje je provedeno tijekom sezone grijanja, bitno je uočiti kako je prilikom ispitivanja modela TIP 3/IIIc ostvarena značajno manja srednja vrijednost temperaturne razlike. Budući da se prilikom in situ ispitivanja U vrijednosti zahtijevaju temperaturne razlike od minimalno 10°C stupnjeva rezultati ispitivanja modela TIP 3/IIIc ne bi se trebali uzimati u obzir.

Tablica 7.5 Uvjeti ispitivanja, izmjerene srednje U vrijednosti, teorijske U vrijednosti i odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti modela TIP 3

Model	Trajanje ispitivanja	Uvjeti ispitivanja	Srednja vrijednost ΔT [°C]	U_m [W/m ² K]	U_t [W/m ² K]	σ [%]
TIP 3/lb	7 dana	$T_i=30$ °C	26,0	0,92±0,09	0,52	76,5
TIP 3/IIb	7 dana	$T_i=30$ °C	21,9	0,60±0,11	0,22	170,5
TIP 3/IIIb	7 dana	$T_i=30$ °C	14,7	0,66±0,16	0,21	214,0
TIP 3/IIIc	7 dana	$T_i=18$ °C	8,4	0,54±0,29	0,21	156,8

S obzirom na to da točnost rezultata in situ ispitivanja U vrijednosti u velikoj mjeri ovisi o postignutoj temperaturnoj razlici tijekom ispitivanja, radi detaljnije analize, na slikama 7.17, 7.19, 7.21 i 7.23 su nakon sedmodnevnog ispitivanja, za sve modele TIP 3, srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima prikazane za šest intervala temperaturnih razlika prethodno definiranih u poglavlju 7. Za prikazane srednje U vrijednosti naveden je i udio

podataka u odnosu na ukupan broj podataka prikupljen prilikom mjerenja, a na temelju kojeg su izračunate srednje U vrijednosti u pojedinim intervalima.

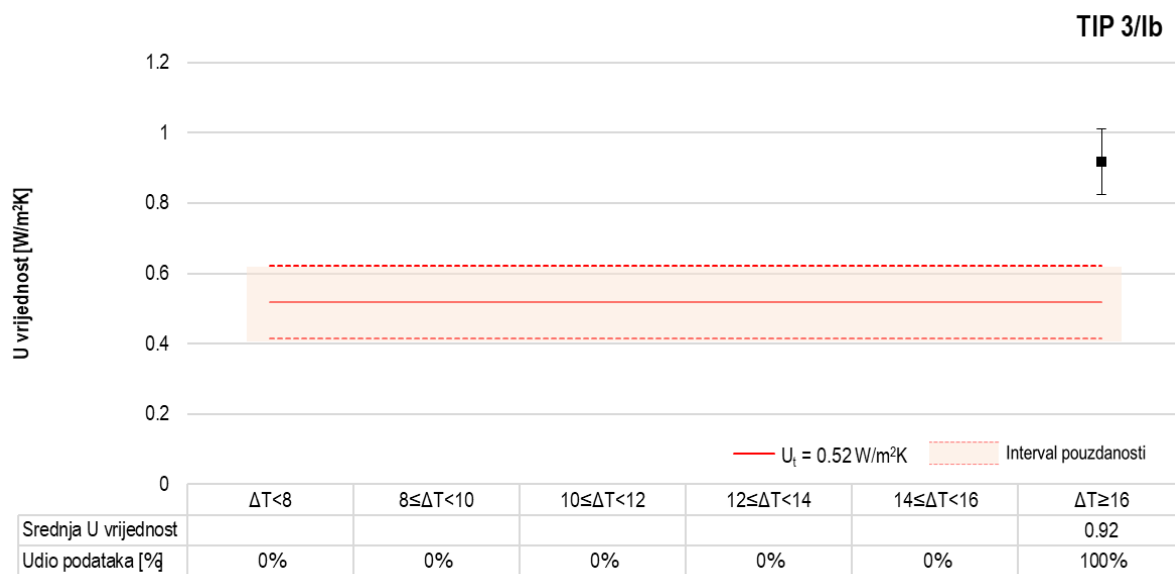
Rezultati ispitivanja neizoliranog modela TIP 3/lb pokazuju da iako je prilikom cijelog ispitivanja ostvarena temperaturna razlika veća od 16°C, izmjerena srednja U vrijednost s mjernim nesigurnostima nalazi se izvan definiranog intervala pouzdanosti.

Rezultati ispitivanja toplinski izoliranih modela pokazuju značajno veća odstupanja srednjih U vrijednosti u usporedbi s teorijskim vrijednostima u svih šest intervala temperaturnih razlika. Kod modela TIP 3/IIb i TIP 3/IIIb vidljiv je trend smanjenja U vrijednosti prema očekivanoj (teorijskoj) vrijednosti povećanjem temperaturne razlike između unutarnjeg i vanjskog zraka, a najveći broj podataka zabilježen je unutar intervala temperaturne razlike veće ili jednake od 16°C. Iako i rezultati ispitivanja modela TIP 3/IIIc pokazuju trend smanjenja U vrijednosti prema očekivanoj (teorijskoj) vrijednosti povećanjem temperaturne razlike između unutarnjeg i vanjskog zraka rezultati se ne bi trebali uzeti u obzir jer je više od 50% podataka zabilježeno pri temperaturnim razlikama manjim od 8°C.

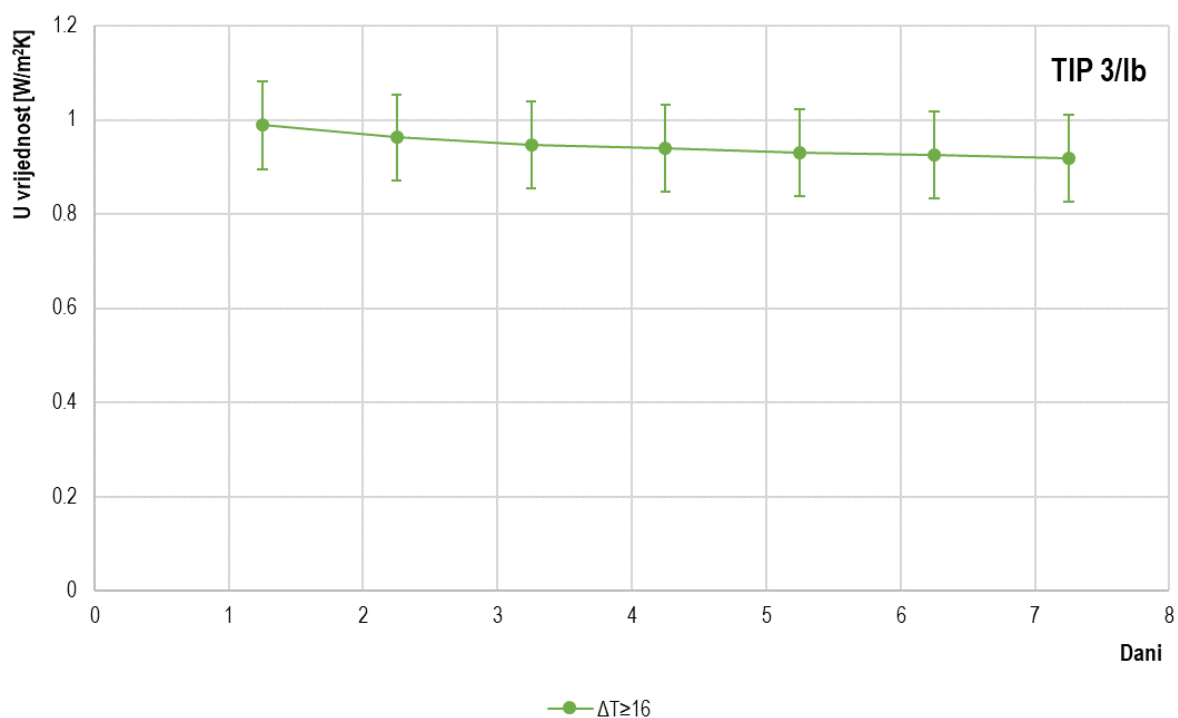
Na slikama 7.18, 7.20, 7.22 i 7.24 prikazan je trend kretanja srednje U vrijednosti s pripadnim mjernim nesigurnostima po danima i za svih šest definiranih intervala temperaturnih razlika koristeći kumulativne vrijednosti. Analiza trenda kretanja srednje U vrijednosti u intervalima koji sadrže udio podataka veći od 43% pokazuje trend smanjenja U vrijednosti prema očekivanoj (teorijskoj) vrijednosti te postupno ujednačenje vrijednosti povećanjem vremena trajanja ispitivanja. Kod svih ispitanih modela TIP 3 porastom temperaturne razlike smanjuje se mjerna nesigurnost što je brojčano iskazano u tablici 7.6.

Detaljni prikaz analize pročišćenih rezultata mjerenja modela TIP 3/lb, 3/IIb i 3/IIIb prema kriterijima za analizu podataka definiranim u poglavlju 7 o najmanjem potrebnom broju podataka i minimalnoj potrebnoj temperaturnoj razlici između unutarnjeg i vanjskog zraka dan je u poglavlju 7.9.

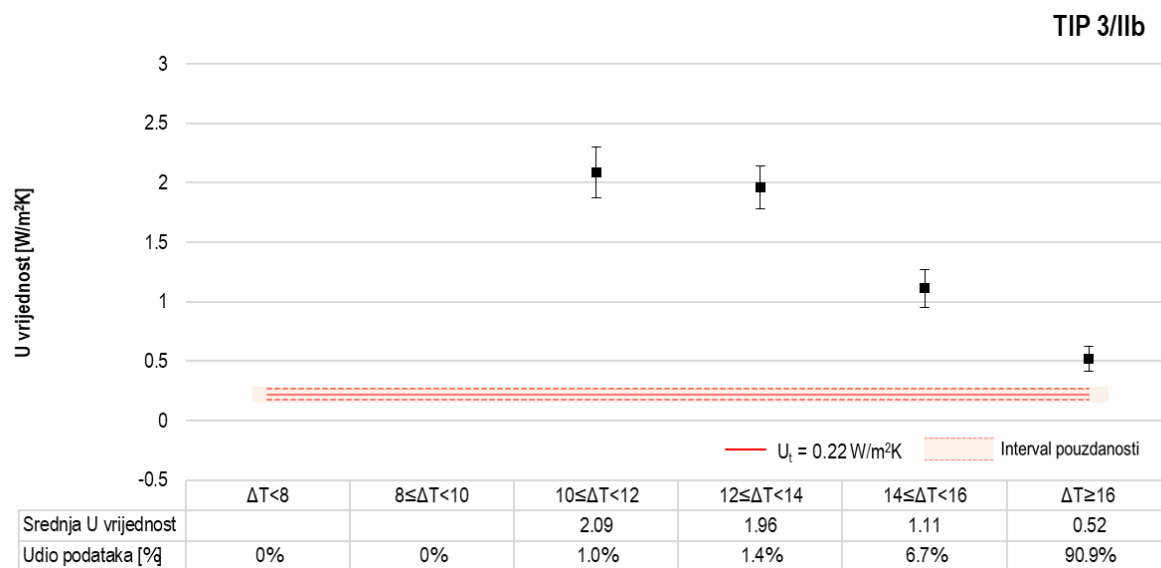
Osim grafički, u tablici 7.6 srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima prikazane su po danima za cijeli set mjernih podataka ($\delta > \Delta T > 8$) i razvrstano za šest intervala temperaturnih razlika koristeći kumulativne vrijednosti. U tablici 7.6 dodatno su izmjerene srednje U vrijednosti ispitanih modela TIP 3 u svim intervalima temperaturnih razlika uspoređene s proračunskim odnosno teorijskim U vrijednostima (U_t). Koeficijenti varijacije za cijeli set izmjerenih podataka izračunati su po danima u odnosu na vrijednosti izmjerene 24 h ranije. Prema kriteriju definiranom u poglavlju 7 i rezultatima ispitivanja, pokazalo se da je za modele TIP 3/lb i TIP 3/IIb potrebno vrijeme trajanja ispitivanja tri dana, budući da je treći dan koeficijent varijacije manji od 5%. Prema istom kriteriju, za model TIP 3/IIIb potrebno vrijeme trajanja ispitivanja je pet dana. Međutim, bitno je uočiti da se koeficijenti varijacije smanjuju nakon što se ispunio uvjet za završetak ispitivanja te se posljedično smanjuje odstupanje izmjerenih rezultata u odnosu na teorijske vrijednosti.



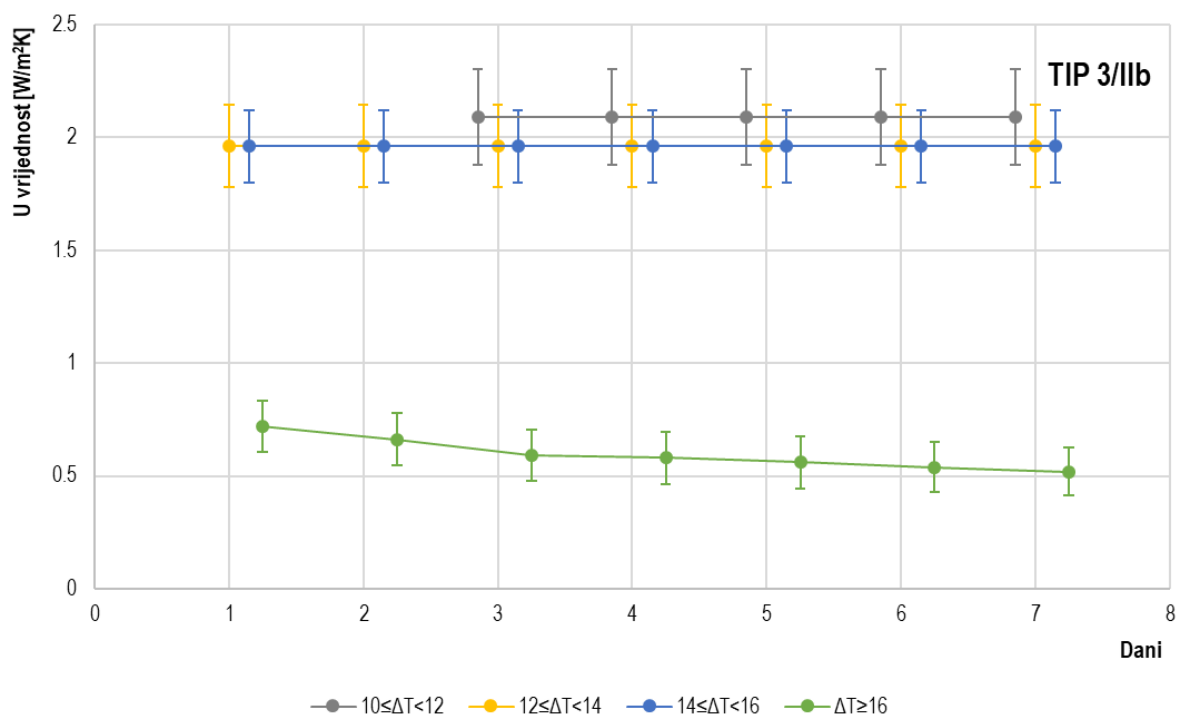
Slika 7.17 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 3/lb



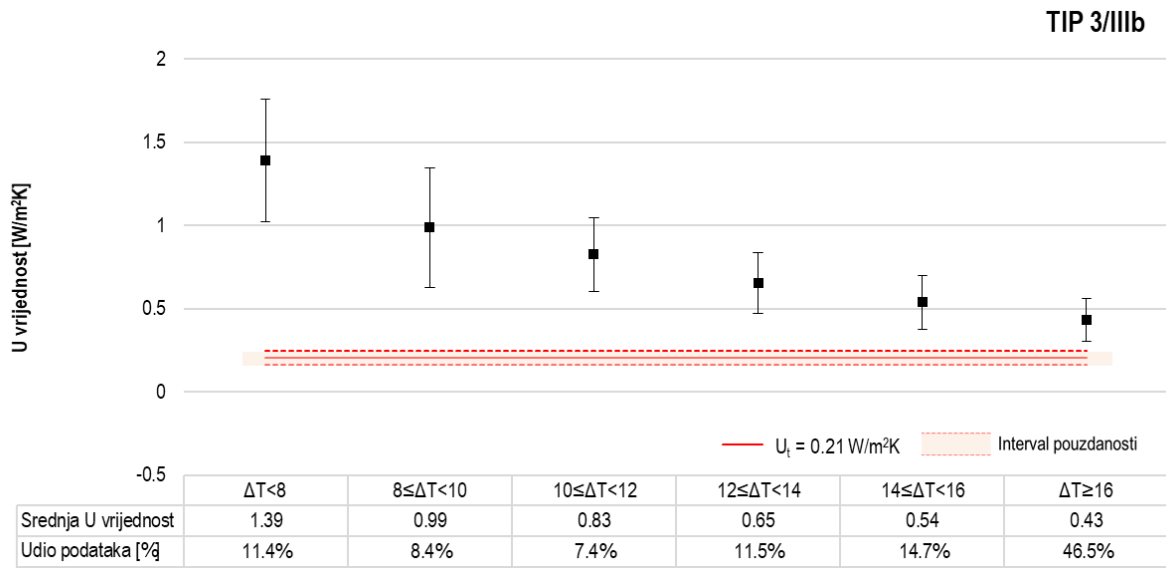
Slika 7.18 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 3/lb



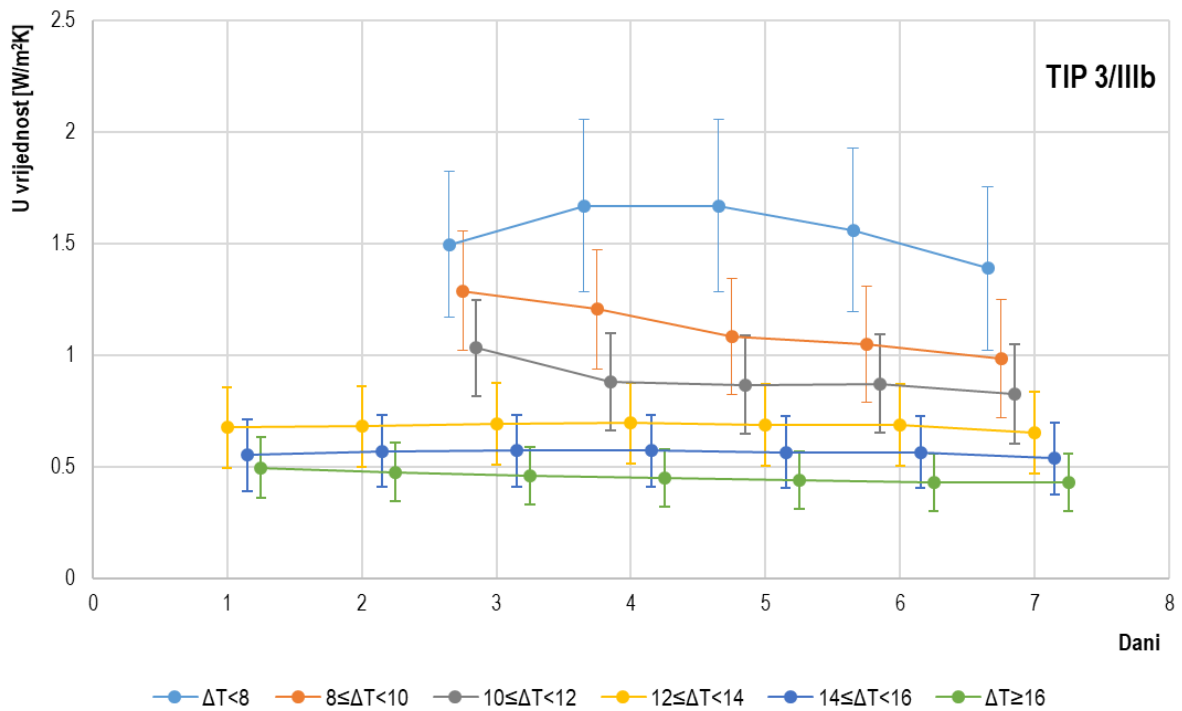
Slika 7.19 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 3/IIb



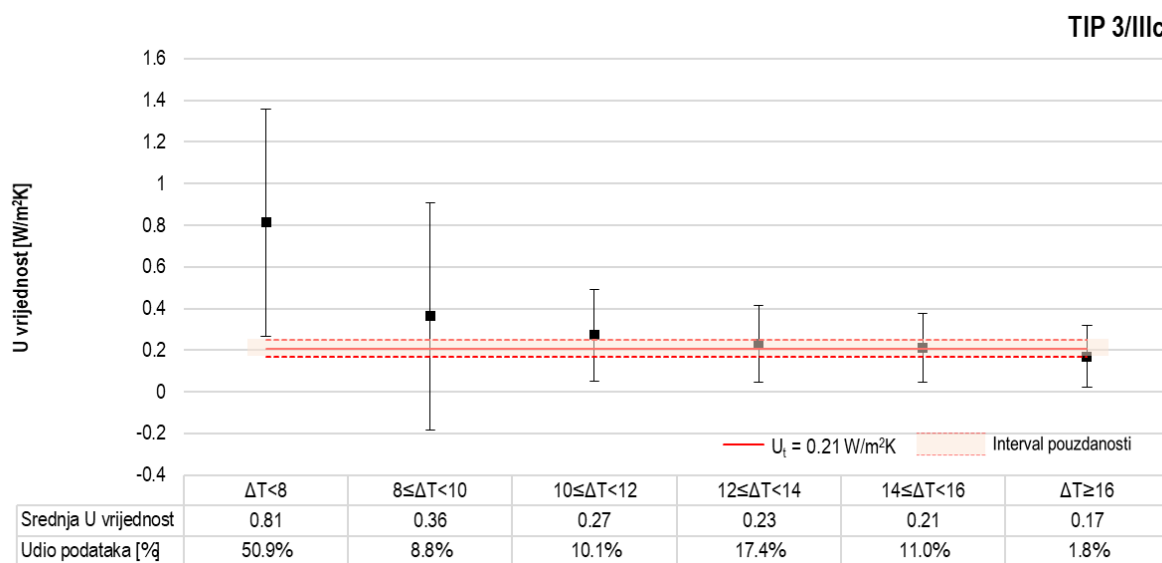
Slika 7.20 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 3/IIb



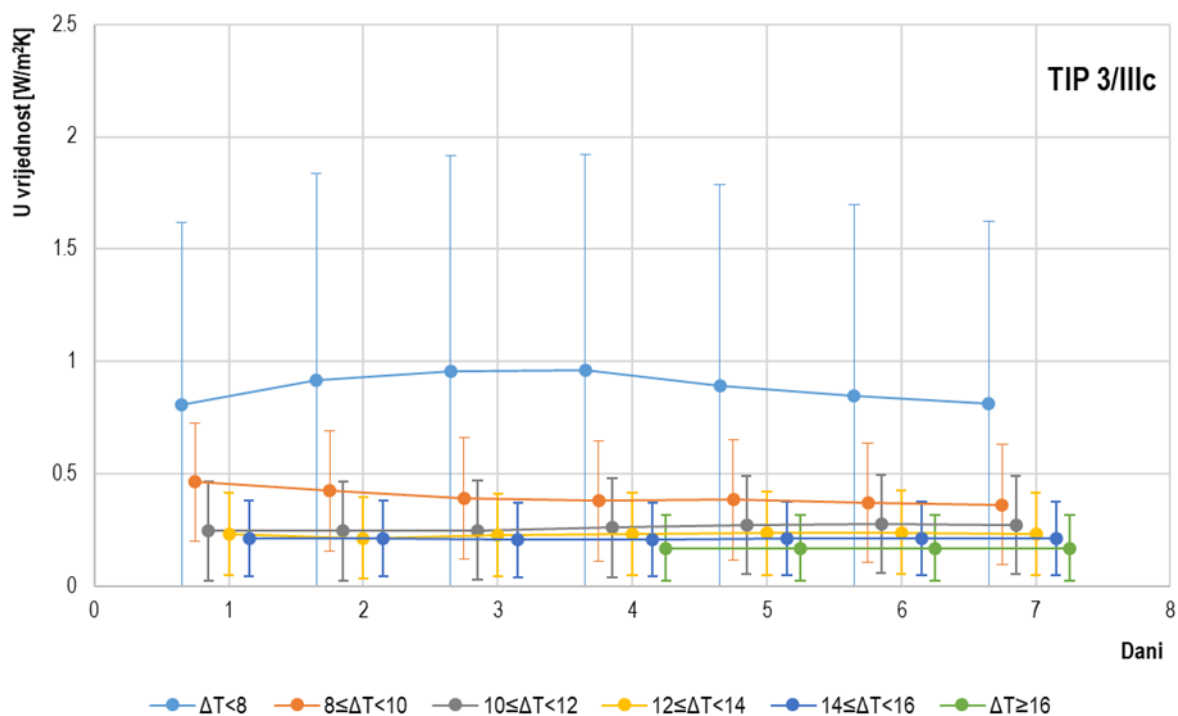
Slika 7.21 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 3/IIIb



Slika 7.22 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 3/IIIb



Slika 7.23 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 3/IIIc



Slika 7.24 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 3/IIIc

Tablica 7.6 Izmjerene U vrijednosti sa mjernim nesigurnostima, odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti i koeficijent varijacije U vrijednosti, modeli TIP 3

MODEL 3/Ib															
Duljina ispitivanja	$\Delta T < 8$		$8 \leq \Delta T < 10$		$10 \leq \Delta T < 12$		$12 \leq \Delta T < 14$		$14 \leq \Delta T < 16$		$\Delta T \geq 16$		$8 > \Delta T > 8$		V
	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	
	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	
1 (24 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,99±0,09	90,2	0,99±0,09	90,2	-
2 (48 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,96±0,09	85,2	0,96±0,09	85,2	3,8
3 (72 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,95±0,09	82,1	0,95±0,09	82,1	0,2
4 (96 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,94±0,09	80,6	0,94±0,09	80,6	1,1
5 (120 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,93±0,09	79,0	0,93±0,09	79,0	0,1
6 (144 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,92±0,09	77,8	0,92±0,09	77,8	0,8
7 (168 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,92±0,09	76,5	0,92±0,09	76,5	0,5

MODEL 3/IIb															
Duljina ispitivanja	$\Delta T < 8$		$8 \leq \Delta T < 10$		$10 \leq \Delta T < 12$		$12 \leq \Delta T < 14$		$14 \leq \Delta T < 16$		$\Delta T \geq 16$		$8 > \Delta T > 8$		V
	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	
	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	
1 (24 h)	-	-	-	-	-	-	1,96±0,18	791,0	1,79±0,16	712,9	0,72±0,11	227,1	1,09±0,13	396,0	-
2 (48 h)	-	-	-	-	-	-	1,96±0,18	791,0	1,32±0,16	500,4	0,66±0,11	201,4	0,87±0,12	297,2	1,7
3 (72 h)	-	-	-	-	2,09±0,21	849,6	1,96±0,18	791,0	1,32±0,16	500,4	0,59±0,11	169,1	0,74±0,12	238,0	3,3
4 (96 h)	-	-	-	-	2,09±0,21	849,6	1,96±0,18	791,0	1,11±0,16	406,5	0,58±0,11	163,4	0,70±0,12	219,2	3,0
5 (120 h)	-	-	-	-	2,09±0,21	849,6	1,96±0,18	791,0	1,11±0,16	406,5	0,56±0,11	154,4	0,66±0,12	200,2	1,1
6 (144 h)	-	-	-	-	2,09±0,21	849,6	1,96±0,18	791,0	1,11±0,16	406,5	0,54±0,11	144,5	0,62±0,12	183,8	0,0
7 (168 h)	-	-	-	-	2,09±0,21	849,6	1,96±0,18	791,0	1,11±0,16	406,5	0,52±0,11	136,1	0,60±0,11	170,5	0,3

MODEL 3/IIIb															
Duljina ispitivanja	$\Delta T < 8$		$8 \leq \Delta T < 10$		$10 \leq \Delta T < 12$		$12 \leq \Delta T < 14$		$14 \leq \Delta T < 16$		$\Delta T \geq 16$		$8 > \Delta T > 8$		V
	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	
	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	
1 (24 h)	-	-	-	-	-	-	0,68±0,18	223,0	0,55±0,16	163,7	0,50±0,14	136,7	0,54±0,15	158,2	-
2 (48 h)	-	-	-	-	-	-	0,68±0,18	225,2	0,57±0,16	172,3	0,48±0,13	127,7	0,53±0,14	152,5	1,1
3 (72 h)	1,50±0,33	613,0	1,29±0,27	514,0	1,03±0,21	391,9	0,70±0,18	231,0	0,57±0,16	173,4	0,46±0,13	120,0	0,59±0,14	182,9	27,9
4 (96 h)	1,67±0,38	695,7	1,21±0,27	474,7	0,88±0,22	321,0	0,70±0,18	232,0	0,57±0,16	173,3	0,45±0,13	116,0	0,67±0,15	219,2	12,2
5 (120 h)	1,67±0,38	695,7	1,08±0,26	416,3	0,87±0,22	313,6	0,69±0,18	228,7	0,57±0,16	170,0	0,44±0,13	111,4	0,65±0,16	210,6	2,4
6 (144 h)	1,56±0,37	643,4	1,05±0,26	400,3	0,87±0,22	316,4	0,69±0,18	227,4	0,57±0,16	169,9	0,43±0,13	106,2	0,65±0,16	210,0	0,9
7 (168 h)	1,39±0,37	561,9	0,99±0,26	370,6	0,83±0,22	293,8	0,65±0,18	211,4	0,54±0,16	156,6	0,43±0,13	106,3	0,66±0,16	214,0	1,8

MODEL 3/IIIc															
Duljina ispitivanja	$\Delta T < 8$		$8 \leq \Delta T < 10$		$10 \leq \Delta T < 12$		$12 \leq \Delta T < 14$		$14 \leq \Delta T < 16$		$\Delta T \geq 16$		$8 > \Delta T > 8$		V
	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	
	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	
1 (24 h)	0,81±0,52	285,2	0,46±0,26	120,4	0,24±0,22	16,6	0,23±0,18	10,8	0,21±0,17	1,6	-	-	0,55±0,29	159,7	-
2 (48 h)	0,92±0,56	336,9	0,43±0,27	102,5	0,24±0,22	16,6	0,21±0,18	2,2	0,21±0,17	0,4	-	-	0,60±0,30	185,4	19,7
3 (72 h)	0,96±0,58	356,2	0,39±0,27	85,9	0,25±0,22	18,4	0,23±0,18	7,2	0,21±0,17	1,6	-	-	0,62±0,29	193,4	6,6
4 (96 h)	0,96±0,60	356,9	0,38±0,27	80,9	0,26±0,22	23,5	0,23±0,18	10,1	0,21±0,16	1,0	0,17±0,15	19,0	0,61±0,29	190,5	1,0
5 (120 h)	0,89±0,57	325,2	0,38±0,27	83,2	0,27±0,22	29,7	0,23±0,18	11,9	0,21±0,16	1,0	0,17±0,15	19,0	0,58±0,29	175,7	3,2
6 (144 h)	0,85±0,56	304,3	0,37±0,27	76,3	0,28±0,22	32,2	0,24±0,18	14,0	0,21±0,16	1,0	0,17±0,15	19,0	0,56±0,29	166,2	2,9
7 (168 h)	0,81±0,54	286,7	0,36±0,27	72,2	0,27±0,22	28,9	0,23±0,18	10,5	0,21±0,17	1,0	0,17±0,15	19,0	0,54±0,29	156,8	1,4

7.4 Rezultati analize podataka mjerenja - Modeli TIP 4

Na temelju podataka dobivenih mjerenjem temperaturnom metodom modela TIP 4, izračunate su i prikazane srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima prema metodi prosjeka, tablica 7.7. Rezultati ispitivanja pokazuju da je postotna razlika između teorijskih i izmjerenih U vrijednosti kod svih ispitanih modela TIP 4 veća od 20% što je izvan definiranog kriterija prihvatljivosti odstupanja od teorijskih vrijednosti. Rezultati ispitivanja pokazuju da je postotna razlika između teorijskih i izmjerenih U vrijednosti najmanja kod ispitivanja modela TIP 4/Ib te iznosi 90,7%. Dodavanjem sloja toplinske izolacije postotna razlika između izmjerenih U vrijednosti u odnosu na teorijske vrijednosti se povećala. Kod modela TIP 4/IIb razlika između izmjerene i teorijske U vrijednosti iznosi 144,2%, u slučaju modela TIP 4/IIIb 325,2%, a u slučaju modela TIP 4/IIIc 126,2%. Iako se postotna razlika između izmjerenih U vrijednosti u odnosu na teorijske vrijednosti povećala nakon dodavanja sloja toplinske izolacije vidljiv je doprinos toplinske izolacije kroz smanjenje srednje U vrijednosti zida. U teoriji, U vrijednost bi se nakon postavljanja sloja toplinske izolacije u odnosu na neizolirani zid trebala smanjiti za 52,3% u slučaju modela TIP 4/II (nakon postavljanja toplinske izolacije od EPS-a) odnosno za 56,8% u slučaju modela TIP 4/III (nakon postavljanja toplinske izolacije od KV). Prema rezultatima ispitivanja pokazalo se da je doprinos toplinske izolacije manji u odnosu na teoriju te da u odnosu na izmjerenu vrijednost modela TIP 4/Ib, smanjenje U vrijednosti kod modela TIP 4/IIb iznosi 39,3%, kod modela TIP 4/IIIb 3,6% te 48,8% kod modela TIP 4/IIIc.

Rezultati sedmodnevnog ispitivanja modela 4/IIIc u sezoni hlađenja pokazuju manje odstupanje izmjerenih od proračunskih vrijednosti u usporedbi s ispitivanjem modela 4/IIb koje je provedeno tijekom sezone grijanja. Međutim, bitno je uočiti kako je prilikom ispitivanja modela TIP 4/IIIb gotovo 20% U vrijednosti izmjereno pri temperaturnoj razlici manjoj od 8°C što je značajno utjecalo na ukupnu srednju U vrijednost. Budući da se prilikom in situ ispitivanja U vrijednosti zahtijevaju temperaturne razlike od minimalno 10°C rezultati ispitivanja modela TIP 4/IIIc ne bi se trebali uzimati u obzir u daljnjoj analizi.

Tablica 7.7 Uvjeti ispitivanja, izmjerene srednje U vrijednosti, teorijske U vrijednosti i odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti modela TIP 4

Model	Trajanje ispitivanja	Uvjeti ispitivanja	Srednja vrijednost ΔT [°C]	U_m [W/m ² K]	U_t [W/m ² K]	σ [%]
TIP 4/Ib	7 dana	$T_i=30$ °C	25,9	$0,84\pm 0,09$	0,44	90,7
TIP 4/IIb	7 dana	$T_i=30$ °C	21,8	$0,51\pm 0,11$	0,21	144,2
TIP 4/IIIb	7 dana	$T_i=30$ °C	14,0	$0,81\pm 0,17$	0,19	325,2
TIP 4/IIIc	7 dana	$T_i=18$ °C	8,5	$0,43\pm 0,29$	0,19	126,2

S obzirom na to da točnost rezultata in situ ispitivanja U vrijednosti u velikoj mjeri ovisi o postignutoj temperaturnoj razlici tijekom ispitivanja, radi detaljnije analize, na slikama 7.25, 7.27, 7.29 i 7.31 su nakon sedmodnevnog ispitivanja za sve modele TIP 4 srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima prikazane za šest intervala temperaturnih razlika prethodno definiranih u poglavlju 7. Za prikazane srednje U vrijednosti naveden je i udio podataka u odnosu na ukupan broj podataka prikupljen prilikom mjerenja, a na temelju kojeg su izračunate srednje U vrijednosti u pojedinim intervalima.

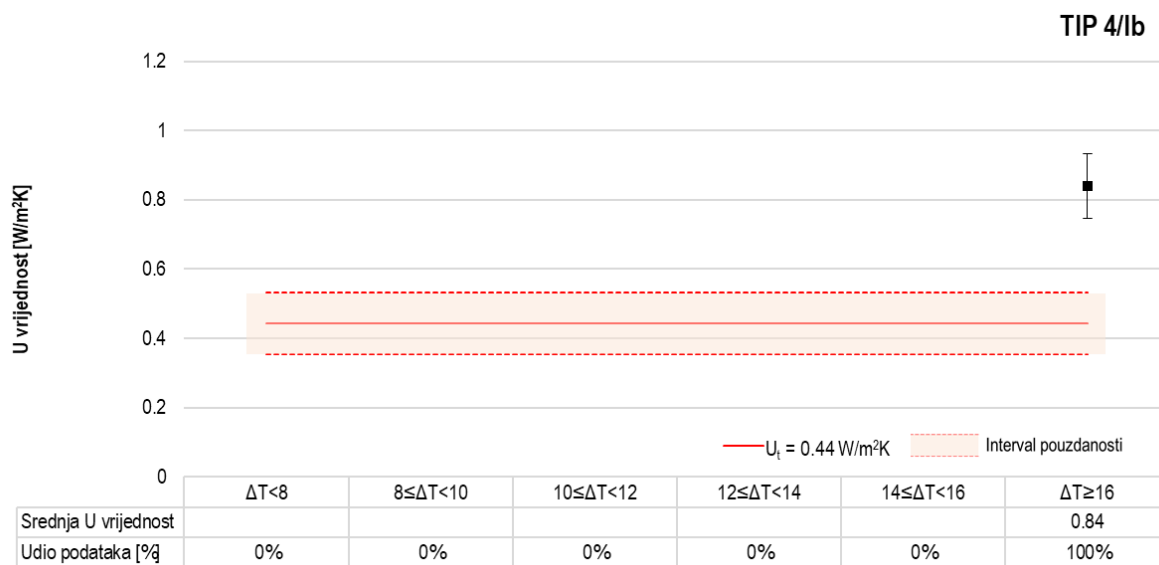
Rezultati ispitivanja neizoliranog modela TIP 4/Ib pokazuju da iako je prilikom cijelog ispitivanja ostvarena temperaturna razlika veća od 16°C, izmjerena srednja U vrijednost i pripadajuća mjerna nesigurnost nalaze se izvan definiranog intervala pouzdanosti.

Rezultati ispitivanja toplinski izoliranih modela TIP 4 pokazuju značajno veća odstupanja srednjih U vrijednosti u usporedbi s teorijskim vrijednostima u svih šest intervala temperaturnih razlika. Kod modela TIP 4/IIb i TIP 4/IIIb vidljiv je trend smanjenja U vrijednosti prema očekivanoj (teorijskoj) vrijednosti povećanjem temperaturne razlike između unutarnjeg i vanjskog zraka, a najveći broj podataka zabilježen je unutar intervala temperaturne razlike veće ili jednake od 16°C. Iako i rezultati ispitivanja modela TIP 4/IIIc pokazuju trend smanjenja U vrijednosti prema očekivanoj (teorijskoj) vrijednosti povećanjem temperaturne razlike između unutarnjeg i vanjskog zraka, rezultati se ne bi trebali uzeti u obzir jer je više od 50% podataka zabilježeno pri temperaturnim razlikama manjim od 8°C.

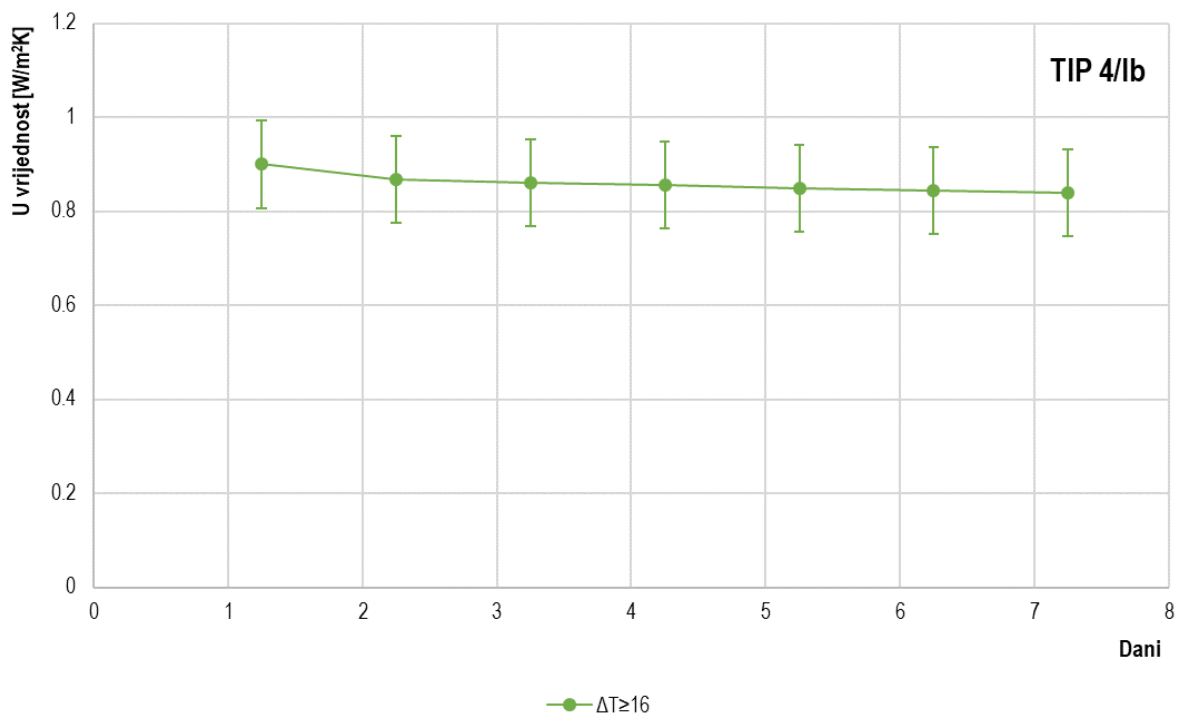
Dodatno je na slikama 7.26, 7.28, 7.30 i 7.32 prikazan i trend kretanja srednje U vrijednosti s pripadnim mjernim nesigurnostima po danima i za svih šest definiranih intervala temperaturnih razlika koristeći kumulativne vrijednosti. Analiza trenda kretanja srednje U vrijednosti u intervalima koji sadrže udio podataka veći od 43% pokazuje trend smanjenja U vrijednosti prema očekivanoj (teorijskoj) vrijednosti te postupno ujednačenje vrijednosti povećanjem vremena trajanja ispitivanja. Rezultati ispitivanja pokazali su i kako se porastom temperaturne razlike smanjuje i mjerna nesigurnost što je brojčano iskazano u tablici 7.8.

Detaljni prikaz analize pročišćenih rezultata mjerenja modela TIP 4/Ib, 4/IIb i 4/IIIb prema kriterijima za analizu podataka definiranim u poglavlju 7 o najmanjem potrebnom broju podataka i minimalnoj potrebnoj temperaturnoj razlici između unutarnjeg i vanjskog zraka dan je u poglavlju 7.9.

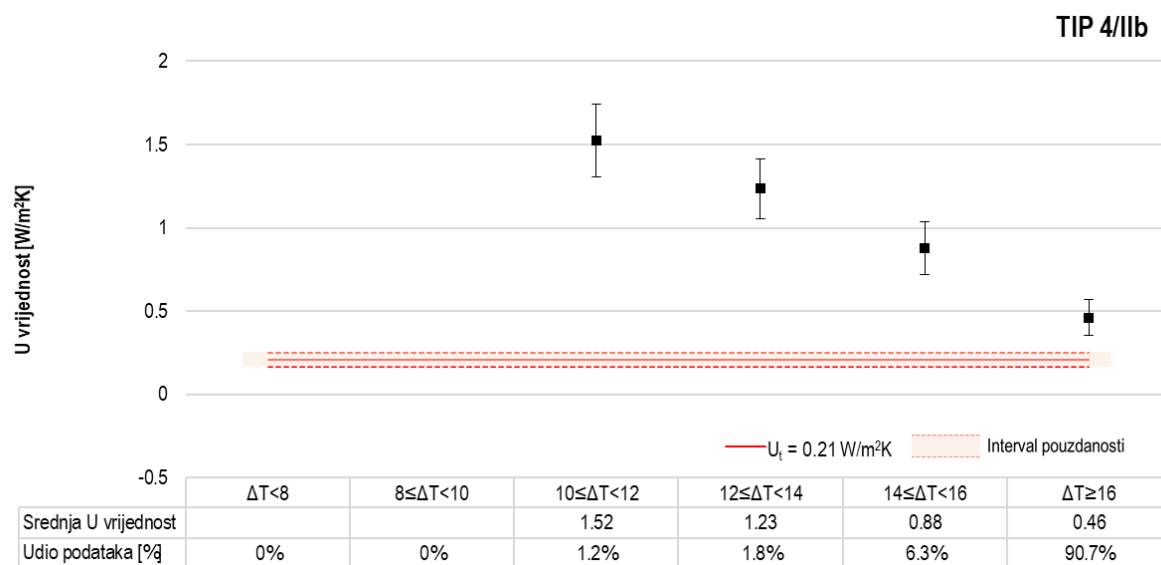
Osim grafički, u tablici 7.8 srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima prikazane su po danima za sve podatke ($\delta > \Delta T > 8$) i razvrstano za šest intervala temperaturnih razlika koristeći kumulativne vrijednosti. U tablici 7.8, dodatno su izmjerene srednje U vrijednosti ispitanih modela TIP 4 uspoređene s proračunskim odnosno teorijskim U vrijednostima (U_t) te su dani koeficijenti varijacije po danima. Koeficijenti varijacije izračunati su u odnosu na vrijednosti izmjerene 24 h ranije, za cijeli set izmjerenih podataka. Prema kriteriju definiranom u poglavlju 7 i rezultatima ispitivanja, pokazalo se da je za modele TIP 4/Ib i TIP 4/IIb potrebno vrijeme trajanja ispitivanja tri dana, budući da je treći dan koeficijent varijacije manji od 5%. Prema istom kriteriju, za model TIP 4/IIIb potrebno vrijeme trajanja ispitivanja je pet dana.



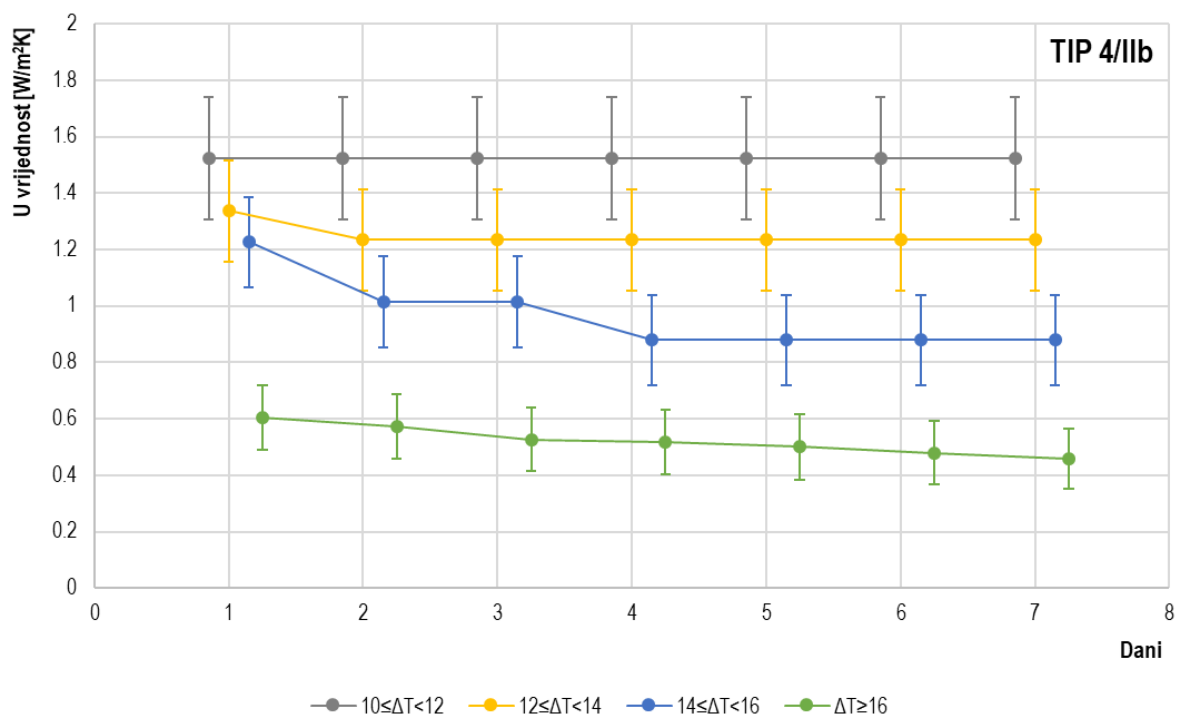
Slika 7.25 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 4/lb



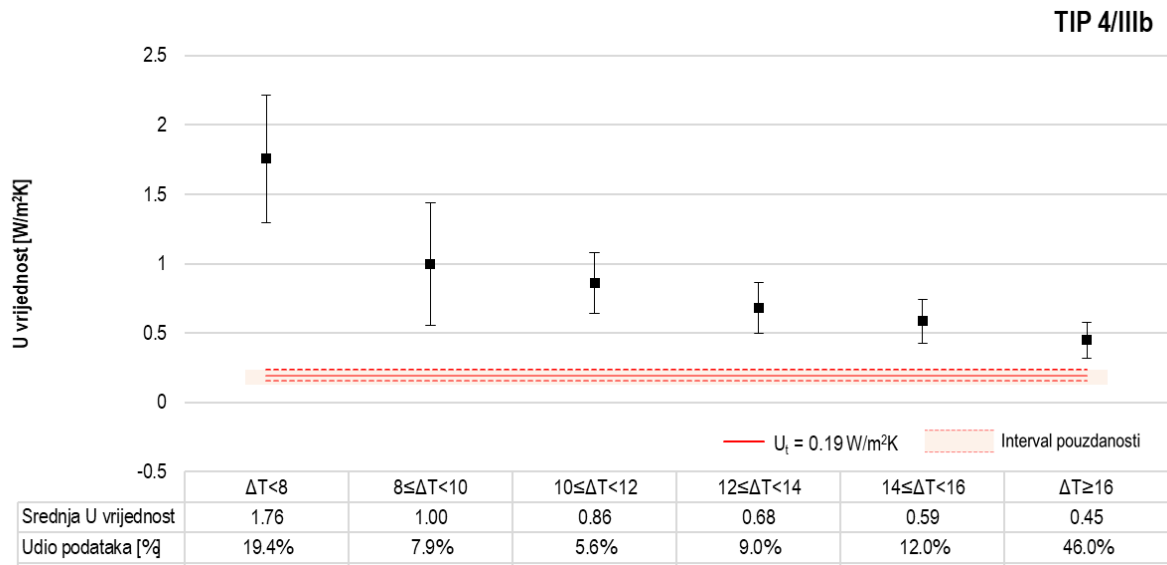
Slika 7.26. Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 4/lb



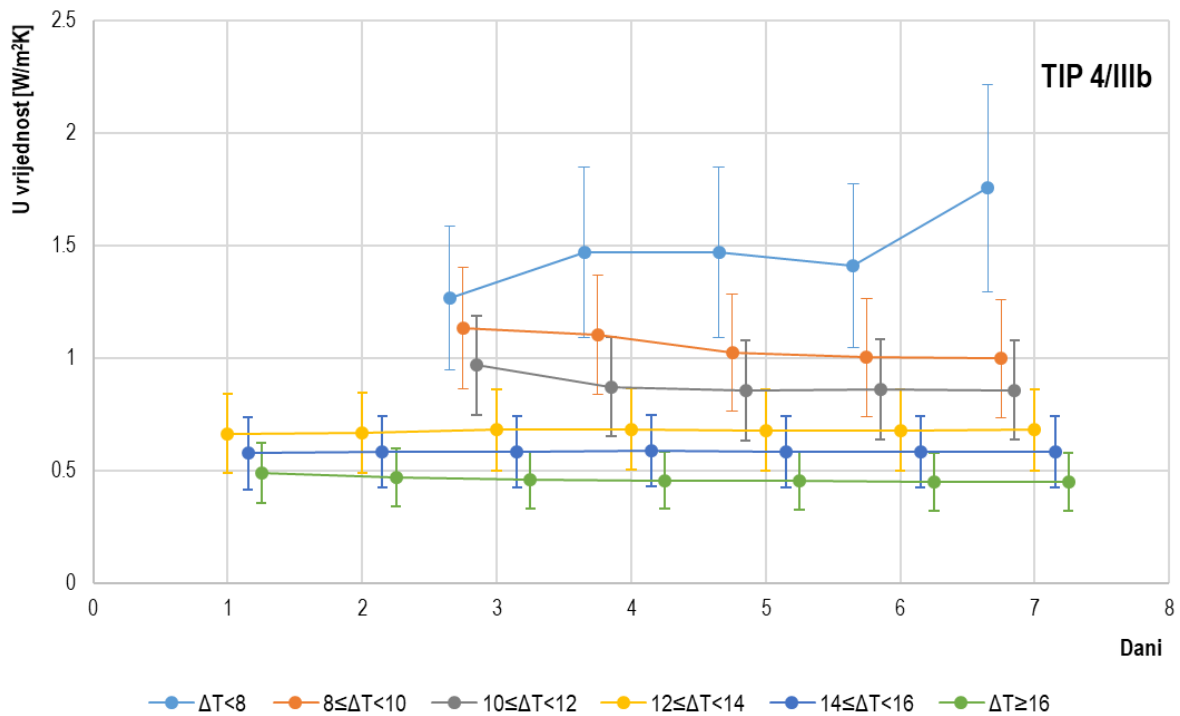
Slika 7.27 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 4/IIb



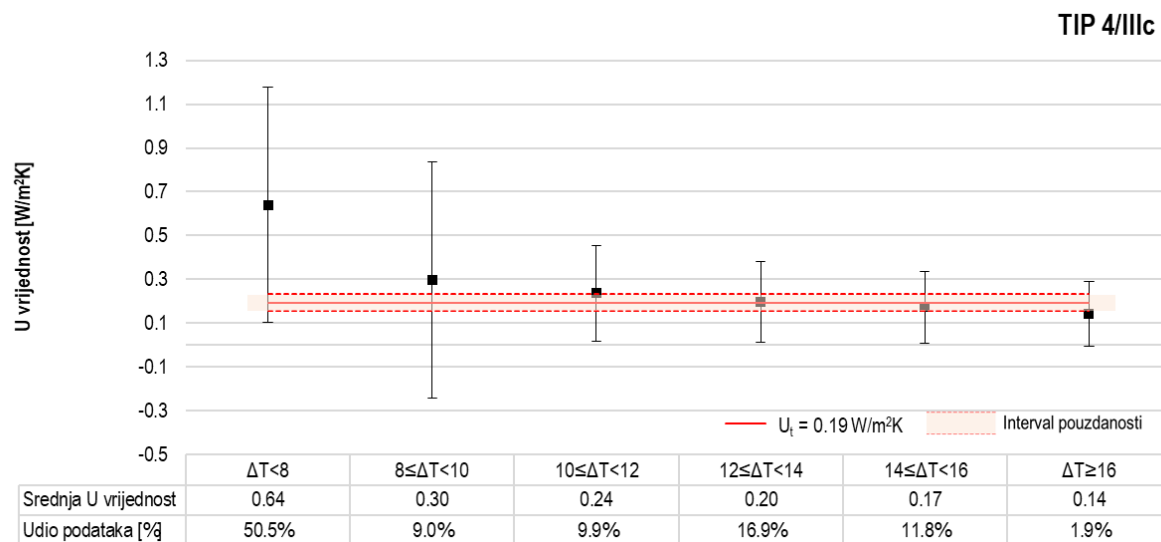
Slika 7.28 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 4/IIb



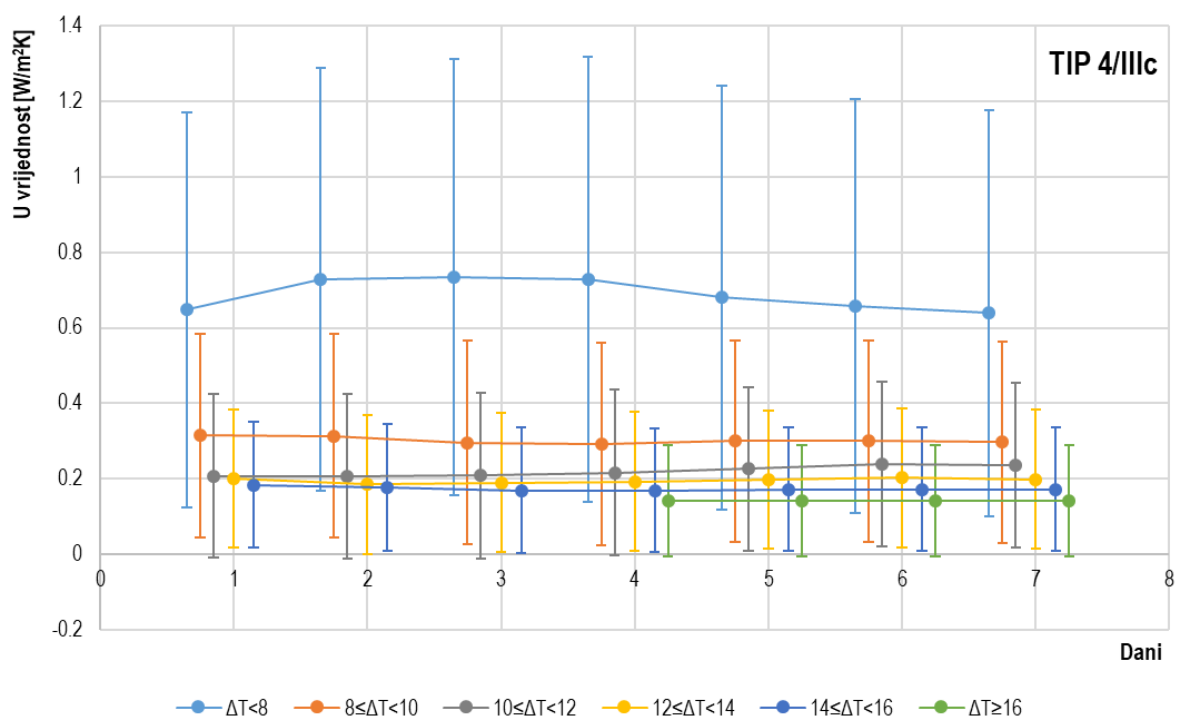
Slika 7.29 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 4/IIIb



Slika 7.30 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 4/IIIb



Slika 7.31 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 4/IIIc



Slika 7.32 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 4/IIIc

Tablica 7.8 Izmjerene U vrijednosti sa mjernim nesigurnostima, odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti i koeficijent varijacije U vrijednosti, modeli TIP 4

MODEL 4/Ib															
Duljina ispitivanja	$\Delta T < 8$		$8 \leq \Delta T < 10$		$10 \leq \Delta T < 12$		$12 \leq \Delta T < 14$		$14 \leq \Delta T < 16$		$\Delta T \geq 16$		$8 > \Delta T > 8$		V
	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	
	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	
1 (24 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,90±0,09	104,5	0,90±0,09	104,5	-
2 (48 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,87±0,09	97,2	0,87±0,09	97,2	3,8
3 (72 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,86±0,09	95,8	0,86±0,09	95,8	0,6
4 (96 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,86±0,09	94,5	0,86±0,09	94,5	1,1
5 (120 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,85±0,09	93,0	0,85±0,09	93,0	0,4
6 (144 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,84±0,09	91,7	0,84±0,09	91,7	0,6
7 (168 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,84±0,09	90,7	0,84±0,09	90,7	0,6

MODEL 4/IIb															
Duljina ispitivanja	$\Delta T < 8$		$8 \leq \Delta T < 10$		$10 \leq \Delta T < 12$		$12 \leq \Delta T < 14$		$14 \leq \Delta T < 16$		$\Delta T \geq 16$		$8 > \Delta T > 8$		V
	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	
	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	
1 (24 h)	-	-	-	-	1,52±0,22	625,1	1,34±0,18	536,4	1,23±0,16	484,0	0,61±0,11	188,2	0,84±0,13	302,0	-
2 (48 h)	-	-	-	-	1,52±0,22	625,1	1,23±0,18	487,6	1,01±0,16	382,8	0,57±0,12	172,7	0,71±0,13	240,4	1,3
3 (72 h)	-	-	-	-	1,52±0,22	625,1	1,23±0,18	487,6	1,01±0,16	382,8	0,53±0,11	150,7	0,63±0,12	199,4	1,6
4 (96 h)	-	-	-	-	1,52±0,22	625,1	1,23±0,18	487,6	0,88±0,16	318,6	0,52±0,11	146,1	0,60±0,12	185,9	2,7
5 (120 h)	-	-	-	-	1,52±0,22	625,1	1,23±0,18	487,6	0,88±0,16	318,6	0,50±0,12	138,4	0,57±0,12	171,3	0,8
6 (144 h)	-	-	-	-	1,52±0,22	625,1	1,23±0,18	487,6	0,88±0,16	318,6	0,48±0,11	128,3	0,54±0,12	156,8	0,7
7 (168 h)	-	-	-	-	1,52±0,22	625,1	1,23±0,18	487,6	0,88±0,16	318,6	0,46±0,11	118,9	0,51±0,11	144,2	0,9

MODEL 4/IIIb															
Duljina ispitivanja	$\Delta T < 8$		$8 \leq \Delta T < 10$		$10 \leq \Delta T < 12$		$12 \leq \Delta T < 14$		$14 \leq \Delta T < 16$		$\Delta T \geq 16$		$8 > \Delta T > 8$		V
	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	
	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	
1 (24 h)	-	-	-	-	-	-	0,67±0,18	251,1	0,58±0,16	204,5	0,49±0,13	158,8	0,54±0,14	184,3	-
2 (48 h)	-	-	-	-	-	-	0,67±0,18	252,2	0,59±0,16	208,1	0,47±0,13	148,9	0,53±0,14	176,6	1,9
3 (72 h)	1,27±0,32	567,7	1,13±0,27	496,5	0,97±0,22	410,2	0,68±0,18	259,3	0,59±0,16	208,7	0,46±0,13	141,9	0,57±0,14	200,8	21,2
4 (96 h)	1,47±0,38	674,1	1,11±0,27	481,8	0,87±0,22	359,8	0,69±0,18	261,3	0,59±0,16	210,5	0,46±0,13	141,5	0,64±0,15	238,1	12,8
5 (120 h)	1,47±0,38	674,1	1,03±0,26	439,9	0,86±0,22	352,6	0,68±0,18	259,0	0,59±0,16	207,9	0,46±0,13	139,6	0,63±0,15	234,1	2,7
6 (144 h)	1,41±0,37	643,7	1,01±0,26	429,0	0,86±0,22	353,6	0,68±0,18	258,9	0,58±0,16	207,7	0,45±0,13	136,8	0,64±0,16	234,9	1,0
7 (168 h)	1,76±0,46	825,4	1,00±0,26	425,9	0,86±0,22	352,6	0,68±0,18	259,5	0,58±0,16	207,7	0,45±0,13	136,8	0,81±0,17	325,2	17,8

MODEL 4/IIIc															
Duljina ispitivanja	$\Delta T < 8$		$8 \leq \Delta T < 10$		$10 \leq \Delta T < 12$		$12 \leq \Delta T < 14$		$14 \leq \Delta T < 16$		$\Delta T \geq 16$		$8 > \Delta T > 8$		V
	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	
	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	
1 (24 h)	0,65±0,52	241,1	0,31±0,27	65,5	0,21±0,22	9,5	0,20±0,18	6,5	0,18±0,17	2,8	-	-	0,43±0,28	127,4	-
2 (48 h)	0,73±0,56	283,2	0,31±0,27	65,5	0,21±0,22	9,5	0,18±0,18	2,7	0,18±0,17	6,4	-	-	0,48±0,29	150,4	17,4
3 (72 h)	0,74±0,58	287,3	0,30±0,27	56,1	0,21±0,22	9,8	0,19±0,18	0,3	0,17±0,17	10,5	-	-	0,48±0,29	150,9	4,1
4 (96 h)	0,73±0,59	283,4	0,29±0,27	53,3	0,22±0,22	14,3	0,19±0,18	1,8	0,17±0,16	10,8	0,14±0,15	25,7	0,47±0,29	146,1	0,8
5 (120 h)	0,68±0,56	257,8	0,30±0,27	57,9	0,23±0,22	19,2	0,20±0,18	4,3	0,17±0,16	9,2	0,14±0,15	25,7	0,45±0,28	135,0	3,3
6 (144 h)	0,66±0,55	245,9	0,30±0,27	57,9	0,24±0,22	25,8	0,20±0,18	6,9	0,17±0,16	9,2	0,14±0,15	25,7	0,44±0,29	130,8	3,8
7 (168 h)	0,64±0,54	236,6	0,30±0,27	56,7	0,24±0,22	24,6	0,20±0,18	4,5	0,17±0,16	9,0	0,14±0,15	25,7	0,43±0,29	126,2	2,1

7.5 Rezultati analize podataka mjerenja - Modeli TIP 5

Na temelju podataka dobivenih mjerenjem temperaturnom metodom modela TIP 5, izračunate su i prikazane srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima prema metodi prosjeka, tablica 7.9. Rezultati ispitivanja pokazuju da je postotna razlika između teorijskih i izmjerenih U vrijednosti kod svih ispitanih modela TIP 5 veća od 20% što je izvan definiranog kriterija prihvatljivosti odstupanja od teorijskih vrijednosti. Kod svih modela TIP 5 in situ izmjerene U vrijednosti u usporedbi s teorijskim vrijednostima odstupaju više od 100%. Rezultati ispitivanja pokazuju da je postotna razlika između teorijskih i izmjerenih U vrijednosti najmanja kod ispitivanja modela TIP 5/IIIb te iznosi 104,1%. Kod modela ispitanih tijekom sezone hlađenja, odnosno kod modela TIP 5/IIc i TIP 5/IIIc vidljiva je značajno veća postotna razlika između teorijskih i izmjerenih U vrijednosti s obzirom na to da je tijekom ispitivanja postignuta prosječna temperaturna razlika manja od 10°C. Budući da se prilikom in situ ispitivanja U vrijednosti zahtijevaju temperaturne razlike od minimalno 10°C stupnjeva rezultati ispitivanja modela TIP 5/IIIc ne bi se trebali promatrati u daljnjoj analizi. Srednja temperaturna razlika od 5,4°C tijekom ispitivanja modela TIP 5/IIIc rezultirala je srednjom U vrijednošću 291% većom u odnosu na teorijsku, što je više i od vrijednosti izmjerene na istom tom modelu pri postavljanja toplinske izolacije. Jednako tako, zbog niskog temperaturnog gradijenta tijekom mjerenja modela TIP 5/IIc razlika između teorijske i izmjerene U vrijednosti iznosi 209,4%. U teoriji, U vrijednost bi se nakon postavljanja sloja toplinske izolacije u odnosu na neizolirani zid trebala smanjiti za 41,4% u slučaju modela TIP 5/II (nakon postavljanja toplinske izolacije od EPS-a) odnosno za 44,8% u slučaju modela 5/III (nakon postavljanja toplinske izolacije od KV). Prema rezultatima ispitivanja pokazalo se da iako izmjerene vrijednosti odstupaju više od 100% od teorijskih, doprinos toplinske izolacije u skladu je s teorijskim pretpostavkama kod modela TIP 5/IIIb ispitivanog tijekom sezone grijanja budući da se u odnosu na izmjerenu vrijednost modela 5/IIb, U vrijednost smanjila za 45,7%.

Tablica 7.9 Izmjerene srednje U vrijednosti, teorijske U vrijednosti i odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti modela TIP 5

Model	Trajanje ispitivanja	Uvjeti ispitivanja	Srednja vrijednost ΔT [°C]	U_m [W/m ² K]	U_t [W/m ² K]	σ [%]
TIP 5/IIb	7 dana	$T_i=30$ °C	28,5	0,60±0,08	0,29	106,9
TIP 5/IIc	7 dana	$T_i=18$ °C	9,8	0,53±0,25	0,17	209,4
TIP 5/IIIc	7 dana	$T_i=18$ °C	5,4	0,63±0,45	0,16	291,0
TIP 5/IIIb	7 dana	$T_i=30$ °C	23,5	0,33±0,10	0,16	104,1

S obzirom na to da točnost rezultata in situ ispitivanja U vrijednosti u velikoj mjeri ovisi o postignutoj temperaturnoj razlici tijekom ispitivanja, radi detaljnije analize, na slikama 7.33, 7.35, 7.37 i 7.39 su nakon sedmodnevnog ispitivanja za sve modele TIP 5 srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima prikazane za šest intervala temperaturnih razlika prethodno definiranih u poglavlju 7. Za prikazane srednje U vrijednosti naveden je i udio podataka u odnosu na ukupan broj podataka prikupljen prilikom mjerenja, a na temelju kojeg su izračunate srednje U vrijednosti u pojedinim intervalima.

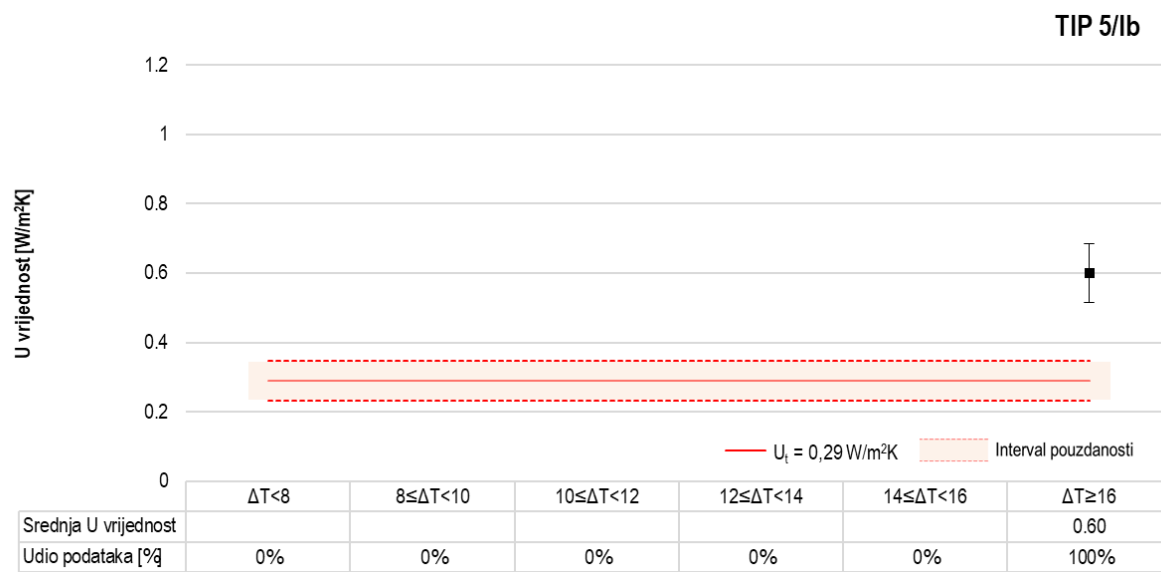
Rezultati ispitivanja neizoliranog modela TIP 5/lb pokazuju da iako je prilikom cijelog ispitivanja ostvarena temperaturna razlika veća od 16°C, izmjerena srednja U vrijednost i pripadajuća mjerna nesigurnost nalaze se izvan definiranog intervala pouzdanosti.

Rezultati ispitivanja toplinski izoliranih zidova tijekom sezone hlađenja pokazuju značajna odstupanja srednjih U vrijednosti u usporedbi s teorijskim vrijednostima. Iako je kod modela TIP 5/IIc i TIP 5/IIIc vidljiv trend smanjenja U vrijednosti prema očekivanoj vrijednosti povećanjem temperaturne razlike između unutarnjeg i vanjskog zraka, rezultati ispitivanja ne bi se trebali uzimati u obzir u daljnjoj analizi budući da je više od 45% podataka zabilježeno pri temperaturnoj razlici manjoj od 8°C. Kod modela TIP 5/IIIb tijekom cijelog vremena trajanja ispitivanja ostvarena je temperaturna razlika veća od 16°C, a izmjerena srednja U vrijednost s mjernim nesigurnostima nalazi se izvan definiranog intervala pouzdanosti.

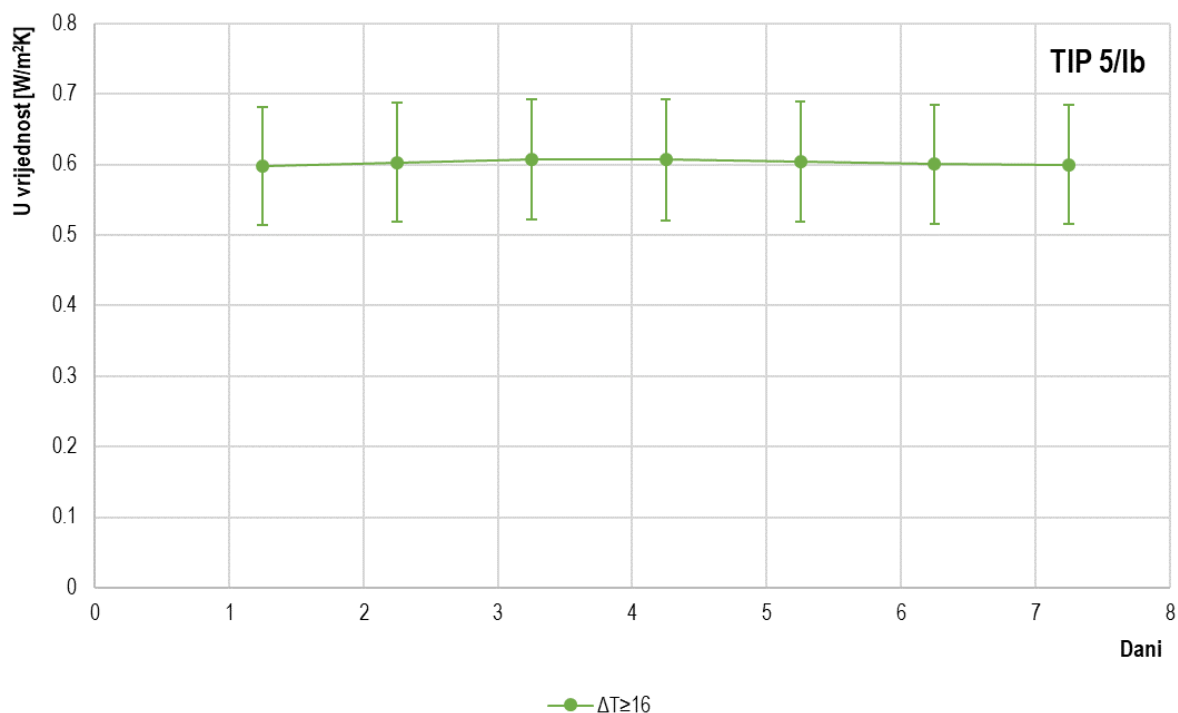
Dodatno je na slikama 7.34, 7.36, 7.38 i 7.40 prikazan i trend kretanja srednje U vrijednosti s pripadnim mjernim nesigurnostima po danima i za svih šest definiranih intervala temperaturnih razlika koristeći kumulativne vrijednosti. Analiza trenda kretanja srednje U vrijednosti kod modela TIP 5/lb i TIP 5/IIIb pokazuje postupno ujednačenje izmjerene U vrijednosti produljenjem vremena trajanja ispitivanja.

Detaljni prikaz analize pročišćenih rezultata mjerenja modela TIP 5/lb i 5/IIIb prema kriterijima za analizu podataka definiranim u poglavlju 7 o najmanjem potrebnom broju podataka i minimalnoj potrebnoj temperaturnoj razlici između unutarnjeg i vanjskog zraka dan je u poglavlju 7.9.

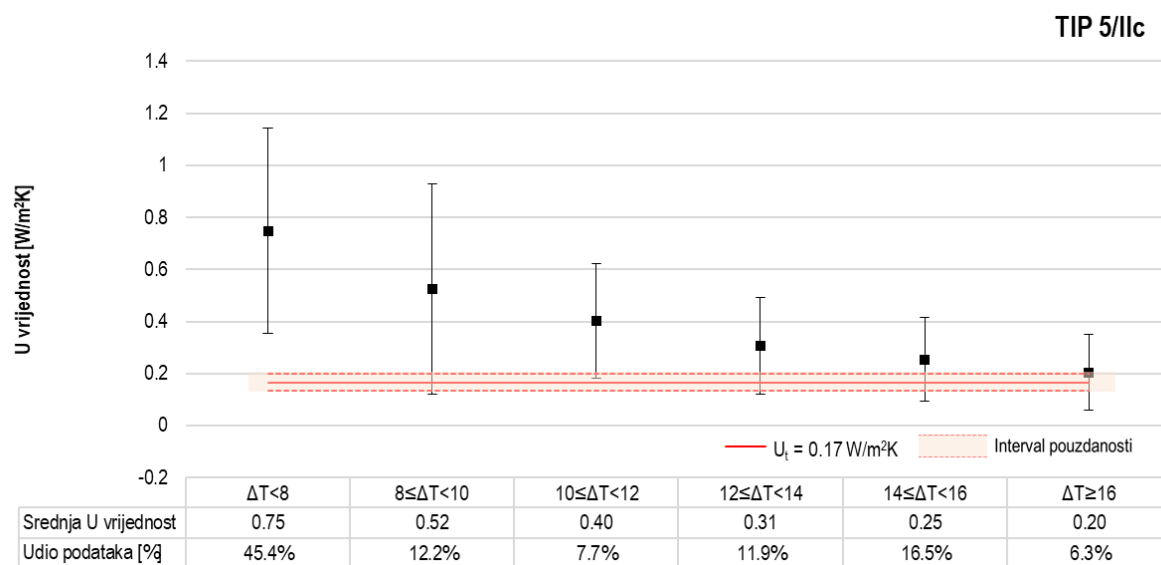
Osim grafički, u tablici 7.10 srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima prikazane su po danima za sve podatke ($\delta > \Delta T > 8$) i razvrstano za šest intervala temperaturnih razlika koristeći kumulativne vrijednosti. U tablici 7.10, dodatno su izmjerene srednje U vrijednosti ispitanih modela TIP 5 uspoređene s teorijskim U vrijednostima (U_t) te su dani koeficijenti varijacije po danima. Koeficijenti varijacije izračunati su u odnosu na vrijednosti izmjerene 24 h ranije i prikazane za cijeli set izmjerenih podataka. Prema kriteriju definiranom u poglavlju 7 i rezultatima ispitivanja, pokazalo se da je za modele TIP 5/lb i TIP 5/IIIb potrebno vrijeme trajanja ispitivanja tri dana, budući da je treći dan koeficijent varijacije manji od 5%. Međutim, bitno je uočiti da se u slučaju modela TIP 5/lb i TIP 5/IIIb produljenjem vremena trajanja ispitivanja smanjuje odstupanje izmjerenih vrijednosti u odnosu na teorijske.



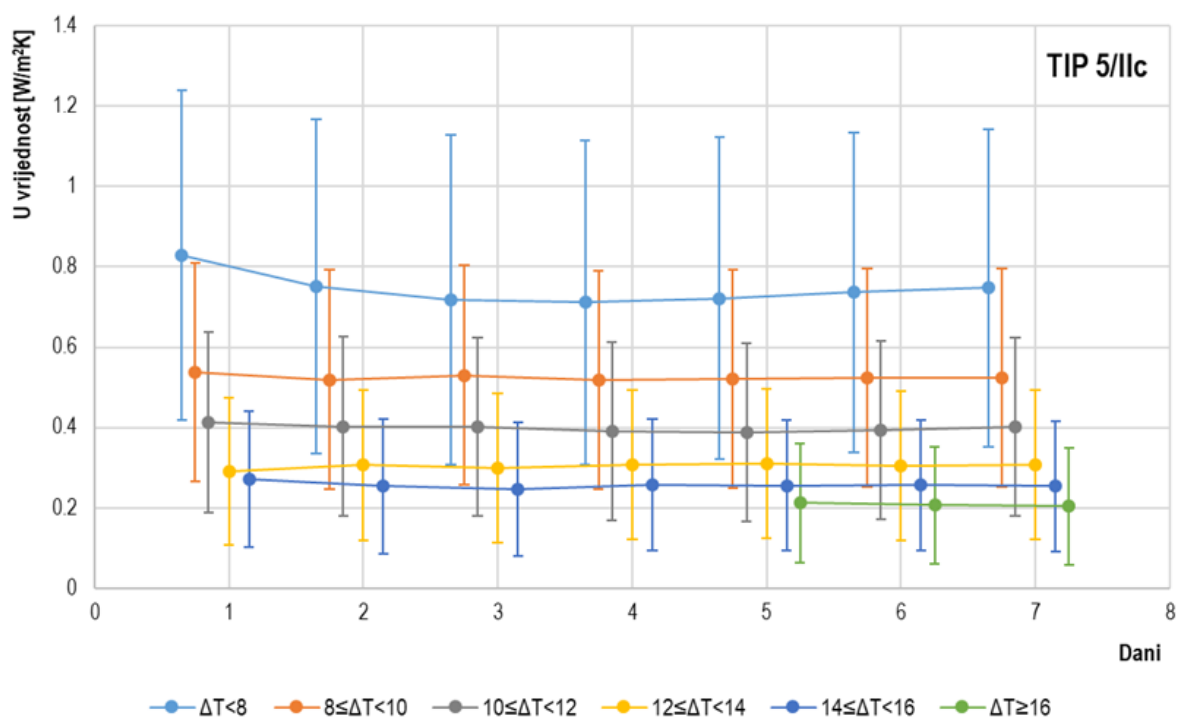
Slika 7.33 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 5/lb



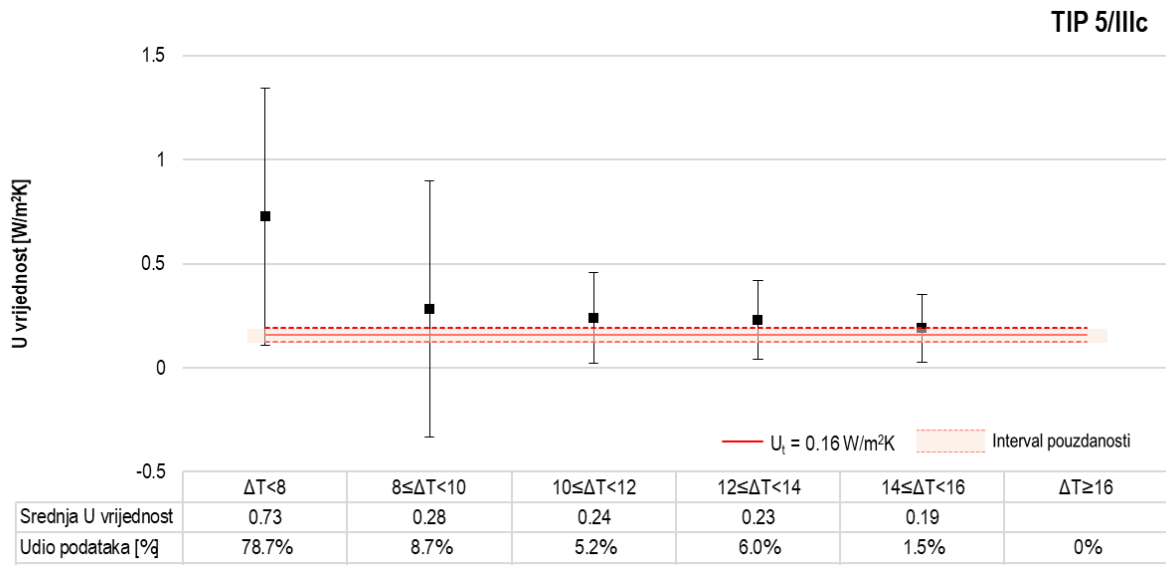
Slika 7.34 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 5/lb



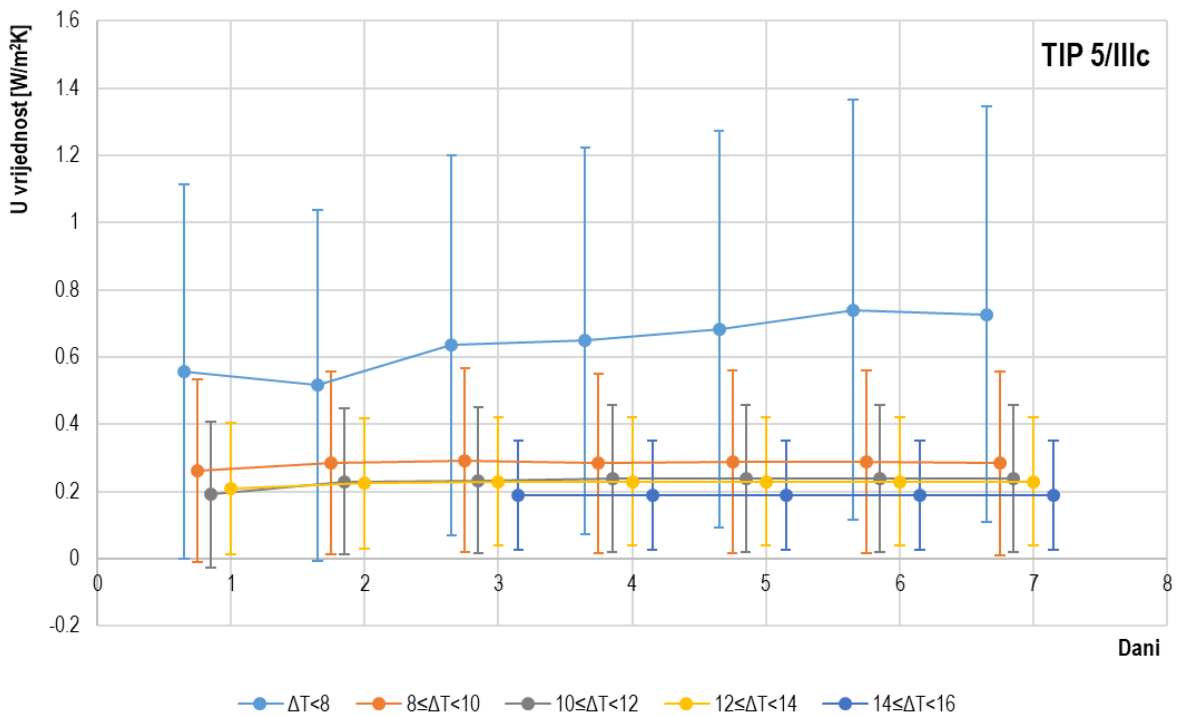
Slika 7.35 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 5/IIc



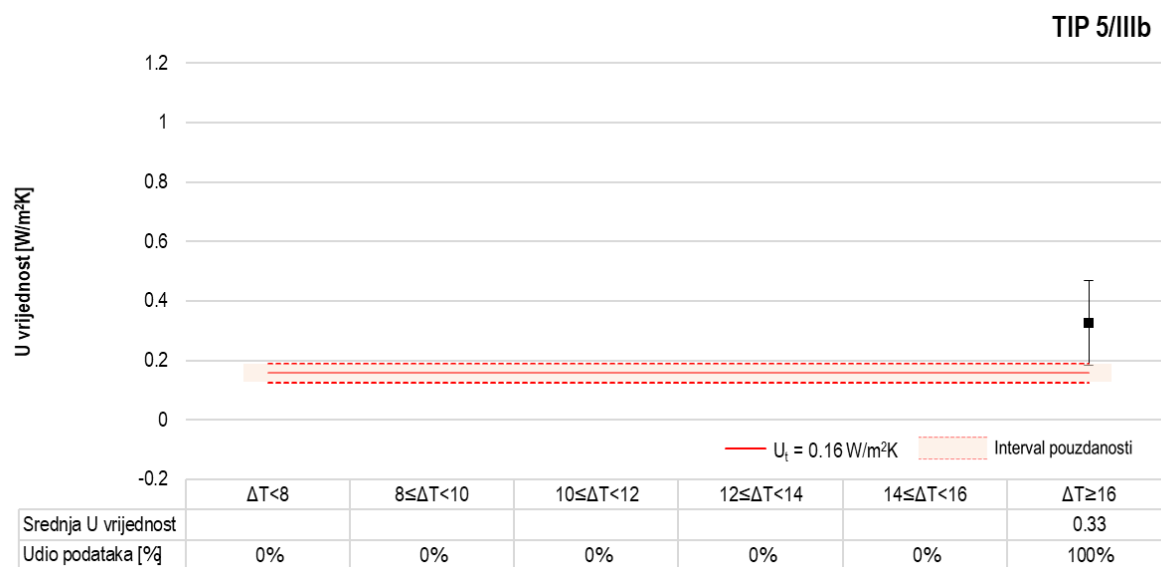
Slika 7.36 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 5/IIc



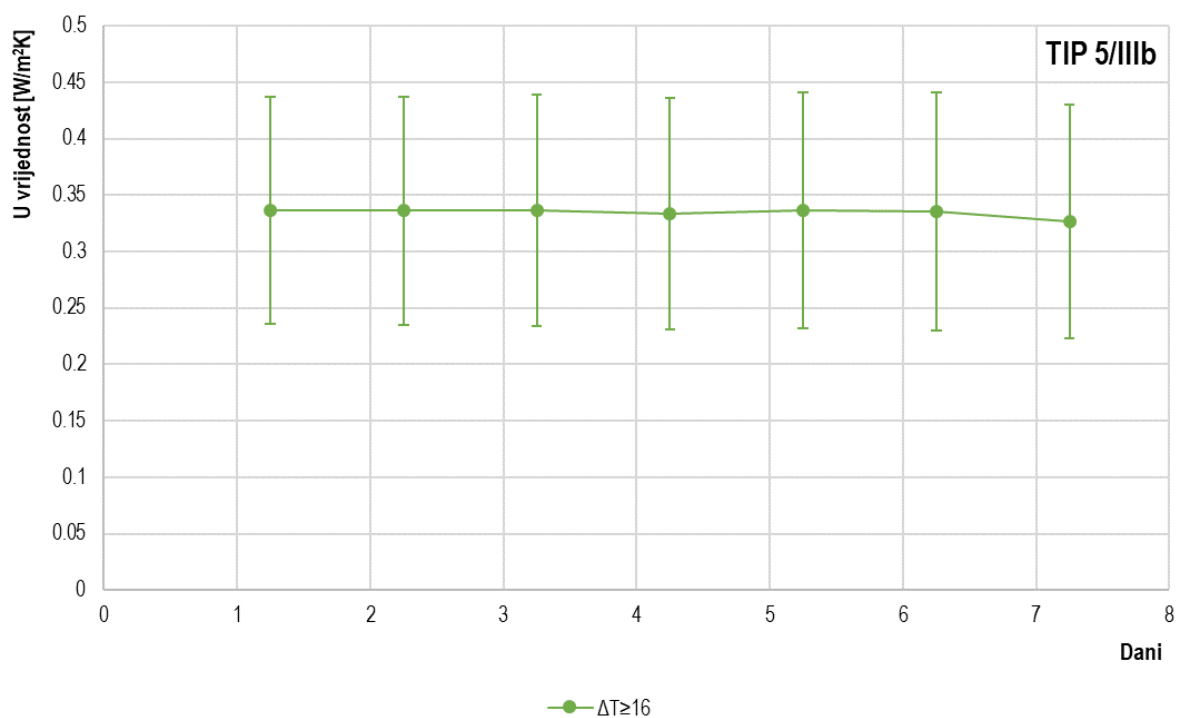
Slika 7.37 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 5/IIIc



Slika 7.38 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 5/IIIc



Slika 7.39 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 5/IIIb



Slika 7.40 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 5/IIIb

Tablica 7.10 Izmjerene U vrijednosti sa mjernim nesigurnostima, odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti i koeficijent varijacije U vrijednosti, modeli TIP 5

MODEL 5/IIb															
Duljina ispitivanja	$\Delta T < 8$		$8 \leq \Delta T < 10$		$10 \leq \Delta T < 12$		$12 \leq \Delta T < 14$		$14 \leq \Delta T < 16$		$\Delta T \geq 16$		$8 > \Delta T > 8$		V
	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	
	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	
1 (24 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,60±0,08	106,2	0,60±0,08	106,2	-
2 (48 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,60±0,08	107,9	0,60±0,08	107,9	0,6
3 (72 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,61±0,09	109,6	0,61±0,09	109,6	0,5
4 (96 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,61±0,09	109,4	0,61±0,09	109,4	0,2
5 (120 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,60±0,09	108,4	0,60±0,09	108,4	0,6
6 (144 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,60±0,09	107,0	0,60±0,09	107,0	0,9
7 (168 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,60±0,08	106,9	0,60±0,08	106,9	0,7

MODEL 5/IIc															
Duljina ispitivanja	$\Delta T < 8$		$8 \leq \Delta T < 10$		$10 \leq \Delta T < 12$		$12 \leq \Delta T < 14$		$14 \leq \Delta T < 16$		$\Delta T \geq 16$		$8 > \Delta T > 8$		V
	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	
	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	
1 (24 h)	0,83±0,41	387,5	0,54±0,27	215,8	0,41±0,23	143,1	0,29±0,18	71,7	0,27±0,17	59,0	-	-	0,65±0,30	283,3	-
2 (48 h)	0,75±0,42	342,0	0,52±0,27	205,1	0,40±0,22	137,1	0,31±0,19	80,3	0,25±0,17	49,5	-	-	0,60±0,29	253,8	0,6
3 (72 h)	0,72±0,41	322,7	0,53±0,27	212,0	0,40±0,22	135,9	0,30±0,19	76,7	0,25±0,17	45,2	-	-	0,56±0,28	227,6	1,3
4 (96 h)	0,71±0,40	318,4	0,52±0,27	205,0	0,39±0,22	129,9	0,31±0,19	81,7	0,26±0,16	51,6	-	-	0,53±0,26	213,6	0,5
5 (120 h)	0,72±0,40	324,7	0,52±0,27	205,9	0,39±0,22	128,3	0,31±0,19	82,1	0,26±0,16	50,2	0,21±0,15	24,7	0,53±0,26	209,8	1,8
6 (144 h)	0,74±0,40	333,1	0,52±0,27	208,3	0,39±0,22	131,4	0,31±0,19	80,0	0,26±0,16	51,4	0,21±0,15	21,9	0,53±0,25	209,0	1,7
7 (168 h)	0,75±0,40	339,9	0,52±0,27	208,4	0,40±0,22	136,3	0,31±0,19	80,5	0,25±0,16	49,1	0,20±0,15	20,2	0,53±0,25	209,4	1,2

MODEL 5/IIIc															
Duljina ispitivanja	$\Delta T < 8$		$8 \leq \Delta T < 10$		$10 \leq \Delta T < 12$		$12 \leq \Delta T < 14$		$14 \leq \Delta T < 16$		$\Delta T \geq 16$		$8 > \Delta T > 8$		V
	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	
	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	
1 (24 h)	0,56±0,56	248,6	0,26±0,27	63,7	0,19±0,22	19,5	0,21±0,20	31,0	-	-	-	-	0,43±0,35	169,6	-
2 (48 h)	0,52±0,52	223,3	0,28±0,27	77,9	0,23±0,22	44,1	0,22±0,19	40,2	-	-	-	-	0,41±0,33	153,9	9,0
3 (72 h)	0,64±0,57	297,0	0,29±0,27	83,2	0,23±0,22	46,1	0,23±0,19	43,6	0,19±0,16	19,1	-	-	0,50±0,35	210,6	8,4
4 (96 h)	0,65±0,58	305,6	0,28±0,27	77,7	0,24±0,22	49,7	0,23±0,19	43,6	0,19±0,16	19,1	-	-	0,52±0,37	224,4	4,2
5 (120 h)	0,68±0,59	327,1	0,29±0,27	81,1	0,24±0,22	49,7	0,23±0,19	43,6	0,19±0,16	19,1	-	-	0,56±0,40	249,7	0,7
6 (144 h)	0,74±0,62	363,3	0,29±0,27	81,1	0,24±0,22	49,7	0,23±0,19	43,6	0,19±0,16	19,1	-	-	0,62±0,43	290,1	5,5
7 (168 h)	0,73±0,62	354,3	0,28±0,27	77,8	0,24±0,22	49,7	0,23±0,19	43,6	0,19±0,16	19,1	-	-	0,63±0,45	291,0	0,2

MODEL 5/IIIb															
Duljina ispitivanja	$\Delta T < 8$		$8 \leq \Delta T < 10$		$10 \leq \Delta T < 12$		$12 \leq \Delta T < 14$		$14 \leq \Delta T < 16$		$\Delta T \geq 16$		$8 > \Delta T > 8$		V
	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	
	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	
1 (24 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,34±0,10	110,4	0,34±0,10	110,4	-
2 (48 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,34±0,10	110,0	0,34±0,10	110,0	0,2
3 (72 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,34±0,10	110,3	0,34±0,10	110,3	0,6
4 (96 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,33±0,10	108,5	0,33±0,10	108,5	0,1
5 (120 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,34±0,10	110,3	0,34±0,10	110,3	0,9
6 (144 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,34±0,11	109,6	0,34±0,11	109,6	1,5
7 (168 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,33±0,10	104,1	0,33±0,10	104,1	1,4

7.6 Rezultati analize podataka mjerenja - Modeli TIP 6

Na temelju podataka dobivenih mjerenjem temperaturnom metodom modela TIP 6, izračunate su i prikazane srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima prema metodi prosjeka, tablica 7.11. Rezultati ispitivanja pokazuju da je postotna razlika između teorijskih i izmjerenih U vrijednosti samo u slučaju modela TIP 6/IIIb manja od 20% što je unutar definiranog kriterija prihvatljivosti. Rezultati ispitivanja pokazuju da je postotna razlika između teorijskih i izmjerenih U vrijednosti najmanja kod ispitivanja modela TIP 6/IIIb te iznosi 3,4%. S druge strane, najveća postotna razlika od 155,2% između teorijskih i izmjerenih U vrijednosti zabilježena je u slučaju modela TIP 6/IIIc. Kod modela ispitanih tijekom sezone hlađenja, odnosno kod modela TIP 6/IIc i TIP 6/IIIc vidljiva je značajno veća postotna razlika između teorijskih i izmjerenih U vrijednosti s obzirom na to da je tijekom ispitivanja postignuta prosječna temperaturna razlika manja od 10°C. Budući da se prilikom in situ ispitivanja U vrijednosti zahtijevaju temperaturne razlike od minimalno 10°C stupnjeva rezultati ispitivanja modela TIP 5/IIIc ne bi se trebali uzimati u obzir u daljnjoj analizi. Srednja temperaturna razlika od 5,5°C tijekom ispitivanja modela TIP 6/IIIc rezultirala je srednjom U vrijednošću 155,2% većom u odnosu na teorijsku. Jednako tako, zbog niskog temperaturnog gradijenta tijekom mjerenja modela TIP 6/IIc razlika između teorijske i izmjerene U vrijednosti iznosi 96,9%. Iako u slučaju ispitivanja tijekom sezone hlađenja kod modela TIP 6/IIc i TIP 6/IIIc izmjerene U vrijednosti odstupaju preko 90%, dodavanjem sloja toplinske izolacije smanjila se izmjerena U vrijednost u odnosu na izmjerenu U vrijednost neizoliranog zida modela TIP 6/Ic. U teoriji, U vrijednost bi se nakon postavljanja sloja toplinske izolacije u odnosu na neizolirani zid trebala smanjiti za 83,3% u slučaju modela TIP 6/II (nakon postavljanja toplinske izolacije od EPS-a) odnosno za 84,9% u slučaju modela TIP 6/III (nakon postavljanja toplinske izolacije od KV). U odnosu na in situ izmjerenu vrijednost modela TIP 6/Ic, a prema rezultatima ispitivanja modela TIP 6/IIc navedeno smanjenje U vrijednosti iznosi 53,7%, a kod modela TIP 6/IIIc i TIP 6/IIIb 45,6% i 77,9%.

Usporede li se ispitivanja modela TIP 6/IIIc i TIP 6/IIIb provedena u različitim uvjetima vidljivo je da je mjerenjem dobivena značajno manja srednja U vrijednost kod modela TIP 6/IIIb koje je provedeno tijekom sezone grijanja kada je ostvarena i veća temperaturna razlika. U različitim uvjetima ispitivanja modela 6/III, a zbog niskog temperaturnog gradijenta prilikom ispitivanja u sezoni hlađenja dobivene srednje U vrijednosti razlikuju se za 59,5%.

Tablica 7.11 Uvjeti ispitivanja, izmjerene srednje U vrijednosti, teorijske U vrijednosti i odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti modela TIP 6

Model	Trajanje ispitivanja	Uvjeti ispitivanja	Srednja vrijednost ΔT [°C]	U_m [W/m ² K]	U_t [W/m ² K]	σ [%]
TIP 6/Ib	7 dana	$T_i=30$ °C	27,7	1,36±0,09	1,92	29,2
TIP 6/IIc	7 dana	$T_i=18$ °C	9,8	0,63±0,25	0,32	96,9
TIP 6/IIIc	7 dana	$T_i=18$ °C	5,5	0,74±0,44	0,29	155,2
TIP 6/IIIb	7 dana	$T_i=30$ °C	23,3	0,30±0,10	0,29	3,4

S obzirom na to da točnost rezultata in situ ispitivanja U vrijednosti u velikoj mjeri ovisi o postignutoj temperaturnoj razlici tijekom ispitivanja, radi detaljnije analize, na slikama 7.41, 7.43, 7.45 i 7.47 su nakon sedmodnevnog

ispitivanja za sve modele TIP 6 srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima prikazane za šest intervala temperaturnih razlika prethodno definiranih u poglavlju 7. Za prikazane srednje U vrijednosti naveden je i udio podataka u odnosu na ukupan broj podataka prikupljen prilikom mjerenja, a na temelju kojeg su izračunate srednje U vrijednosti u pojedinim intervalima.

Rezultati ispitivanja neizoliranog modela TIP 6/lb pokazuju da iako je prilikom cijelog ispitivanja ostvarena temperaturna razlika veća od 16°C, izmjerena srednja U vrijednost s mjernim nesigurnostima nalazi se izvan definiranog intervala pouzdanosti.

Rezultati ispitivanja toplinski izoliranih zidova tijekom sezone hlađenja pokazuju značajna odstupanja srednjih U vrijednosti u usporedbi s teorijskim vrijednostima. Iako je kod modela TIP 6/IIc i TIP 6/IIIc vidljiv trend smanjenja U vrijednosti prema očekivanoj (teorijskoj) vrijednosti povećanjem temperaturne razlike između unutarnjeg i vanjskog zraka, rezultati ispitivanja ne bi se trebali uzimati u obzir u daljnjoj analizi budući da je više od 44% podataka zabilježeno pri temperaturnim razlikama manjim od 8°C. Kod modela TIP 6/IIIb tijekom cijelog vremena trajanja ispitivanja ostvarena je temperaturna razlika veća od 16°C, a izmjerena srednja U vrijednost s mjernim nesigurnostima nalazi se unutar definiranog intervala pouzdanosti.

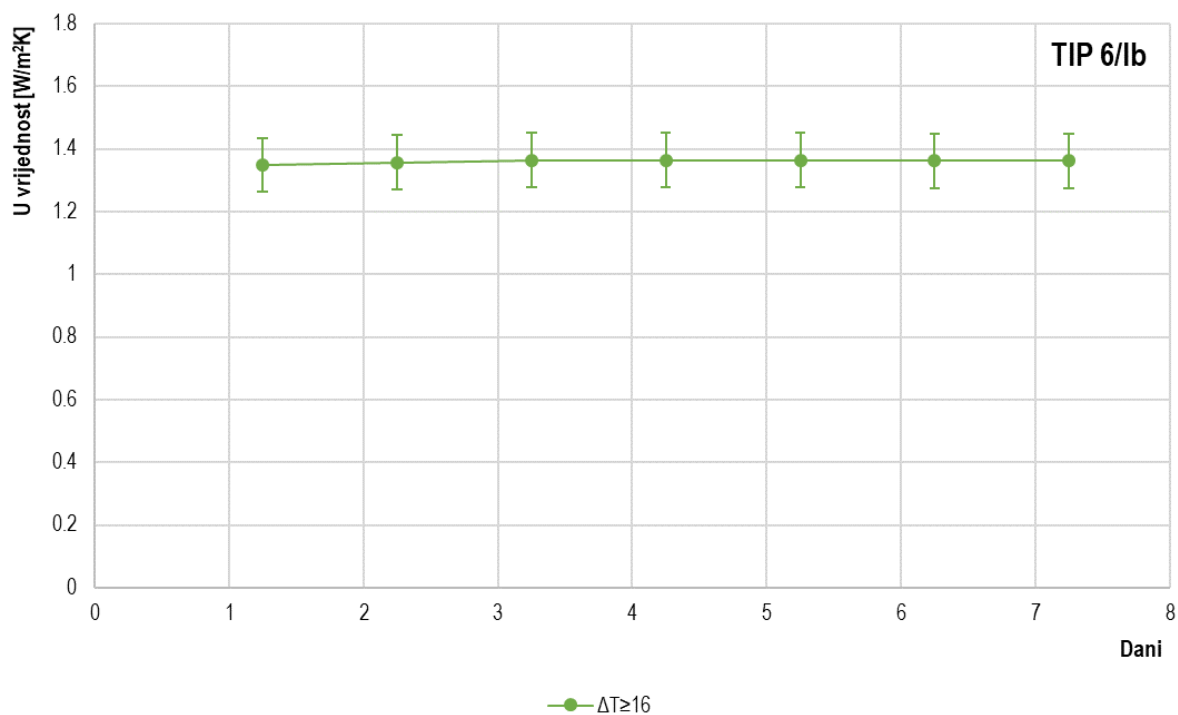
Na slikama 7.42, 7.44, 7.46 i 7.48 prikazan je trend kretanja srednje U vrijednosti s pripadnim mjernim nesigurnostima po danima i za svih šest definiranih intervala temperaturnih razlika koristeći kumulativne vrijednosti. Analiza trenda kretanja srednje U vrijednosti kod modela TIP 6/lb i TIP 6/IIIb pokazuje postupno ujednačenje izmjerene U vrijednosti povećanjem vremena trajanja ispitivanja.

Detaljni prikaz analize pročišćenih rezultata mjerenja modela TIP 6/lb i 6/IIIb prema kriterijima za analizu podataka definiranim u poglavlju 7 o najmanjem potrebnom broju podataka i minimalnoj potrebnoj temperaturnoj razlici između unutarnjeg i vanjskog zraka dan je u poglavlju 7.9.

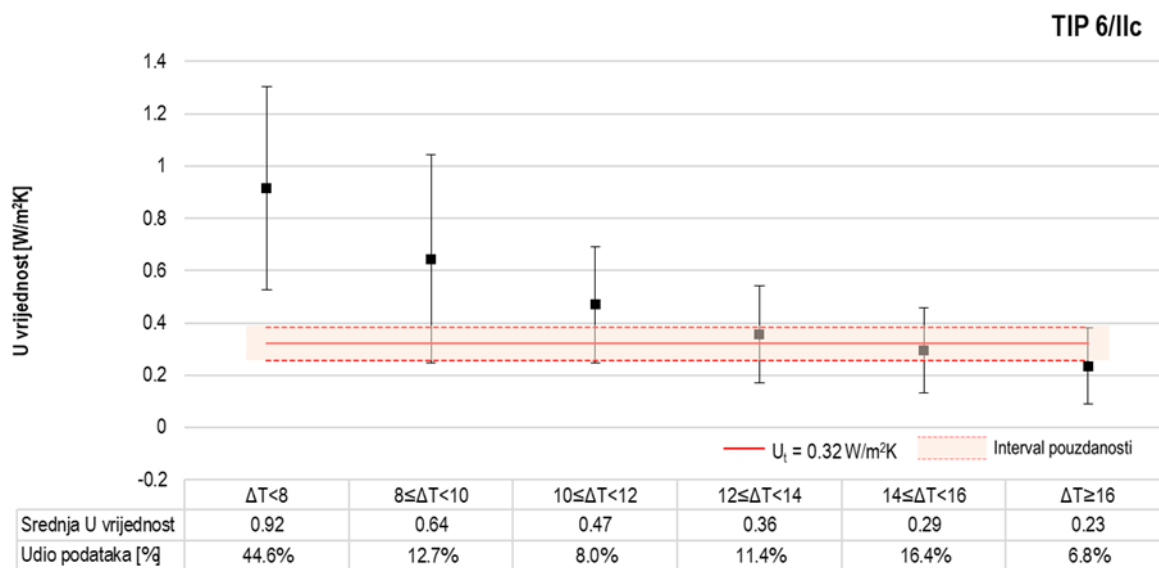
Osim grafički, u tablici 7.12 srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima prikazane su po danima za sve podatke ($8 > \Delta T > 8$) i razvrstano za šest intervala temperaturnih razlika koristeći kumulativne vrijednosti. U tablici 7.11, dodatno su izmjerene srednje U vrijednosti ispitanih modela TIP 6 uspoređene s teorijskim U vrijednostima (U_t) te su dani koeficijenti varijacije po danima. Koeficijenti varijacije izračunati su u odnosu na vrijednosti izmjerene 24 h ranije i prikazane za cijeli set izmjerenih podataka. Prema kriteriju definiranom u poglavlju 7 i rezultatima ispitivanja, pokazalo se da je za modele TIP 6/lb i TIP 6/IIIb potrebno vrijeme trajanja ispitivanja tri dana, budući da je treći dan koeficijent varijacije manji od 5%. Međutim, bitno je uočiti da u slučaju modela TIP 6/lb i TIP 6/IIIb produljenjem vremena trajanja ispitivanja smanjuje odstupanje izmjerenih U vrijednosti u odnosu na teorijske.



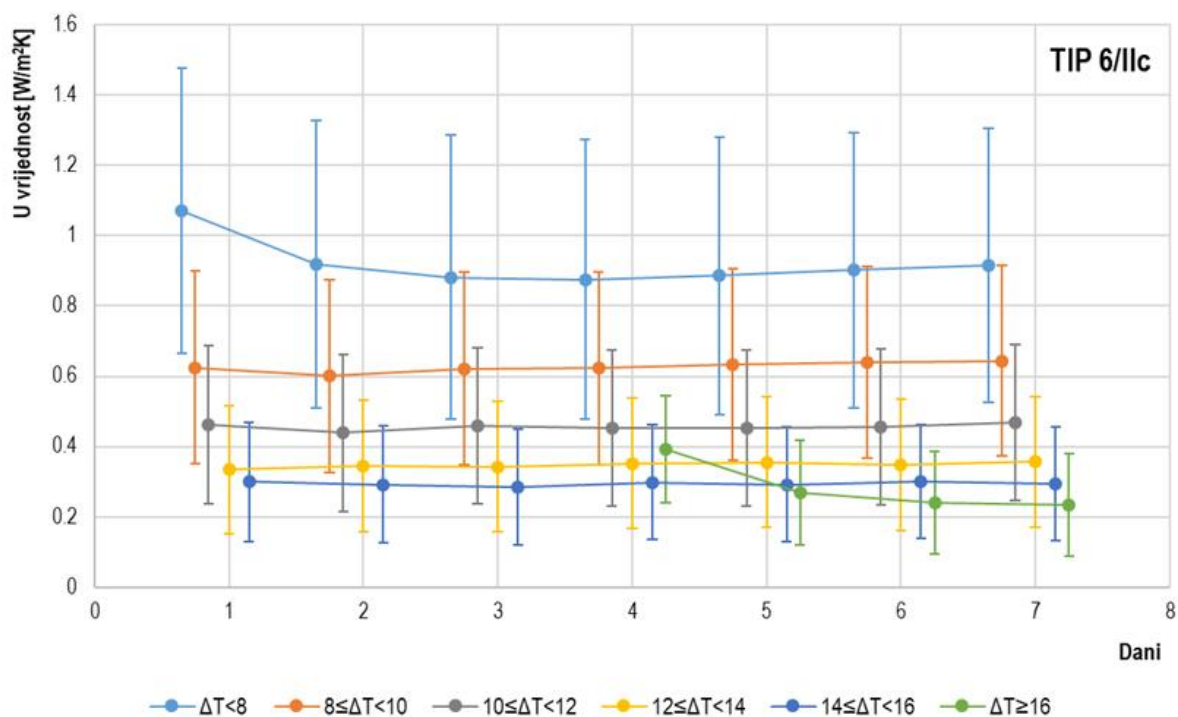
Slika 7.41 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 6/lb



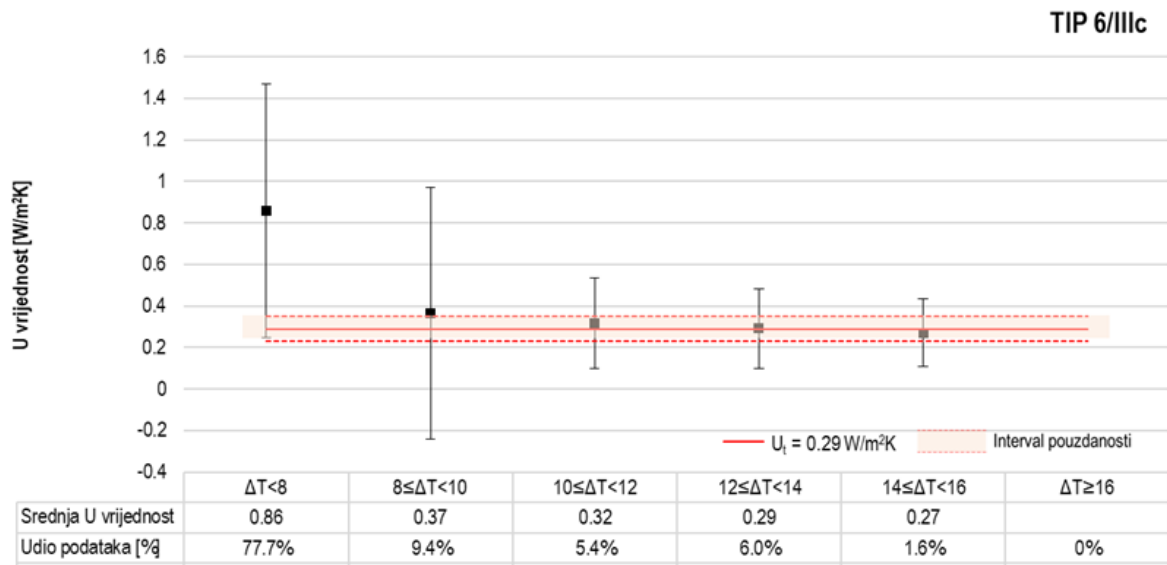
Slika 7.42 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 6/lb



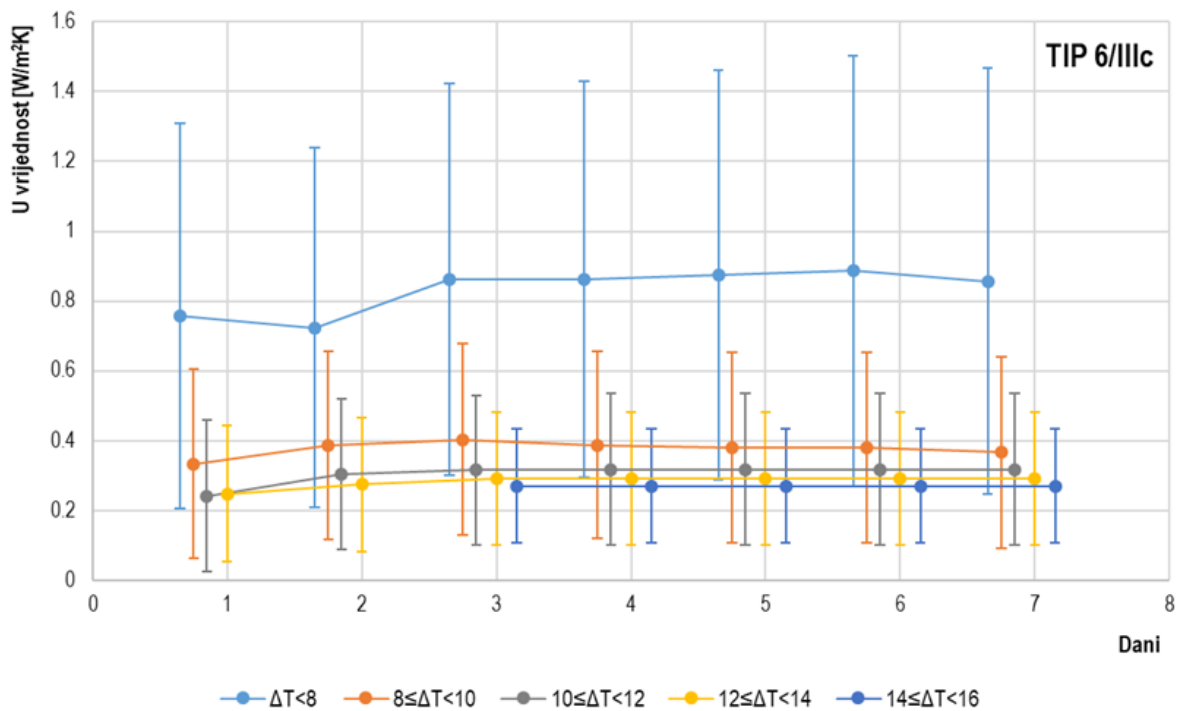
Slika 7.43 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 6/IIc



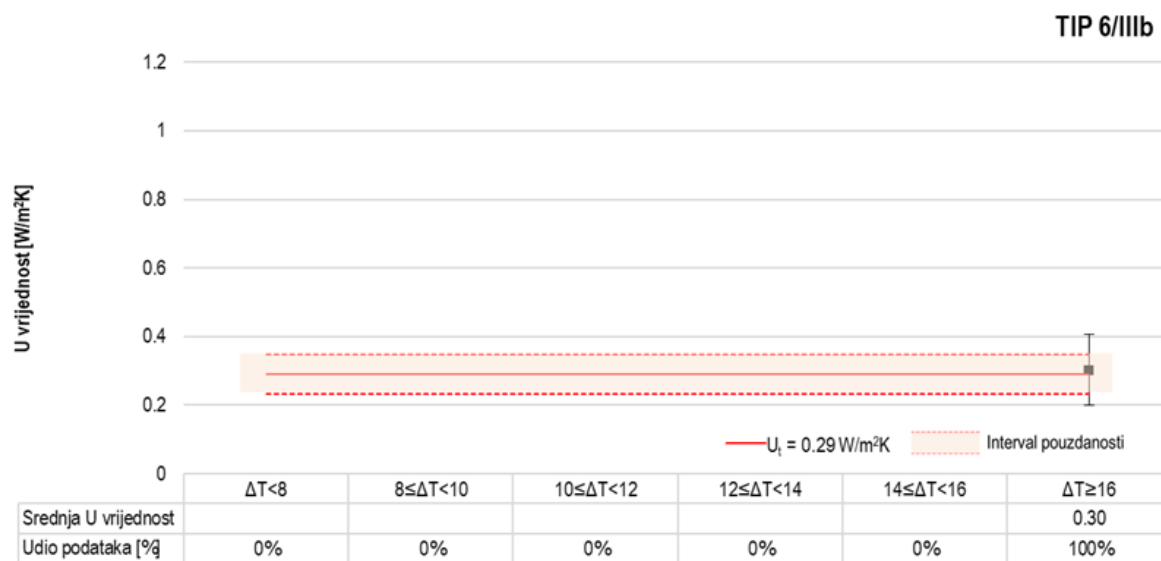
Slika 7.44 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 6/IIc



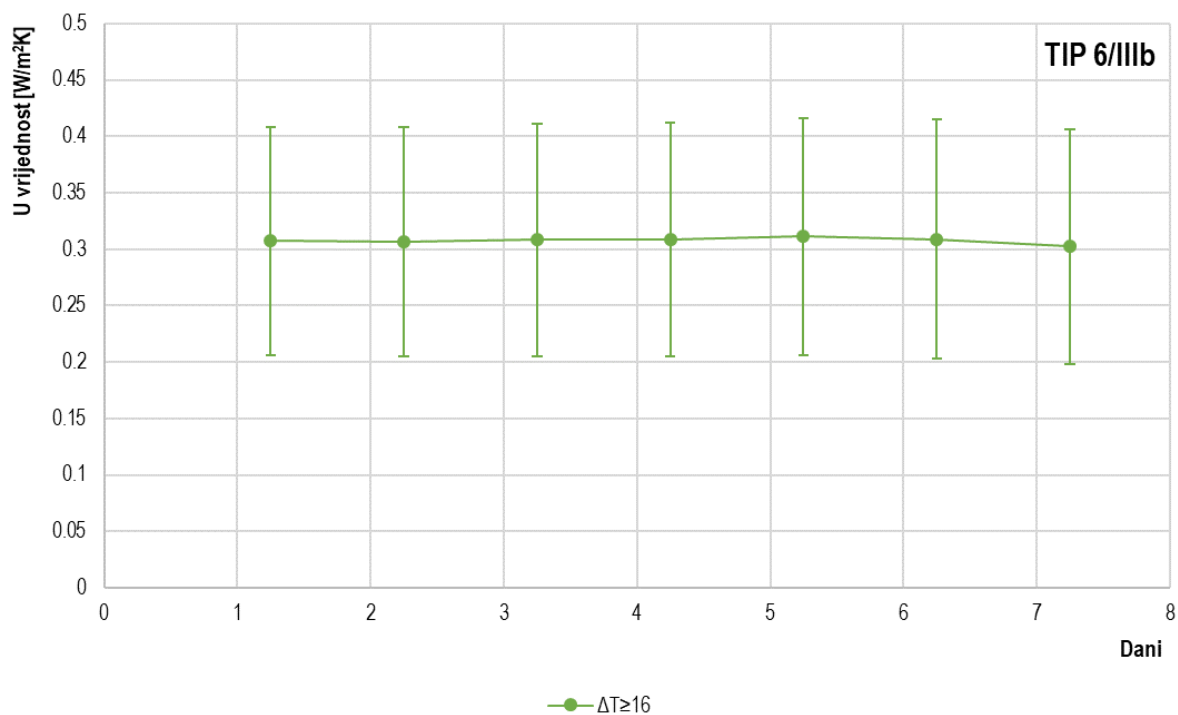
Slika 7.45 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 6/IIIc



Slika 7.46 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 6/IIIc



Slika 7.47 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 6/IIIb



Slika 7.48 Kretanje srednje U vrijednosti kroz vrijeme u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 6/IIIb

Tablica 7.12 Izmjerene U vrijednosti sa mjernim nesigurnostima, odstupanje između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti i koeficijent varijacije U vrijednosti, modeli TIP 6

MODEL 6/IIb															
Duljina ispitivanja	$\Delta T < 8$		$8 \leq \Delta T < 10$		$10 \leq \Delta T < 12$		$12 \leq \Delta T < 14$		$14 \leq \Delta T < 16$		$\Delta T \geq 16$		$8 > \Delta T > 8$		V
	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	
	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	
1 (24 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35±0,09	29.8	1,35±0,09	29.8	-
2 (48 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,36±0,09	29.3	1,36±0,09	29.3	0,8
3 (72 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,36±0,09	29.0	1,36±0,09	29.0	0,8
4 (96 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,36±0,09	28.9	1,36±0,09	28.9	0,5
5 (120 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,36±0,09	29.0	1,36±0,09	29.0	0,7
6 (144 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,36±0,09	29.1	1,36±0,09	29.1	0,3
7 (168 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,36±0,09	29.1	1,36±0,09	29.1	0,2

MODEL 6/IIc															
Duljina ispitivanja	$\Delta T < 8$		$8 \leq \Delta T < 10$		$10 \leq \Delta T < 12$		$12 \leq \Delta T < 14$		$14 \leq \Delta T < 16$		$\Delta T \geq 16$		$8 > \Delta T > 8$		V
	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	
	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	
1 (24 h)	1,07±0,41	234.4	0,63±0,27	95.4	0,46±0,22	44.5	0,33±0,18	4.4%	0,30±0,17	6.5	-	-	0,80±0,29	151.1	-
2 (48 h)	0,92±0,41	187.3	0,60±0,27	87.6	0,44±0,22	37.2	0,34±0,19	7.8%	0,29±0,17	8.6	-	-	0,72±0,29	124.4	0,5
3 (72 h)	0,88±0,40	175.5	0,62±0,27	94.2	0,46±0,22	43.2	0,34±0,19	7.1%	0,29±0,17	10.7	-	-	0,67±0,27	108.2	0,6
4 (96 h)	0,87±0,40	173.4	0,62±0,27	94.5	0,45±0,22	41.8	0,35±0,19	10.2%	0,30±0,16	6.7	0,39±0,15	22.8	0,64±0,26	100.6	0,2
5 (120 h)	0,89±0,39	176.8	0,63±0,27	98.3	0,45±0,22	41.6	0,36±0,19	11.0%	0,29±0,16	8.6	0,27±0,15	15.8	0,63±0,25	98.1	1,4
6 (144 h)	0,90±0,39	181.9	0,64±0,27	100.2	0,46±0,22	42.8	0,35±0,19	8.8%	0,30±0,16	6.1	0,24±0,15	24.8	0,63±0,25	97.5	1,4
7 (168 h)	0,92±0,39	186.4	0,64±0,27	101.3	0,47±0,22	46.8	0,36±0,19	11.4%	0,29±0,16	8.3	0,23±0,15	26.7	0,63±0,25	97.9	0,9

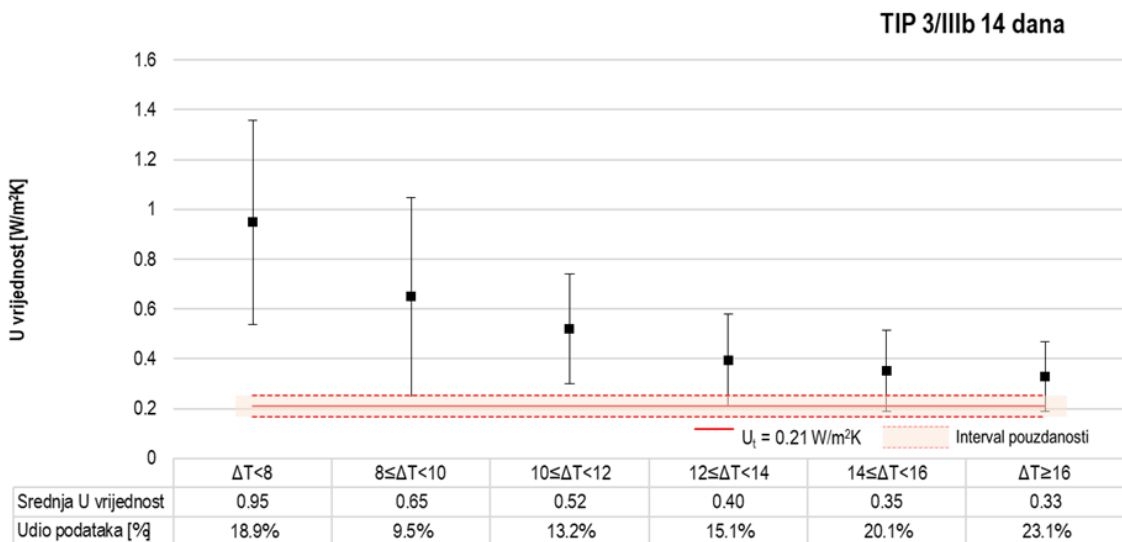
MODEL 6/IIIc															
Duljina ispitivanja	$\Delta T < 8$		$8 \leq \Delta T < 10$		$10 \leq \Delta T < 12$		$12 \leq \Delta T < 14$		$14 \leq \Delta T < 16$		$\Delta T \geq 16$		$8 > \Delta T > 8$		V
	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	
	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	
1 (24 h)	0,76±0,55	161.5	0,33±0,27	14.8	0,24±0,22	16.7	0,25±0,20	14.8	-	-	-	-	0,57±0,35	97.8	-
2 (48 h)	0,72±0,51	149.7	0,39±0,27	33.1	0,31±0,22	5.3	0,27±0,19	5.3	-	-	-	-	0,56±0,33	92.1	9,6
3 (72 h)	0,86±0,56	197.2	0,40±0,27	39.0	0,32±0,21	8.9	0,29±0,19	0.4	0,27±0,16	6.7	-	-	0,67±0,35	130.2	4,7
4 (96 h)	0,86±0,57	197.3	0,39±0,27	33.4	0,32±0,22	9.6	0,29±0,19	0.4	0,27±0,16	6.7	-	-	0,69±0,37	136.5	3,1
5 (120 h)	0,88±0,59	201.8	0,38±0,27	31.5	0,32±0,22	9.6	0,29±0,19	0.4	0,27±0,16	6.7	-	-	0,71±0,39	145.6	0,0
6 (144 h)	0,89±0,62	205.5	0,38±0,27	31.5	0,32±0,22	9.6	0,29±0,19	0.4	0,27±0,16	6.7	-	-	0,75±0,43	157.8	1,5
7 (168 h)	0,86±0,61	195.3	0,37±0,27	26.3	0,32±0,22	9.6	0,29±0,19	0.4	0,27±0,16	6.7	-	-	0,74±0,44	154.6	1,0

MODEL 6/IIIb															
Duljina ispitivanja	$\Delta T < 8$		$8 \leq \Delta T < 10$		$10 \leq \Delta T < 12$		$12 \leq \Delta T < 14$		$14 \leq \Delta T < 16$		$\Delta T \geq 16$		$8 > \Delta T > 8$		V
	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	$U_m \pm u_c(U)$	σ	
	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	[W/m ² K]	[%]	
1 (24 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,31±0,10	6.0	0,31±0,10	6.0	-
2 (48 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,31±0,10	5.9	0,31±0,10	5.9	0,1
3 (72 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,31±0,10	6.4	0,31±0,10	6.4	0,8
4 (96 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,31±0,10	6.5	0,31±0,10	6.5	0,3
5 (120 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,31±0,11	7.3	0,31±0,11	7.3	0,8
6 (144 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,31±0,11	6.5	0,31±0,11	6.5	1,5
7 (168 h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,30±0,10	4.3	0,30±0,10	4.3	0,8

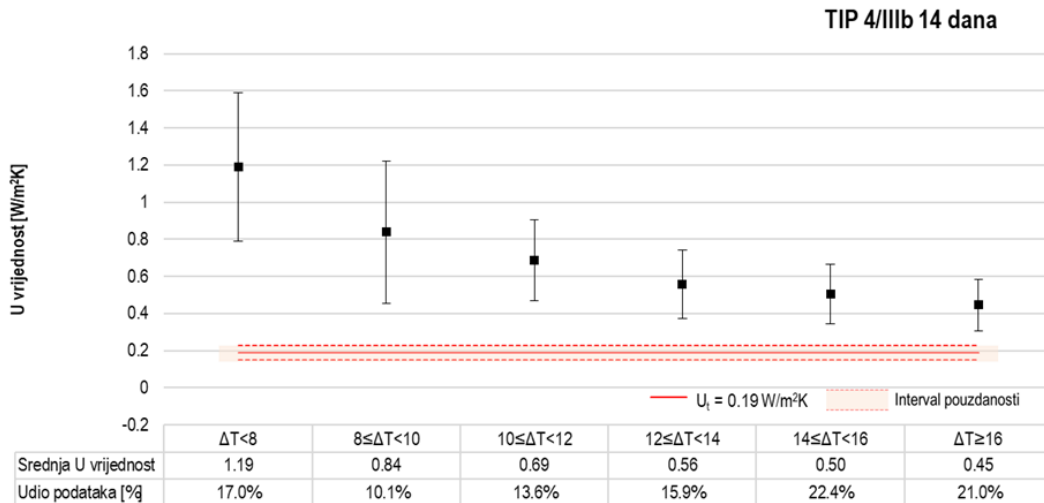
7.7 Analiza rezultata ispitivanja U vrijednosti temperaturnom metodom različitih vremena trajanja

S ciljem definiranja minimalnog potrebnog vremena trajanja ispitivanja U vrijednosti temperaturnom metodom, provedena su dodatna ispitivanja modela TIP 3/IIIb, 4/IIIb, 5/IIIb i 6/IIIb. Modeli TIP 3/IIIb i 4/IIIb ispitani su u trajanju od 14 dana tijekom sezone grijanja te je unutarnja temperatura, T_i postavljena na 30 °C i održavana konstantnom. Modeli TIP 5/IIIb i 6/IIIb ispitani su u trajanju od 30 dana također tijekom sezone grijanja pri čemu je unutarnja temperatura, T_i postavljena na 30 °C i održavana konstantnom.

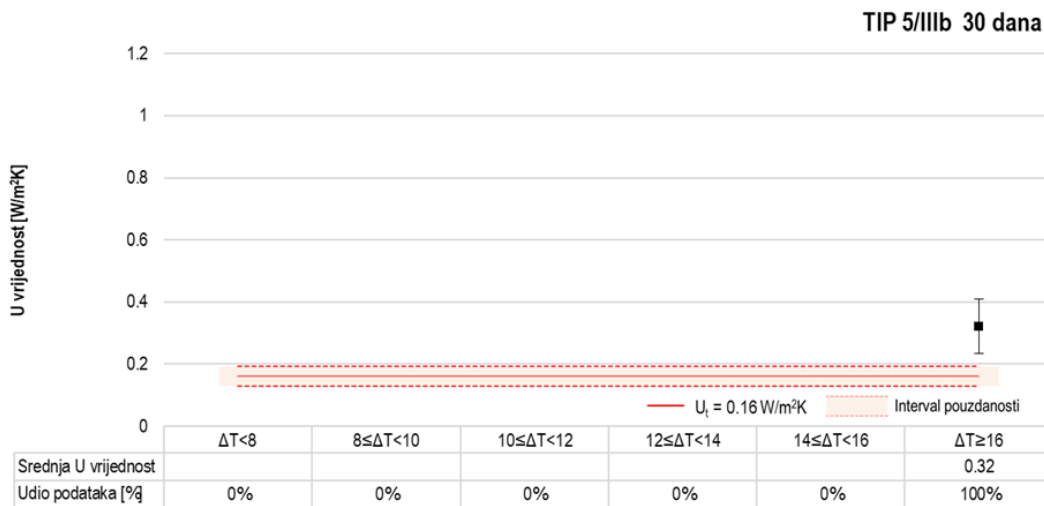
Na slikama 7.49 do 7.52 su za sva četiri ispitana modela prikazane srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima za šest intervala temperaturnih razlika prethodno definiranih u poglavlju 7. Za prikazane srednje U vrijednosti naveden je i udio podataka u odnosu na ukupan broj podataka prikupljen prilikom mjerenja, a na temelju kojeg su izračunate srednje U vrijednosti u pojedinim intervalima. Prema grafičkim prikazima, vidljiv je trend smanjenja U vrijednosti prema očekivanoj (teorijskoj) vrijednosti povećanjem temperaturne razlike između unutarnjeg i vanjskog zraka u slučaju modela TIP 3/IIIb i 4/IIIb. Međutim, bitno je uočiti kako je oko 57% podataka prilikom ispitivanja modela TIP 3/IIIb i 4/IIIb prikupljeno pri temperaturnoj razlici između unutarnjeg i vanjskog zraka manjoj od 14°C. Slijedom navedenog te daljnjom analizom izmjerenih srednjih U vrijednosti prema definiranim intervalima temperaturnih razlika, vidljivo je kako su značajno veća odstupanja između teorijskih i izmjerenih U vrijednosti dobivena pri manjim temperaturnim razlikama, odnosno pri temperaturnoj razlici između unutarnjeg i vanjskog zraka manjoj od 14°C. S druge strane, kod modela TIP 5/IIIb i 6/IIIb tijekom cijelog vremena trajanja ispitivanja ostvarena je temperaturna razlika veća od 16°C, a izmjerena srednja U vrijednost kod modela TIP 6/IIIb nakon 30 dana u usporedbi s teorijskom vrijednosti nalazi se unutar definiranog intervala pouzdanosti.



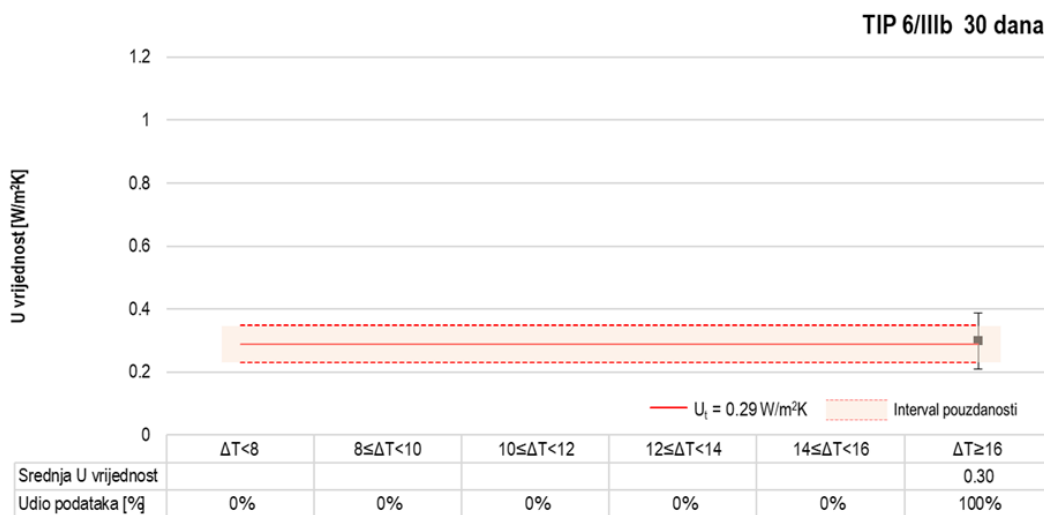
Slika 7.49 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici nakon 14 dana ispitivanja, model TIP 3/IIIb



Slika 7.50 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici nakon 14 dana ispitivanja, model 4/IIIb



Slika 7.51 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici nakon 30 dana ispitivanja, model 5/IIIb



Slika 7.52 Srednje U vrijednosti u ovisnosti o temperaturnoj razlici nakon 30 dana ispitivanja, model 6/IIIb

U tablici 7.13 prikazani su dobiveni rezultati ispitivanja modela TIP 3/IIIb i 4/IIIb nakon 14 dana, a modela 5/IIIb i 6/IIIb nakon 30 dana. Izmjerene srednje U vrijednosti (U_m) ispitanih modela prikazane su nakon svaka 24 h i uspoređene s teorijskim U vrijednostima (U_t). Promjenljivost rezultata analizirana je izračunavanjem koeficijenta varijacije prema kriteriju definiranom u poglavlju 7. Analizom rezultata, može se uočiti kako se produljenjem vremena trajanja ispitivanja postupno smanjuju varijacije srednjih U vrijednosti. Izmjerene srednje U vrijednosti modela TIP 3/III b i 4/IIIb nakon 3 dana odstupaju 5 i 3% u odnosu na izmjerene U vrijednosti nakon 14 dana. Nadalje, izmjerene srednje U vrijednosti nakon 3 dana odstupaju 10% u odnosu na izmjerene U vrijednosti nakon 30 dana kod modela 5/IIIb, a kod modela TIP 6/IIIb 2%. S obzirom na navedeno te da je koeficijent varijacije kod sva tri modela manji od 5% nakon 3 dana ispitivanja, može se zaključiti kako daljnje povećanje trajanja ispitivanja nije značajno utjecalo na izmjerenu srednju U vrijednost.

Tablica 7.13 Izmjerene srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima, odstupanje između teorijskih i izmjerenih U vrijednosti i koeficijent varijacije izmjerenih U vrijednosti

TRAJANJE ISPITIVANJA [dani]	MODEL	U_m [W/m ² K]	U_t [W/m ² K]	σ	V (%)	MODEL	U_m [W/m ² K]	U_t [W/m ² K]	σ	V [%]		
1		0,62±0,19		196%	-		0,69±0,19		266%	-		
2		0,58±0,19		177%	10,23		0,73±0,19		282%	13,65		
3		0,54±0,19		159%	3,27		0,70±0,19		268%	3,95		
4		0,51±0,19		144%	0,92		0,67±0,19		254%	2,24		
5		0,50±0,18		140%	1,36		0,65±0,19		240%	0,67		
6		0,51±0,19		143%	1,84		0,64±0,18		237%	0,87		
7	TIP	0,51±0,19	0,21	145%	1,05	TIP	0,65±0,19	0,19	243%	2,4		
8	3/IIIb	0,52±0,19		145%	1,85	4/IIIb	0,65±0,19		243%	0,2		
9		0,52±0,19		149%	3,73		0,66±0,19		247%	2,43		
10		0,53±0,19		150%	2,37		0,66±0,19		248%	2,76		
11		0,52±0,19		149%	0,88		0,66±0,19		249%	0,61		
12		0,52±0,19		149%	2,01		0,66±0,19		250%	0,44		
13		0,52±0,19		150%	0,47		0,68±0,19		259%	2,6		
14		0,52±0,19		146%	0,17		0,68±0,19		256%	0,17		
1		0,29±0,09		0,16	80%	-			0,29±0,09	0,29	0%	-
2		0,29±0,08			82%	0,64			0,29±0,08		1%	0,45
3		0,29±0,08			83%	0,37			0,29±0,08		1%	0,11
4		0,30±0,08			85%	0,35			0,30±0,08		2%	0,01
5		0,30±0,08			88%	0,01			0,30±0,08		3%	0,19
6		0,31±0,08			94%	0,7			0,30±0,08		5%	0,35
7		0,31±0,09	95%		0,17		0,30±0,09	5%	0,04			
8		0,31±0,09	93%		0,35		0,30±0,09	4%	0,5			
9		0,31±0,09	93%		0,29		0,30±0,09	4%	0,02			
10		0,31±0,09	94%		0,07		0,30±0,09	4%	0,07			
11		0,31±0,09	95%		0,08		0,30±0,09	4%	0,2			
12	TIP	0,31±0,09	96%		0,23	TIP	0,30±0,09	5%	0,13			
13	5/IIIb	0,32±0,09	97%		0,13	6/IIIb	0,30±0,09	5%	0,26			
14		0,32±0,09	97%		0,24		0,31±0,09	5%	0,14			
15		0,31±0,09	97%		0,08		0,30±0,09	5%	0,09			
16		0,31±0,09	96%		0		0,30±0,09	5%	0,04			
17		0,31±0,09	96%		0,12		0,30±0,09	4%	0,02			
18		0,31±0,09	96%		0,03		0,30±0,09	4%	0,03			
19		0,31±0,09	96%		0,07		0,30±0,09	4%	0,02			
20		0,31±0,09	96%		0,13		0,30±0,09	3%	0,12			
21		0,31±0,09	96%		0,08		0,30±0,09	3%	0,02			
22		0,31±0,09	96%		0,04		0,30±0,09	3%	0,01			
23		0,31±0,09	97%		0,07		0,30±0,09	3%	0,01			
24		0,32±0,09	97%		0,03		0,30±0,09	3%	0,04			

25	0,32±0,09	99%	0,12	0,30±0,09	3%	0,04
26	0,32±0,09	100%	0,31	0,30±0,09	3%	0,04
27	0,32±0,09	100%	0,01	0,30±0,09	3%	0
28	0,32±0,09	100%	0,08	0,30±0,09	3%	0,06
29	0,32±0,09	100%	0,02	0,30±0,09	3%	0,08
30	0,32±0,09	101%	0,11	0,30±0,09	3%	0,07

Na temelju prikazane analize na slikama 7.49 do 7.52 i u tablici 7.13, bitno je uočiti kako kod modela TIP 3/IIIb i 4/IIIb velik utjecaj na izmjerenu srednju U vrijednost nakon 14 dana imaju podatci zabilježeni pri temperaturnim razlikama između unutarnjeg i vanjskog zraka manjim od 14°C. Ukoliko bi se promatrali samo podatci zabilježeni pri temperaturnim razlikama između unutarnjeg i vanjskog zraka većim od 14°C odstupanja između teorijskih i izmjerenih U vrijednosti smanjila bi se prosječno za oko 90% kod modela TIP 3/IIIb te za oko 100% prosječno kod modela 4/IIIb.

7.8 Analiza rezultata usporednog ispitivanja modela temperaturnom metodom i metodom mjerenja toplinskog toka kroz građevne dijelove

Sažeti prikaz rezultata usporednog in situ ispitivanja modela temperaturnom metodom (TBM-om) i metodom mjerenja toplinskog toka kroz građevne dijelove (HFM metodom) dan je u tablici 7.14. U tablici 7.14 prikazane su izmjerene srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima nakon 7, 14 i 30 dana za modele TIP 5/I i 6/I. Za modele TIP 5/III i 6/III izmjerene srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima prikazane su nakon 7 i 14 dana ispitivanja. U tablici 7.14 crvenom bojom označeni su rezultati ispitivanja modela TIP 5/IIIb budući da je prilikom ispitivanja modela TIP 5/IIIb došlo je do odvajanja senzora za mjerenje unutarnje temperature od površine zida zbog čega prikazani dobiveni rezultati nisu mjerodavni za daljnju analizu.

Općenito, rezultati usporednog ispitivanja TBM-om i HFM metodom pokazuju relativno mala odstupanja između izmjerenih U vrijednosti dobivenih korištenjem obiju metoda. Dobivene razlike iznose od 9 do 41%. Najmanja razlika između izmjerenih U vrijednosti TBM-om i HFM metodom vidljiva je u slučaju ispitivanja modela TIP 6/IIIb. Suprotno, najveća razlika između dobivenih rezultata različitim metodama vidljiva je kod modela TIP 5/Ib pri čemu se rezultati razlikuju u prosjeku za 32%. Veća odstupanja između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti dobivena su mjerenjem TBM-om. Iako razlike između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti postoje, vidljivo je smanjenje U vrijednosti u slučaju izoliranih zidova u odnosu na neizolirane bez obzira na primijenjenu in situ metodu određivanja U vrijednosti.

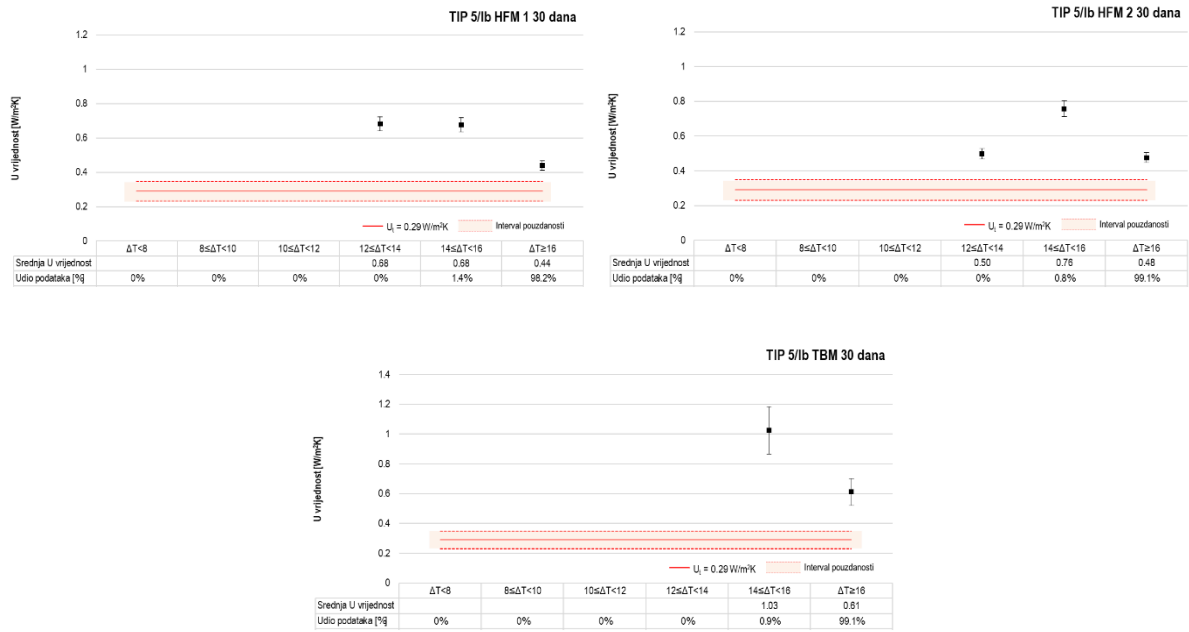
Rezultati eksperimentalnog ispitivanja pokazuju da su U vrijednosti, bez obzira na primijenjenu metodu, precijenjene za toplinski izolirane zidove, dok su za toplinski neizolirane podcijenjene. Precjenjivanje toplinske učinkovitosti materijala niske toplinske provodljivosti, te s druge strane podcijenjivanje toplinskih svojstava tradicionalnih materijala potvrđuje rezultate provedenih istraživanja u postojećoj znanstvenoj literaturi.

Tablica 7.14 Sažeti prikaz rezultata in situ ispitivanja U vrijednosti, teorijskih U vrijednosti i usporedbe između teorijskih i izmjerenih U vrijednosti

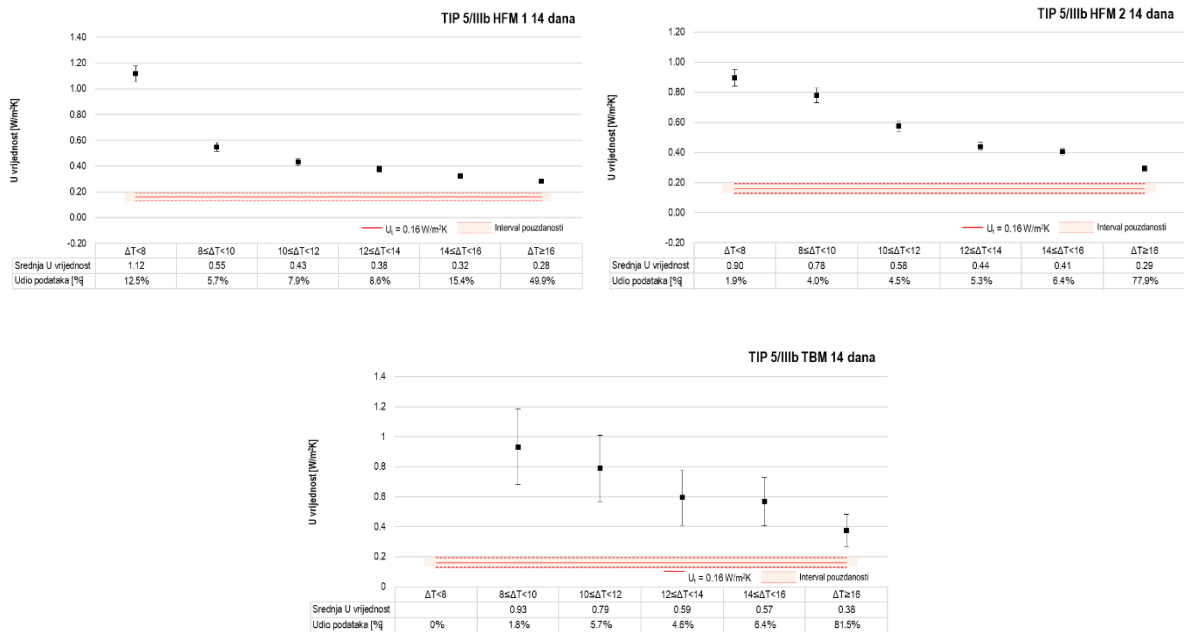
Model	Trajanje ispitivanja	HFM metoda - Mjerna oprema 1	HFM metoda - Mjerna oprema 2	TBM	U_t	Postotna razlika HFM1- TBM	Postotna razlika HFM2- TBM	Postotna razlika U_t - HFM1	Postotna razlika U_t - HFM2	Postotna razlika U_t - TBM
		SREDNJA U VRIJEDNOST [W/m ² K]								
TIP 5/lb	7 dana	0,44±0,03	0,47±0,03	0,60±0,08	0,29	36%	28%	52%	62%	107%
	14 dana	0,44±0,03	0,49±0,03	0,60±0,08		36%	22%	52%	69%	107%
	30 dana	0,44±0,03	0,48±0,03	0,62±0,09		41%	29%	52%	66%	114%
TIP 5/IIIb	7 dana	0,45±0,03*	0,40±0,02	0,49±0,12	0,16	9%*	23%	181%*	150%	206%
	14 dana	0,43±0,02*	0,35±0,02	0,43±0,12		0%*	23%	169%*	119%	169%
Razlika u U vrijednosti prije i nakon postavljanja dodatne toplinske izolacije		2%	29%	28%	45%					
TIP 6/lb	7 dana	1,73±0,10	1,78±0,11	1,36±0,09	1,92	-21%	-24%	-10%	-7%	-29%
	14 dana	1,74±0,10	1,78±0,11	1,36±0,09		-22%	-24%	-9%	-7%	-29%
	30 dana	1,87±0,11	1,82±0,11	1,39±0,09		-26%	-24%	-3%	-5%	-28%
TIP 6/IIIb	7 dana	0,49±0,03	0,39±0,03	0,52±0,12	0,29	6%	33%	69%	34%	79%
	14 dana	0,52±0,03	0,42±0,03	0,46±0,12		-12%	10%	79%	45%	59%
Razlika u U vrijednosti prije i nakon postavljanja dodatne toplinske izolacije		70%	76%	66%	85%					

* Tijekom ispitivanja došlo je do odvajanja senzora za mjerenje unutarnje temperature od površine zida

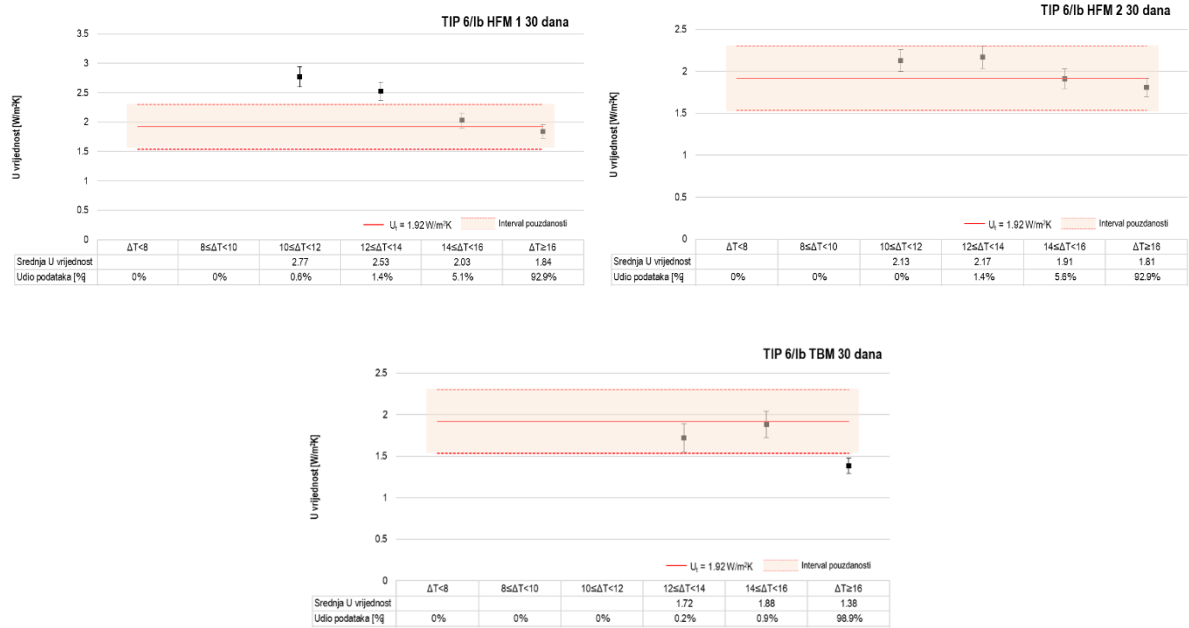
Na slikama 7.53 do 7.56 su za sva četiri ispitana modela prikazane srednje U vrijednosti s mjernim nesigurnostima za šest intervala temperaturnih razlika prethodno definiranih u poglavlju 7. Za prikazane srednje U vrijednosti naveden je i udio podataka u odnosu na ukupan broj podataka prikupljen prilikom mjerenja, a na temelju kojeg su izračunate srednje U vrijednosti u pojedinim intervalima. Prema grafičkim prikazima, vidljiv je trend smanjenja U vrijednosti prema očekivanoj (teorijskoj) vrijednosti povećanjem temperaturne razlike između unutarnjeg i vanjskog zraka u slučaju izoliranih zidova neovisno o primijenjenoj metodi. Na temelju prikazane analize na slikama 7.53 do 7.56 bitno je uočiti kako kod izoliranih zidova podatci zabilježeni pri temperaturnim razlikama između unutarnjeg i vanjskog zraka manjim od 16°C utječu na izmjerene srednje U vrijednost na kraju ispitivanja. Ukoliko bi se promatrali samo podatci zabilježeni pri temperaturnim razlikama između unutarnjeg i vanjskog zraka većim od 16°C smanjila bi se izmjerena U vrijednost te samim time i razlike između teorijskih i izmjerenih U vrijednosti.



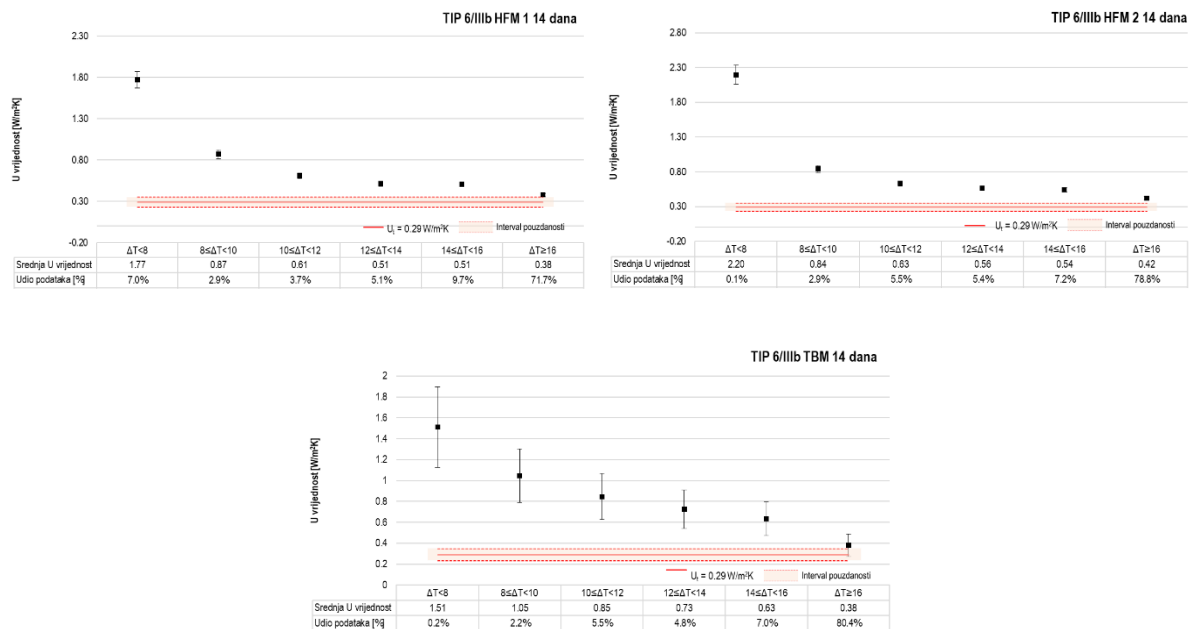
Slika 7.53 Srednje U vrijednosti in situ ispitivanja TBM-om i HFM metodom u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 5/lb



Slika 7.54 Srednje U vrijednosti in situ ispitivanja TBM-om i HFM metodom u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 5/IIlb



Slika 7.55 Srednje U vrijednosti in situ ispitivanja TBM-om i HFM metodom u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 6/lb



Slika 7.56 Srednje U vrijednosti in situ ispitivanja TBM-om i HFM metodom u ovisnosti o temperaturnoj razlici, model TIP 6/IIlb

7.9 Analiza pročišćenog seta podataka

Pročišćavanje eksperimentalnih podataka provedeno je prema kriterijima o minimalnom potrebnom broju podataka i minimalnoj potrebnoj temperaturnoj razlici između unutarnjeg i vanjskog zraka. Prema prvom kriteriju, prilikom analize promatrani su samo intervali u kojima je zabilježeno najmanje 43% podataka, što u odnosu na provedena sedmodnevna ispitivanja predstavlja tri dana mjerenja, a što je prema ISO 9869-1:2014 [27] preporučeno minimalno vrijeme trajanja ispitivanja. Prema drugom kriteriju, promatrani su podatci zabilježeni pri razlici temperature između unutarnjeg i vanjskog zraka većoj ili jednakoj od 10°C, a što je prema literaturi minimalna preporučena temperaturna razlika za provođenje in situ ispitivanja U vrijednosti [18, 19, 110].

U tablici 7.15 usporedno su prikazani rezultati mjerenja za pročišćeni (filtrirani) i cijeli set podataka. U tablici 7.15 dan je sažeti prikaz izmjerenih srednjih U vrijednosti, teorijskih U vrijednosti, intervala temperaturnih razlika koji sadrže najmanje 43% podataka, postotka podataka koji je obuhvaćen pročišćavanjem u pojedinim intervalima temperaturnih razlika, odstupanja između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti za pročišćeni i cijeli set podataka. Pročišćeni podatci prikazani u tablici 7.15 odnose se na izmjerene srednje U vrijednosti u intervalima temperaturnih razlika većih od 10°C koji sadrže najmanje 43% podataka ($N > 43\%$). Bitno je uočiti da u slučaju modela kod kojih je tijekom cijelog vremena trajanja ispitivanja ostvarena temperaturna razlika veća ili jednaka od 16 °C pročišćavanje podataka nije imalo utjecaja na rezultate budući da 100% izmjerenih podataka zadovoljava oba postavljena kriterija.

Prema rezultatima prikazanim u tablici 7.15, vidljivo je kako su se odstupanja između izmjerene i teorijske U vrijednosti u slučaju modela TIP 1/Ia, 1/IIIa i 2/IIIa nakon pročišćavanja povećala. Kod modela TIP 1/Ia odstupanje se povećalo za 12,6%, kod modela TIP 1/IIIa za 18,5%, a kod modela TIP 2/IIIa za 19%. Pročišćavanje podataka u ostalim slučajevima rezultiralo je smanjenjem odstupanja između izmjerene i teorijske U vrijednosti u rasponu od 12 do 188%.

Bitno je uočiti kako su se nakon primjene metode pročišćavanja podataka odstupanja između izmjerene i teorijske U vrijednosti povećala samo u slučaju ispitivanja s održavanjem temperaturne razlike od 15 °C prosječno između unutarnjeg i vanjskog zraka u ovisnosti o vanjskoj temperaturi. S druge strane, pročišćavanje podataka mjerenja provedenih s održavanjem konstantne unutarnje temperature od 30°C rezultiralo je smanjenjem odstupanja između izmjerene i teorijske U vrijednosti te posljedično povećanjem točnosti rezultata.

Tablica 7.15 Usporedni prikaz rezultata mjerenja za pročišćeni i cijeli set podataka

MODEL	Cijeli set podataka			N > 43%				
	U _m [W/m ² K]	U _t [W/m ² K]	σ [%]	Temperaturna razlika	N [%]	U _{mf} [W/m ² K]	U _t [W/m ² K]	σ _r [%]
TIP 1/Ia	1,09±0,15	1,10	1,0	14 ≤ ΔT < 16	49,2	1,25±0,15	1,10	13,6
TIP 1/IIa	0,44±0,16	0,28	57,7	/	/	/	/	/
TIP 1/IIIa	0,58±0,15	0,26	123,8	ΔT ≥ 16	49,5	0,63±0,15	0,26	142,3
TIP 1/IIIb	0,59±0,09	0,26	126,8	ΔT ≥ 16	100	0,59±0,09	0,26	126,8
TIP 2/Ia	1,71±0,16	1,96	12,7	14 ≤ ΔT < 16	53,1	1,97±0,16	1,96	0,5
TIP 2/IIa	0,56±0,16	0,32	75,0	/	/	/	/	/
TIP 2/IIIa	0,65±0,15	0,29	125,8	ΔT ≥ 16	44,7	0,71±0,14	0,29	144,8
TIP 2/IIIb	0,70±0,09	0,29	141,4	ΔT ≥ 16	100	0,70±0,09	0,29	141,4
TIP 3/Ib	0,92±0,09	0,52	76,5	ΔT ≥ 16	100	0,92±0,09	0,52	76,5
TIP 3/IIb	0,60±0,11	0,22	170,5	ΔT ≥ 16	90,9	0,52±0,11	0,22	136,4
TIP 3/IIIb	0,66±0,16	0,21	214,0	ΔT ≥ 16	46,5	0,43±0,13	0,21	104,8
TIP 3/IIIc	0,54±0,29	0,21	156,8	/	/	/	/	/
TIP 4/Ib	0,84±0,09	0,44	90,7	ΔT ≥ 16	100	0,84±0,09	0,44	90,7
TIP 4/IIb	0,51±0,11	0,21	144,2	ΔT ≥ 16	90,7	0,46±0,11	0,21	119,0
TIP 4/IIIb	0,81±0,17	0,19	325,2	ΔT ≥ 16	46,0	0,45±0,13	0,19	136,8
TIP 4/IIIc	0,43±0,29	0,19	126,2	/	/	/	/	/
TIP 5/Ib	0,60±0,08	0,29	106,9	ΔT ≥ 16	100	0,60±0,08	0,29	106,9
TIP 5/IIc	0,53±0,25	0,17	209,4	/	/	/	/	/
TIP 5/IIIc	0,63±0,45	0,16	291,0	/	/	/	/	/
TIP 5/IIIb	0,33±0,10	0,16	104,1	ΔT ≥ 16	100	0,33±0,10	0,16	104,1
TIP 6/Ib	1,36±0,09	1,92	29,2	ΔT ≥ 16	100	1,36±0,09	1,92	29,2
TIP 6/IIc	0,63±0,25	0,32	96,9	/	/	/	/	/
TIP 6/IIIc	0,74±0,44	0,29	155,2	/	/	/	/	/
TIP 6/IIIb	0,30±0,10	0,29	3,4	ΔT ≥ 16	100	0,30±0,10	0,29	3,4

8 ANALIZA UTJECAJA KOEFICIJENTA PRIJELAZA TOPLINE NA REZULTATE IN SITU ISPITIVANJA

Prijenos topline između unutarnjeg zraka i unutarnje površine zida sastoji se od prijenosa topline provođenjem kroz zrak uz površinu zida, konvekcijom odnosno strujanjem zraka te zračenjem. Budući da se prijenos topline provođenjem može zanemariti zbog vrlo niske toplinske provodljivosti zraka, na prijenos topline značajno utječu konvekcija i zračenje koji se opisuju veličinom koja se naziva koeficijent prijelaza topline, h [9]:

$$h = h_c + h_r, \quad (8.1)$$

gdje je h_c [W/m²K] koeficijent prijelaza topline konvekcijom, a h_r [W/m²K] koeficijent prijelaza topline zračenjem.

Koeficijent prijelaza topline konvekcijom, h_c je eksperimentalno određen koeficijent čija vrijednost ovisi o brojnim parametrima - geometriji promatranog elementa, obliku i položaju plohe, prirodni gibanja fluida, svojstvima fluida, brzini strujanja temperaturi zraka i temperaturi građevnog dijela [85]. Prijenos topline konvekcijom između unutarnjeg zraka i unutarnje površine zida rezultat je gibanja fluida. Ovisno o načinu pobude gibanja fluida, razlikujemo slobodnu (prirodnu) konvekciju i prisilnu konvekciju. Kod slobodne odnosno prirodne konvekcije gibanje fluida posljedica je postojanja temperaturnog gradijenta. S druge strane, prisilna konvekcija uzrokovana je umjetnim putem nametnutom razlikom tlakova korištenjem ventilatora, pumpi i sličnih uređaja.

Prijenos topline zračenjem između površine i zraka opisuje se koeficijentom prijelaza topline zračenjem, h_r . Za razliku od koeficijenta prijelaza topline konvekcijom, koeficijent prijelaza topline zračenjem ovisi u najvećoj mjeri o temperaturi.

Koeficijent prijelaza topline jedan je od parametara koji utječe na rezultate in situ mjerenja U vrijednosti. Projektne vrijednosti koeficijenta prijelaza topline definirane su u normi HRN EN ISO 6946:2017 [9]. Navedene vrijednosti predstavljaju samo procjenu te nisu nužno reprezentativne za stvarne prijenose topline između okoliša i zida. S druge strane, pouzdane vrijednosti koeficijenta prijelaza topline mogu se odrediti mjerenjem dodatnih fizikalnih parametara.

Kako bi se analizirao utjecaj koeficijenta prijelaza topline na točnost rezultata provedenih eksperimentalnih ispitivanja u okviru doktorske disertacije, tijekom in situ ispitivanja temperaturnom metodom osim temperatura mjereni su i dodatni fizikalni parametri - brzina strujanja zraka, površinske temperature okolnih elemenata komore i emisivnost. Navedeni parametri korišteni su za izračun koeficijenta prijelaza topline kako bi se analizirao njegov utjecaj na točnost rezultata. Dodatni fizikalni parametri potrebni za izračun koeficijenta prijelaza topline mjereni su tijekom ispitivanja U vrijednosti modela TIP 6/lb i 6/IIIb. Na temelju izmjerenih vrijednosti proveden je proračun koeficijenta prijelaza topline uzimajući u obzir utjecaj konvekcije i zračenja.

U tablici 8.2 usporedno su prikazane U vrijednosti dobivene:

- ispitivanjem HFM metodom,

- ispitivanjem TBM-om i korištenjem preporučene projektne vrijednosti koeficijenta prijelaza topline ($h=7,69$ W/m²K) definirane u normi HRN EN ISO 6946:2017 [9],
- ispitivanjem TBM-om i korištenjem proračunske vrijednosti koeficijenta prijelaza topline prema HRN EN ISO 6946:2017 [9] na temelju izmjerenih veličina - brzine strujanja zraka, površinske temperature zida i okolnih građevnih elemenata komore i emisivnosti,
- ispitivanjem TBM-om i korištenjem preporučenog izraza za proračun koeficijenta prijelaza topline konvekcijom u slučaju izoliranih površina prema Khalifa et al. [181] i
- proračunom na temelju karakteristika materijala preuzetih od proizvođača materijala.

Proračun koeficijenta prijelaza topline konvekcijom prema Khalifa et al. [181] proveden je samo za slučaj ispitivanja modela TIP 6/IIIb budući da izraz odgovara i preporučuje se samo za toplinski izolirane zidove. Izrazi korišteni za proračun koeficijenta prijelaza topline konvekcijom i zračenjem prikazani su u tablici 8.1.

Prema rezultatima prikazanim u tablici 8.2 vidljivo je kako se kod modela TIP 6/lb izmjerena U vrijednost dobivena korištenjem proračunske vrijednosti koeficijenta prijelaza topline prema HRN EN ISO 6946:2017 [9] na temelju dodatno izmjerenih fizikalnih parametara povećala u odnosu na vrijednost dobivenu korištenjem preporučene projektne vrijednosti koeficijenta prijelaza topline. U skladu s tim, korištenjem proračunske vrijednosti koeficijenta prijelaza topline prema HRN EN ISO 6946:2017 [9] na temelju dodatno izmjerenih fizikalnih parametara kod modela TIP 6/lb dobivena su i manja odstupanja u odnosu na HFM metodu. Međutim, kod modela TIP 6/IIIb proračun koeficijenta prijelaza topline korištenjem dodatno izmjerenih fizikalnih parametara prema HRN EN ISO 6946:2017 [9] rezultirao je većim U vrijednostima i većim odstupanjima od vrijednosti izmjerenih HFM metodom i TBM-om s preporučenom projektnom vrijednošću koeficijenta prijelaza topline. Kod modela TIP 6/IIIb najmanja, odnosno ista odstupanja dobivena su korištenjem izraza za proračun koeficijenta prijelaza topline konvekcijom prema Khalifa et al. [181] i korištenjem preporučene projektne vrijednosti koeficijenta prijelaza topline definirane u normi HRN EN ISO 6946:2017[9].

Tablica 8.1 Koeficijenti prijelaza topline konvekcijom i zračenjem

Izvor	h_c
HRN EN ISO 6946:2017 [9]	$4 + 4v$
Khalifa et al. [181]	$2,03 \cdot \Delta T^{0,14}$
Izvor	h_r
HRN EN ISO 6946:2017 [9]	$\varepsilon 4\sigma T_m^3$

Preliminarna analiza utjecaja koeficijenta prijelaza topline na rezultate in situ ispitivanja temperaturnom metodom i usporedba dobivenih vrijednosti s rezultatima ispitivanja HFM metodom pokazala je kako je korištenjem proračunskih vrijednosti koeficijenta prijelaza topline na temelju mjerenja dodatnih fizikalnih parametara moguće dobiti točnije rezultate. Međutim bitno je naglasiti kako se dobiveni rezultati odnose na mali uzorak analiziranih zidova, budući da je analiza provedena samo na jednom izoliranom i jednom neizoliranom zidu. Kako bi se donijeli pouzdani zaključci o veličini utjecaja koeficijenta prijelaza topline na rezultate in situ ispitivanja temperaturnom

metodom potrebno je provesti veći broj ispitivanja na većem uzorku neizoliranih i izoliranih zidova od različitih materijala.

Tablica 8.2 Usporedni prikaz U vrijednosti dobivenih ispitivanjem različitim metodama

MODEL TIP 6/Ib				
		U [W/m ² K]	Odstupanje u odnosu na vrijednost dobivenu HFM metodom	
			Mjerna oprema 1	Mjerna oprema 2
HFM metoda	Mjerna oprema 1	1,74±0,10	-	-
	Mjerna oprema 2	1,78±0,11	-	-
TBM	h=7,69 W/m ² K	1,36±0,09	-21,8%	-23,6%
	HRN EN ISO 6946 [9]	1,72±0,12	-1,15%	-3,4%
Teorijska vrijednost	HRN EN ISO 6946 [9]	1,92	10,3%	7,9%
MODEL TIP 6/IIIb				
		U [W/m ² K]	Odstupanje u odnosu na vrijednost dobivenu HFM metodom	
			Mjerna oprema 1	Mjerna oprema 2
HFM metoda	Mjerna oprema 1	0,52±0,03	-	-
	Mjerna oprema 2	0,42±0,03	-	-
TBM	h=7,69 W/m ² K	0,46±0,12	-11,5%	9,5%
	HRN EN ISO 6946 [9]	0,58±0,15	11,5%	38,1%
	Khalifa et al. [181]	0,46±0,12	-11,5%	9,5%
Teorijska vrijednost	HRN EN ISO 6946 [9]	0,29	-44,2%	-31,0%

9 CO-HEATING TEST

Co-heating test razvijen je nakon energetske krize u SAD-u, a predstavlja metodu mjerenja toplinskih gubitaka, (eng. *Total heat losses, THL*) u Vatima po Kelvinu, [W/K] [205, 206]. Metoda se sastoji od mjerenja potrošnje električne energije u Vatima potrebne za zagrijavanje i održavanje stabilne unutarnje temperature stambene jedinice, uobičajeno na temperaturu od 25 °C [207]. Mjerenjem količine električne energije koja je potrebna za održavanje stabilne dnevne unutarnje temperature, može se odrediti potrošnja objekta u Vatima, [W]. Dijeljenjem dnevne potrošnje električne energije i dnevne temperaturne razlike između unutarnjeg i vanjskog zraka dobiva se koeficijent toplinskih gubitaka, [W/K] (eng. *Heat loss coefficient, HLC*), a za daljnju usporedbu rezultata Co-heating testa koristi se vrijednost toplinskih gubitaka po kvadratnom metru, [W/m²K] (eng. *Heat Loss Parameter, HLP*) dobivena dijeljenjem koeficijenta toplinskih gubitaka s površinom stambene jedinice.

Energetska bilanca Co-heating testa podrazumijeva toplinske dobitke od sunčeva zračenja i električne energije sustava za grijanje, transmisijske i ventilacijske toplinske gubitke te uzima u obzir utjecaj toplinskih mostova. Prema tome energetska bilanca jednaka je [208]:

$$\text{Električna energija sustava za grijanje} + \text{Toplinski dobitci od sunca} = \text{Transmisijski gubici} + \text{Ventilacijski gubici} \quad (9.1)$$

Nakon što se postigne relativno stabilna unutarnja temperatura i toplinska ovojnica postigne toplinski kapacitet, energetska bilanca jednaka je [209]:

$$Q + R \cdot S = (\sum U \cdot A + C_v) \cdot \Delta T \quad (9.2)$$

pri čemu je Q ukupna izmjerena potrošnja energije za grijanje prostora [W], R je solarni otvor zgrade [m²], S je sunčevo zračenje [W/m²], $\sum U \cdot A$ je ukupni transmisijski toplinski gubitak kroz ovojnicu [W], C_v je ventilacijski toplinski gubitak [W] i ΔT je temperaturna razlika između unutarnjeg i vanjskog okoliša. Uzimajući u obzir energetska bilancu, koeficijent toplinskih gubitaka, HLC može se izraziti pomoću sljedećeg izraza [209]:

$$\text{HLC} = (Q + R \cdot S) / \Delta T \quad (9.3)$$

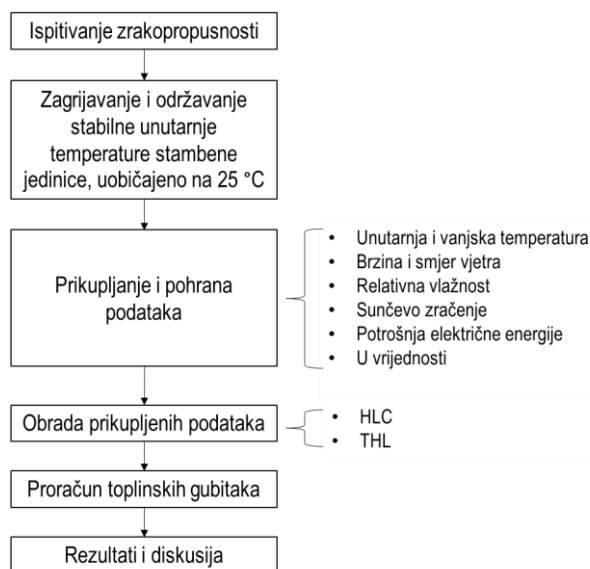
Koeficijent toplinskih gubitaka, HLC obično se procjenjuje pomoću kvazi-stacionarnog proračuna na temelju podataka prikupljenih tijekom provođenja testa [209]. Toplinski dobitci od solarnog zračenja tijekom Co-heating testa ne mjere se izravno, već se njegov učinak promatra kroz izmjereno smanjenje snage električne energije potrebne za održavanje konstantne unutarnje temperature, što se očituje u smanjenju HLC-a [209].

Tijekom provođenja Co-heating testa mjere se i dodatni parametri poput unutarnje i vanjske temperature, brzine i smjera vjetra, relativne vlažnosti, sunčevog zračenja i potrebne električne energije za održavanje stabilne unutarnje temperature [207]. Preporučljivo je da se uz Co-heating test koriste i dodatne metode poput mjerenja zrakopropusnosti, toplinskog toka kroz građevne dijelove i infracrvene termografije kako bi se stekao bolji uvid i razumijevanje glavnih procesa gubitaka topline [210]. Mjerenje zrakopropusnosti može se provesti prije Co-heating testa, poslije provedbe testa ili u oba slučaja pri čemu se za daljnju analizu uzima prosjek rezultata oba mjerenja

[208]. Mjerenje zrakopropusnosti provodi se iz razloga što provođenje Co-heating testa može uzrokovati dodatno pucanje ili isušivanje materijala, čime se mijenja stopa infiltracije [208].

Nakon što se postigne relativno stabilna unutarnja temperatura, preporučuje se provođenje Co-heating testa u trajanju od 2 do 4 tjedna tijekom sezone grijanja pri minimalnoj temperaturnoj razlici između unutarnje i vanjske temperature od 10 °C [210].

Sažeti prikaz metodologije provođenja Co-heating testa prikazan je na slici 9.1.



Slika 9.1 Dijagram toka provođenja Co-heating testa

Glavne prednosti Co-heating testa su [207]:

- karakterizacija ovojnice cijele zgrade i
- komplementarnost s različitim metodama.

S druge strane, glavni nedostaci testa su [207]:

- dugo trajanje testa (obično oko 2-3 tjedna),
- mogućnost provođenja testa samo tijekom zimskih mjeseci,
- količina instrumenata i opreme,
- potrošnja električne energije i
- nemogućnost pouzdane procjene u slučaju provođenja testa tijekom uporabe objekta.

Provođenje Co-heating testa omogućuje određivanje stvarnih energetske potreba. Međutim, kako bi se kvantificirao nesrazmjer između očekivane i stvarne potrošnje energije potrebno je izračunati projektne vrijednosti.

Projektna vrijednost koeficijenta transmisijskih toplinskih gubitaka izračunata je u ovom istraživanju korištenjem pojednostavljene metode prema EN 12831-3:2017 [211] :

$$H_{T,ie} = \sum A_k \cdot f_k \cdot (U_k + 0,10) [W/K], \quad (9.4)$$

pri čemu je A_k površina građevnog elementa (k) [m^2], f_k je temperaturni korekcijski faktor [-], U_k je U vrijednost građevnog elementa (k) [$W/(m^2 \cdot K)$], a 0,10 predstavlja dodatak za linearne toplinske mostove. U tablici 9.1. prikazani su korišteni temperaturni korekcijski faktori f_k za toplinske gubitke prema različitim okolnim plohama.

Tablica 9.1 Temperaturni korekcijski faktori f_k za toplinske gubitke prema različitim okolnim plohama [211]

Toplinski gubici	f_k	Opis
izravno prema okolini (vanjskom zraku)	1,00	za izolirane toplinske mostove
	1,40	za neizolirane toplinske mostove
	1,00	za prozore i vrata
prema tlu	0,3	za izolirane toplinske mostove
	0,42	za neizolirane toplinske mostove
preko krova	0,90	za izolirane toplinske mostove
	1,26	za neizolirane toplinske mostove

Ukupni transmisijski toplinski gubici $\Phi_{T,i}$ izračunati su pomoću sljedećeg izraza [211]:

$$\Phi_{T,i} = H_{T,i} \cdot (\theta_{int,i} - \theta_e) [W] \quad (9.5)$$

gdje je $\theta_{int,i}$ unutarnja projektna temperatura (obično 20°C za stambene zgrade) [°C], a θ_e vanjska projektna temperatura [°C]. Za grad Osijek vanjska projektna temperatura u zimskom razdoblju iznosi -18°C.

Ukupni koeficijent ventilacijskih toplinskih gubitaka određen je prema izrazu [211]:

$$H_{V,i} = 0,34 \cdot V_i \cdot n_{min} [W/K] \quad (9.6)$$

pri čemu je V_i volumen grijanog prostora (i) određen na temelju unutarnjih dimenzija, a n_{min} je minimalan broj izmjena unutarnjeg zraka s vanjskim zrakom [h^{-1}]. Približno, volumen grijanog prostora iznosi 0,8 puta od volumena prostora izračunatog na temelju vanjskih dimenzija [m^3], a vrijednosti broja izmjena unutarnjeg zraka s vanjskim zrakom kod stambenih zgrada u kojoj borave ili rade ljudi treba iznositi najmanje $n = 0,5 h^{-1}$ prema trenutno važećoj regulativi [83].

Ukupni ventilacijski toplinski gubici izračunati su prema izrazu [211]:

$$\Phi_{V,i} = H_{V,i} \cdot (\theta_{int,i} - \theta_e) [W] \quad (9.7)$$

Na kraju, ukupni toplinski gubici određeni su kao zbroj ukupnih ventilacijskih i transmisijskih gubitaka prema izrazu [211]:

$$H_i = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} [W], \quad (9.8)$$

pri čemu je $\Phi_{T,i}$ projektna vrijednost ukupnih transmisijskih toplinskih gubitaka grijanog prostora (i), a $\Phi_{V,i}$ projektna vrijednost ukupnih ventilacijskih toplinskih gubitaka grijanog prostora (i).

9.1 Analiza rezultata primjenom metode Co-heating

Co-heating test je proveden tijekom ispitivanja modela TIP 5/lb i 6/lb. Prije početka testa, Blower door metodom je ispitana zrakopropusnost komore, slika 9.2. In situ ispitivanje U vrijednosti modela zidova TIP 5/lb i 6/lb provedeno je TBM-om i HFM metodom, a U vrijednost zidova komore ispitana je TBM-om, slika 9.3. In situ ispitivanja dvjema metodama provedena su s ciljem ocjene primjenjivosti TBM-e, usporedbe rezultata i procjene veličine utjecaja na rezultate Co-heating testa. Tijekom in situ ispitivanja U vrijednosti mjerena je potrošnja energije u kWh za održavanje stabilne unutarnje temperature. Za potrebe testa, unutarnja temperatura postavljena je na 30°C i održavana stabilnom kako bi se ostvarila što veća temperaturna razlika između unutarnjeg i vanjskog zraka. Na taj način, korištenjem sustava za grijanje postavljenog unutar komore postignuta je temperaturna razlika veća od 15°C tijekom cijelog perioda provođenja testa. Lokacija senzora korištenih prilikom in situ ispitivanja U vrijednosti istražena je infracrvenom termografijom kako bi se izbjegla mjesta toplinskih mostova, nepravilnosti, pukotina i sl. što može značajno utjecati na rezultate mjerenja [212].

Co-heating test je proveden u trajanju od 40 dana pri čemu su bilježeni prosječni podatci u intervalu od 10 min. Grijanje je uključeno četiri mjeseca ranije zbog potreba provođenja drugog ispitivanja, a kako bi se smanjio utjecaj akumulacije topline unutar građevnih elemenata. Samim tim izbjegnuta je mogućnost pojave dodatnih pukotina ili isušavanja materijala kao posljedica provođenja testa zbog čega je mjerenje zrakopropusnosti provedeno samo prije provođenja Co-heating testa. Sažeti opis eksperimentalno ispitanih zidova, izmjerenih U vrijednosti, teorijskih U vrijednosti izračunatih prema normi HRN EN ISO 6946:2017 [9] kao i temperaturnih uvjeta prilikom provođenja in situ mjerenja, prikazan je u tablici 9.2.



Slika 9.2 Oprema za ispitivanje zrakopropusnosti komore Blower door metodom



Slika 9.3 Oprema za in situ ispitivanje U vrijednosti TBM-om i HFM metodom

Tablica 9.2 Sažeti prikaz U vrijednosti eksperimentalno ispitanih zidova

Oznaka	Vrsta zida	U_t [W/m ² K]	$U_{m,HFM}$ [W/m ² K]	$U_{m,TBM}$ [W/m ² K]
Z1	Zid od laganih betonskih blokova debljine 30 cm toplinski izoliran sa 10 cm EPS-a	0,20	-	0,68
Z2	Zid od betonskih blokova s recikliranom opekom debljine 12 cm i unutarnjom žbukom debljine 2 cm – model TIP 6/lb	1,92	1,85	1,42
Z3	Zid od šuplje blok opeke sa integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune debljine 25 cm i unutarnjom žbukom debljine 2 cm – model TIP 5/lb	0,29	0,46	0,62

Rezultati Co-heating testa prikazani su u tablici 9.3. Iako se predlaže rezultate Co-heating testa prikazati pomoću dnevnih vrijednosti, zbog dugog razdoblja ispitivanja u ovom istraživanju, izmjerene vrijednosti potrošene el. energije, unutarnje i vanjske temperature zajedno s vanjskom relativnom vlagom, uprosječene su za razdoblje od 10 dana, a zatim dane kao dnevni prosjek. Stvarne vrijednosti HLC-a ($(Q/\Delta T)_{1d}$ u Vatima po Kelvinu) i THL-a (količina potrošene energije za jedan dan u Vatima, Q_1) ispitane komore u daljnjoj analizi uspoređene su s projektnim vrijednostima. Posljednji stupac u tablici 9.3 prikazuje sve prosječne vrijednosti tijekom ukupnog testnog razdoblja od 40 dana. Na taj se način rezultati ispitivanja Co-heating testa mogu se promatrati kao pet različitih Co-heating testova za četiri vremenska razdoblja; svaki u trajanju od 10 dana te ukupni rezultati ispitivanja nakon 40 dana.

Tablica 9.3. Rezultati Co-heating testa

Vrijednosti dobivene mjerenjem	Trajanje ispitivanja - 10 dana: od 5.2.2019. do 15.2.2019.	Trajanje ispitivanja - 10 dana: od 15.2.2019. do 25.2.2019.	Trajanje ispitivanja - 10 dana: od 25.2.2019. do 7.3.2019.	Trajanje ispitivanja - 10 dana: od 7.3.2019. do 18.3.2019.	Trajanje ispitivanja - 40 dana: od 5.2.2019. do 18.3.2019.
Potrošena el. energija, E [kWh]	68,32	62,48	47,80	46,20	224,80
Vremenski period, T_{10d} [h]	242,00	238,00	239,00	261,00	980,00
Prosječna RH vanjskog zraka u 10 dana, [%]	75,07	61,34	53,73	51,59	60,13
Potrošena energija za 10 dana, Q_{10} [W]	282,31	262,52	200,00	177,01	229,39
Potrošena energija za 1 dan, Q_1 [W]	28,23	26,25	20,00	17,70	22,94
Prosječna unutarnja temperatura u 10 dana, $T_{i,10}$ [°C]	28,99	29,06	29,41	28,42	29,25
Prosječna vanjska temperatura u 10 dana, $T_{o,10}$ [°C]	2,96	3,80	8,86	10,44	6,59
$\Delta T = T_i - T_o$ [°C]	26,03	25,26	20,55	17,98	22,66
$(Q/\Delta T)_{10d}$ [W/K]	10,85	10,39	9,73	9,84	10,12
$(Q/\Delta T)_{1d}$ [W/K]	1,08	1,04	0,97	0,98	1,01

Projektne vrijednosti ukupnih ventilacijskih i transmisijskih toplinskih gubitaka, izračunate su korištenjem pojednostavljene metode prema EN 12831-3:2017 [211] i prikazane u tablici 9.4. Način proračuna prikazanih vrijednosti opisan je u poglavlju 9. Za potrebe proračuna korišten je podatak o broju dana u sezoni grijanja za grad Osijek koji prema važećoj regulativi iznosi 178,9 dana.

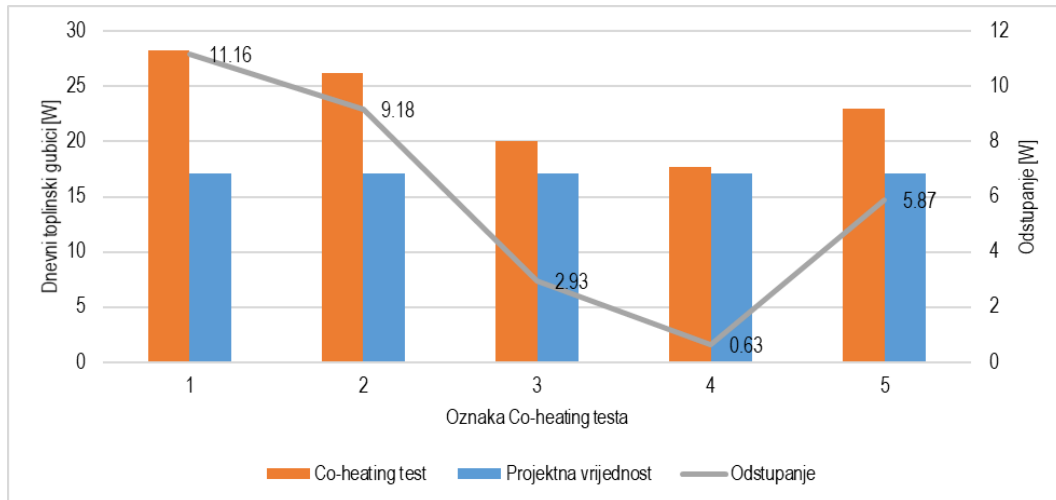
Tablica 9.4. Projektne vrijednosti ukupnih ventilacijskih i transmisijskih toplinskih gubitaka te koeficijenata toplinskih gubitaka

Vrijednosti temperatura					
Projektna vrijednost vanjske temperature	θ_e	°C	-18		
Projektna vrijednost unutarnje temperature	$\theta_{int,i}$	°C	20		
Projektna razlika temperature	$\theta_{int,i} - \theta_e$	°C	38		
Transmisijski gubici					
Oznaka	Građevni element	f_k	A_k	U_k	$f_k \cdot A_k \cdot (U_k + 0,10)$
		[-]	[m ²]	[W/(m ² ·K)]	[W/K]
C	Strop prema vanjskom zraku	1,26	16,61	0,25	7,33
F	Pod prema tlu	0,42	16,61	4,05	28,95
Z1	Vanjski zid 1	1,4	44,22	0,2	18,57
Z2	Vanjski zid 2	1,4	5,28	1,92	14,93
Z3	Vanjski zid 3	1,4	5,28	0,29	2,88
D	Ulazna vrata	1	2,1	1,4	3,15
Ukupni koeficijent transmisijskih toplinskih gubitaka $H_{T,i} = \sum f_k \cdot A_k \cdot (U_k + 0,10)$ [W/K]					75,81
Ukupni transmisijski toplinski gubici $\Phi_{T,i} = H_{T,i} \cdot (\theta_{int,i} - \theta_e)$ [W]					2880,91
Ventilacijski toplinski gubici					
Unutarnji volumen	V_i	m ³	26,7		
Minimalan broj izmjena zraka	n_{min}	h ⁻¹	0,5		
Ukupni koeficijent ventilacijskih toplinskih gubitaka $H_{V,i} = 0,34 \cdot V_i \cdot n_{min}$ [W/K]					4,54
Ukupni ventilacijski toplinski gubici $\Phi_{V,i} = H_{V,i} \cdot (\theta_{int,i} - \theta_e)$ [W]					172,48
Ukupni ventilacijski i transmisijski toplinski gubici $\Phi_{T,i} + \Phi_{V,i}$ [W]					3053,39
Ukupni dnevni koeficijent toplinskih gubitaka [W/K]					0,45
Ukupni dnevni toplinski gubici, THL [W]					17,07

Kako bi se istražio i kvantificirao nesrazmjer između očekivane i stvarne potrošnje energije, u nastavku su grafički prikazane usporedbe rezultata Co-heating testa s projektним vrijednostima ukupnih toplinskih gubitaka. Usporedba rezultata prikazana je za tri različita slučaja proračuna projektних vrijednosti. U prvom slučaju su prilikom proračuna projektних vrijednosti toplinskih gubitaka korištene projektne vrijednosti svih varijabli potrebnih za proračun. U drugom slučaju, projektne vrijednosti toplinskih gubitaka dobivene su korištenjem izmjerenih prosječnih temperatura, izmjerene vrijednosti n_{50} (5,19 h⁻¹) i in situ izmjerene U vrijednosti zidova Z2 i Z3 HFM metodom, a za preostale varijable korištene su teorijske vrijednosti. Budući da zidovi Z1 nisu ispitani HFM metodom, u drugom slučaju proračuna projektних vrijednosti korištena je izmjerena U vrijednost TBM-om. Na kraju, u trećem slučaju, projektne vrijednosti toplinskih gubitaka dobivene su korištenjem izmjerenih prosječnih temperatura, izmjerene

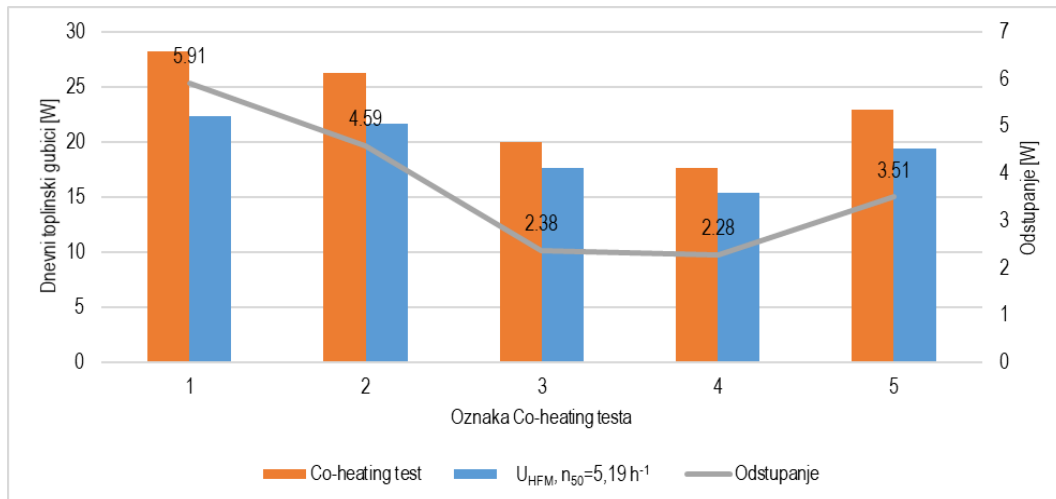
vrijednosti n_{50} ($5,19 \text{ h}^{-1}$) i in situ izmjerene U vrijednosti vanjskih zidova TBM-om, a za preostale varijable korištene su teorijske vrijednosti.

Na slici 9.4 grafički je prikazana usporedba rezultata potrebne energije iz tablice 9.3 dobivene Co-heating testom s projektnim vrijednostima ukupnih dnevnih toplinskih gubitaka prikazanih u tablici 9.4. Proračun projektnih vrijednosti proveden je korištenjem teorijskih vrijednosti svih ulaznih varijabli. Rezultati su prikazani za pet vremenskih perioda, od kojih su četiri perioda u trajanju od 10 dana dok peti period predstavlja ukupne rezultate ispitivanja nakon 40 dana.

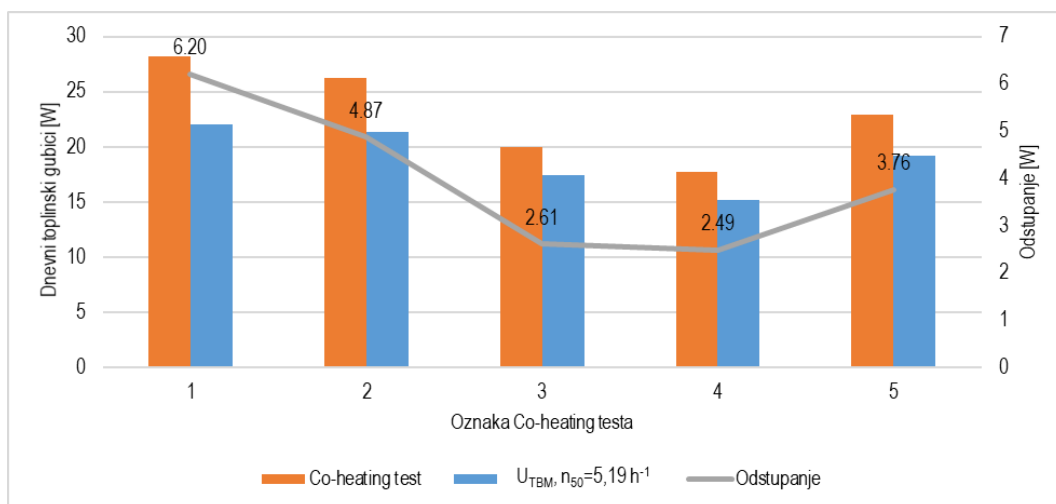


Slika 9.4 Usporedni prikaz rezultata Co-heating testa i projektnih vrijednosti

Na slici 9.5 grafički je prikazana usporedba rezultata Co-heating testa s projektnim vrijednostima ukupnih toplinskih gubitaka dobivenih korištenjem izmjerenih prosječnih temperatura, izmjerene vrijednosti n_{50} ($5,19 \text{ h}^{-1}$) i in situ izmjerene U vrijednosti vanjskih zidova HFM-om navedene u tablici 9.2. Usporedba rezultata Co-heating testa s projektnim vrijednostima ukupnih toplinskih gubitaka dobivenih korištenjem izmjerenih prosječnih temperatura, izmjerene vrijednosti n_{50} ($5,19 \text{ h}^{-1}$) i in situ izmjerene U vrijednosti vanjskih zidova TBM-om (tablica 9.2) prikazana je na slici 9.6. Prikazani rezultati pokazuju kako su korištenjem rezultata in situ ispitivanja vanjskih zidova TBM-om dobivene projektne vrijednosti toplinskih gubitaka veće za 1% u odnosu na projektne vrijednosti toplinskih gubitaka dobivene korištenjem rezultata in situ ispitivanja vanjskih zidova HFM metodom. Međutim, bitno je naglasiti kako se radi o malim površinama ispitanih zidova zbog čega metoda in situ ispitivanja U vrijednosti vanjskih zidova nema značajan utjecaj na toplinske gubitke. Na temelju ovih preliminarnih rezultata, općenito se može zaključiti da se korištenjem in situ izmjerenih U vrijednosti TBM-om mogu procijeniti toplinski gubici te smanjiti nesrazmjer između očekivane i stvarne potrošnje.

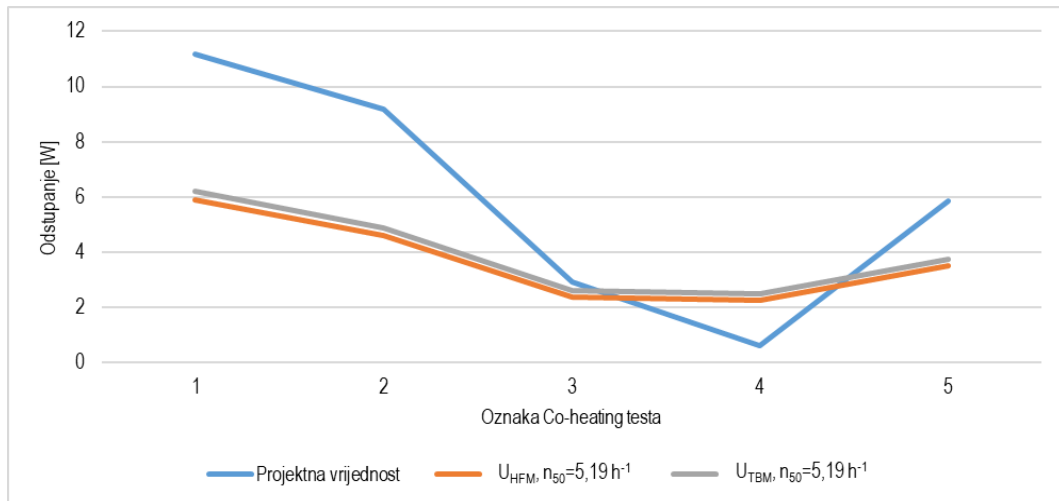


Slika 9.5 Usporedni prikaz rezultata Co-heating testa i projektnih vrijednosti dobivenih korištenjem izmjerene vrijednosti n_{50} i stvarnih U vrijednosti izmjerenih HFM metodom



Slika 9.6 Usporedni prikaz rezultata Co-heating testa i projektnih vrijednosti dobivenih korištenjem izmjerene vrijednosti n_{50} i stvarnih U vrijednosti izmjerenih TBM metodom

Sažeti prikaz razlike između očekivane i stvarne potrošnje energije za sva tri slučaja proračuna projektnih vrijednosti toplinskih gubitaka prikazan je na slici 9.7. Prema rezultatima analize, jasno je vidljivo kako se korištenjem stvarnih odnosno izmjerenih vrijednosti umjesto projektnih vrijednosti prilikom proračuna toplinskih gubitaka smanjuje nesrazmjer između očekivane i stvarne potrošnje. Jedino odstupanje od navedenog zaključka vidljivo je u četvrtom periodu ispitivanja gdje su stvarni toplinski gubici manji od projektnih. Ovakav rezultat može se objasniti samo činjenicom da je jedino u četvrtom periodu izmjerena srednja temperaturna razlika, na temelju koje je proveden proračun, manja od 20°C . U tom vremenskom razdoblju prosječna vanjska temperatura bila je viša, $10,44^{\circ}\text{C}$, u usporedbi sa $2,96^{\circ}\text{C}$, $3,80^{\circ}\text{C}$ i $8,86^{\circ}\text{C}$ u vremenskim razdobljima 1, 2 i 3. S obzirom na to da se unutarnja temperatura tijekom sva četiri razdoblja nije značajnije mijenjala to je utjecalo na niže vrijednosti dnevne potrošnje energije.



Slika 9.7 Usporedba odstupanja projektnih i stvarnih toplinskih gubitaka

Na temelju analize i prikazanih rezultata općenito se može zaključiti da korištenje projektnih vrijednosti rezultira manjim energetske potrebama u odnosu na stvarnu potrošnju. Veća temperaturna razlika tijekom mjerenja i korištenje stvarnih, izmjerenih vrijednosti varijabli rezultira manjim nesrazmjerom između očekivane i stvarne potrošnje energije što dokazuje da su projektne vrijednosti varijabli koje utječu na energetske učinkovitost zgrada (U vrijednosti) često precijenjene vjerojatno zbog marketinških razloga. Pojava novih građevinskih materijala i izolacija na tržištu u posljednjem desetljeću mogla bi uzrokovati još veći nesrazmjer između očekivane i stvarne potrošnje energije u budućnosti budući da za nove materijale nedostaju podatci o degradaciji toplinskih svojstava materijala tijekom uporabe i veći broj istraživanja u različitim uvjetima.

10 IZBOR EKONOMSKI OPRAVDANE TEHNOLOGIJE OBNOVE VANJSKIH ZIDOVA I ANALIZA UŠTEDA

Budući da rezultati eksperimentalnih ispitivanja pokazuju da su U vrijednosti bez obzira na primijenjenu metodu precijenjene za toplinski izolirane zidove, a za toplinski neizolirane podcijenjene, u nastavku je napravljena procjena utjecaja rezultata in situ ispitivanja U vrijednosti temperaturnom metodom na potrošnju energije i emisiju CO₂ na stvarnom primjeru energetske certificirane obiteljske kuće s područja Osječko-baranjske županije.

Glavne karakteristike analizirane obiteljske kuće prikazane su u tablici 10.1. Kuća je prirodno ventilirana, a za grijanje se koristi sustav centralnog grijanja na plin. Vanjski zidovi obiteljske kuće su od pune glinene opeke, karakteristične za područje lokacije obiteljske kuće.

Tablica 10.1 Karakteristike obiteljske kuće

Geometrija		
Korisna površina, A_k [m ²]	80,33	
Oplošje grijanog dijela zgrade, A [m ²]	279,83	
Obujam grijanog dijela zgrade, V_e [m ³]	172,27	
Broj etaža	1	
Faktor oblika, f_0 [m ⁻¹]	1,23	
Karakteristike vanjske ovojnice		Površina [m ²]
Vanjski zidovi debljine 25 cm		51,15
Zidovi između unutarnjih negrijanih prostora debljine 25 cm		9,27

Analiza utjecaja rezultata in situ ispitivanja U vrijednosti temperaturnom metodom provedena je variranjem toplinskih karakteristika vanjskih zidova analizirane obiteljske kuće. Za potrebe procjene utjecaja toplinskih karakteristika vanjskih zidova na potrošnju energije, emisiju CO₂ i troškove obnove provedena je usporedba rezultata dobivenih korištenjem:

- proračunskih U vrijednosti, U_i ,
- in situ izmjerenih U vrijednosti primjenom temperaturne metode, U_m i
- procijenjenih U vrijednosti na temelju predloženih matematičkih modela, U_p .

Analiza je provedena na zidovima od pune opeke bez izolacije i nakon provedbe mjere povećanja energetske učinkovitosti. Budući da U vrijednost neizoliranog zida od opeke koji čini vanjsku ovojnicu ne zadovoljava trenutno postavljene zahtjeve o najvećim dopuštenim koeficijentima prolaska topline definirane TPRUETZZ [83], na temelju proračuna predložena je mjera povećanja toplinske zaštite vanjskih zidova postavljanjem 10 cm toplinske izolacije od kamene vune. Međutim, bitno je naglasiti da iako proračunska U vrijednost vanjskog zida od opeke sa 10 cm toplinske izolacije od kamene vune ($\lambda=0,035$ W/mK) zadovoljava postavljene zahtjeve o najvećim dopuštenim koeficijentima prolaska topline definirane TPRUETZZ [83], in situ mjerenjem dobivene su značajno više vrijednosti, tablica 10.2.

Proračunske, izmjerene i procijenjene U vrijednosti korištene za potrebe analize prikazane su u tablici 10.2. Za potrebe procjena utjecaja rezultata in situ ispitivanja U vrijednosti temperaturnom metodom na potrošnju energije i emisiju CO₂ korišteni su eksperimentalni podatci modela TIP 2/Ia i 2/IIIa. S obzirom na prikazane rezultate eksperimentalnih ispitivanja temperaturnom metodom i definirane smjernice za obradu izmjerenih podataka, za potrebe energetske analize promatrane su U vrijednosti eksperimentalno ispitanog zida od pune opeke izmjerene pri temperaturnim razlikama od 14°C i više.

Tablica 10.2 Proračunske, in situ izmjerene i procijenjene U vrijednosti vanjskih zidova

Vrsta zida	U _t [W/(m ² K)]	U _m [W/(m ² K)]	U _p [W/(m ² K)]
Puna opeka bez toplinske izolacije	1,96	1,82	1,82
Puna opeka sa 10 cm TI od kamene vune	0,29	0,68	0,69

Za zadane karakteristike zida napravljen je proračun specifične godišnje potrebne toplinske energije za grijanje, primarne energije, isporučene energije, troškova grijanja i godišnje emisije CO₂ u programu KI expert PLUS [213]. Ki Expert PLUS računalni je program za proračun toplinske zaštite i racionalnu uporabu energije te izradu energetskih certifikata zgrada. U tablici 10.3 prikazani su rezultati proračuna za proračunske, izmjerene i procijenjene U vrijednosti. Prema prikazanim rezultatima vidljivo je kako podcjenjivanje toplinskih svojstava neizoliranog zida, u ovom slučaju pune opeke, utječe na povećanje proračunske potrošnje, emisije CO₂ i troškova u iznosu od 5% u odnosu na in situ izmjerene U vrijednosti. Suprotno, precjenjivanje toplinskih svojstava kod toplinski izoliranog zida od opeke s 10 cm kamene vune rezultira smanjenjem proračunske odnosno teorijske potrošnje za 5% u odnosu na in situ izmjerene U vrijednosti. Što se tiče rezultata dobivenih korištenjem procijenjenih U vrijednosti korištenjem predloženih matematičkih modela vidljivo je kako razvijeni matematički modeli daju prihvatljivu procjenu U vrijednosti, te samim time i prihvatljivu procjenu potrebne energije, troškova i emisije CO₂ budući da su u usporedbi s rezultatima in situ mjerenja rezultati u slučaju neizoliranog zida istovjetni dok se za slučaj izoliranog zida razlikuju za samo 1%.

Dobiveni rezultati potvrđuju rezultate prethodno provedenih istraživanja u literaturi koji pokazuju postojanje nesrazmjera između očekivane i stvarne potrošnje energije. Iako se razlika od 5% u potrošnji energije i emisiji CO₂ dobivena korištenjem proračunskih i izmjerenih U vrijednosti čini relativno mala, bitno je naglasiti kako se dobiveni rezultati odnose na obiteljsku kuću korisne površine od 80 m², te oplošje zidova od 60,42 m². Uzme li se u obzir veličina postojećeg stambenog fonda koji ne zadovoljava trenutne propise o toplinskoj zaštiti rezultati nisu zanemarivi te predstavljaju podlogu za daljnja istraživanja.

Tablica 10.3 Rezultati proračuna potrebne toplinske energije za grijanje, troškova i emisije CO₂

		Specifična godišnja potrebna toplinska energija za grijanje $Q''_{h,nd}$ [kWh/(m ² a)]	Specifična godišnja primarna energija E''_{prim} [kWh/(m ² a)]	Specifična godišnja isporučena energija E''_{del} [kWh/(m ² a)]	Emisija CO ₂	Troškovi grijanja
MODEL TIP 2/Ia	U _t	182,24	177,8	162,38	2872,25	4078,86
	U _m	173,48	169,41	154,71	2736,61	3886,23
	U _p	173,48	169,41	154,71	2736,61	3886,23
	(U _m -U _t)/U _t	-5%	-5%	-5%	-5%	-5%
	(U _p -U _t)/U _t	-5%	-5%	-5%	-5%	-5%
MODEL TIP 2/IIIa	U _t	136,56	133,99	122,36	2164,46	3073,73
	U _m	144	141,13	128,88	2279,78	3237,49
	U _p	144,52	141,62	129,34	2287,76	3248,83
	(U _m -U _t)/U _t	5%	5%	5%	5%	5%
	(U _p -U _t)/U _t	6%	6%	6%	6%	6%

Na temelju rezultata proračuna i odabrane tehnologije energetske obnove vanjskih zidova analiziran je potencijal i troškovi predložene obnove provedbom financijske analize. Financijska analiza provedena je uzimajući u obzir troškove ulaganja i uštede ostvarene nakon provedbe odabrane mjere energetske učinkovitosti za sva tri analizirana slučaja. Za potrebe ovog istraživanja pretpostavlja se da se obnova vanjskih zidova izvodi u jednoj godini. Stoga se investicijski troškovi i uštede obračunavaju po cijenama u trenutku ulaganja. Izračuni troškova uključuju troškove ulaganja u mjere energetske učinkovitosti. U tablici 10.4, prikazani su podatci o početnom trošku ulaganja i uštedi troškova nakon provođenja odabrane mjere energetske obnove vanjskih zidova. Investicijski troškovi predložene mjere energetske učinkovitosti izračunati su na temelju potrebnog materijala i količine radova dobivenih iz troškovnika proizvođača i građevinskih izvođača radova.

Tablica 10.4 Početni trošak ulaganja i godišnja ušteda troškova energetske obnove vanjskih zidova

U Vrijednost	Površina zidova	Investicijski troškovi obnove [kn/m ²]	Investicijski troškovi obnove [kn]	Godišnja ušteda troškova grijanja [kn/(m ² a)]	Godišnja ušteda troškova grijanja [kn]
U _t				12,51	1005,13
U _m	60,42	250	15.105,00	8,08	648,74
U _p				7,93	637,4

Isplativost energetske obnove vanjskih zidova obiteljske kuće ocijenjena je pomoću dvije metode - razdoblja povrata i jednostavne stope povrata, tablica 10.5. Razdoblje povrata je definirano kao vrijeme potrebno za povratak početne investicije s novčanim tijekom iz investicije [214]. Izračunava se kao omjer početne investicije i godišnje uštede troškova potrošnje energije nakon obnove. Obično se izražava u godinama koje predstavljaju broj godina potrebnih za povrat početnog ulaganja. Druga metoda koja se koristi za procjenu potencijala predložene obnove - jednostavna stopa povrata definira se kao odnos dobiti u prosječnoj godini uporabe građevine i ukupnog uloženeog kapitala [215]. Rezultati analize razdoblja povrata i jednostavne stope povrata za predloženu mjeru obnove za sva tri slučaja U vrijednosti prikazani su u tablici 10.5. Razdoblje povrata i jednostavna stopa povrata izračunati su na

temelju prethodno prikazanih podataka o troškovima i uštedama u tablici 10.4. Prema rezultatima prikazanim u tablici 10.5 vidljiv je značajan utjecaj stvarnih U vrijednosti na razdoblje povrata investicije obnove analiziranih vanjskih zidova pri čemu se razdoblje povrata u odnosu na proračunsku (teorijsku) vrijednost produžilo za 8 godina.

Tablica 10.5 Razdoblje povrata i jednostavna stopa povrata

U vrijednost	Razdoblje povrata	Jednostavna stopa povrata
U_t	15,03	6,65%
U_m	23,28	4,29%
U_p	23,70	4,22%

Rezultati analize procjene utjecaja rezultata in situ ispitivanja U vrijednosti temperaturnom metodom na potrošnju energije i emisiju CO₂ pokazuju kako je bitno poznavanje stvarnih U vrijednosti vanjskih zidova koji čine najveći udio u vanjskoj ovojnici zidova s obzirom na značajan utjecaj na potrošnju energije i emisiju CO₂ te samim time i na odabir primjerene tehnologije energetske obnove i razdoblje povrata investicije. Donošenje investicijskih odluka temeljenih na proračunskim vrijednostima toplinski izoliranih zidova uzrokuje nesrazmjer između očekivane i stvarne potrošnje. Precjenjivanje U vrijednosti rezultirat će precjenjivanjem potrošnje energije što direktno utječe na isplativost ulaganja i očekivano razdoblje povrata investicije od strane korisnika.

11 MATEMATIČKI MODELI PROCJENE U VRIJEDNOSTI TEMPERATURNOM METODOM

Jedan od ciljeva istraživanja ove doktorske disertacije je istražiti mogućnost predviđanja U vrijednosti vanjskih zidova in situ temperaturnom metodom razvojem pojednostavljenog matematičkog modela. Budući da dosadašnja metodologija in situ ispitivanja U vrijednosti vanjskih zidova zahtjeva mjerenje tri temperature, istražena je mogućnost razvoja jednostavnog modela procjene U vrijednosti na temelju samo jedne neovisne varijable.

Kako bi se istražila veza između U vrijednosti i varijabli koje utječu na nju, potrebno je stvaranje baze podataka iz koje će se ta veza moći definirati regresijskom analizom. Regresijskom analizom moguće je analitički izraziti odnos između jedne ovisne (U vrijednost) i jedne neovisne varijable. U tu svrhu analizirali su prethodno obrađeni eksperimentalni podatci ispitanih modela zidova. Prema tim podacima određeno je koji se modeli zidova mogu koristiti pri definiranju baze podataka za izradu matematičkog modela. Prema obrađenim rezultatima sedmodnevnih ispitivanja 24 modela kao valjani podatci definirani su podatci izmjereni tijekom sezone grijanja pri različiti temperature većoj ili jednakoj od 10°C. Dodatni uvjet koji je morao biti zadovoljen je da izmjereni podatci obuhvaćaju minimalno 43% od ukupnog broja podataka prikupljenih tijekom sedam dana ispitivanja, a što u odnosu na sedam dana mjerenja predstavlja tri dana ispitivanja. S obzirom na definirane uvjete, baza podataka formirana je na temelju vrijednosti izmjerenih tijekom ispitivanja 18 različitih modela zidova u sezoni grijanja. Analizom nisu obuhvaćeni podatci odnosno rezultati ispitivanja 6 modela provedenih tijekom sezone hlađenja budući da tijekom ispitivanja nije ostvarena odgovarajuća razlika temperature između unutarnjeg i vanjskog zraka što ih čini nepouzdanima za daljnju analizu i primjenu.

11.1 Odabir statističke metode i varijabli modela

Budući da metodologija in situ ispitivanja U vrijednosti vanjskih zidova temperaturnom metodom zahtjeva mjerenje tri temperature, istražena je mogućnost razvoja pojednostavljenog linearnog regresijskog modela procjene U vrijednosti na temelju samo jedne neovisne varijable. U statistici, modelom jednostavne regresije analitički se izražava odnos među dvjema pojavama predloženim vrijednostima numeričkih varijabli [216].

Opći oblik modela jednostavne linearne regresije može se zapisati izrazom:

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, n, \quad (11.1)$$

gdje su x_1, x_2, \dots, x_n vrijednosti nezavisnih varijabli X , α i β su nepoznati parametri linearne veze koje treba odrediti tj. procijeniti u postupku modeliranja, a $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n$ predstavljaju varijable greške koja je dodana na linearnu vezu, a koja model čini statističkim [217].

Na osnovu metodologije za provođenje in situ ispitivanja, detaljnog pregleda literature i provedenih eksperimentalnih ispitivanja, utvrđena je baza podataka neovisnih varijabli koje se mogu smatrati relevantnim za definiranje modela procjene U vrijednosti vanjskih zidova temperaturnom metodom. Provođenjem in situ ispitivanja

temperaturnom metodom prikupljeni su podatci o unutarnjoj temperaturi zraka, vanjskoj temperaturi zraka, temperaturi na površini ispitivanog zida i U vrijednosti. Za potrebe analize su osim navedenih izmjerenih vrijednosti definirane i dodatne dvije varijable: razlika između unutarnje i vanjske temperature zraka (ΔT) te razlika između unutarnje temperature zraka i temperature na površini zida ($T_i - T_w$). Popis neovisnih varijabli prikazan je u tablici 11.1.

Tablica 11.1 Popis mogućih neovisnih varijabli za razvoj modela procjene U vrijednosti temperaturnom metodom

Varijabla	Opis varijable	Jedinica mjere
T_i	Unutarnja temperatura zraka	°C
T_e	Vanjska temperatura zraka	°C
T_w	Temperatura na površini ispitivanog zida	°C
ΔT	Razlika između unutarnje i vanjske temperature zraka	°C
$T_i - T_w$	Razlika između unutarnje temperature zraka i temperature na površini zida	°C

Budući da rezultati in situ ispitivanja u velikoj mjeri ovise o vrsti ispitivanog zida te temperaturnim uvjetima pri kojima se ispitivanja provode, na temelju eksperimentalnih rezultata ispitivanja 18 različitih modela zidova u sezoni grijanja predloženo je šest modela za procjenu U vrijednosti, tablica 11.2. Predloženi modeli definirani su za različite uvjete ispitivanja, vrstu materijala, gustoću materijala i stupanj izoliranosti zida. Na temelju prethodno provedenih sedmodnevnih ispitivanja definirane su baze podataka odnosno setovi podataka koji su korišteni za potrebe razvoja pojedinih modela.

Tablica 11.2 Opis predloženih modela

Model	Uvjeti ispitivanja	Vrsta materijala	Gustoća materijala [kg/m ³]	Stupanj izoliranosti	Baza podataka - Rezultati ispitivanja modela
Model 1	$\Delta T = 15^\circ\text{C}$	Opečni zidni elementi	800-1600	neizolirani	TIP 1/Ia, 2/Ia
Model 2				izolirani	TIP 1/IIa, 1/IIIa, 2/IIa, 2/IIIa
Model 3	$T_i = 30^\circ\text{C}$	Opečni zidni elementi	620-780	neizolirani	TIP 3/Ib
Model 4				izolirani	TIP 3/IIb, 3/IIIb, 5/Ib, 5/IIIb
Model 5	$T_i = 30^\circ\text{C}$	Lagani betonski zidni elementi	300-850	neizolirani	TIP 4/Ib, 6/Ib
Model 6				izolirani	TIP 4/IIb, 4/IIIb, 6/IIIb

Smjer i jakost veze između varijabli procijenjena je pomoću koeficijenta korelacije (r). U tablici 11.3 prikazane su vrijednosti korelacije svih neovisnih varijabli s ovisnom varijablom *U vrijednost*, za svih šest uzoraka (baza podataka). Vrijednosti koeficijenta korelacije od 0 do 1 ukazuju na pozitivnu povezanost pri čemu je porast jedne varijable praćen porastom druge varijable. S druge strane, vrijednosti od -1 do 0 ukazuju na negativnu povezanost pri čemu je porast jedne varijable praćen padom druge varijable.

Tablica 11.3 Koeficijenti korelacije neovisnih i ovisne varijable

Varijabla	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 4	Uzorak 5	Uzorak 6
	U vrijednost [W/m ² K]					
T_w [°C]	-0.26	0.29	-0.12	-0.60	-0.90	-0.35
T_i [°C]	0.28	0.58	0.59	-0.25	0.46	0.11
T_e [°C]	0.38	0.55	0.63	0.01	-0.18	0.66
ΔT [°C]	-0.34	0.08	-0.53	-0.04	0.25	-0.68
$T_i - T_w$ [°C]	0.99	0.96	0.79	0.80	0.96	0.85

Prema tablici 11.3 vidljivo je da se najizraženija pozitivna korelacija kod svih šest uzoraka nalazi u odnosu U vrijednosti i razlike između unutarnje temperature zraka i temperature na površini zida (T_i-T_w). Što je veća razlika između unutarnje temperature zraka i temperature na površini zida veća je i U vrijednost.

Radi boljeg razumijevanja veza između varijabli, u prilogu 1 grafički su prikazani odnosi među varijablama u dijagramima raspršenosti podataka (eng. scatter plot) iz kojih se vidi da se podatci grupiraju oko pravca što ukazuje na linearnu zavisnost.

Deskriptivna analiza uzoraka, odnosno neovisnih i ovisne varijable za svih šest uzoraka s najosnovnijim statističkim podacima dana je u tablici 11.4. Detaljniji podatci nalaze se u prilogu 2. U tablici 11.4 prikazane su srednje, najveće i najmanje vrijednosti te standardna devijacija svih neovisnih i ovisne varijable U vrijednost.

Tablica 11.4 Deskriptivna statistika uzoraka

Varijabla	Uzorak 1				
	N	Aritmetička sredina	Minimum	Maksimum	Std.Dev.
U vrijednost [W/m ² K]	1699	1.47	0.02	3.28	0.60
T_w [°C]	1699	17.65	13.10	23.02	2.12
T_i [°C]	1699	20.63	14.23	26.11	2.11
T_e [°C]	1699	4.92	-0.75	11.90	2.36
ΔT [°C]	1699	15.71	14.00	18.38	0.88
T_i-T_w [°C]	1699	2.98	0.01	6.28	1.15
Varijabla	Uzorak 2				
	N	Aritmetička sredina	Minimum	Maksimum	Std.Dev.
U vrijednost [W/m ² K]	3110	0.64	0.00	1.76	0.34
T_w [°C]	3110	17.64	13.01	21.67	1.66
T_i [°C]	3110	18.61	13.04	24.02	2.16
T_e [°C]	3110	2.42	-1.73	9.30	2.10
ΔT [°C]	3110	16.19	14.00	19.12	1.15
T_i-T_w [°C]	3110	1.34	0.00	3.97	0.72
Varijabla	Uzorak 3				
	N	Aritmetička sredina	Minimum	Maksimum	Std.Dev.
U vrijednost [W/m ² K]	970	0.92	0.40	1.27	0.11
T_w [°C]	970	24.91	23.64	25.51	0.26
T_i [°C]	970	28.00	24.96	28.56	0.35
T_e [°C]	970	2.03	-3.11	7.29	1.89
ΔT [°C]	970	25.96	19.51	30.99	1.86
T_i-T_w [°C]	970	3.09	1.27	3.98	0.30
Varijabla	Uzorak 4				
	N	Aritmetička sredina	Minimum	Maksimum	Std.Dev.
U vrijednost [W/m ² K]	3617	0.49	0.03	2.53	0.18
T_w [°C]	3617	28.10	22.31	30.21	1.00
T_i [°C]	3617	29.59	26.62	31.22	0.56
T_e [°C]	3617	6.07	-3.31	16.85	4.74
ΔT [°C]	3617	23.52	14.00	32.30	4.38
T_i-T_w [°C]	3617	1.49	0.01	4.73	0.58
Varijabla	Uzorak 5				
	N	Aritmetička sredina	Minimum	Maksimum	Std.Dev.
U vrijednost [W/m ² K]	1978	1.11	0.52	1.69	0.28

T_w [°C]	1978	24.20	22.42	25.68	0.97
T_i [°C]	1978	28.08	24.97	28.71	0.35
T_e [°C]	1978	1.23	-3.30	7.29	1.99
ΔT [°C]	1978	26.85	19.65	31.44	2.01
$T_i - T_w$ [°C]	1978	3.88	1.76	5.50	1.07
Uzorak 6					
Varijabla	N	Aritmetička sredina	Minimum	Maksimum	Std.Dev.
U vrijednost [W/m ² K]	2571	0.41	0.03	1.54	0.14
T_w [°C]	2571	28.72	24.60	29.99	0.48
T_i [°C]	2571	29.84	27.51	31.15	0.39
T_e [°C]	2571	8.19	-1.03	17.11	3.57
ΔT [°C]	2571	21.65	14.01	30.65	3.38
$T_i - T_w$ [°C]	2571	1.12	0.09	2.92	0.25

Nakon grafičkih prikaza odabrana je statistički najznačajnija nezavisna varijabla pojedinačno za razvoj svakog od šest modela. Nakon odabira najznačajnije varijable, predloženi su linearni regresijski modeli.

11.2 Razvoj modela procjene U vrijednosti vanjskih zidova

Na osnovu rezultata regresijske analize, izbor i vrednovanje modela provedeno je analizom statističkih parametara - koeficijenta determinacije (R^2), srednje apsolutne pogreške (*engl. Mean Absolute Error – MAE*) i korijena srednje kvadratne pogreške (*eng. Root-mean-square error, RMSE*). Interpretacija vrijednosti koeficijenta determinacije koji mjeri jakost linearne veze između varijabli u linearnom regresijskom modelu provedena je prema Chaddokovoj ljestvici [218] prikazanoj u tablici 11.5. Vrijednost koeficijenta determinacije kreće se u granicama između nule i jedan. Što je vrijednost koeficijenta determinacije bliža jedinici model je reprezentativniji. Prilikom odabira nezavisne varijable modela vodilo se računa da u model bude uključena varijabla koja daje najveću vrijednost koeficijenta determinacije (R^2) [219]. Srednja apsolutna pogreška (*MAE*) koja mjeri prosječnu apsolutnu pogrešku u predviđanjima odabrana je s obzirom na to da je istu jednostavno izračunati i interpretirati. Koristi se za usporedbu dva skupa podataka i procjenu točnosti modela koji se zasnivaju na regresiji. Srednja apsolutna pogreška definirana je izrazom:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} \quad (11.2)$$

gdje je n ukupan broj podataka, y_i procijenjena vrijednost, a x_i izmjerena vrijednost.

Korijen srednje kvadratne greške je mjera ukupne točnosti i kvadratni parametar uspješnosti koji predstavlja korijen prosjeka kvadrata razlike između stvarne i procijenjene vrijednosti u skupu podataka. Korijen srednje kvadratne greške (*RMSE*) određen je prema izrazu:

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n} \right)^{1/2} \quad (11.3)$$

I *MAE* i *RMSE* trebaju biti što manji, a što je vrijednost bliža nuli, model točnije opisuje neko svojstvo, u ovom slučaju U vrijednost.

Tablica 11.5 Chaddockova ljestvica jakosti veze [218]

R²	Tumačenje jakosti veze
0,00-0,10	Odsutnost veze
0,10-0,30	Slaba veza
0,30-0,50	Veza srednje jakosti
0,50-0,70	Izražena veza
0,70-0,90	Jaka veza
0,90-1,00	Vrlo jaka veza

U tablici 11.6 prikazane su vrijednosti koeficijenta determinacije (R^2), srednje apsolutne pogreške (MAE) i korijena srednje kvadratne pogreške (RMSE). Na osnovu prikazanih rezultata u tablici 11.6 izvršen je izbor modela procjene U vrijednosti. Izabrani modeli procjene U vrijednosti prikazani su u tablici 11.7.

Tablica 11.6 Vrijednosti koeficijenta determinacije, srednje apsolutne greške i korijena srednje kvadratne pogreške

Model procjene U vrijednosti	Mjere točnosti	Varijabla				
		T_w [°C]	T_i [°C]	T_e [°C]	ΔT [°C]	T_r-T_w [°C]
Model 1	R ²	0,067	0,080	0,143	0,116	0,984
	MAE	0,443	0,470	0,452	0,426	0,062
	RMSE	0,581	0,557	0,556	0,565	0,076
Model 2	R ²	0,087	0,334	0,303	0,006	0,929
	MAE	0,257	0,208	0,220	0,272	0,035
	RMSE	0,328	0,280	0,287	0,342	0,049
Model 3	R ²	0,013	0,349	0,398	0,279	0,628
	MAE	0,079	0,065	0,059	0,064	0,049
	RMSE	0,109	0,089	0,085	0,093	0,067
Model 4	R ²	0,363	0,062	0,000	0,002	0,645
	MAE	0,091	0,118	0,131	0,132	0,072
	RMSE	0,146	0,177	0,183	0,183	0,109
Model 5	R ²	0,805	0,216	0,031	0,065	0,926
	MAE	0,084	0,223	0,244	0,234	0,053
	RMSE	0,122	0,244	0,271	0,266	0,075
Model 6	R ²	0,120	0,013	0,429	0,458	0,723
	MAE	0,100	0,097	0,072	0,071	0,055
	RMSE	0,130	0,138	0,105	0,102	0,073

Tablica 11.7 Prijedlog modela procjene U vrijednosti

Model 1				
R²	MAE	RMSE	Varijabla	Opis varijable
0,984	0,062	0,076	T _i -T _w [°C]	Razlika između unutarnje temperature zraka i temperature na površini zida
Model 2				
R²	MAE	RMSE	Varijabla	Opis varijable
0,929	0,035	0,049	T _i -T _w [°C]	Razlika između unutarnje temperature zraka i temperature na površini zida
Model 3				
R²	MAE	RMSE	Varijabla	Opis varijable
0,628	0,049	0,067	T _i -T _w [°C]	Razlika između unutarnje temperature zraka i temperature na površini zida
Model 4				
R²	MAE	RMSE	Varijabla	Opis varijable
0,645	0,072	0,109	T _i -T _w [°C]	Razlika između unutarnje temperature zraka i temperature na površini zida
Model 5				
R²	MAE	RMSE	Varijabla	Opis varijable
0,926	0,053	0,075	T _i -T _w [°C]	Razlika između unutarnje temperature zraka i temperature na površini zida
Model 6				
R²	MAE	RMSE	Varijabla	Opis varijable
0,723	0,055	0,073	T _i -T _w [°C]	Razlika između unutarnje temperature zraka i temperature na površini zida

11.3 Modeli procjene U vrijednosti vanjskih zidova

U nastavku su prikazani modeli procjene U vrijednosti vanjskih zidova dobiveni na osnovi analize u poglavljima 11.1 i 11.2. Predloženim modelima moguće je procijeniti prosječne U vrijednosti vanjskih zidova u različitim uvjetima ispitivanja i za različite vrste materijala, gustoću materijala i stupanj izoliranosti zida na temelju razlike između unutarnje temperature zraka i temperature na površini zida.

Ukupno je predloženo 6 modela. Opis modela dan je u poglavlju 11.1 u tablici 11.2. Modeli procjene U vrijednosti vanjskih zidova su linearni regresijski model s varijablom (T_i-T_w). Regresijskom analizom za navedenu varijablu modela dobiveni su regresijski koeficijent i konstanta, a prikaz modela dan je u tablici 11.8. Modeli su dani u obliku:

$$PU = \alpha + \beta(T_i - T_{si}) \quad (11.4)$$

Tablica 11.8 Predloženi modeli procjene U vrijednosti

	Matematički model
Model 1	PU = - 0,076 + 0,5186 · (T _i -T _w)
Model 2	PU = 0,008 + 0,4689 · (T _i -T _w)
Model 3	PU = 0,0178 + 0,2917 · (T _i -T _w)
Model 4	PU = 0,1097 + 0,2543 · (T _i -T _w)
Model 5	PU = 0,1499 + 0,2464 · (T _i -T _w)
Model 6	PU = - 0,1181 + 0,4737 · (T _i -T _w)

11.4 Validacija modela procjene U vrijednosti vanjskih zidova

Radi utvrđivanja primjenjivosti modela za predviđanje U vrijednosti vanjskih zidova, dobiveni modeli primijenjeni su na vanjske zidove koji nisu sudjelovali u definiranju regresijskih koeficijenata. Validacija modela 1, modela 2 i modela 3 provedena je na jednom testnom uzorku, dok je validacija modela 4, modela 5 i modela 6 provedena na dva testna uzorka. Validacija modela nije provedena na većem broju uzoraka budući da in situ ispitivanja ovise o vremenskim uvjetima zbog čega je otežano prikupljanje većeg broja podataka u kratkom vremenskom periodu.

Točnost modela (*eng. Model Accuracy, A_c*) izračunata je kao postotak razlike U vrijednosti predviđenih modelom i stvarnih izmjerenih U vrijednosti prema izrazu [220]:

$$A_c = \left[\frac{PC - AC}{AC} \right] \cdot 100\% \quad (11.5)$$

gdje je A_c točnost izračunatih U vrijednosti, PC U vrijednost predviđena modelom, a AC stvarna U vrijednost. Što je vrijednost bliže nuli, model točnije opisuje analizirano svojstvo.

Pri predviđanju ovisne varijable, u ovom slučaju U vrijednosti potrebno je voditi računa o tome da vrijednosti neovisne varijable koje se koriste za predviđanje nisu izvan granica neovisne varijable koja se koristila za utvrđivanje regresijskih koeficijenata, jer u suprotnom je moguće dobiti potpuno netočne rezultate [221]. Iz tog razloga, prvi korak prije uporabe modela je provjera vrijednosti neovisne varijable testnog uzorka u odnosu na vrijednost neovisne varijable koja se koristila za utvrđivanje regresijskih koeficijenata.

U tablici 11.9 prikazane su maksimalne i minimalne vrijednosti varijabli modela i vrijednosti varijabli testnih uzoraka vanjskih zidova.

Tablica 11.9 Maksimalne i minimalne vrijednosti varijabli modela i vrijednosti varijabli testnih uzoraka vanjskih zidova

		Model		Testni uzorak 1		Testni uzorak 2	
		ΔT	$T_i - T_w$	ΔT	$T_i - T_w$	ΔT	$T_i - T_w$
Model 1	minimum	14	0,01	14	0,05	-	-
	maksimum	18,38	6,28	18,15	5,46	-	-
Model 2	minimum	14	0	14	0,02	-	-
	maksimum	19,12	3,97	18,07	3,74	-	-
Model 3	minimum	19,51	1,27	22,93	1,28	-	-
	maksimum	30,99	3,98	31,01	3,96	-	-
Model 4	minimum	14	0,01	18,22	0,17	14,02	0,36
	maksimum	32,30	4,73	31,70	2,36	33,85	2,70
Model 5	minimum	19,65	1,76	26,67	3,27	23,41	1,87
	maksimum	31,44	5,50	32,99	5,48	31,17	3,78
Model 6	minimum	14,01	0,09	14,01	0,73	14,02	0,29
	maksimum	30,65	2,92	28,25	2,92	30,35	2,90

Kako je vidljivo u tablici 11.9, testni uzorak 1 kod modela 5 ima vrijednost varijable ΔT izvan dopuštene granice, gdje je vrijednost testnog uzorka veća za oko 5% u odnosu na maksimalnu preporučenu vrijednost. Budući da se radi o relativno malom odstupanju validacija modela 5 provedena je za oba testna uzorka.

Rezultati validacije modela prikazani su u tablici 11.10. Razlika između stvarne izmjerene i procijenjene U vrijednosti izračunata je prema izrazu za točnost modela (11.5) i predstavlja odstupanje procijenjenih od stvarnih U vrijednosti izraženih u postotku.

Tablica 11.10 Rezultati validacije predloženih modela procjene U vrijednosti

Testni uzorak	Vrsta materijala	Stvarna vrijednost	Procijenjena vrijednost	Točnost modela
1.1	Puna opeka	1,44	1,50	4,6%
2.1	Puna opeka s 10 cm TI EPS	0,70	0,68	-3,7%
3.1	Brušena šuplja blok opeka	0,91	0,96	5,6%
4.1	Brušena šuplja blok opeka s 10 cm TI EPS	0,46	0,53	14,1%
4.2	Brušena šuplja blok opeka s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune	0,58	0,61	5,4%
5.1	Betonski blokovi s recikliranom opekrom	1,31	1,29	-1,5%
5.2	Blokovi od porastog betona	0,78	0,83	7,1%
6.1	Lagani betonski blokovi s 10 cm TI EPS	0,49	0,52	6,7%
6.2	Brušena šuplja blok opeka s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune i s 10 cm TI KV	0,38	0,38	0%

Rezultati validacije su sljedeći:

- Validacija modela 1 provedena je na neizoliranom vanjskom zidu od pune opeke. Odstupanje procijenjene U vrijednosti od stvarno izmjerene iznosi 4,6%.
- Validacija modela 2 provedena je na vanjskom zidu od opeke toplinski izoliranom s 10 cm EPS-a. Odstupanje procijenjene U vrijednosti od stvarno izmjerene vrijednosti iznosi -3,7%, odnosno model daje 3,7% manje U vrijednosti od stvarno izmjerenih vrijednosti.
- Validacija modela 3 provedena je na vanjskom zidu od brušene šuplje blok opeke. Rezultati validacije modela 3 pokazali su odstupanje procijenjene U vrijednosti od stvarno izmjerene u iznosu od 5,6%, odnosno model daje 5,6% veće U vrijednosti od stvarnih.
- Validacija modela 4 provedena je na vanjskom zidu od brušena šuplje blok opeka s 10 cm toplinske izolacije od EPS-a i zidu od brušene šuplje blok opeka s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune. Odstupanje procijenjenih U vrijednosti od stvarno izmjerenih vrijednosti u slučaju modela 4 iznosi između 6% i 14%, odnosno model daje u prosjeku oko 10% veće U vrijednosti od stvarnih vrijednosti.

- Validacija modela 5 provedena je na vanjskom zidu od betonskih blokova s recikliranom opekom i zidu od porastog betona, a odstupanje procijenjenih U vrijednosti od stvarno izmjerenih vrijednosti iznosi između -1,5% i 7,1%.
- Validacija modela 6 provedena je na vanjskom zidu od blokova od porastog betona toplinski izoliranom s 10 cm od EPS-a te na vanjskom zidu od s integriranom toplinskom izolacijom od kamene vune i s 10 cm toplinske izolacije od KV. Rezultati validacije pokazuju kako odstupanje procijenjenih U vrijednosti od stvarno izmjerenih vrijednosti iznosi 6,7% kod testnog uzorka 1 te 0% kod testnog uzorka 2 što znači da je model potpuno točno procijenio stvarnu U vrijednost vanjskog zida.

Provedenom validacijom modela dobivena odstupanja odnosno točnost modela su prihvatljivi, te se može zaključiti kako se predloženi modeli mogu primijeniti za procjenu U vrijednosti.

11.5 Prednosti i ograničenja korištenja modela

Prikazani rezultati pokazuju kako je predloženim modelima moguće procijeniti U vrijednost vanjskih zidova na temelju razlike između unutarnje temperature zraka i temperature na površini zida ($T_i - T_w$). Odstupanja procijenjenih U vrijednosti od stvarnih kod svih šest modela kreću se unutar područja od -3,7% do 14,1 %, pri čemu se dobivena odstupanja odnose samo na testni uzorak.

Prva i najveća prednost primjene predloženih modela procjene U vrijednosti vanjskih zidova je jednostavnost primjene, jer je za procjenu U vrijednosti potrebna jedna varijabla. Varijabla potrebna za procjenu U vrijednosti je razlika između unutarnje temperature zraka i temperature na površini zida ($T_i - T_w$). S obzirom na to da je trenutno tijekom provođenja in situ ispitivanja U vrijednosti vanjskih zidova temperaturnom metodom potrebno izmjeriti tri temperature, razvijeni modeli predstavljaju pojednostavljenje i unaprijeđenje postojeće metodologije budući da daju procjenu U vrijednosti na temelju samo jedne neovisne varijable.

Na temelju rezultata validacija modela vidljivo je kako su razvijeni modeli jednako primjenjivi i na neizolirane i na izolirane vanjske zidove. Međutim, s obzirom na to da je validacija provedena na malom broju uzoraka, kako bi se utvrdila stvarna primjenjivost modela potrebno je povećati uzorak za validaciju. U ovom radu je prikupljanje većeg broja uzoraka za validaciju ograničeno činjenicom da in situ ispitivanja U vrijednosti u velikoj mjeri ovise o vremenskim uvjetima zbog čega je otežano prikupljanje većeg broja podataka u kratkom vremenu.

Također, ograničenje predloženih modela procjene U vrijednosti vanjskih zidova je i njihova primjenjivost isključivo na ispitane materijale zidnih elemenata. Nadalje, prilikom primjene modela potrebno je voditi računa da vrijednosti nezavisnih varijabli koje se koriste za predviđanje nisu izvan granica neovisnih varijabli koje su se koristile za utvrđivanje regresijskih koeficijenata, budući da je u suprotnom moguće dobiti potpuno netočne rezultate [221, 222]. Stoga je, prije uporabe modela potrebno provesti provjeru izmjerenih vrijednosti neovisne varijable ($T_i - T_w$) u odnosu na vrijednosti koje su se koristile za utvrđivanje regresijskih koeficijenata. Ako se izmjerene vrijednosti razlike između unutarnje temperature zraka i temperature na površini zida ne nalaze unutar definiranog raspona modela, uporaba modela nije preporučljiva.

12 SMJERNICE ZA PROVOĐENJE IN SITU ISPITIVANJA TEMPERATURNOM METODOM

S obzirom na to da zahtjevi i upute za mjerenje U vrijednosti temperaturnom metodom definirani od strane proizvođača uređaja ne obuhvaćaju velik broj faktora koji utječu na mjerenja U vrijednosti, provedena su ispitivanja na različitim vrstama građevnih elemenata i u različitim uvjetima. Na temelju rezultata ispitivanja i detaljnog pregleda literature definirana su ograničenja metode te predložene smjernice kojih bi se trebalo pridržavati prilikom provođenja ispitivanja. Smjernice su definirane s obzirom na uvjete ispitivanja, lokaciju uređaja i pripadnih senzora, prikupljanje i obradu podataka te procjenu mjerne nesigurnosti.

S obzirom na uvjete ispitivanja preporučuje se:

- ostvariti razliku u temperaturi između unutarnjeg i vanjskog od najmanje 14 °C,
- osigurati stabilne meteorološke uvjete budući da promjenjivi (nestacionarni) uvjeti utječu na rezultate mjerenja što znači da se unutarnja ili vanjska temperatura ne bi trebale značajno mijenjati,
- izbjeći izravan utjecaj oborina, solarne radijacije (mjerenjem vanjskih zidova orijentiranih prema sjeveru), uređaja za zagrijavanje ili hlađenje te uređaja za sušenje, ventilaciju i drugih tipova opreme koja izaziva prisilnu konvekciju i
- provesti mjerenja pri brzinama vjetra manjim od 1 m/s.

S obzirom na lokaciju uređaja i pripadnih senzora preporučuje se:

- in situ mjerenje U vrijednosti temperaturnom metodom provesti korištenjem dva temperaturna senzora, uređaj za pohranu podataka i senzora za mjerenje temperature površine zida,
- lokaciju senzora istražiti infracrvenom termografijom prema ISO 6781 [223] kako bi se izbjeglo postavljanje senzora u blizini toplinskih mostova, pukotina, spojeva i mjesta koja predstavljaju sličan izvor pogrešaka,
- postaviti senzore za mjerenje unutarnje i vanjske temperature na udaljenosti od 30 cm od ispitivanog zida (kako bi se izbjegao utjecaj konvekcije) te na istoj visini sa senzorom za mjerenje temperature unutarnje površine građevnog elementa,
- postaviti termoparove koji mjere temperaturu unutarnje površine zida na međusobnom razmaku od 10 cm, 2 cm udaljeno od sljubnica morta na visini od 1,5 m mjereno od poda,
- izbjeći horizontalno i vertikalno poklapanje termoparova ako nije moguće odrediti položaj sljubnica morta,
- za postavljanje senzora koristiti ljepljivu masu, kako bi se postigla što bolja prionjivost senzora s površinom zida i
- izbjeći postavljanje senzora u uglove zida budući da je u uglovima temperatura obično viša u odnosu na preostalu površinu zida.

S obzirom na prikupljanje i obradu podataka preporučuje se:

- provesti mjerenja u trajanju od najmanje tri dana,

- trajanje ispitivanja odrediti korištenjem kriterija predloženog u ISO 9869-1:2014 [27] pri čemu se mjerenje može zaustaviti ako U vrijednost na kraju ispitivanja ne odstupa više od $\pm 5\%$ od vrijednosti izmjerene 24 h ranije,
- koristiti programabilnu opremu za prikupljanje podataka mjerenja koja omogućuje prikupljanje podataka u prilagodljivim intervalima od 1 s do 1 h,
- bilježiti podatke kontinuirano u zadanim intervalima, preporučljivo u intervalu od 10 min što olakšava daljnju obradu podataka,
- koristiti podatke prikupljene pri razlici temperature između unutarnjeg i vanjskog od najmanje 14 °C,
- koristiti podatke prikupljene u uvjetima bez oborina i pri brzinama vjetra manjim od 1 m/s i
- prikupljene podatke obraditi korištenjem metode prosjeka.

Smjernice za procjenu mjerne nesigurnosti:

- preporučuje se korištenje termoparova klase 1 prema IEC 60584-1 [224] budući da preciznost termoparova značajno utječe na mjernu nesigurnost, pri čemu najveći utjecaj na mjernu nesigurnost imaju termoparovi za mjerenje vanjske temperature i
- kalibrirati uređaje i senzore prije provođenja mjerenja.

13 ZAKLJUČAK I SMJERNICE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA

13.1 Zaključak

In situ temperaturna metoda za određivanje U vrijednosti često se primjenjuje u praksi, međutim detaljnim i iscrpnim pregledom stanja područja in situ ispitivanja U vrijednosti vanjskih zidova nerazornim metodama pokazalo se kako nedostaju smjernice za provođenje ispitivanja te ispitivanja na različitim vrstama građevnih elemenata i u različitim uvjetima kako bi se definirala ograničenja, uklonili mogući negativni utjecaji i donijeli dublji zaključci o mogućnosti pouzdane procjene U vrijednosti ovom metodom. S obzirom na navedeno, u okviru doktorske disertacije provedeno je eksperimentalno i numeričko istraživanje s ciljem doprinosa razvoju eksperimentalne in situ temperaturne metode za određivanje U vrijednosti, a u svrhu odabira ekonomski opravdanih tehnologija obnove vanjskih zidova postojećih zgrada i definiranja ušteda koje je moguće ostvariti na troškovima obnove i tijekom razdoblja uporabe zgrada. Provedeno je istraživanje stanja područja in situ ispitivanja U vrijednosti vanjskih zidova nerazornim metodama te pregled spoznaja o fizikalnom procesu prijenosa topline i toplinskim svojstvima materijala.

Eksperimentalna ispitivanja u okviru ove doktorske disertacije provedena su na 18 modela zidova od različitih zidnih elemenata. Nakon provedenih eksperimentalnih ispitivanja u različitim temperaturnim uvjetima i numeričkih simulacija prijenosa topline doktorska disertacija obuhvatila je i analizu:

- potrebnog vremena trajanja ispitivanja U vrijednosti temperaturnom metodom,
- rezultata usporednog ispitivanja temperaturnom i HFM metodom na odabranim modelima zidova,
- utjecaja koeficijenta prijelaza topline na točnost rezultata provedenih eksperimentalnih ispitivanja,
- toplinskih gubitaka primjenom Co-heating testa te usporedbu između stvarnih i projektnih vrijednosti,
- ušteda koje je moguće ostvariti na troškovima obnove i tijekom razdoblja uporabe zgrada izborom ekonomski opravdanih tehnologija obnove vanjskih zidova primjenom temperaturne metode za određivanje U vrijednosti i
- mogućnosti predviđanja U vrijednosti vanjskih zidova in situ temperaturnom metodom razvojem pojednostavljenog matematičkog modela.

Na temelju prikazanih rezultata i analize u okviru disertacije predložene su detaljne smjernice s obzirom na uvjete ispitivanja, lokaciju uređaja i pripadnih senzora, prikupljanje i obradu podataka te procjenu mjerne nesigurnosti, a kojih bi se trebalo pridržavati prilikom provođenja ispitivanja.

Na osnovu provedenog istraživanja i analize rezultata mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Eksperimentalni i numerički rezultati ispitivanja toplinski izoliranih modela u odnosu na neizolirane pokazali su značajno veća odstupanja srednjih U vrijednosti u usporedbi s proračunskim vrijednostima. Iako su ispitivanjem dobivene razlike između izmjerenih i teorijskih U vrijednosti, nakon postavljanja toplinske izolacije izmjerene su niže U vrijednosti u odnosu na toplinski neizolirane zidove.

- Iako se preporučuje in situ ispitivanja provoditi u stabilnim temperaturnim uvjetima, preliminarni rezultati provedenih eksperimentalnih ispitivanja pokazali su potencijalnu mogućnost primjene metode u uvjetima promjenjive unutarnje i vanjske temperature održavajući temperaturnu razliku od 15°C.
- Razlika temperature između unutarnjeg i vanjskog zraka značajno utječe na rezultate mjerenja. Analiza utjecaja postignute temperaturne razlike između unutarnjeg i vanjskog zraka tijekom ispitivanja na točnost izmjerenih U vrijednosti pokazala je da je prilikom ispitivanja potrebno ostvariti razliku u temperaturi između unutarnjeg i vanjskog zraka od najmanje 14°C.
- Ispitivanje U vrijednosti tijekom sezone hlađenja predstavlja veliki izazov. Tijekom sezone hlađenja izražene su veće temperaturne promjene te je teško ostvariti preporučenu temperaturnu razliku od 14°C između unutarnjeg i vanjskog zraka što značajno utječe na rezultate mjerenja.
- Povećanjem temperaturne razlike između unutarnjeg i vanjskog zraka smanjuje se mjerna nesigurnost. Najveći utjecaj na mjernu nesigurnost ima točnost senzora za mjerenje vanjske temperature.
- Usporedbom rezultata numeričkih simulacija prijenosa topline analiziranih modela s rezultatima in situ ispitivanja temperaturnom metodom pokazalo se kako se primjenom temperaturne metode mogu odrediti stvarne U vrijednosti budući da metoda daje smislene i dosljedne rezultate neovisno o temperaturnim uvjetima unutar komore tijekom kojih je provedeno ispitivanje. Iako su numeričkim simulacijama dobivena odstupanja u odnosu na in situ ispitivanja izvan definiranog intervala pouzdanosti od $\pm 20\%$, rezultati in situ ispitivanja temperaturnom metodom u skladu su s rezultatima provedenih istraživanja objavljenih u postojećoj znanstvenoj literaturi prema kojima su često stvarne U vrijednosti izoliranih zidova u odnosu na projektne vrijednosti precijenjene, a neizoliranih zidova podcijenjene.
- Rezultati analize potrebnog vremena trajanja ispitivanja U vrijednosti temperaturnom metodom prema kriteriju predloženom u ISO 9869-1:2014 [27] pokazali su da je minimalno vrijeme trajanja ispitivanja 3 dana ako je temperaturna razlika između unutarnjeg i vanjskog zraka 16 °C. Također, rezultati analize pokazali su da produljenje trajanja ispitivanja ne utječe značajno na povećanje točnosti izmjerenih U vrijednosti.
- Rezultati usporednog ispitivanja temperaturnom i HFM metodom pokazali su gotovo jednak trend kretanja U vrijednosti s odstupanjima od 9 do 41% između izmjerenih U vrijednosti dobivenih korištenjem objiju metoda. Bez obzira na primijenjenu in situ metodu određivanja U-vrijednosti vidljivo je smanjenje U vrijednosti u slučaju izoliranih zidova u odnosu na neizolirane zidove.
- Preliminarnom analizom utjecaja koeficijenta prijelaza topline na rezultate in situ ispitivanja temperaturnom metodom pokazalo se kako se korištenjem proračunskih vrijednosti koeficijenta prijelaza topline na temelju mjerenja dodatnih fizikalnih parametara povećava točnost izmjerenih rezultata.
- Rezultati Co-heating testa pokazali su kako korištenje projektnih vrijednosti rezultira većim energetskim potrebama u odnosu na stvarnu potrošnju. Veća temperaturna razlika tijekom mjerenja i korištenje izmjerenih vrijednosti varijabli rezultira manjim nesrazmjerom između očekivane i stvarne potrošnje

energije, a projektne U vrijednosti toplinski izoliranih zidova koje imaju najveći utjecaj na energetske učinkovitost zgrada često su precijenjene.

- Procjena utjecaja rezultata in situ ispitivanja U vrijednosti vanjskih zidova temperaturnom metodom na potrošnju energije i emisiju CO₂ provedena na stvarnom primjeru odabrane energetske certificirane obiteljske kuće pokazala je kako podcjenjivanje toplinskih svojstava neizoliranog zida koristeći projektne U vrijednosti, utječe na povećanje proračunske potrošnje, emisije CO₂ i troškova u iznosu od 5% u odnosu na stvarnu potrošnju dobivenu korištenjem in situ izmjerenih U vrijednosti. Suprotno, precjenjivanjem toplinskih svojstava kod toplinski izoliranog zida od opeke s 10 cm kamene vune korištenjem projektne U vrijednosti rezultiralo je smanjenjem proračunske odnosno teorijske potrošnje za 5% u odnosu na stvarnu potrošnju dobivenu korištenjem in situ izmjerenih U vrijednosti. Dobiveni rezultati odnose na obiteljsku kuću korisne površine od 80 m², te oplošje zidova od 60,42 m². Iako se razlika od 5% čini mala, rezultati nisu zanemarivi uzme li se u obzir veličina postojećeg stambenog fonda koji ne zadovoljava trenutne propise o toplinskoj zaštiti.
- Financijska analiza odabrane tehnologije energetske obnove vanjskih zidova provedena na primjeru energetske certificirane obiteljske kuće pokazala je kako stvarne, izmjerene U vrijednosti imaju značajan utjecaj na razdoblje povrata investicije. U analiziranom primjeru obiteljske kuće razdoblje povrata određeno korištenjem izmjerenih U vrijednosti produžilo se za 8 godina u odnosu na razdoblje povrata dobiveno koristeći proračunsku U vrijednost.
- Primjenom temperaturne metode moguće je odabrati primjereniju tehnologiju energetske obnove vanjskih zidova postojećih zgrada, odrediti troškove sanacije, njihov životni vijek i isplativost ulaganja, povećati udobnost i kvalitetu življenja te smanjiti nesrazmjer između očekivane i stvarne potrošnje energije te emisije CO₂.
- Na temelju rezultata eksperimentalnog ispitivanja regresijskom analizom predloženo je šest pojednostavljenih matematičkih modela procjene U vrijednosti na temelju jedne varijable - razlike između unutarnje temperature zraka i temperature na površini zida ($T_i - T_w$). Predloženi modeli definirani su za različite uvjete ispitivanja, vrstu materijala, gustoću materijala i stupanj izoliranosti zida. Greška razvijenih modela izražena je s pomoću koeficijenta determinacije (R^2), srednje apsolutne pogreške (MAE) i korijena srednje kvadratne pogreške (RMSE), a dobivene su vrijednosti R^2 od 0,628 do 0,984, MAE od 0,035 do 0,072 i RMSE od 0,049 do 0,109. Validacijom, modeli su se pokazali adekvatnima za procjenu U vrijednosti vanjskih zidova na temelju razlike između unutarnje temperature zraka i temperature na površini zida ($T_i - T_w$). Također, razvijeni modeli pokazali su se jednako primjenjivi na neizolirane i na izolirane vanjske zidove. Međutim, kako bi se dobila pouzdana procjena U vrijednosti vanjskih zidova, primjena razvijenih modela preporučuje se za vrijednosti nezavisnih varijabli u okviru onih granica koje su se koristile pri razvoju modela i samo za materijale zidnih elemenata za koje su modeli definirani.

U okviru doktorske disertacije potvrđene su hipoteze istraživanja. Na temelju prikazanih rezultata eksperimentalnog i numeričkog istraživanja može se zaključiti kako je moguća primjena temperaturne metode za ispitivanje

koeficijenta prolaska topline vanjskih zidova in situ. Također, primjenom temperaturne metode moguće je odabrati primjerenu tehnologiju energetske obnove vanjskih zidova postojećih zgrada čime će se ostvariti uštede tijekom razdoblja uporabe zgrade. Na osnovu eksperimentalnih rezultata mjerenja moguće je definirati pojednostavljeni matematički model za predviđanje koeficijenta prolaska topline vanjskih zidova temperaturnom metodom.

13.2 Smjernice za daljnja istraživanja

Prikazani rezultati u okviru ove doktorske disertacije potvrđuju potencijal korištenja temperaturne metode kao metode za provođenje nerazornih in situ ispitivanja U vrijednosti vanjskih zidova. Značajne prednosti temperaturne metode u odnosu na standardizirane metode poput brzine provođenja mjerenja, jednostavnosti obrade podataka i smanjenih troškova ispitivanja, ali i uočeni nedostaci podloga su za daljnja istraživanja.

S obzirom na trenutno postavljene zahtjeve za postizanje gotovo nulte energije u zgradama sve je veća upotreba materijala s vrlo niskim U-vrijednostima. Projektne vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti materijala, koje u najvećoj mjeri utječu na energetska učinkovitost zgrada, često su precijenjene vjerojatno zbog marketinških razloga. Također, rezultati dosadašnjih istraživanja pokazali su kako su često U vrijednosti toplinski izoliranih zidova precijenjene. Budući da precjenjivanje toplinskih svojstava može rezultirati pogrešnom procjenom mjera uštede energije odnosno manjim povećanjem energetske učinkovitosti od očekivanog, buduća istraživanja trebala bi razmotriti ispitivanje većeg broja uzoraka toplinski izoliranih vanjskih zidova s vrlo niskim U vrijednostima.

Preliminarni rezultati analize utjecaja koeficijenta prijelaza topline na rezultate in situ ispitivanja temperaturnom metodom pokazali su kako je korištenjem proračunskih vrijednosti koeficijenta prijelaza topline na temelju mjerenja dodatnih fizikalnih parametara moguće povećati točnost izmjerenih rezultata. Stoga je preporuka provesti dodatnu analizu na većem broju različitih vrsta zidova i utvrditi veličinu utjecaja koeficijenta prijelaza topline na rezultate in situ ispitivanja temperaturnom metodom.

Budući da je eksperimentalno istraživanje u okviru ove doktorske disertacije provedeno u kontroliranim uvjetima, potrebno je dodatno istražiti mogućnost in situ mjerenja tijekom razdoblja uporabe zgrada s ciljem proširenja saznanja o pouzdanosti mjerenja, poboljšanja pouzdanosti mjerenja TBM-om, definiranja ograničenja i uvjeta primjene metode.

Također, s ciljem proširenja saznanja o pouzdanosti mjerenja i poboljšanja pouzdanosti mjerenja TBM-om potrebno je provesti veći broj usporednih ispitivanja sa standardiziranim metodama na vanjskim zidovima od različitih vrsta materijala u različitim uvjetima te veći broj ispitivanja tijekom sezone hlađenja koja i dalje predstavljaju veliki izazov.

LITERATURA

1. Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency. 2018, Official Journal of the European Union
2. Boris Delač. Optimizacija energetskih sustava zgrada približno nulte energije korištenjem dinamičkih simulacija. Doktorska disertacija, Rijeka, 2017.
3. BPIE, 97% of buildings in the EU need to be upgraded, factsheet. 2017: Brussels.
4. Adhikari, R.S., E. Lucchi, and V. Pracchi. Experimental measurements on thermal transmittance of the opaque vertical walls in the historical buildings. in *Proceedings of the PLEA2012—28th Conference, Opportunities, Limits & Needs towards an Environmentally Responsible Architecture, At Lima, Peru*. 2012.
5. Majcen, D., L.C.M. Itard, and H. Visscher, *Theoretical vs. actual energy consumption of labelled dwellings in the Netherlands: Discrepancies and policy implications*. Energy Policy, 2013. **54**: p. 125-136.
6. Majcen, D., L. Itard, and H. Visscher, *Actual and theoretical gas consumption in Dutch dwellings: What causes the differences?* Energy Policy, 2013. **61**: p. 460-471.
7. Koški, Ž., I. Ištoka, and I. Miličević, *Klasifikacija elemenata zgrada u funkciji mjerenja zrakopropusnosti*. Građevinar, 2013. **65**.
8. ISO 13790:2008 Energy performance of buildings -- Calculation of energy use for space heating and cooling.
9. HRN EN ISO 6946:2017 Građevni dijelovi i građevni elementi -- Toplinski otpor i koeficijent prolaska topline -- Metode proračuna (ISO 6946:2017; EN ISO 6946:2017).
10. Branco, G., et al., *Predicted versus observed heat consumption of a low energy multifamily complex in Switzerland based on long-term experimental data*. Energy and Buildings, 2004. **36**(6): p. 543-555.
11. Burman, E., D. Mumovic, and J. Kimpian, *Towards measurement and verification of energy performance under the framework of the European directive for energy performance of buildings*. Energy, 2014. **77**: p. 153-163.
12. de Wilde, P., *The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation*. Automation in Construction, 2014. **41**: p. 40-49.
13. Sunikka-Blank, M. and R. Galvin, *Introducing the prebound effect: the gap between performance and actual energy consumption*. Building Research & Information, 2012. **40**(3): p. 260-273.
14. Norford, L.K., et al., *Two-to-one discrepancy between measured and predicted performance of a 'low-energy' office building: insights from a reconciliation based on the DOE-2 model*. Energy and Buildings, 1994. **21**(2): p. 121-131.
15. Demanuele, C., T. Tweddell, and M. Davies. *Bridging the gap between predicted and actual energy performance in schools*. in *World renewable energy congress XI*. 2010. UAE Abu Dhabi.
16. Lucchi, E., *Thermal transmittance of historical brick masonries: A comparison among standard data, analytical calculation procedures, and in situ heat flow meter measurements*. Energy and Buildings, 2017. **134**: p. 171-184.
17. Albatici, R., A.M. Tonelli, and M. Chiogna, *A comprehensive experimental approach for the validation of quantitative infrared thermography in the evaluation of building thermal transmittance*. Applied Energy, 2015. **141**(0): p. 218-228.
18. Desogus, G., S. Mura, and R. Ricciu, *Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance*. Energy and Buildings, 2011. **43**(10): p. 2613-2620.
19. Asdrubali, F., et al., *Evaluating in situ thermal transmittance of green buildings masonries—A case study*. Case Studies in Construction Materials, 2014. **1**(0): p. 53-59.
20. Evangelisti, L., et al., *In Situ Thermal Transmittance Measurements for Investigating Differences between Wall Models and Actual Building Performance*. Sustainability, 2015. **7**(8): p. 10388.

21. Gaspar, K., M. Casals, and M. Gangoells, *A comparison of standardized calculation methods for in situ measurements of façades U-value*. Energy and Buildings, 2016. **130**: p. 592-599.
22. Evangelisti, L., C. Guattari, and F. Asdrubali, *Influence of heating systems on thermal transmittance evaluations: Simulations, experimental measurements and data post-processing*. Energy and Buildings, 2018. **168**: p. 180-190.
23. Siviour, J.B. and D.A. McIntyre, *U-value meters in theory and practice*. Building Services Engineering Research and Technology, 1982. **3**(2): p. 61-69.
24. McIntyre, D.A., *In situ measurement of U-values*. Building Services Engineering Research and Technology, 1985. **6**(1): p. 1-6.
25. Modera, M.P., M.H. Sherman, and R.C. Sonderegger, *Determining the U-value of a wall from field measurements of heat flux and surface temperatures*, in *Building Applications of Heat Flux Transducers*. 1985, ASTM International.
26. *International Organization for Standardization. Thermal insulation -- Building elements -- In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance (ISO 9869:1994)*.
27. *International Organization for Standardization. Thermal insulation -- Building elements -- In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance -- Part 1: Heat flow meter method (ISO 9869-1:2014)*.
28. Ficco, G., et al., *U-value in situ measurement for energy diagnosis of existing buildings*. Energy and Buildings, 2015. **104**: p. 108-121.
29. Rye, C. and C. Scott, *The SPAB Research Report 1 e U-Value Report*. Published 2010 and revised, SPAB: London, November 2012.
30. *International Organization for Standardization. Thermal insulation -- Building elements -- In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance -- Part 2: Infrared method for frame structure dwelling (ISO 9869-2:2018)*
31. Doran, S., *Safety and health business plan – field investigations of the thermal performance of construction elements as built*. 2000, BRE, Building Research Establishment Ltd.: East Kilbride (UK).
32. Baker, P., *U-values and traditional buildings*. 2011, Glasgow Caledonian University.
33. Rhee-Duverne, S. and P. Baker, *Research into the Thermal Performance of Traditional Brick Walls*. 2013, English Heritage Report: London.
34. Walker, R. and S. Pavia, *Thermal performance of a selection of insulation materials suitable for historic buildings*. Building and Environment, 2015. **94**: p. 155-165.
35. Bros-Williamson, J., C. Garnier, and J.I. Currie, *A longitudinal building fabric and energy performance analysis of two homes built to different energy principles*. Energy and Buildings, 2016. **130**: p. 578-591.
36. Lucchi, E., *Thermal transmittance of historical stone masonries: A comparison among standard, calculated and measured data*. Energy and Buildings, 2017. **151**: p. 393-405.
37. Hoffmann, C. and A. Geissler, *The prebound-effect in detail: real indoor temperatures in basements and measured versus calculated U-values*. Energy Procedia, 2017. **122**: p. 32-37.
38. Kato, S., K. Kuroki, and S. Hagihara. *Method of in-situ measurement of thermal insulation performance of building elements using infrared camera*. in *6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings-IAQVEC*. 2007. Citeseer.
39. Albatici, R. and A.M. Tonelli. *On site evaluation of U-value of opaque building elements: a new methodology*. in *Passive and Low Energy Architecture (PLEA) Conference, Dublin, Ireland*. 2008.
40. Albatici, R. and A.M. Tonelli, *Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site*. Energy and Buildings, 2010. **42**(11): p. 2177-2183.
41. Grinzato, E., et al., *R-value estimation by local thermographic analysis*. SPIE Defense, Security, and Sensing. Vol. 7661. 2010: SPIE. 15.

42. Fokaides, P.A. and S.A. Kalogirou, *Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes*. Applied Energy, 2011. **88**(12): p. 4358-4365.
43. Dall'O', G., L. Sarto, and A. Panza, *Infrared Screening of Residential Buildings for Energy Audit Purposes: Results of a Field Test*. Energies, 2013. **6**(8): p. 3859.
44. Tzifa, V., et al., *Uncertainty and method limitations in a short-time measurement of the effective thermal transmittance on a building envelope using an infrared camera* International Journal of Sustainable Energy, 2014. **36**(1): p. 28-46.
45. Danielski, I. and M. Fröling, *Diagnosis of Buildings' Thermal Performance - A Quantitative Method Using Thermography Under Non-steady State Heat Flow*. Energy Procedia, 2015. **83**: p. 320-329.
46. Nardi, I., S. Sfarra, and D. Ambrosini, *Quantitative thermography for the estimation of the U-value: state of the art and a case study* Journal of Physics: Conference Series, 2014. **547**.
47. Nardi, I., et al., *A comparison between thermographic and flow-meter methods for the evaluation of thermal transmittance of different wall constructions*. Journal of Physics: Conference Series, 2015. **655**: p. 012007.
48. Nardi, I., et al., *U-value assessment by infrared thermography: A comparison of different calculation methods in a Guarded Hot Box*. Energy and Buildings, 2016. **122**: p. 211-221.
49. Tejedor, B., et al., *Quantitative internal infrared thermography for determining in-situ thermal behaviour of façades*. Energy and Buildings, 2017. **151**: p. 187-197.
50. Tejedor, B., M. Casals, and M. Gangoells, *Assessing the influence of operating conditions and thermophysical properties on the accuracy of in-situ measured U-values using quantitative internal infrared thermography*. Energy and Buildings, 2018. **171**: p. 64-75.
51. Meng, X., et al., *Feasibility experiment on the simple hot box-heat flow meter method and the optimization based on simulation reproduction*. Applied Thermal Engineering, 2015. **83**: p. 48-56.
52. Ahmad, A., M. Maslehuudin, and L.M. Al-Hadhrami, *In situ measurement of thermal transmittance and thermal resistance of hollow reinforced precast concrete walls*. Energy and Buildings, 2014. **84**: p. 132-141.
53. Bienvenido-Huertas, D., et al., *Determining the U-Value of Façades Using the Thermometric Method: Potentials and Limitations*. Energies, 2018. **11**(2): p. 360.
54. Vučićević, B., et al., *Experimental and numerical modelling of thermal performance of a residential building in Belgrade*. Thermal Science, 2009. **13**(4): p. 242-252.
55. Cuerda, E., et al. *Evaluation And Comparison Of Building Performance In Use Through On-Site Monitoring And Simulation Modelling*. in *Proceedings of the 3rd IBPSA-England Conference BSO 2016*. 2016. Great North Museum, Newcastle.
56. Buzatu, G., et al. *Thermal transmittance determination for different components of buildings*. in *2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP)*. 2017.
57. Andújar Márquez, J.M., M.Á. Martínez Bohórquez, and S. Gómez Melgar, *A New Metre for Cheap, Quick, Reliable and Simple Thermal Transmittance (U-Value) Measurements in Buildings*. Sensors (Basel, Switzerland), 2017. **17**(9).
58. Kim, S.-H., et al., *Reliability Field Test of the Air-Surface Temperature Ratio Method for In Situ Measurement of U-Values*. Energies, 2018. **11**(4): p. 803.
59. Kim, S.-H., et al., *The Feasibility of Improving the Accuracy of In Situ Measurements in the Air-Surface Temperature Ratio Method*. Energies, 2018. **11**(7): p. 1885.
60. *Građevinska fizika i materijali*. 2003. Beograd: Jugoslavensko društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija (JUDIMK), Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
61. *Tehničar, Građevinski priručnik*. 1984, Beograd: Izdavačka radna organizacija "Građevinska knjiga".
62. Novaković, B., *Toplotna zaštita i zaštita od kondenzne vlage u savremenom zgradarstvu*. 1973, Beograd.
63. Šimetin, V., *Optimalna toplinska zaštita zgrada*. Građevinar, 1988. **40**(9): p. 399-405.

64. EURIMA. *The critical importance of building insulation for the environment*. Available from: www.eurima.org.
65. Republika Hrvatska, Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, *Energija u Hrvatskoj 2019, Godišnji energetske pregled*.
66. *Dugoročna strategija za poticanje ulaganja u obnovu nacionalnog fonda zgrada Republike Hrvatske*. Vlada Republike Hrvatske, 2014.
67. Republika Hrvatska, Ministarstvo gospodarstva, *Energija u Hrvatskoj 2011, Godišnji energetske pregled*.
68. Republika Hrvatska, Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, *Energija u Hrvatskoj 2017, Godišnji energetske pregled*.
69. Marđetko-Škoro, N., Fučić, L., Bertol-Vrček, J. , *Tehnički propisi o uštedi toplinske energije i toplinskoj zaštiti u zgradama*. Građevinar, 2005. **57**(7).
70. UNDP, *Priručnik za energetske certificiranje zgrada-1 dio*. 2010, Program UN-a za razvoj: Zagreb.
71. Goran, G. and e. al., *Strategija energetske razvika Republike Hrvatske: nacrt*. 1998, Ministarstvo gospodarstva Republike Hrvatske, Energetski institut "Hrvoje Požar": Zagreb.
72. *Zakon o energiji*. „Narodne novine“ broj 68/01; Available from: http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2001_07_68_1120.html.
73. *Strategija energetske razvika Republike Hrvatske*. „Narodne novine“ broj 38/02; Available from: http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2002_04_38_839.html.
74. *Strategija energetske razvoja Republike Hrvatske*. „Narodne novine“ broj 130/09; Available from: http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2009_10_130_3192.html.
75. *Strategija energetske razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu (NN 25/2020)*.
76. Dančević, D., *Termička i zvučna izolacija u građevinskim objektima*. 1968, Niš: Zajednica zavoda za zaštitu na radu.
77. *Pravilnik o tehničkim mjerama i uvjetima za toplinsku zaštitu zgrada*. 1970, Službeni list SFRJ br. 35/70.
78. *JUS U.J5.600 – Toplotna tehnika u građevinarstvu - Tehnički uslovi za projektovanje i građenje zgrada*. 1980, Službeni list SFRJ br. 3/80.
79. *JUS U.J5.600 – Toplotna tehnika u građevinarstvu - Tehnički uslovi za projektovanje i građenje zgrada*. 1987, Službeni list SFRJ 69/87.
80. *Tehnički propis o uštedi toplinske energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* „Narodne novine“ broj 79/05.
81. *Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* „Narodne novine“ broj 110/08.
82. *Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama*. „Narodne novine“ broj 97/14
83. *Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (Translation: Technical Regulation on the Rational Use of Energy and Thermal Insulation in Buildings)*. „Narodne novine“ broj 128/15, 70/18, 73/18, 86/18, 102/20; Available from: http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2014_08_97_1938.html.
84. *HRN EN ISO 52016-1:2017 Energijska svojstva zgrada -- Energija potrebna za grijanje i hlađenje, unutarnje temperature i osjetna i latentna toplinska opterećenja -- 1. dio: Postupci proračuna (ISO 52016-1:2017; EN ISO 52016-1:2017)*.
85. Çengel, Y.A., *Heat transfer : a practical approach*. 2004, New York: McGraw-Hill.
86. Greensite, J., *PHYSICS 430 Lecture Notes on Quantum Mechanics*. 2003, San Francisco.
87. Moran, M.J., et al., *Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 8th Edition*. 2014: Wiley.
88. Kirchhoff, G. (1860). *Über das Verhältniss zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht*. *Annalen der Physik und Chemie*, 109, 275–301.
89. Huang, Y., *7 - Electrical and thermal properties of activated carbon fibers*, in *Activated Carbon Fiber and Textiles*, J.Y. Chen, Editor. 2017, Woodhead Publishing: Oxford. p. 181-192.
90. Parsonage, N.G., *CHAPTER 6 - THERMAL CONDUCTIVITY*, in *The Gaseous State*, N.G. Parsonage, Editor. 1966, Pergamon. p. 83-92.

91. Abdou, A. and I. Budaiwi, *The variation of thermal conductivity of fibrous insulation materials under different levels of moisture content*. Construction and Building Materials, 2013. **43**: p. 533-544.
92. Willoughby, J., *30 - Insulation*, in *Plant Engineer's Reference Book (Second Edition)*, D.A. Snow, Editor. 2002, Butterworth-Heinemann: Oxford. p. 30-1-30-18.
93. *12 - Heat-insulating Materials and Sound-absorbing Materials*, in *Building Materials in Civil Engineering*, H. Zhang, Editor. 2011, Woodhead Publishing. p. 304-423.
94. Koronthalyova, O. and P. Matiasovsky, *Thermal Conductivity of Fibre Reinforced Porous Calcium Silicate Hydrate-based Composites*. Journal of Thermal Envelope and Building Science, 2003. **27**(1): p. 71-89.
95. dos Santos, W.N., *Effect of moisture and porosity on the thermal properties of a conventional refractory concrete*. Journal of the European Ceramic Society, 2003. **23**(5): p. 745-755.
96. Ochs, F., W. Heidemann, and H. Müller-Steinhagen, *Effective thermal conductivity of moistened insulation materials as a function of temperature*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008. **51**(3): p. 539-552.
97. Karamanos, A., S. Hadjarakou, and A.M. Papadopoulos, *The impact of temperature and moisture on the thermal performance of stone wool*. Energy and Buildings, 2008. **40**(8): p. 1402-1411.
98. Mar, J.D., E. Litovsky, and J. Kleiman, *Modeling and database development of conductive and apparent thermal conductivity of moist insulation materials*. Journal of building physics, 2008. **32**(1): p. 9-31.
99. Jerman, M. and R. Černý, *Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials*. Energy and Buildings, 2012. **53**: p. 39-46.
100. Pavlík, Z., et al., *Application of Effective Media Theory for Determination of Thermal Properties of Hollow Bricks as a Function of Moisture Content*. International Journal of Thermophysics, 2013. **34**(5): p. 894-908.
101. El Fgaier, F., et al., *Effect of sorption capacity on thermo-mechanical properties of unfired clay bricks*. Journal of Building Engineering, 2016. **6**: p. 86-92.
102. Litti, G., et al., *Hygrothermal performance evaluation of traditional brick masonry in historic buildings*. Energy and Buildings, 2015. **105**: p. 393-411.
103. Taoukil, D., et al., *Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood-concrete composite*. Construction and Building Materials, 2013. **48**: p. 104-115.
104. Willems, W.M., K. Schild, and S. Dinter, *Vieweg Handbuch Bauphysik Teil 1*. 2006: Vieweg.
105. Vrančić, T., *Toplinskoizolacijski materijali u graditeljstvu*. Građevinar, 2005. **57**(10): p. 829-833.
106. Aittomäki, A., *Determination of the overall heat transfer coefficient of multilayer structures under non-steady-state conditions*. Working paper. CIB session 1972, Tegernsee/Obb.
107. Atsonios, I.A., et al., *A comparative assessment of the standardized methods for the in-situ measurement of the thermal resistance of building walls*. Energy and Buildings, 2017. **154**: p. 198-206.
108. Gaspar, K., M. Casals, and M. Gangolells, *Review of criteria for determining HFM minimum test duration*. Energy and Buildings, 2018. **176**: p. 360-370.
109. Li, F.G.N., et al., *Solid-wall U-values: heat flux measurements compared with standard assumptions*. Building Research & Information, 2015. **43**(2): p. 238-252.
110. Trethowen, H., *Measurement errors with surface-mounted heat flux sensors*. Building and Environment, 1986. **21**(1): p. 41-56.
111. Meng, X., et al., *Factors affecting the in situ measurement accuracy of the wall heat transfer coefficient using the heat flow meter method*. Energy and Buildings, 2015. **86**: p. 754-765.
112. Cesaratto, P.G., M. De Carli, and S. Marinetti, *Effect of different parameters on the in situ thermal conductance evaluation*. Energy and Buildings, 2011. **43**(7): p. 1792-1801.
113. Cesaratto, P.G. and M. De Carli, *A measuring campaign of thermal conductance in situ and possible impacts on net energy demand in buildings*. Energy and Buildings, 2013. **59**: p. 29-36.

114. Gaspar, K., M. Casals, and M. Gangoells, *In situ measurement of façades with a low U-value: Avoiding deviations*. Energy and Buildings, 2018. **170**: p. 61-73.
115. Tadeu, A., et al., *In-Situ Thermal Resistance Evaluation of Walls Using an Iterative Dynamic Model*. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2015. **67**(1): p. 33-51.
116. Jiménez, M.J., B. Porcar, and M.R. Heras, *Application of different dynamic analysis approaches to the estimation of the building component U value*. Building and Environment, 2009. **44**(2): p. 361-367.
117. Gori, V. and C.A. Elwell, *Estimation of thermophysical properties from in-situ measurements in all seasons: Quantifying and reducing errors using dynamic grey-box methods*. Energy and Buildings, 2018. **167**: p. 290-300.
118. Roulet, C., J. Gass, and I. Marcus, *In situ U-value measurement: reliable results in shorter time by dynamic interpretation of the measured data*. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings III; ASHRAE Transactions: Atlanta, GA, USA, 1987: p. 777-784.
119. Anderlind, G., *Multiple Regression Analysis of in situ Thermal Measurements — Study of an Attic Insulated with 800 mm Loose Fill Insulation*. Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes, 1992. **16**(1): p. 81-104.
120. Norlén, U., *Estimating thermal parameters of outdoor test cells*. Building and Environment, 1990. **25**(1): p. 17-24.
121. Naveros, I., et al., *Physical parameters identification of walls using ARX models obtained by deduction*. Energy and Buildings, 2015. **108**: p. 317-329.
122. Jiménez, M.J., H. Madsen, and K.K. Andersen, *Identification of the main thermal characteristics of building components using MATLAB*. Building and Environment, 2008. **43**(2): p. 170-180.
123. Jiménez, M.J. and M.R. Heras, *Application of multi-output ARX models for estimation of the U and g values of building components in outdoor testing*. Solar Energy, 2005. **79**(3): p. 302-310.
124. Gutschker, O., *Parameter identification with the software package LORD*. Building and Environment, 2008. **43**(2): p. 163-169.
125. Baker, P.H. and H.A.L. van Dijk, *PASLINK and dynamic outdoor testing of building components*. Building and Environment, 2008. **43**(2): p. 143-151.
126. Naveros, I., et al., *Setting up and validating a complex model for a simple homogeneous wall*. Energy and Buildings, 2014. **70**: p. 303-317.
127. Deconinck, A.-H. and S. Roels, *A Maximum Likelihood Estimation of the Thermal Resistance of a Cavity Wall from On-site Measurements*. Energy Procedia, 2015. **78**: p. 3276-3281.
128. Naveros, I., M.J. Jiménez, and M.R. Heras, *Analysis of capabilities and limitations of the regression method based in averages, applied to the estimation of the U value of building component tested in Mediterranean weather*. Energy and Buildings, 2012. **55**(0): p. 854-872.
129. Jiménez, M.J., B. Porcar, and M.R. Heras, *Estimation of building component UA and gA from outdoor tests in warm and moderate weather conditions*. Solar Energy, 2008. **82**(7): p. 573-587.
130. Deconinck, A.-H. and S. Roels, *Comparison of characterisation methods determining the thermal resistance of building components from onsite measurements*. Energy and Buildings, 2016. **130**: p. 309-320.
131. Rasooli, A., L. Itard, and C.I. Ferreira, *A response factor-based method for the rapid in-situ determination of wall's thermal resistance in existing buildings*. Energy and Buildings, 2016. **119**: p. 51-61.
132. Fox, M., S. Goodhew, and P. De Wilde, *Building defect detection: External versus internal thermography*. Building and Environment, 2016. **105**: p. 317-331.
133. S.B. Tian, *Study on In-situ Measurement Method of Heat Transfer Coefficient of Building Envelop (Master Thesis)*, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 2006.
134. L. Pan, B.M. Chen, Z.H. Fang, B.F. Han, Y.T. Zhen, *Measurement of thermal resistance of building enclosures by means of the heat box method*, Build. Energy Environ. 2 (2005) 74-77.

135. L. Pan, B.M. Chen, Z.H. Fang, Y.T. Zhen. *Field measurement and data processing method of envelope's thermal resistance*, *Build. Energy Environ.* 6 (2005) 80-84.
136. X.F. Zhu, L.P. Li, X.B. Yin, *An in-situ test apparatus of heat transfer coefficient for building envelope*, *Build. Energy Effic.* 256 (2012) 57-60.
137. Meng, X., et al., *A new simple method to measure wall thermal transmittance in situ and its adaptability analysis*. *Applied Thermal Engineering*, 2017. **122**: p. 747-757.
138. Scarpa, M., et al., *New Measurement Procedure for U-value Assessment via Heat Flow Meter*. *Energy Procedia*, 2017. **113**: p. 174-181.
139. Kilic, G., *Using advanced NDT for historic buildings: Towards an integrated multidisciplinary health assessment strategy*. *Journal of Cultural Heritage*, 2015. **16**(4): p. 526-535.
140. Hopper, J., et al., *Assessing retrofitted external wall insulation using infrared thermography*. *Structural Survey*, 2012. **30**(3): p. 245-266.
141. Taylor, T., J. Counsell, and S. Gill, *Energy efficiency is more than skin deep: Improving construction quality control in new-build housing using thermography*. *Energy and Buildings*, 2013. **66**: p. 222-231.
142. Taieb, A. and H. Dekkiche, *Infrared Imaging as a Means of Analyzing and Improving Energy Efficiency of Building Envelopes: The case of a LEED Gold Building*. *Procedia Engineering*, 2015. **118**: p. 639-646.
143. Kominsky, J.R., J. Luckino, and T. Martin, *Passive infrared thermography—a qualitative method for detecting moisture anomalies in building envelopes*. *Tedford Pond*, 2007. **2005**: p. 1-11.
144. Barreira, E., R.M.S.F. Almeida, and J.M.P.Q. Delgado, *Infrared thermography for assessing moisture related phenomena in building components*. *Construction and Building Materials*, 2016. **110**: p. 251-269.
145. Gonçalves, M.D. and T. Colantonio, *Commissioning of Exterior Building Envelopes of Large Buildings for Resultant Moisture Accumulation Using Infrared Thermography and Other Diagnostic Tools*, *Therm. Perform. Ext. Envel. Whole Build. X Int. Conf. (2007)* 1–10.
146. Grinzato, E., P.G. Bison, and S. Marinetti, *Monitoring of ancient buildings by the thermal method*. *Journal of Cultural Heritage*, 2002. **3**(1): p. 21-29.
147. Edis, E., I. Flores-Colen, and J. De Brito, *Building Thermography: Detection of Delamination of Adhered Ceramic Claddings Using the Passive Approach*. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2014. **34**(1): p. 268.
148. Titman, D.J., *Applications of thermography in non-destructive testing of structures*. *NDT & E International*, 2001. **34**(2): p. 149-154.
149. de Freitas, S.S., V.P. de Freitas, and E. Barreira, *Detection of façade plaster detachments using infrared thermography – A nondestructive technique*. *Construction and Building Materials*, 2014. **70**(0): p. 80-87.
150. Kalamees, T., *Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia*. *Building and Environment*, 2007. **42**(6): p. 2369-2377.
151. Lerma, C., E. Barreira, and R.M.S.F. Almeida, *A discussion concerning active infrared thermography in the evaluation of buildings air infiltration*. *Energy and Buildings*, 2018. **168**: p. 56-66.
152. *Thermal performance of buildings -- Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes -- Infrared method (ISO 6781:1983 modified; EN 13187:1998)*.
153. Bianchi, F., et al., *Infrared Thermography Assessment of Thermal Bridges in Building Envelope: Experimental Validation in a Test Room Setup*. *Sustainability*, 2014. **6**(10): p. 7107-7120.
154. O'Grady, M., A.A. Lechowska, and A.M. Harte, *Infrared thermography technique as an in-situ method of assessing heat loss through thermal bridging*. *Energy and Buildings*, 2017. **135**: p. 20-32.
155. O'Grady, M., A.A. Lechowska, and A.M. Harte, *Application of infrared thermography technique to the thermal assessment of multiple thermal bridges and windows*. *Energy and Buildings*, 2018. **168**: p. 347-362.
156. Baldinelli, G., et al., *A model for the improvement of thermal bridges quantitative assessment by infrared thermography*. *Applied Energy*, 2018. **211**: p. 854-864.

157. Sfarra, S., et al., *Improving the detection of thermal bridges in buildings via on-site infrared thermography: The potentialities of innovative mathematical tools*. Energy and Buildings, 2019. **182**: p. 159-171.
158. Asdrubali, F., G. Baldinelli, and F. Bianchi, *A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings*. Applied Energy, 2012. **97**: p. 365-373.
159. Lehmann, B., et al., *Effects of individual climatic parameters on the infrared thermography of buildings*. Applied Energy, 2013. **110**(0): p. 29-43.
160. P. V. Maldague, X., *Introduction to NDT by active infrared thermography*. Vol. 60. 2002.
161. S. Prakash Rao, D., *Infrared thermography and its applications in civil engineering*. Vol. 82. 2008.
162. Balaras, C.A. and A.A. Argiriou, *Infrared thermography for building diagnostics*. Energy and Buildings, 2002. **34**(2): p. 171-183.
163. Kyllili, A., et al., *Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review*. Applied Energy, 2014. **134**(0): p. 531-549.
164. Meola, C., S. Boccardi, and G.m. Carlomagno, *Chapter 4 - Nondestructive Testing With Infrared Thermography*, in *Infrared Thermography in the Evaluation of Aerospace Composite Materials*, C. Meola, S. Boccardi, and G.m. Carlomagno, Editors. 2017, Woodhead Publishing. p. 85-125.
165. Nardi, I., et al., *Quantification of heat energy losses through the building envelope: A state-of-the-art analysis with critical and comprehensive review on infrared thermography*. Building and Environment, 2018. **146**: p. 190-205.
166. Kirimtat, A. and O. Krejcar, *A review of infrared thermography for the investigation of building envelopes: Advances and prospects*. Energy and Buildings, 2018. **176**: p. 390-406.
167. Lucchi, E., *Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. **82**: p. 3077-3090.
168. Soares, N., et al., *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 and Buildings, 2019. **182**: p. 88-110.
169. Avdelidis, N.P. and A. Moropoulou, *Emissivity considerations in building thermography*. Energy and Buildings, 2003. **35**(7): p. 663-667.
170. Barreira, E. and V.P. de Freitas, *Evaluation of building materials using infrared thermography*. Construction and Building Materials, 2007. **21**(1): p. 218-224.
171. Beausoleil-Morrison, I. *Modelling mixed convection heat transfer at internal buildings surfaces*. in *Proceedings of Building Simulation*. 1999.
172. Hoyano, A., K. Asano, and T. Kanamaru, *Analysis of the sensible heat flux from the exterior surface of buildings using time sequential thermography*. Atmospheric Environment, 1999. **33**(24): p. 3941-3951.
173. Hagishima, A. and J. Tanimoto, *Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces*. Building and Environment, 2003. **38**(7): p. 873-881.
174. Fohanno, S. and G. Polidori, *Modelling of natural convective heat transfer at an internal surface*. Energy and Buildings, 2006. **38**(5): p. 548-553.
175. Belussi, L., et al., *Energy performance assessment with empirical methods: application of energy signature*, in *Opto-Electronics Review*. 2015. p. 85.
176. Maroy, K., et al., *Assessing the thermal performance of insulating glass units with infrared thermography: Potential and limitations*. Energy and Buildings, 2017. **138**: p. 175-192.
177. Madding, R., *Finding R-values of stud frame constructed houses with IR thermography*. Proc. InfraMation, 2008. **2008**: p. 261-277.
178. Evangelisti, L., et al., *Experimental investigation of the influence of convective and radiative heat transfers on thermal transmittance measurements*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2016. **78**: p. 214-223.

179. Janković, A., B. Antunović, and L. Preradović, *Alternative Method for On Site Evaluation of Thermal Transmittance*. FACTA UNIVERSITATIS, Series Mechanical Engineering, 2017. **15**: p. 341-351.
180. Awbi, H.B. and A. Hatton, *Natural convection from heated room surfaces*. Energy and Buildings, 1999. **30**(3): p. 233-244.
181. Khalifa, A.J.N. and R.H. Marshall, *Validation of heat transfer coefficients on interior building surfaces using a real-sized indoor test cell*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1990. **33**(10): p. 2219-2236.
182. Michejev, M.A., *Základy sdílení tepla*. 1952: Průmyslové vydavatelství.
183. King, W.J., *The basic laws and data of heat transmission*. 1932, [New York: American Society of Mechanical Engineers. I v. (various pagings).
184. Nusselt, W., *Das Grundgesetz des Wärmeüberganges*. Gesundheits-Ingenieur, 1915. **38**(42): p. 477-482.
185. Heilmann, R.H., *Surface heat transmission*. Mechanical Engineering, 1929. **51**: p. 355.
186. Wilkes, G. and C. Peterson, *Radiation and convection from surfaces in various positions*. Transactions, ASHVE, 1938. **44**: p. 513-520.
187. American Society of Heating, R. and E. Air-Conditioning, *2001 ASHRAE handbook : fundamentals*. 2001, Atlanta, GA.: ASHRAE.
188. *Performance of buildings -- Detection of heat, air and moisture irregularities in buildings by infrared methods -- Part 3: Qualifications of equipment operators, data analysts and report writers (ISO 6781-3:2015)*
189. Givoni, B., *Effectiveness of mass and night ventilation in lowering the indoor daytime temperatures. Part I: 1993 experimental periods*. Energy and Buildings, 1998. **28**(1): p. 25-32.
190. *HRN EN 13163:2016 Toplinsko-izolacijski proizvodi za zgrade -- Tvornički izrađeni proizvodi od ekspaniranog polistirena (EPS) -- Specifikacija (EN 13163:2012+A2:2016)*.
191. *HRN EN 13162:2015 Toplinsko-izolacijski proizvodi za zgrade -- Tvornički izrađeni proizvodi od mineralne vune (MW) -- Specifikacija (EN 13162:2012+A1:2015)*.
192. *Tehnički propis za građevinske konstrukcije „Narodne novine“ broj 17/17, 75/20*.
193. *European Committee for Standardization (CEN). EN 197-1, cement - part 1: composition, specifications and conformity criteria for common cements. Brussels, Belgium: CEN; 2011*.
194. *European Committee for Standardization (CEN). EN 459-1. Building lime – part 1: definitions; specifications and conformity criteria. Brussels, Belgium: CEN; 2005*.
195. *Self-Compacting Concrete European Project Group. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products or Structures (EFNARC); 2005*.
196. *American Concrete Institute (ACI) Committee 229. 229R-13 Report on Controlled Low-Strength Materials. Farmington Hills, Michigan, USA: ACI; 2013*.
197. *HRN EN ISO 10456:2008 Građevni materijali i proizvodi -- Svojstva s obzirom na toplinu i vlagu -- Tablične projektne vrijednosti i postupci određivanja nazivnih i projektnih toplinskih vrijednosti (ISO 10456:2007; EN ISO 10456:2007)*.
198. *HRN ISO 8301:1998 Toplinska izolacija -- Mjerenje toplinskog otpora i srodnih veličina u ustaljenom stanju -- Tokomjerni uređaj (ISO 8301:1991)*.
199. *HRN EN 12667:2002 Toplinske značajke građevnih materijala i proizvoda -- Određivanje toplinskog otpora metodom sa zaštićenom vrućom pločom i tokomjernom metodom -- Proizvodi s visokim i srednjim toplinskim otporom (EN 12667:2001)*.
200. *HRN ISO 8302:1998 Toplinska izolacija -- Mjerenje toplinskog otpora i srodnih veličina u ustaljenom stanju -- Pločasti uređaj sa zaštićenom vrućom pločom (ISO 8302:1991)*.
201. *Testo 435-4. [cited 2018 1.3.]; Available from: <https://www.testo.com/hr-HR/testo-435-4/p/0563-4354>*.
202. *Testo AG. U-Value Measurement; Testo AG: Lenzkirch, Germany, 2014*.

203. CHAMPS-BES: Coupled Heat, Air, Moisture and Pollutant Simulation in Building Envelope Systems, TU Dresden.
204. International Organization for Standardization. ISO/IEC Guide 98-3:2008—Uncertainty of Measurement—Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM:1995); International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2008.
205. Sonderegger, R. and M. Modera. *Electric co-heating: A method for evaluating seasonal heating efficiencies and heat loss rates in dwellings*. in *Proceedings of the Second International CIB Symposium, Energy Conservation in the Built Environment, Copenhagen*. 1979.
206. Sonderegger, R.C., P.E. Condon, and M.P. Modera. *In-situ measurements of residential energy performance using electric co-heating*. 1980. United States.
207. Maeiro, J.R.M., *Analysis of the Thermal Performance of Opaque Building Envelope Components Using In situ Measurements*. 2016.
208. Jack, R., et al., *First evidence for the reliability of building co-heating tests*. *Building Research & Information*, 2018. **46**(4): p. 383-401.
209. Farmer, D., D. Johnston, and D. Miles-Shenton, *Obtaining the heat loss coefficient of a dwelling using its heating system (integrated coheating)*. *Energy and Buildings*, 2016. **117**: p. 1-10.
210. Johnston, D., J. Wingfield, and D. Miles-Shenton, *Measuring the fabric performance of UK dwellings*, in *Proceedings of the Association of Researchers in Construction Management (ARCOM) Twenty-Sixth Annual Conference*. 2010: Leeds.
211. Energy performance of buildings - Method for calculation of the design heat load -- Part 3: Domestic hot water systems heat load and characterization of needs, M.M.-., M8-3 (EN 12831-3:2017).
212. HRN ISO 9869:1998 *Toplinska izolacija -- Građevinski elementi -- Mjerenje toplinskog otpora i toplinske prohodnosti in situ (ISO 9869:1994)*.
213. *KI Expert Plus v7.10.0.0 Računalni program za proračun toplinske zaštite i racionalnu uporabu energije te izradu energetske certifikata zgrada. Knauf Insulation d.o.o (<http://www.knaufinsulation.hr/>)* .
214. Medanić, B., I. Pšunder, and V. Skendrović, *Neki aspekti financiranja i financijskog odlučivanja u građevinarstvu*. 2005, Osijek: Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, Osijek.
215. Čulo, K., *Ekonomika investicijskih projekata*. 2010, Osijek: Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku.
216. Šošić, I., *Primijenjena statistika*. 2004, Zagreb: Školska knjiga.
217. Benšić, M., Šuvak, N., *Primijenjena statistika*. 2013, Sveučilište J.J. Strossmayera, Odjel za matematiku: Osijek.
218. Chaddock, R. E. (1925), *Principles and Methods of Statistics*. Houghton Mifflin Company, The Riverside Press, Cambridge.
219. Freund, R.J., W.J. Wilson, and P. Sa, *Regression Analysis Statistical Modeling of a Response Variable*. 2006, London: Elsevier Inc.
220. Al-Hajj, A. and M.W. Horner, *Modelling the running costs of buildings*. *Construction Management and Economics*, 1998. **16**: p. 459-470.
221. Wilcox, R.R., *Basic Statistics*. 2009: Oxford University Press.
222. Montgomery, D.C., *Design and Analysis of Experiments*. 2001, New York: John Wiley & Sons, Inc.
223. ISO 6781 - *Toplinska izolacija -- Kvalitativno otkrivanje toplinskih mostova u ubodnim konstrukcijama zgrada s pomoću infracrvenog snimanja (ISO 6781:1983)* International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1983.
224. IEC 60584-1:2013 *Thermocouples - Part 1: EMF specifications and tolerances*.

PRILOZI

POPIS PRILOGA

PRILOG 1 – Deskriptivna statistika baze podataka za razvoj modela procjene U vrijednosti temperaturnom metodom

PRILOG 2 – Prikaz korelacije zavisne varijable i nezavisnih varijabli

PRILOG 1 – Deskriptivna statistika baze podataka za razvoj modela procjene U vrijednosti temperaturnom metodom

Variable	Descriptive Statistics (Model 1)						
	Valid N	Mean	Median	Minimum	Maximum	Variance	Std.Dev.
U vrijednost [W/m2K]	1699	1.46718	1.43750	0.02450	3.27850	0.361687	0.601404
Tw [°C]	1699	17.65413	17.73500	13.09500	23.01500	4.477042	2.115902
Ti [°C]	1699	20.62913	20.81500	14.23000	26.11000	4.450639	2.109654
Te [°C]	1699	4.91957	5.05000	-0.75000	11.90000	5.578005	2.361780
ΔT [°C]	1699	15.70956	15.69500	14.00000	18.38000	0.768353	0.876558
Ti-Tw [°C]	1699	2.97565	2.96000	0.01000	6.28000	1.323167	1.150290

Variable	Descriptive Statistics (Model 2)						
	Valid N	Mean	Median	Minimum	Maximum	Variance	Std.Dev.
U vrijednost [W/m2K]	3110	0.63697	0.63830	0.00000	1.76427	0.117900	0.343366
Tw [°C]	3110	17.64428	17.76500	13.01000	21.66983	2.749219	1.658077
Ti [°C]	3110	18.60833	18.74500	13.04000	24.01500	4.658316	2.158313
Te [°C]	3110	2.42153	2.25000	-1.73167	9.30000	4.422098	2.102878
ΔT [°C]	3110	16.18680	16.12583	14.00000	19.12333	1.312677	1.145721
Ti-Tw [°C]	3110	1.30968	1.36617	-1.04500	3.97033	0.609138	0.780473

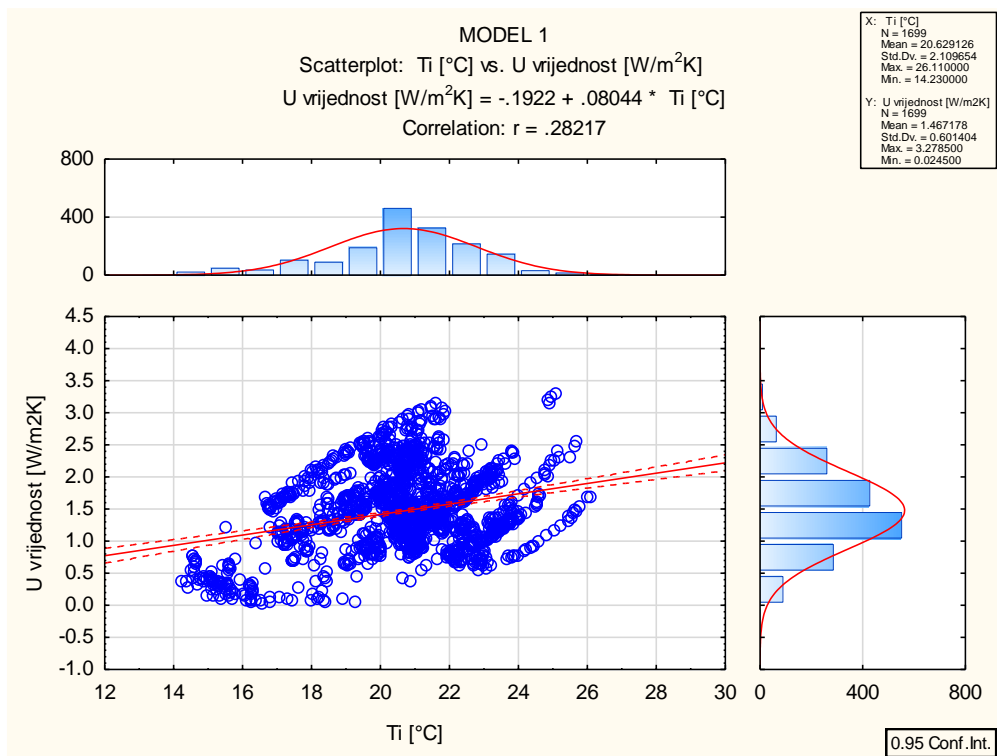
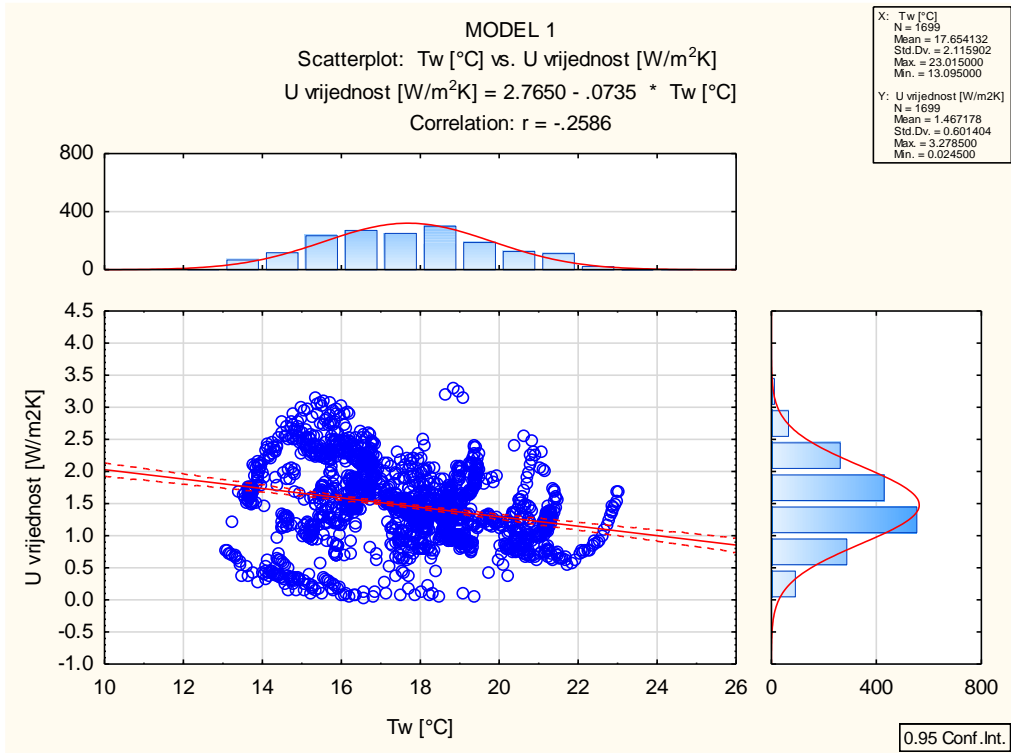
Variable	Descriptive Statistics (Model 3)						
	Valid N	Mean	Median	Minimum	Maximum	Variance	Std.Dev.
U vrijednost [W/m2K]	970	0.91767	0.90955	0.40180	1.27040	0.012151	0.110232
Tw [°C]	970	24.90968	24.93700	23.63600	25.50700	0.065663	0.256248
Ti [°C]	970	27.99522	28.04200	24.95700	28.55900	0.123883	0.351971
Te [°C]	970	2.03253	1.92000	-3.11000	7.29000	3.555467	1.885595
ΔT [°C]	970	25.96268	26.09450	19.51000	30.98800	3.449063	1.857165
Ti-Tw [°C]	970	3.08554	3.10150	1.26900	3.98200	0.089762	0.299603

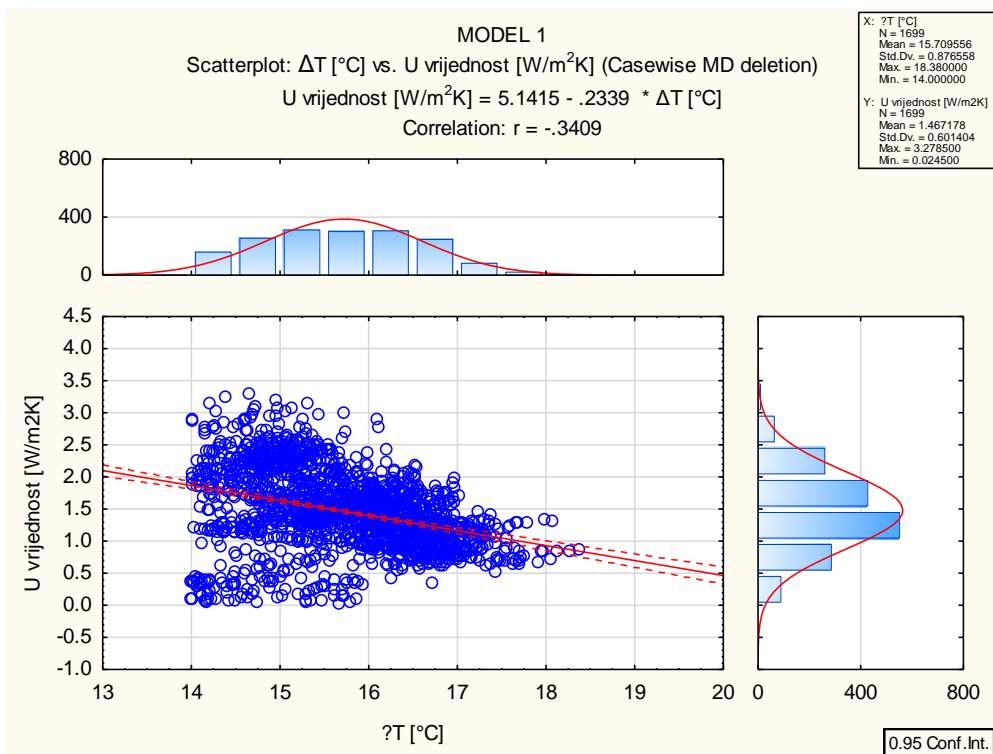
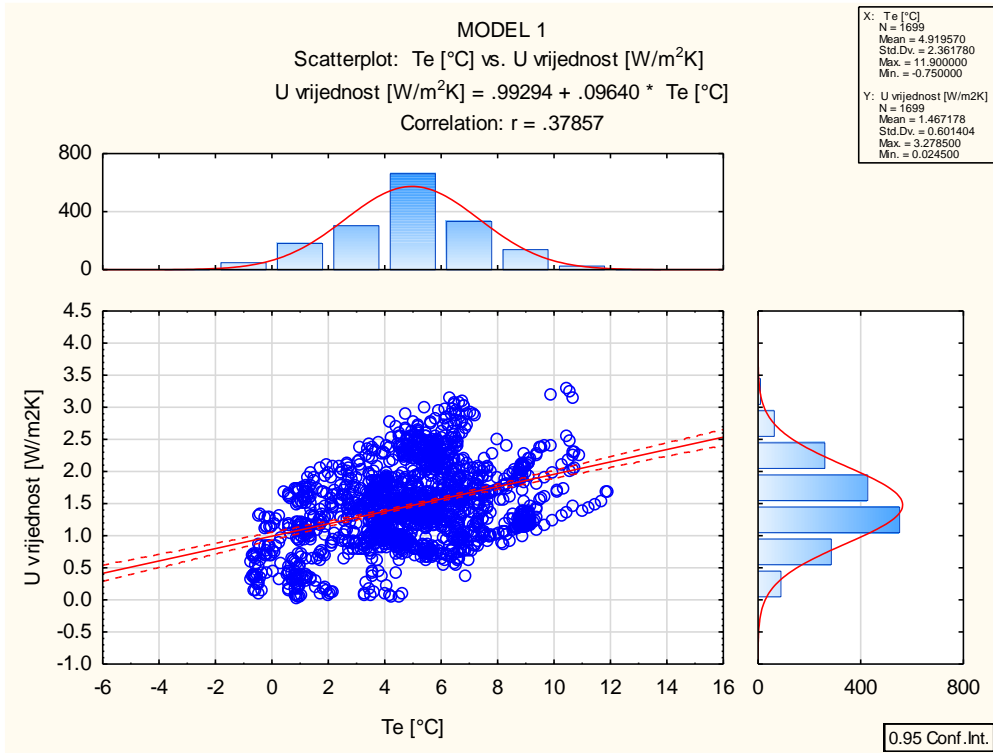
Variable	Descriptive Statistics (Model 4)						
	Valid N	Mean	Median	Minimum	Maximum	Variance	Std.Dev.
U vrijednost [W/m2K]	3617	0.48892	0.46496	0.03120	2.52924	0.03341	0.182784
Tw [°C]	3617	28.09842	28.47700	22.31135	30.21143	1.00666	1.003322
Ti [°C]	3617	29.58968	29.70900	26.62200	31.21900	0.31801	0.563927
Te [°C]	3617	6.07350	6.36000	-3.31000	16.85000	22.43075	4.736111
ΔT [°C]	3617	23.51617	23.48900	14.00200	32.29900	19.14680	4.375705
Ti-Tw [°C]	3617	1.49126	1.27200	0.01500	4.72912	0.33320	0.577235

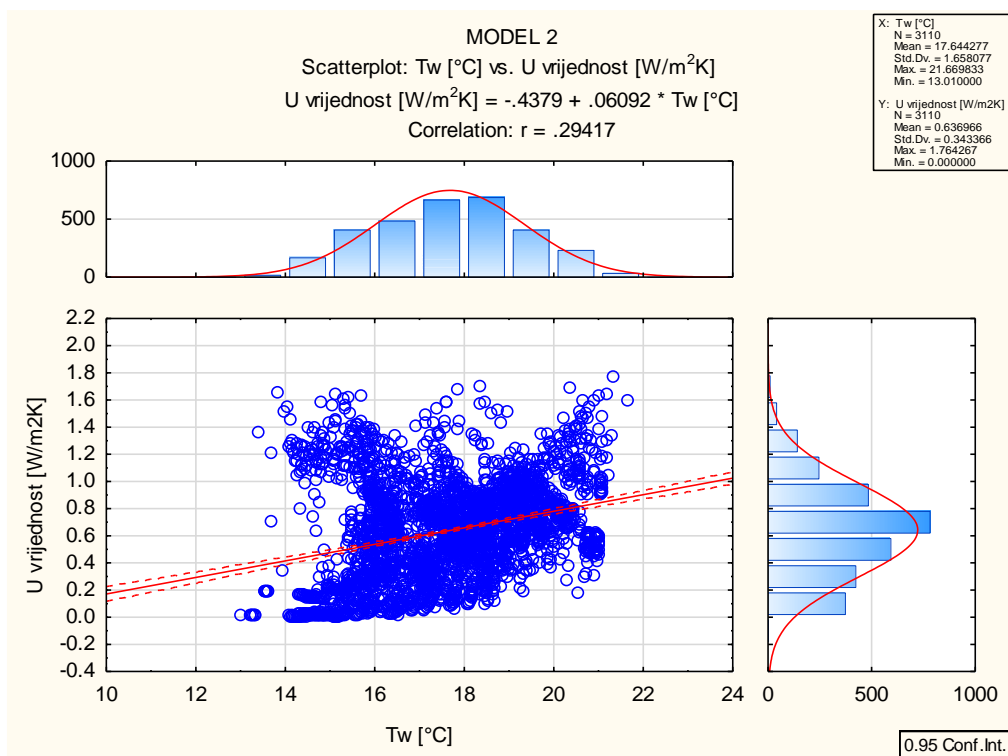
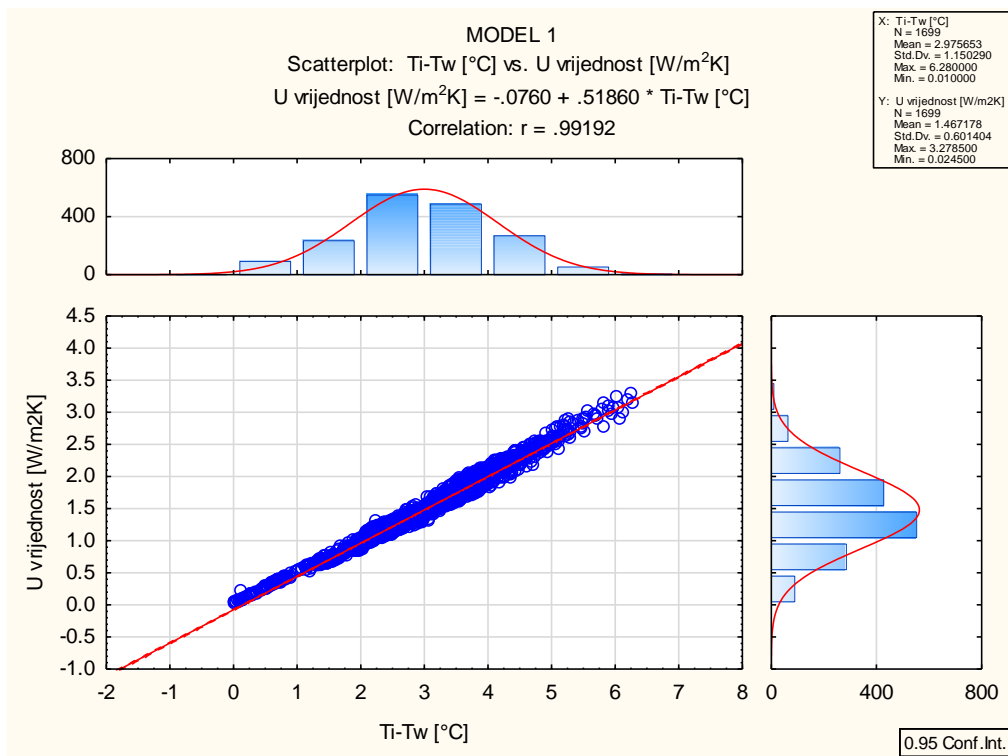
Variable	Descriptive Statistics (Model 5)						
	Valid N	Mean	Median	Minimum	Maximum	Variance	Std.Dev.
U vrijednost [W/m2K]	1978	1.10557	1.19280	0.51520	1.69040	0.075644	0.275034
Tw [°C]	1978	24.19910	24.06900	22.41500	25.67800	0.944286	0.971744
Ti [°C]	1978	28.07730	28.11600	24.96900	28.70600	0.121021	0.347880
Te [°C]	1978	1.23128	1.20500	-3.30000	7.29000	3.976478	1.994111
ΔT [°C]	1978	26.84602	26.82950	19.64800	31.43800	4.031501	2.007860
Ti-Tw [°C]	1978	3.87820	4.13250	1.76000	5.49600	1.153139	1.073843

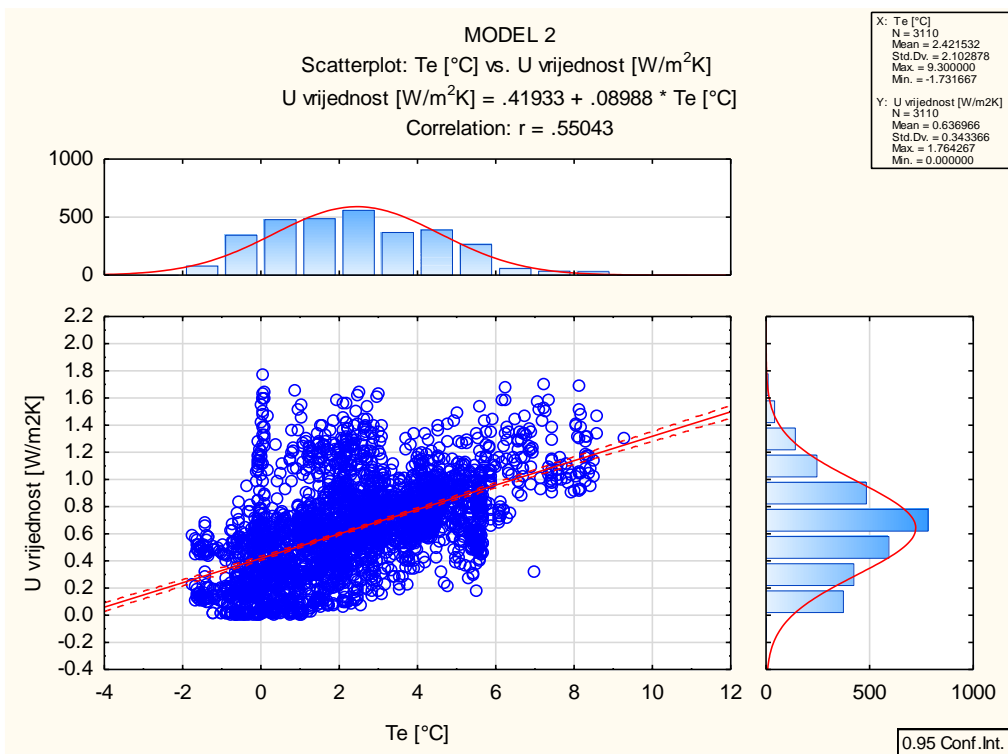
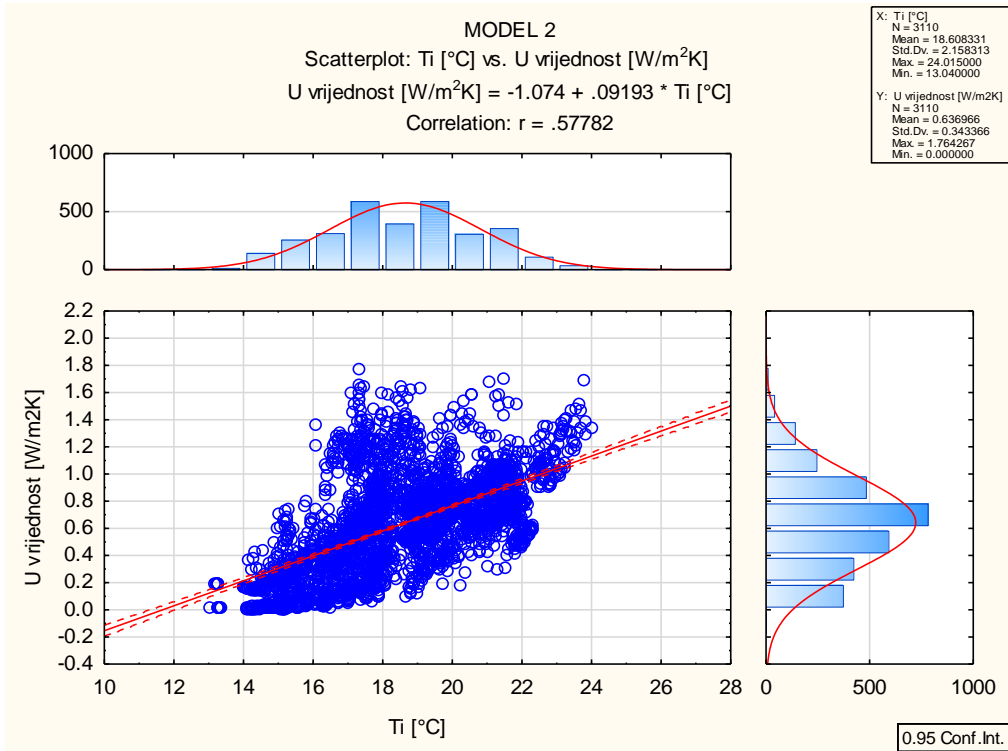
Variable	Descriptive Statistics (Model 6)						
	Valid N	Mean	Median	Minimum	Maximum	Variance	Std.Dev.
U vrijednost [W/m2K]	2571	0.41261	0.40100	0.03110	1.53951	0.01932	0.138991
Tw [°C]	2571	28.72227	28.80500	24.59518	29.99400	0.23373	0.483460
Ti [°C]	2571	29.84269	29.77200	27.51285	31.15200	0.15591	0.394855
Te [°C]	2571	8.19168	8.09000	-1.03000	17.11000	12.71298	3.565526
ΔT [°C]	2571	21.65101	21.72100	14.00600	30.64600	11.45548	3.384594
Ti-Tw [°C]	2571	1.12042	1.11600	0.09000	2.91767	0.06224	0.249475

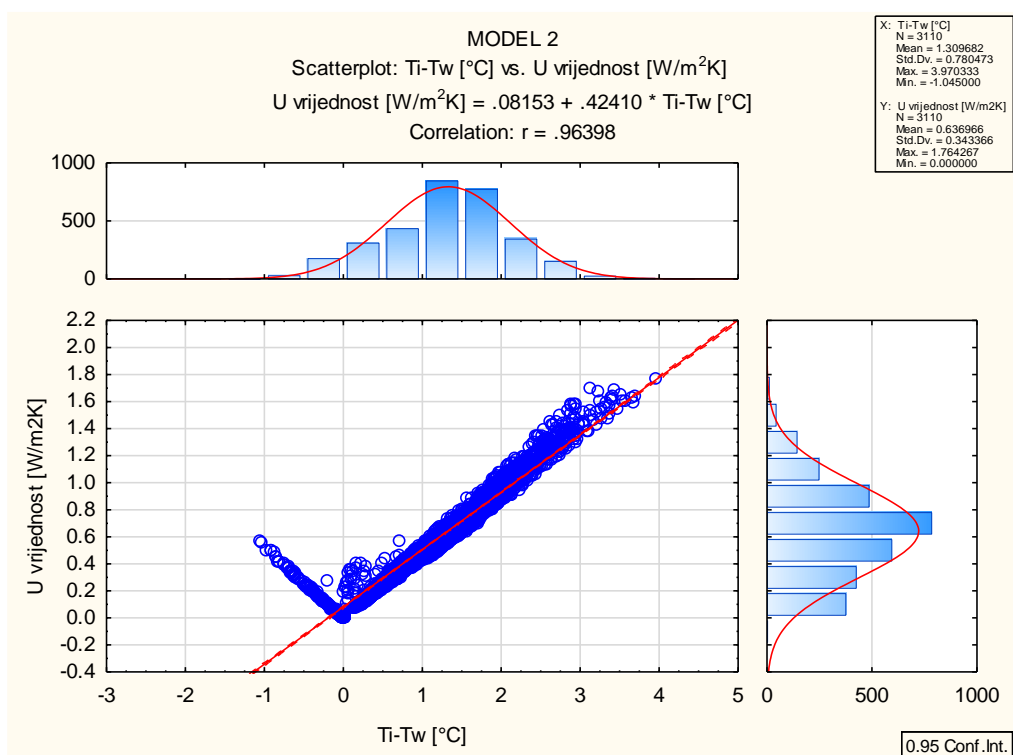
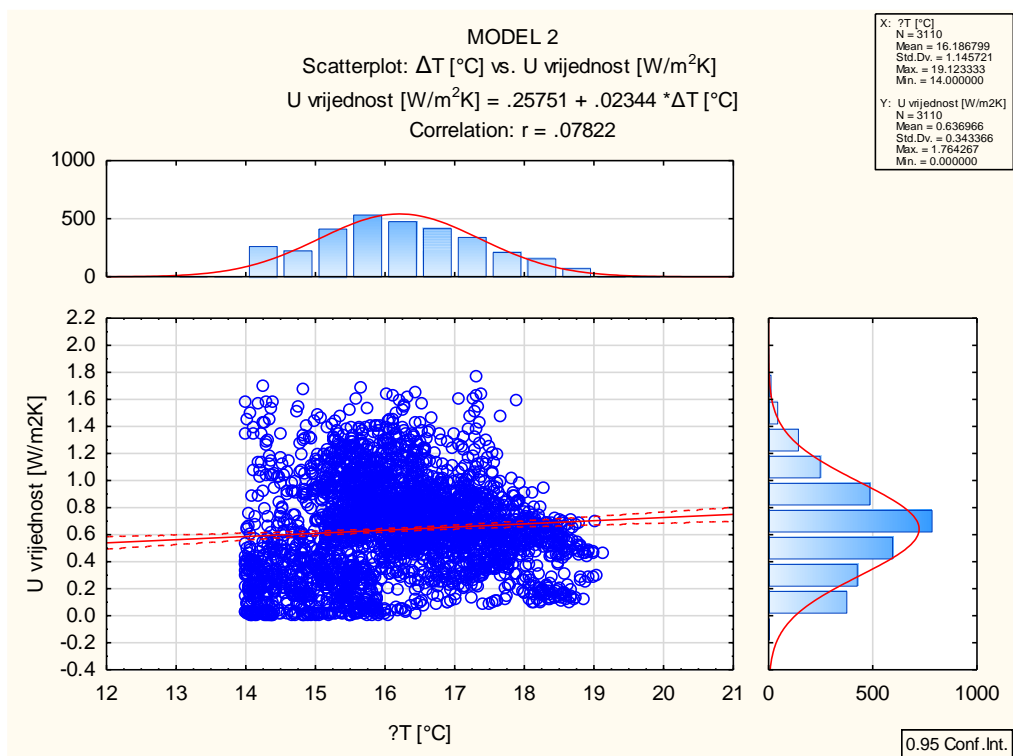
PRILOG 2 – Prikaz korelacije zavisne varijable i nezavisnih varijabli

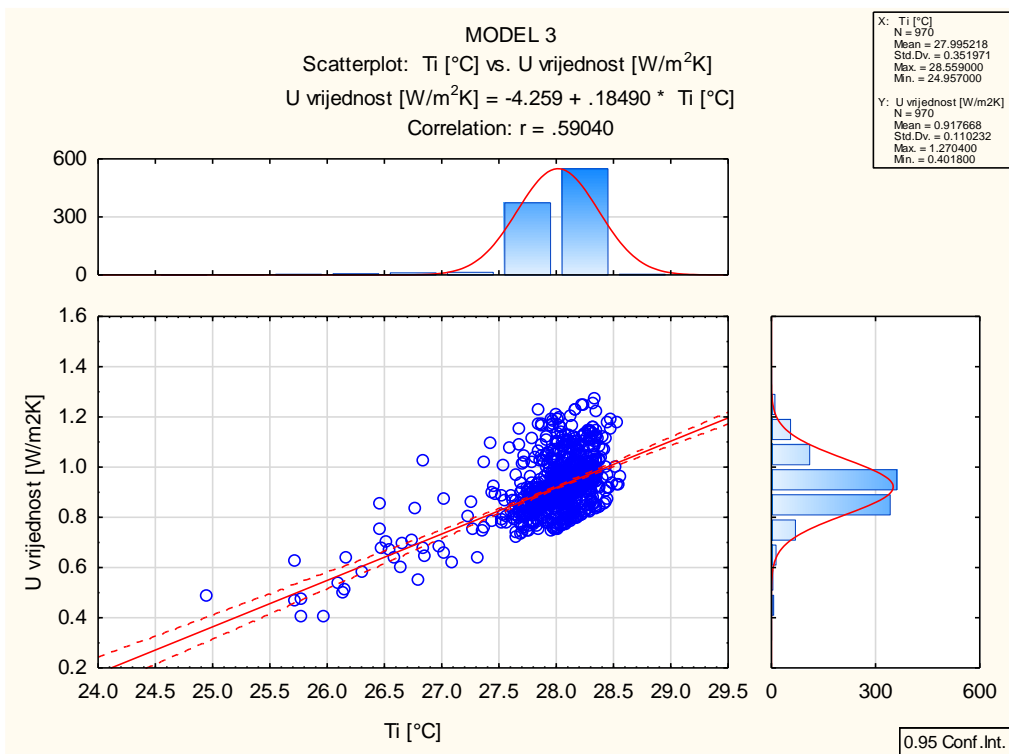
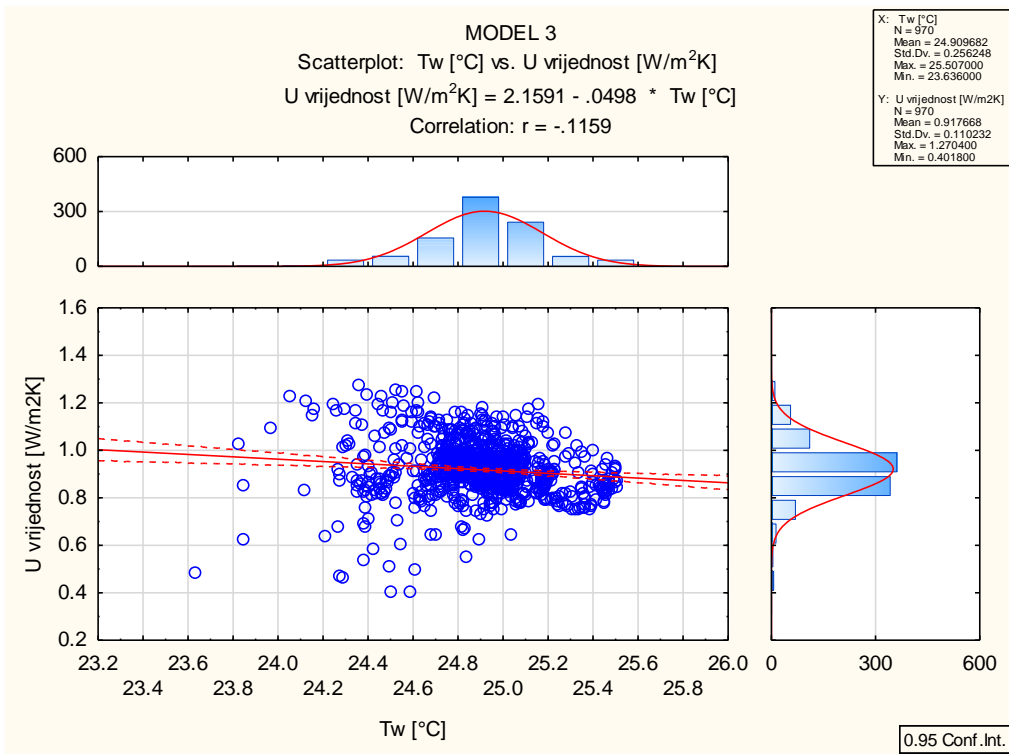


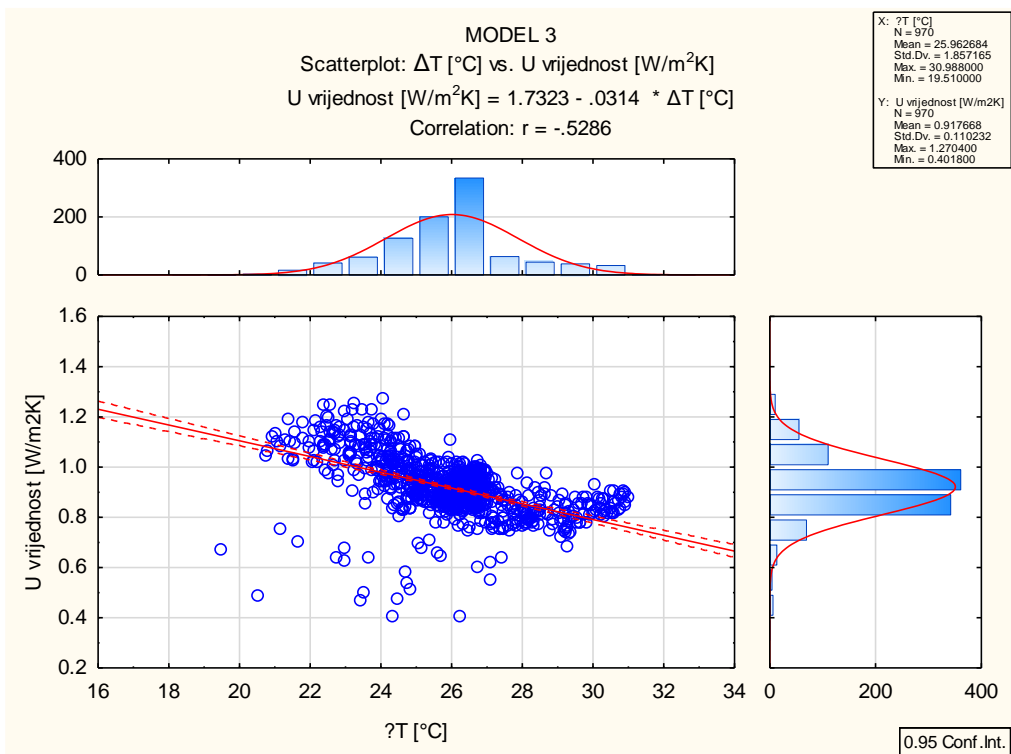
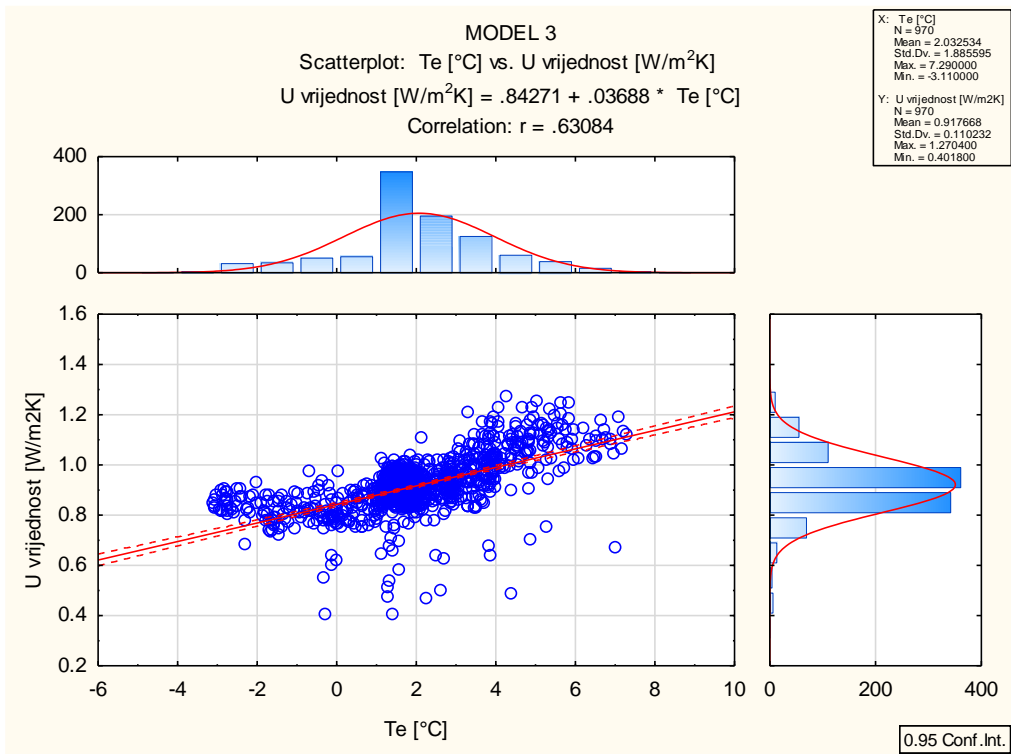


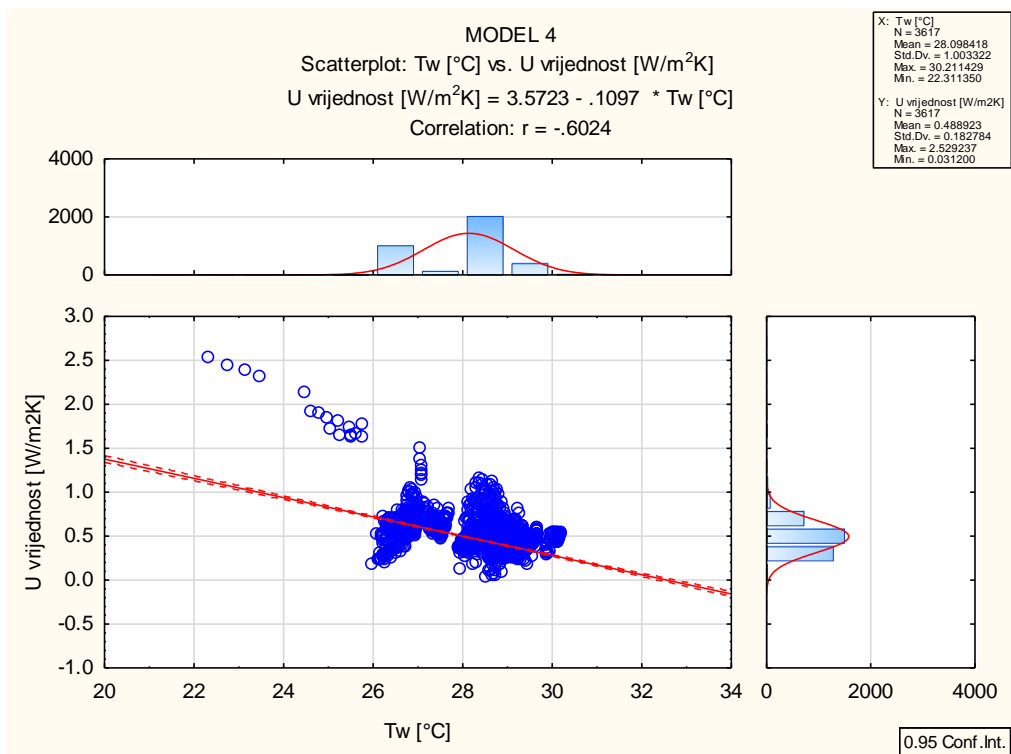
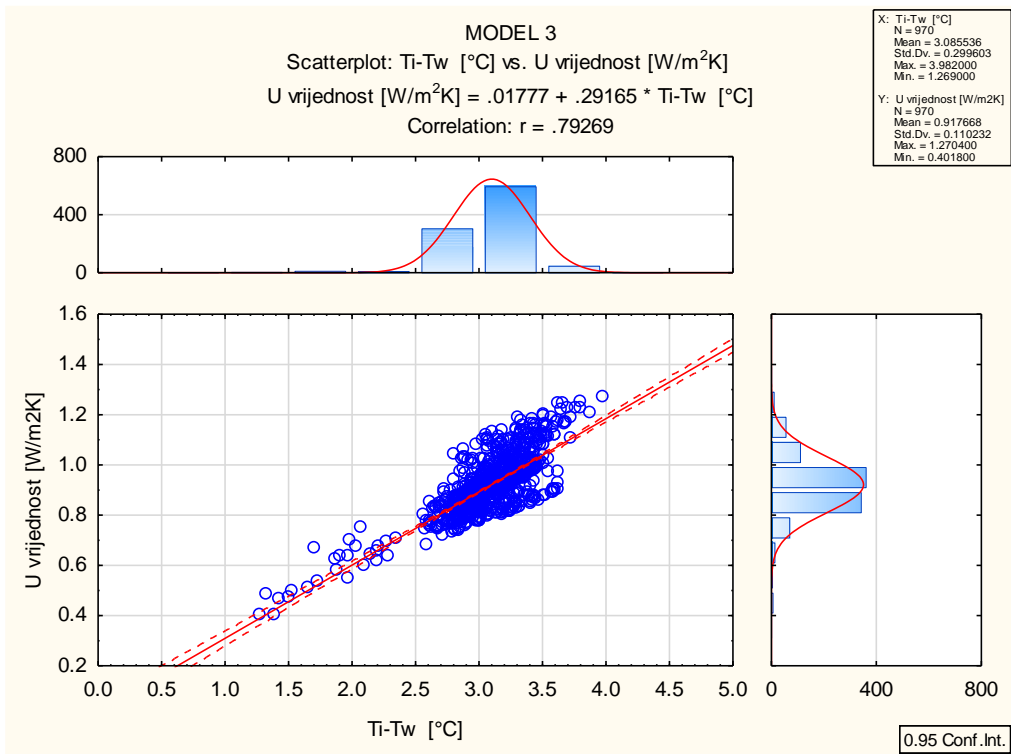


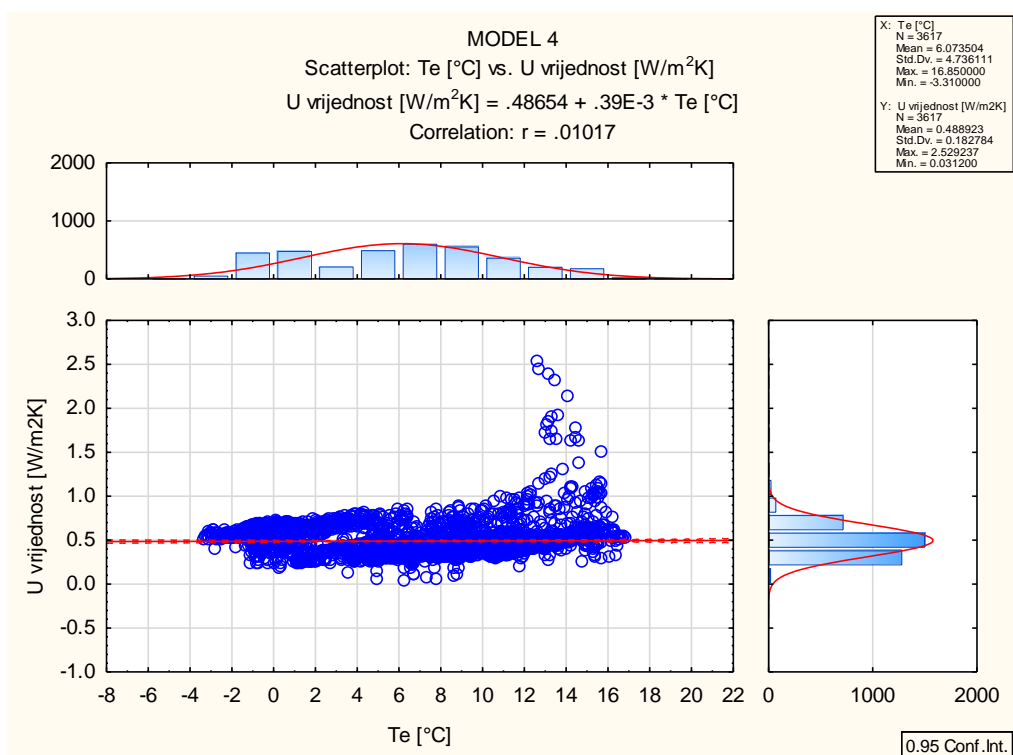
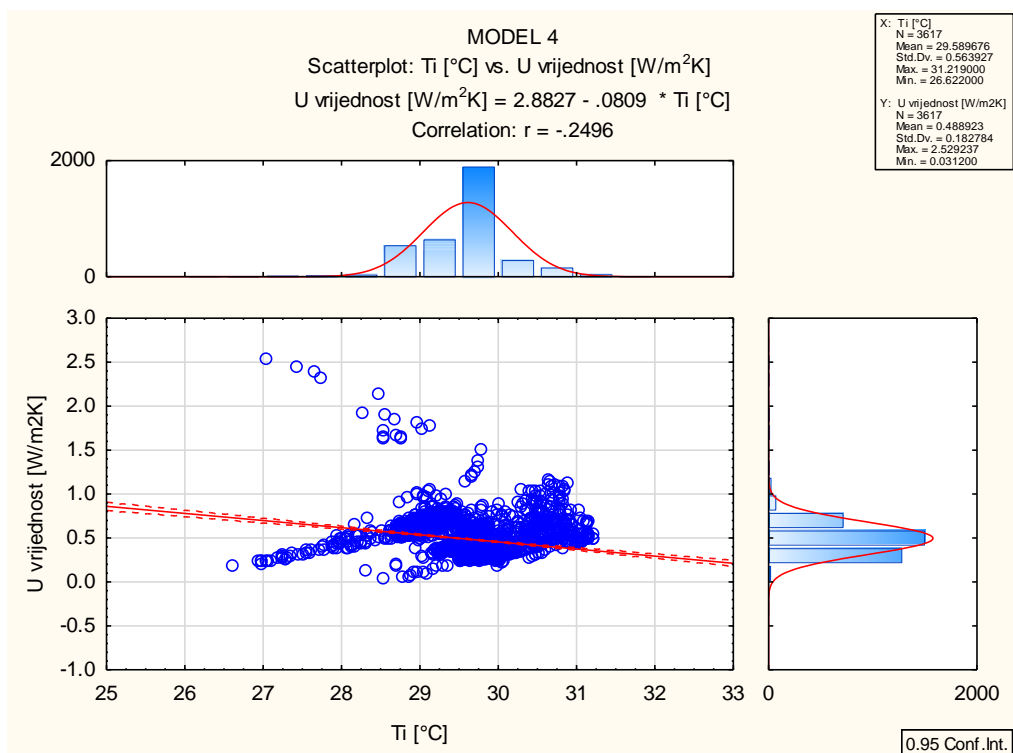


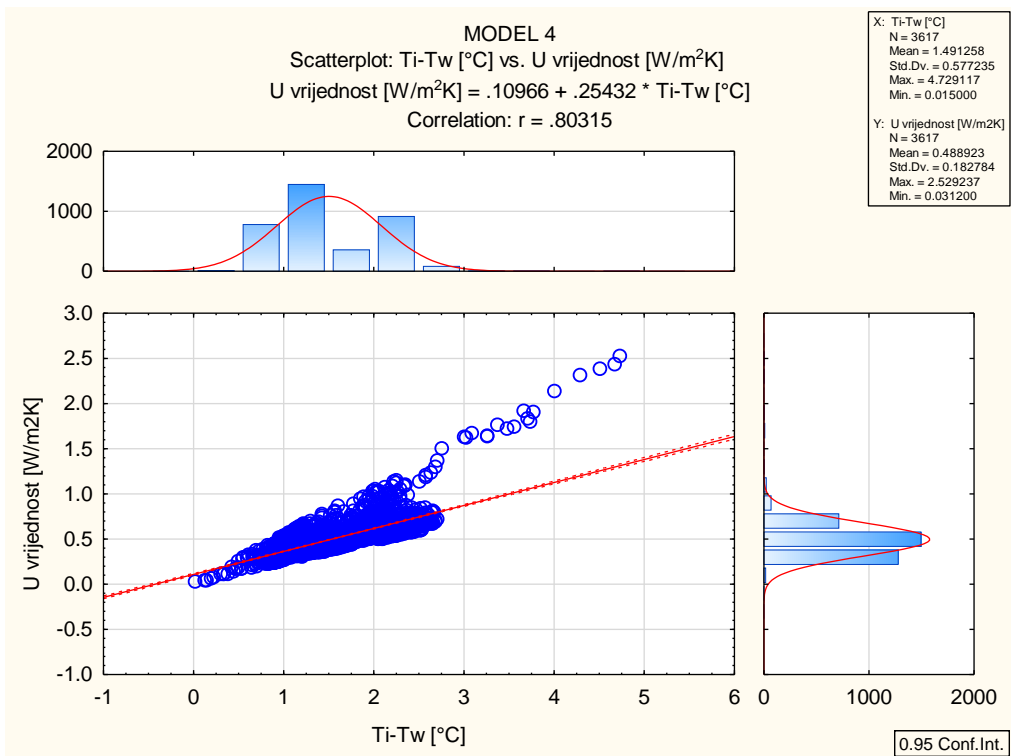
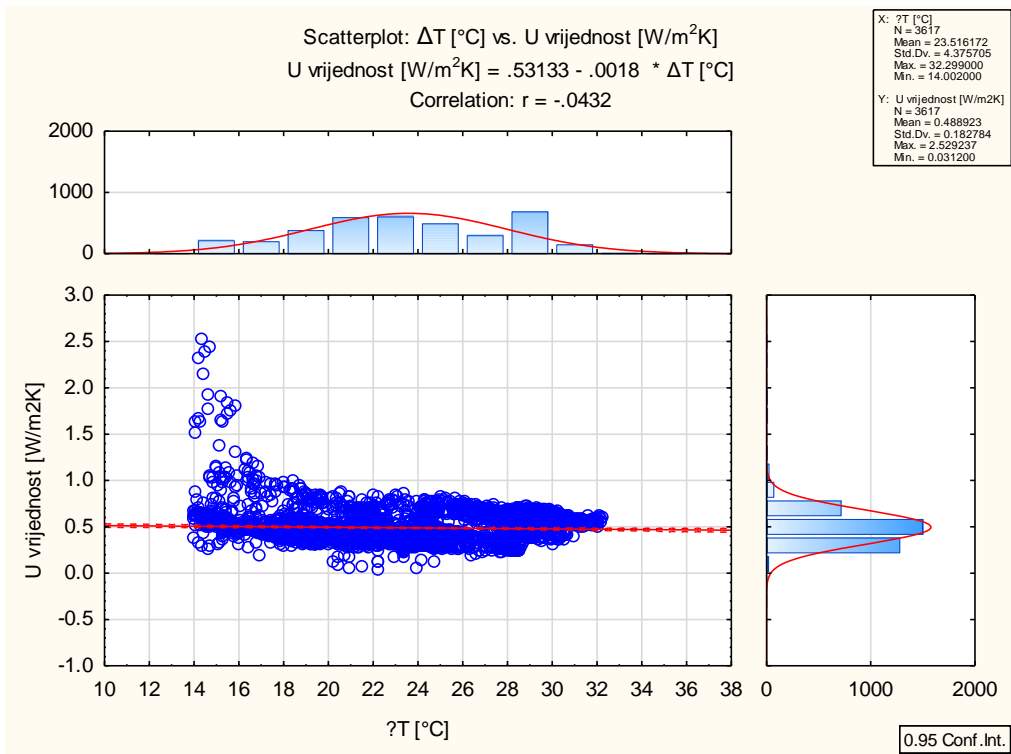


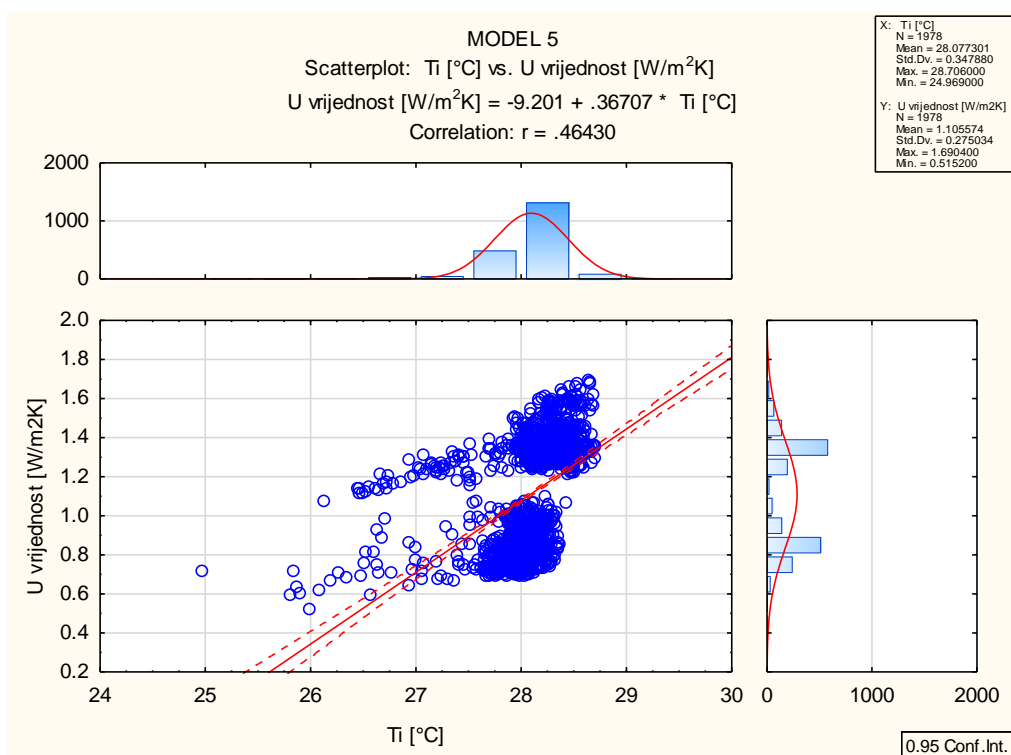
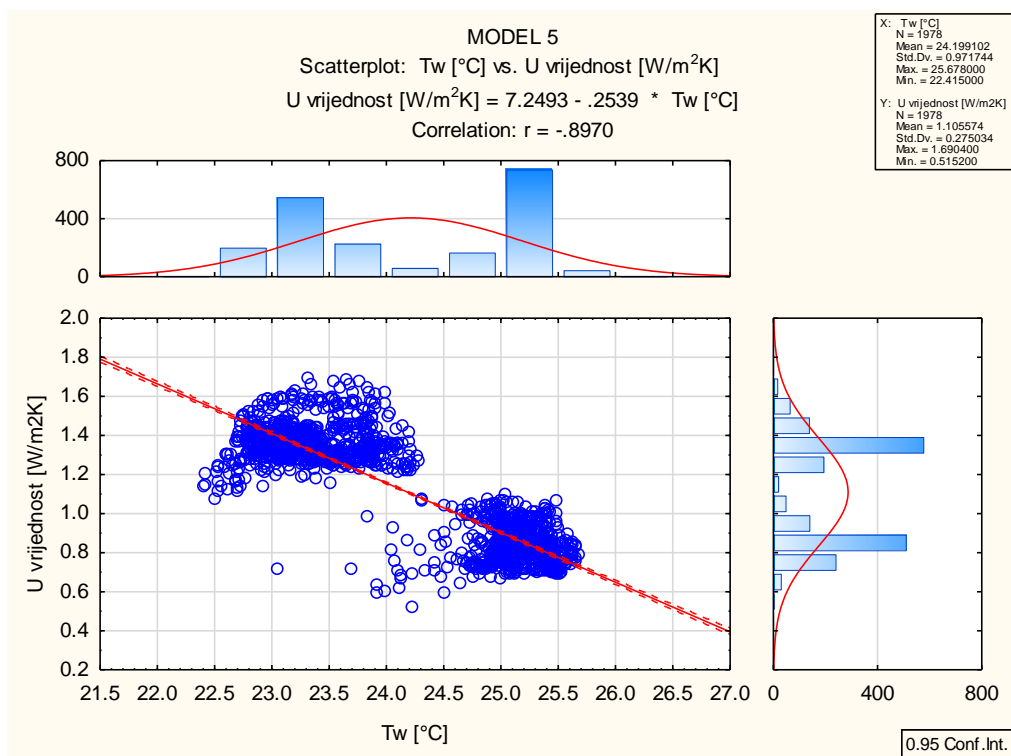


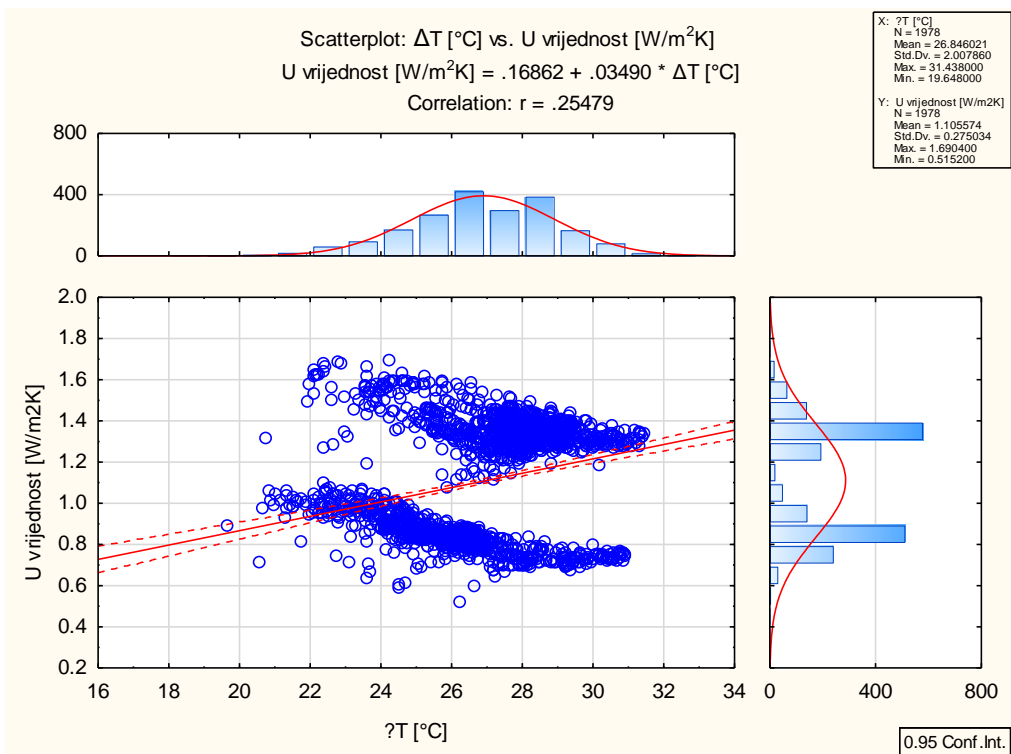
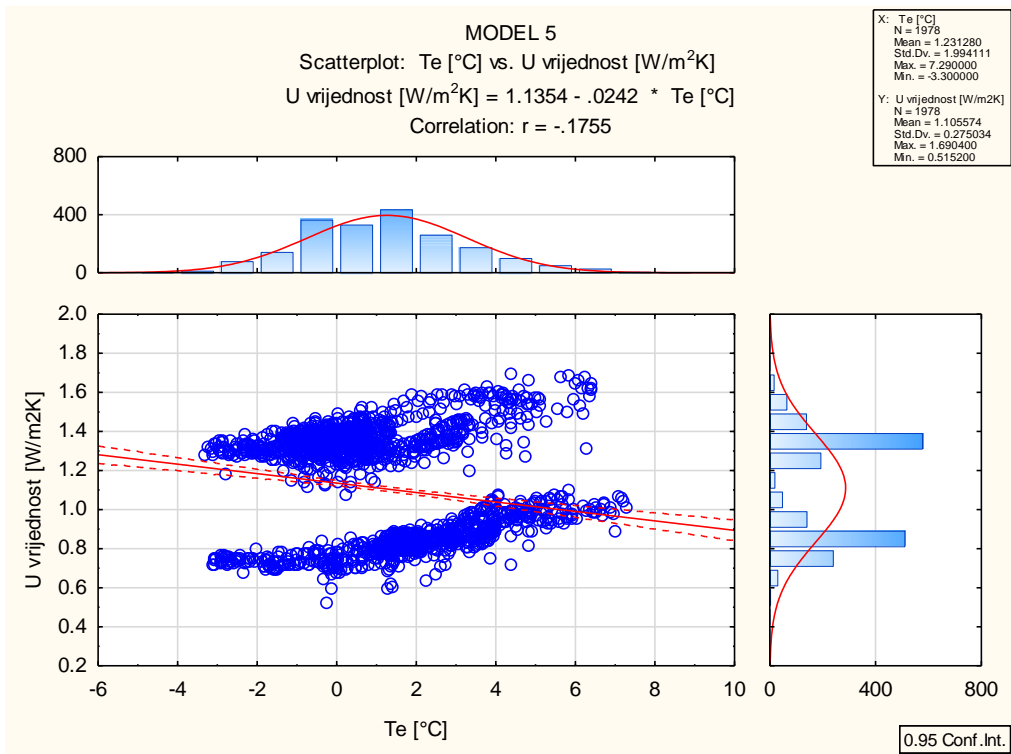


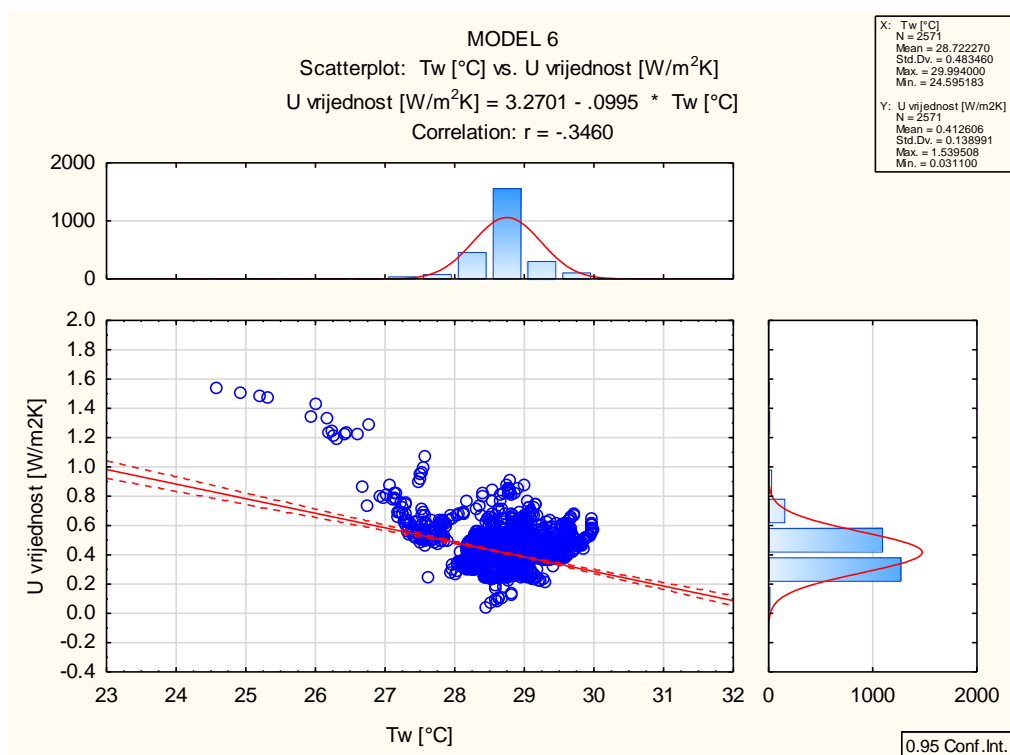
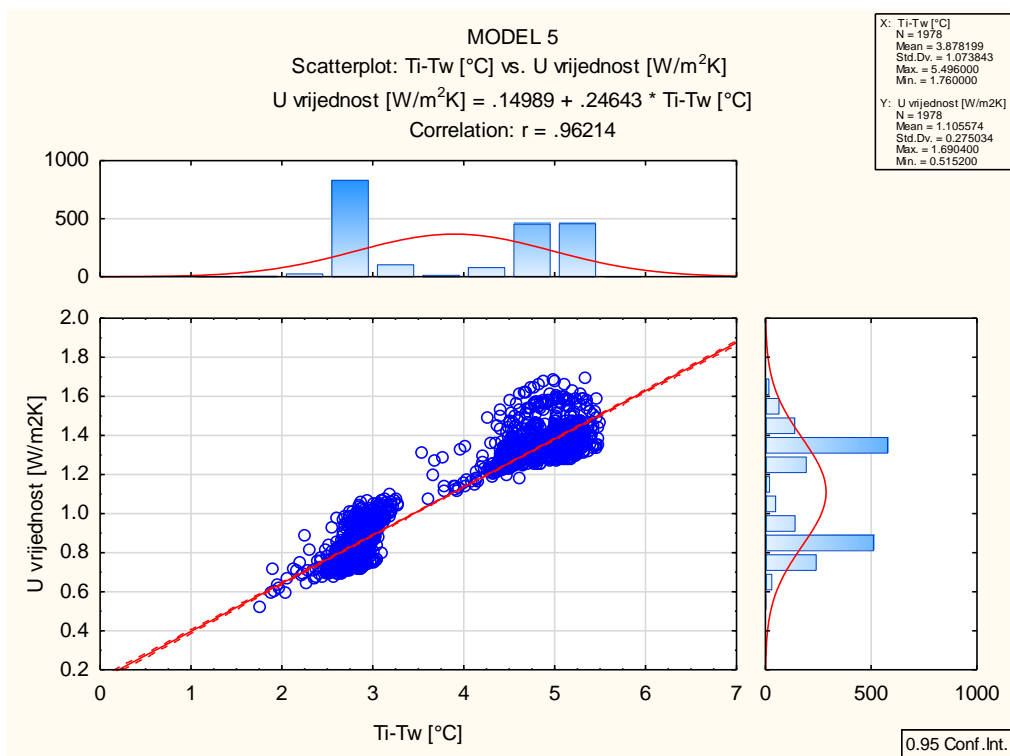


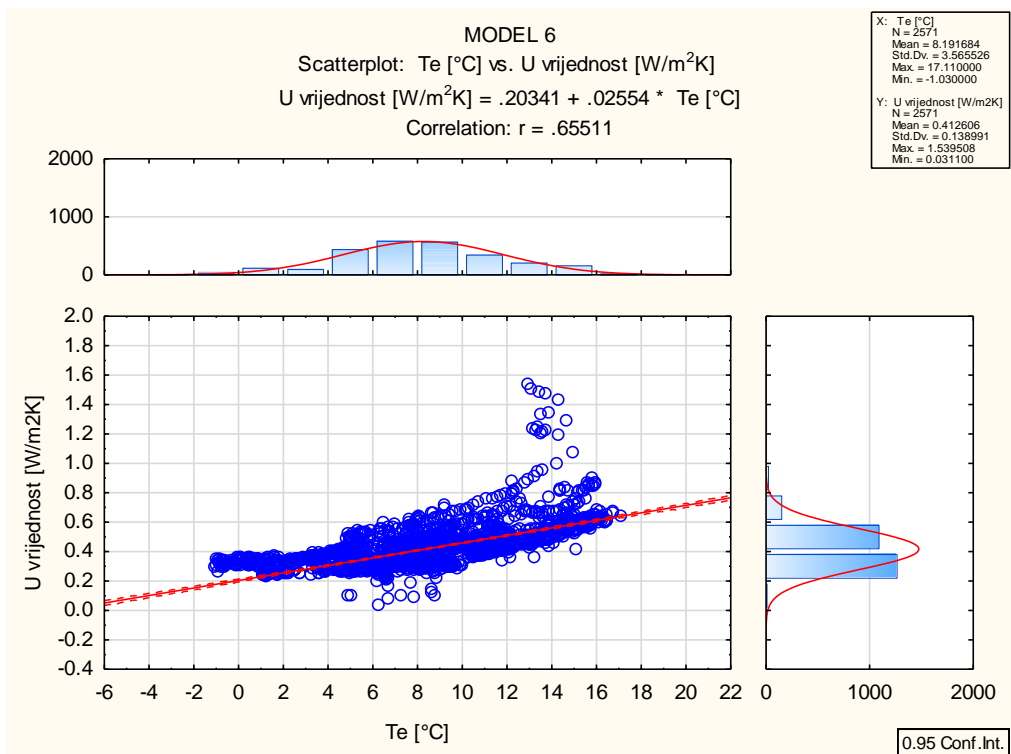
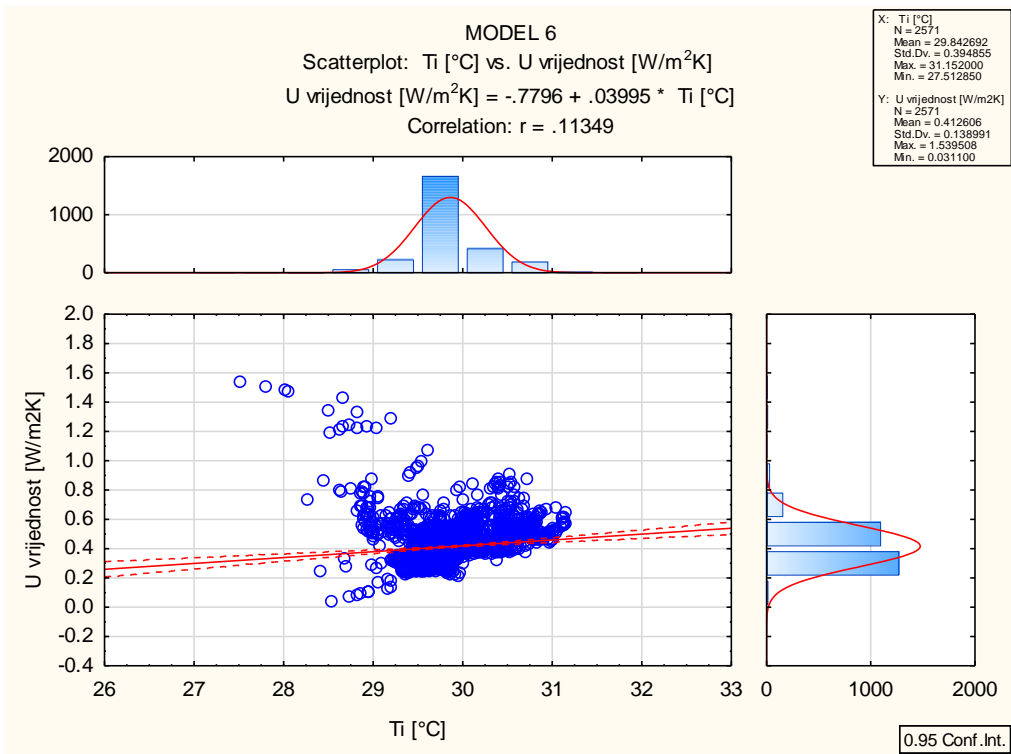


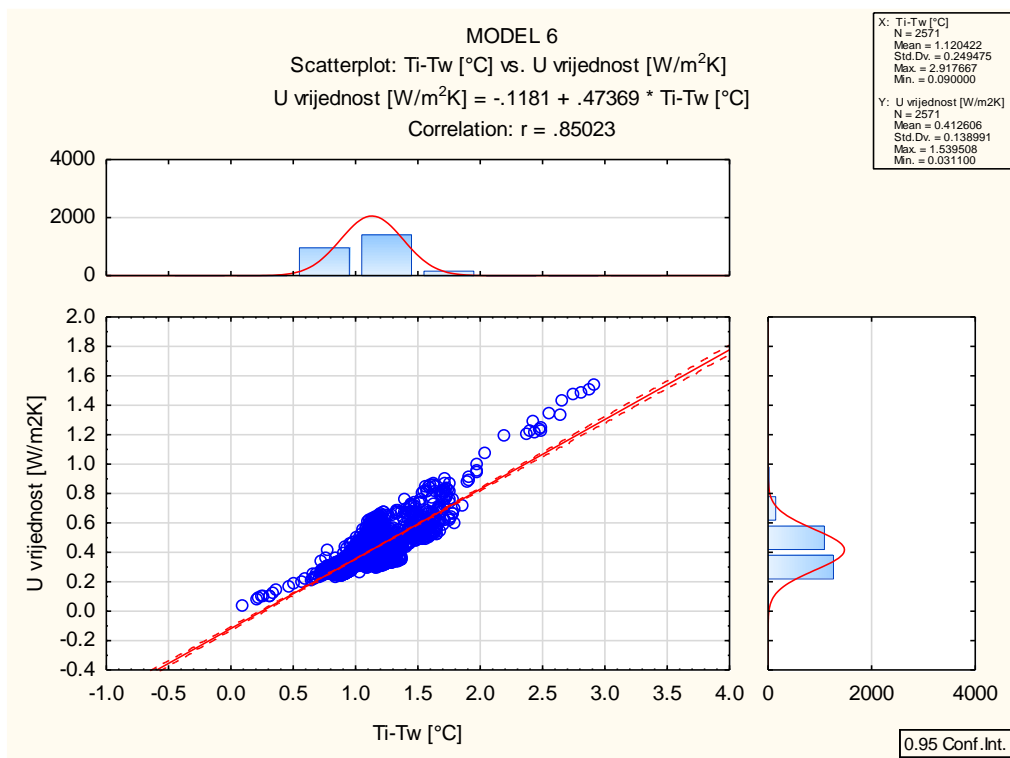
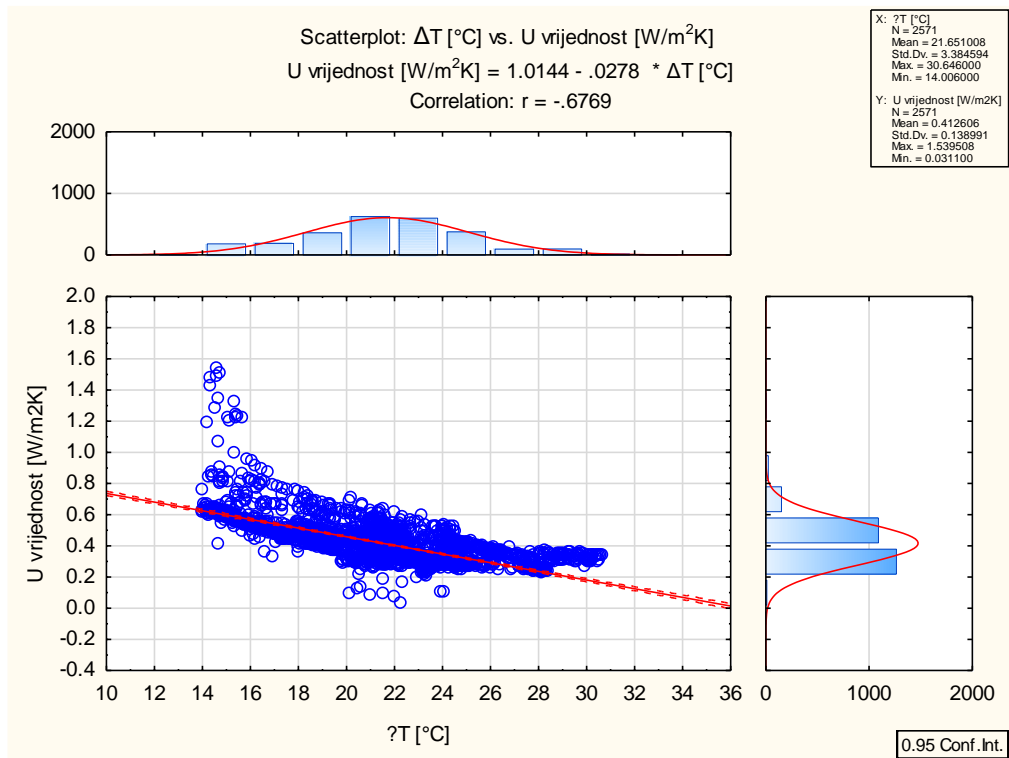












CURRICULUM VITAE

Mihaela Domazetović, mag. ing. aedif. rođena je 19. veljače 1991. godine u Osijeku. Srednju školu, I. gimnaziju u Osijeku, završila je 2009. godine te je iste godine upisala sveučilišni preddiplomski studij na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek. Nakon završenog preddiplomskog studija na istom Fakultetu upisala je diplomski studij, smjer Nosive konstrukcije. Za vrijeme studiranja primala je stipendije za izvrsnost. Tijekom studiranja bila je demonstrator iz predmeta Građevna statika II. Stručnu praksu odradila je u građevinskom poduzeću HARTBEX u Poljskoj. U sklopu ERASMUS+ programa za mobilnost studenata četvrti semestar diplomskog studija pohađala je na Slovačkom tehničkom sveučilištu u Bratislavi. Diplomirala je 2014. godine s temom Numerički modeli ponašanja okvira s ispunom pod mentorstvom prof. dr. sc. Ivica Guljaša.

Od 11. prosinca 2014. godine zaposlena je na Zavodu za organizaciju, tehnologiju i menadžment. Poslijediplomski studij Građevinarstva upisala je akademske godine 2015./2016. na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek, smjer Organizacija, tehnologija i menadžment građenja. U okviru Erasmus+ mobilnosti nastavnog osoblja, internog znanstveno-istraživačkog projekta Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku i projekta za međunarodnu razmjenu studenata poslijediplomskog studija (PROM) tijekom studiranja na poslijediplomskom studiju tri puta je boravila na poljskom Sveučilištu u Olsztynu.

Nastavne aktivnosti na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek uključuju rad na predmetima Organizacija građenja I i II, Tehnologija visokogradnje i Energetski učinkovite građevine. Članica je Hrvatske udruge za organizaciju građenja. Od 2018. godine ovlaštena je termografist razine 1 s međunarodnim certifikatom. Od 2016. godine do danas, kao članica projektnog tima, uključena je u rad pet znanstveno-istraživačkih projekata. Do danas je sudjelovala na deset međunarodnih konferencija, objavila je četiri znanstvena rada u WoSCC bazi, četiri znanstvena rada u ostalim časopisima te dva poglavlja u knjigama.

