

Kvantificiranje utjecaja linijskih toplinskih mostova metodom infracrvene termografije

SIMPOZIJ DOKTORSKOG STUDIJA GRAĐEVINARSTVA

Mergim Gaši¹, Doc.dr.sc. Bojan Milovanović²

¹Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za materijale, mgasi@grad.hr

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za materijale, bmilovanovic@grad.hr

Sažetak

Jedni od najbitnijih parametara za proračun toplinskih gubitaka u zgradi su zasigurno koeficijent prolaska topline, U , i duljinski koeficijent prolaska topline ψ . U ovom radu se za određivanje koeficijenta ψ koristi metoda infracrvene termografije (ICT) i to za postojeće zgrade sa stvarnim utjecajima toplinskih mostova. Rezultat mjerenja je termogram iz kojeg je moguće očitati parametre potrebne za kvantificiranje utjecaja toplinskog mosta, uz istovremeno mjerenje temperature unutrašnjeg i vanjskog zraka. Tom metodom se na jednostavan, brz i učinkovit način mogu odrediti stvarni toplinski gubici kroz najslabija mjesta na vanjskoj ovojnici zgrade – toplinske mostove.

Ključne riječi: toplinski mostovi, infracrvena termografija, toplinski gubici, zgrada, toplinska izolacija

Quantification of linear thermal bridges using infrared thermography method

DOCTORAL SYMPOSIUM IN CIVIL ENGINEERING

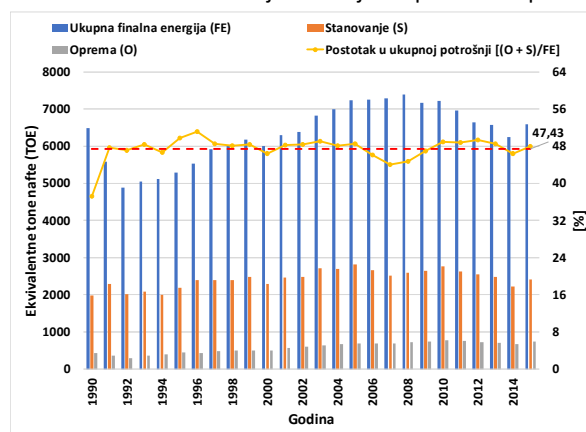
Abstract

One of the most important parameters for calculating heat losses in buildings is definitely heat transfer coefficient, U , and linear thermal transmittance, ψ . This paper proposes a method based on infrared thermography (IRT) for calculating ψ value for existing buildings and real impact of thermal bridges. Result of measurement is a thermogram from which it is possible to determine the parameters required to quantify the influence of the thermal bridges, while simultaneously measuring the indoor and outdoor air temperature. This method represents a quick and effective tool to define the actual heat losses of high-insulation buildings and to evaluate the benefits in treating thermal bridges.

Key words: thermal bridges, infrared thermography, heat losses, building, insulation

1 Uvod

U pogledu potrošnje energije građevinski sektor je jedan od najznačajnijih potrošača – 40 % ukupno potrošene energije otpada na zgrade [1]. U Hrvatskoj je taj iznos čak i veći pa je 2015. godine iznosio 47,97 % od ukupne finalne energije potrošene u toj godini (**Slika 1**), uzevši u obzir potrošnju za stanovanje i opremu zgrade. Kvaliteta izvođenja građevinskih radova može biti skupa, kako vremenski tako i novčano. Razlog tome može biti nepristupačnost građevinskih elemenata na kojima se pojavljuju toplinski mostovi – potrebno je postaviti skelu kako bi se fizički došlo do nedostatka koji uzrokuju toplinske mostove. Nadalje, ako se toplinski most otkrije snimanjem infracrvenom kamerom, teško je odrediti njegovu ozbiljnost. U ovom radu će biti opisan teoretski postupak koji bi se mogao primijeniti kod kvantificiranja utjecaja linijskih toplinskih mostova, a buduće publikacije će se bazirati na primjerima korištenja opisane metode. Infracrvena termografija (ICT) je jedna od načina na koji je moguće ocijeniti trenutno stanje vanjske ovojnice zgrade [2]. U posljednje vrijeme metoda ICT je sve više primjenjivana u području energetske učinkovitosti, kako za ocjenjivanje prihvatljivosti primijenjenih rješenja, tako i za pronalaženje nedostataka u elementima zgrade – pukotina [3] i mjesta s povećanom vlažnosti [4]. Metodu je čak moguće i koristiti za in situ određivanje koeficijenta prolaska topline (U-vrijednosti) [5][6][7].



Slika 1. Potrošnja energije u Hrvatskoj u periodu od 1990. - 2015. (prema podacima iz [1])

IC termografija je beskontaktna metoda mjerenja temperature i njezine raspodjele na površini tijela. Temelji se na mjerenju intenziteta infracrvenog zračenja s promatrane površine. Rezultat termografskog mjerenja je termogram, koji u sivim tonovima ili nekom kodu boja daje sliku temperaturne raspodjele na površini promatranog objekta. Temperaturna raspodjela posredno daje informaciju o različitim stanjima same površine ili je pak odraz strukture i unutrašnjeg stanja promatranog objekta [8].

Budući da je metoda ICT klasificirana kao nerazorna metoda moguće ju je koristiti u velikom broju slučajeva – monitoring strojeva (pregrijavanje), medicinsko snimanje, satelitsko snimanje, provjera električnih instalacija, mikro-termografija elektronskih dijelova, provjera pregrijavanja fotonapona, optimizacija sustava, te naravno u termografskom snimanju zgrada [9].

U normi HRN EN ISO 10211 toplinski most je definiran kao manje područje u omotaču grijanog dijela zgrade kroz koje je toplinski tok povećan zbog promjene materijala, debljine ili geometrije građevnog dijela zgrade [10]. Gibanje fluida kroz elemente zgrade uzrokuje promjenu temperature u samom elementu i na njegovoj površini. Primjeri toga se najbolje očituju na područjima toplinskih mostova: u gibanju zraka kroz nebrtvljene spojeve unutarnjih zidova sa vanjskom ovojnicom zgrade, spojeve vanjske ovojnice s prozorima ili vratima [11] ili na mjestima prodora vlage uzrokovanog infiltracijom kiše ili kapilarnim upijanjem vode iz tla [12]. Nadalje, povećan toplinski tok na vanjskoj ovojnicu zgrade može nastati zbog nezaštićenih elemenata konstrukcije (ploče, grede) koji probijaju sloj toplinske izolacije, te na taj način uzrokuju toplinske mostove.

Osim velikog utjecaja toplinskih mostova na potrošnju energije u zgradama, toplinski mostovi, kao jedni od najkritičnijih mjesta na vanjskoj ovojnicu zgrade, predstavljaju rizik od nastanka plijesni u zimskom periodu zbog

smanjenja površinske temperature na unutrašnjoj površini elementa [10]. Smanjenje površinske temperature je uzrokovano smanjenjem toplinskog otpora na području toplinskog mosta u odnosu na ostatak elementa. Toplinski otpor se može smanjiti zbog promjene koeficijenta toplinske provodljivosti na spoju dva građevinska materijala, zbog prisutnosti zračnih pukotina ili zbog toplinsko nezaštićenih konstruktivnih elemenata.

Kod projektiranja toplinskih mostova proračun se vrši preko normi HRN EN ISO 10211 i HRN EN ISO 14683. Norma HRN EN ISO 14683 daje pojednostavljen proračun toplinskih mostova za karakteristične linijske toplinske mostove u zgradarstvu [13], dok se za detaljniji proračun koristi norma HRN EN ISO 10211. Kod obje norme se prilikom proračuna utjecaja toplinskih mostova pretpostavljaju stacionarni uvjeti prolaska topline. Nadalje, kod proračuna toplinskih mostova se gubitci topline kroz točkaste toplinske mostove mogu zanemariti u odnosu na gubitke kroz linijske toplinske mostove [13]. Parametri koji se uzimaju u obzir prilikom proračuna toplinskog mosta su parametri vezani uz rubne uvjete – temperatura unutrašnjeg i vanjskog zraka, geometrija elementa (dimenzije), te materijalne i toplinske karakteristike elemenata (toplinska provodljivost, U-vrijednost...).

2 Metoda infracrvene termografije

Slika 2 prikazuje proces prijenosa topline prilikom snimanja termografskom kamerom [14]. Ukupna energija zračenja koju kamera registrira dana je jednadžbom:

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

W_{tot} [J] je ukupna energija zračenja koja doprije do kamere prilikom fokusiranja na mjerenu površinu, W_{obj} [J] je energija koju promatrana površina zrači prema kameri, W_{refl} [J] je energija okoliša koja se reflektira od promatrane površine, W_{atm} [J] je energija koju emitira atmosfera između promatrane površine i infracrvene (IC) kamere, τ je koeficijent transmisije atmosfere, ε je koeficijent emisivnosti promatrane površine. Dio zračenja koji se emitira od promatrane površine do kamere se izgubi zbog transmitivnosti atmosfere.

Jedini član u jednadžbi (1) koji je bitan za kvantificiranje utjecaja toplinskog mosta na površini elementa je W_{obj} koji je funkcija površinske temperature. Preostala dva člana (W_{refl} i W_{atm}) se odnose na dodatna zračenja u okolini elementa. W_{refl} ovisi o temperaturama ostalih tijela koja se nalaze u okolini promatrane površine i o samim svojstvima površine, a W_{atm} ovisi o temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka, te o udaljenosti kamere od mjerene površine.

Za što bolju interpretaciju fizikalnog modela prolaska topline pomoću infracrvene termografije potreban je niz parametara: prije samog mjerenja potrebno je odrediti koeficijent emisivnosti površine i reflektiranu temperaturu T_{refl} , temperaturu i relativnu vlažnost zraka te udaljenost kamere od promatrane površine [15]. Iz određene emisivnosti površine i reflektirane temperature moguće je iz termograma odrediti točnu temperaturu na površini toplinskog mosta.

Slika 2. Shematski prikaz mjerenja termografskom kamerom (1: okoliš, 2: mjereni objekt, 3: atmosfera, 4: IC kamera) [14]

3 Izrazi korišteni za kvantificiranje utjecaja toplinskog mosta pomoću metode ICT

Svaki termogram snimljen pomoću infracrvene kamere daje zapis zračenja pojedinog piksela koje dolazi na IC kameru s predmeta i njegove okoline. Skup svih piksela na slici čini polje dozračene energije promatrane površine [15]. Kod infracrvenog snimanja elemenata zgrade radi određivanja toplinskih gubitaka uzrokovanih toplinskim mostovima preporuča se minimalna temperaturna razlika između vanjskog i unutarnjeg okoliša od 10 – 15 °C [14]. Primjer vidljivosti toplinskih mostova pri većoj razlici temperatura je, npr., za vrijeme sezone grijanja – toplinske mostove je lakše detektirati (**Slika 3**).

Slika 3. Primjeri linijskih toplinskih mostova

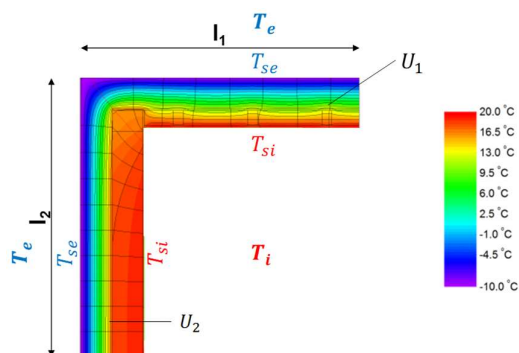
Toplinski mostovi u zgradi se najčešće pojavljuju na spoju građevinskih elemenata ili na mjestu na kojemu se mijenja sastav elementa (promjena materijala). Na tim mjestima dolazi do:

- promjene toplinskog toka i
- promjene u unutarnjoj i vanjskoj površinskoj temperaturi.

Prijenos topline kroz toplinske mostove je u pravilu trodimenzionalan ili dvodimenzionalan. Kod dvodimenzionalnog toplinskog toka utjecaj toplinskog mosta se prikazuje preko duljinskog koeficijenta prolaska topline Ψ [W/mK] – jednadžba (2).

$$\Psi = L_{2D} = \sum_{k=1}^n U_k \cdot l_k \quad (2)$$

U jednadžbi (2) L_{2D} [W/mK] je koeficijent toplinske veze dobiven iz 2D proračuna komponente koja razdvaja dva promatrana okoliša, U_k [W/m²K] je plošni koeficijent prolaska topline 1D komponente k koja razdvaja dva promatrana okoliša, l_k [m] je duljina na koju se odnosi vrijednost U_k i N je broj 1D komponenata. **Slika 4** prikazuje parametre potrebne za određivanje koeficijenta Ψ .



Slika 4. Prikaz parametara za proračun koeficijenta ψ

Toplinski se mostovi dakle kvantificiraju preko koeficijenta Ψ koji je jednak povećanju stacionarnog toplinskog toka kroz linijski toplinski most, u odnosu na neporemećeno stanje. S obzirom da koeficijent Ψ toplinskog mosta određuje površinsku temperaturu elementa koja se može mjeriti pomoću infracrvene kamere, teoretski je moguće iz poznatog temperaturnog polja kvantificirati utjecaj toplinskog mosta preko koeficijenta učestalosti

toplinskog mosta l_{tb} [15] i duljinskog koeficijent prolaska topline ψ . U nastavku će biti prikazan teoretski raspis izraza preko kojih bi se trebali moći odrediti koeficijenti ψ i l_{tb} toplinskog mosta.

U neporemećenom dijelu konstrukcije, dalje od područja toplinskog mosta, toplinski tok se može pretpostaviti jednodimenzionalnim. Koeficijent prolaska topline, U [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$], iz jednadžbe (2) se, u tom području, računa kao:

$$U_k = \frac{h_{out} \cdot (T_k - T_{out})}{T_{in} - T_k} \quad (3)$$

gdje je h_{out} [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] vanjski plošni koeficijent prijelaza topline, T_k [K] je površinska temperatura vanjskog k -tog sloja, T_{out} [K] je temperatura vanjskog zraka i T_{in} [K] je temperatura unutrašnjeg zraka.

Jednadžba (3) vrijedi za toplinski tok usmjeren od vanjske površine prema unutrašnjosti zgrade. Ako se pretpostavi da je toplinski tok koji prolazi kroz građevinski element generiran zračenjem i strujanjem, tada se prijenos topline opisuje preko jednadžbi (4) i (5):

$$P_{conv} = h_{out} \cdot A \cdot (T_k - T_{out}) \quad (4)$$

$$P_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_e - T_{refl})^4 \quad (5)$$

gdje su P_{conv} [W] i P_{rad} [W] snage toplinskog toka od zračenja i strujanja, A [m^2] je površina kroz koju se odvija toplinski tok, a σ je Stefan-Boltzmannova konstanta koja iznosi $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$. Ukupana snaga toplinskog toka se pretpostavlja jednakoj snazi toplinskog toka P_{cond} [W] koji prolazi kroz k -ti 1D sloj prema jednadžbi (6):

$$P_{cond} = U_k \cdot A \cdot (T_{in} - T_k) \quad (6)$$

pretpostavljajući pritom da je se unutarnja temperatura k -tog 1D sloja jednaka unutarnjoj temperaturi zraka u neposrednoj blizini promatrane površine, te da se vanjska površinska temperatura tog istog sloja mjeri pomoću IC kamere. Jednadžbu (3) moguće je dobiti izjednačavajući jednadžbu (6) sa jednadžbom (4) – pritom se zanemaruje toplinski tok zračenjem s obzirom da je utjecaj radijacije pri malim razlikama temperature zanemariv u odnosu na strujanje i vođenje. Snaga toplinskog toka zračenjem za jediničnu površinu pri razlici temperatura od 1 K, za crno tijelo ($\varepsilon = 1$), jednaka je $5,67 \cdot 10^{-8}$ W, dok je za istu površinu i razliku temperatura, uz koeficijent $h_{out} = 25 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$, snaga toplinskog toka strujanjem jednaka 25 W. Tako dobiven koeficijent prolaska topline (U vrijednost) je opisan u normi HRN EN ISO 6946 [16]. Za detaljniji proračun U vrijednosti potrebno je koristiti numeričke simulacije u skladu s normom HRN EN ISO 10211 [10]. Koeficijent h_{out} [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] u jednadžbama (3) i (4) u sebi sadrži samo doprinose od strujanja fluida po površini elementa i može se uzeti iz norme HRN EN ISO 6946. Ako se dodatno želi uzeti i prisilno strujanje fluida po površini, tada se h_{out} može izračunati preko jednadžbe (7):

$$h_{out} = 4 + 4 \cdot v \quad (7)$$

gdje je v [m/s] brzina vjetra uz površinu vanjskog k -tog 1D sloja.

Koeficijent toplinske veze se određuje preko jednadžbe (8) [10]:

$$L_{2D} = \frac{q}{(T_{in} - T_{out})} \quad (8)$$

gdje je q [W/m] toplinski tok po metru duljine toplinskog mosta vidljivog IC kamerom na vanjskoj površini ovojnice zgrade. Izračunava se preko jednadžbe (9):

$$q = \frac{(T_{tb} - T_{out}) \cdot l_{tb}}{R_{se}} \quad (9)$$

gdje je T_{tb} [K] temperatura očitana IC kamerom na površini toplinskog mosta, l_{tb} [m] je širina toplinskog mosta ako je toplinski most vertikalni ili visina toplinskog mosta ako je toplinski most horizontalan, R_{se} [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$] je vanjski plošni otpor prolasku topline.

Uvrštavanjem jednadžbi (8) i (9) u jednadžbu (2) dobiva se konačan izraz za računanje koeficijenta ψ :

$$\Psi_{out} = \frac{(T_{tb} - T_{out}) \cdot l_{tb}}{R_{se} \cdot (T_{in} - T_{out})} - \sum_{k=1}^n \frac{h_{out} \cdot (T_k - T_{out})}{T_{in} - T_k} \cdot l_k \quad (10)$$

U slučaju da se toplinski mostovi snimaju IC kamerom s unutarnje strane zgrade, tada jednadžba (10) glasi:

$$\Psi_{in} = \frac{(T_{in} - T_{tb}) \cdot l_{tb}}{R_{si} \cdot (T_{in} - T_{out})} - \sum_{k=1}^n \frac{h_{in} \cdot (T_{in} - T_k)}{T_{in} - T_k} \cdot l_k \quad (11)$$

gdje je R_{si} [m²K/W] unutarnji plošni otpor prolasku topline, h_{in} [W/m²K] je unutarnji plošni koeficijent prijelaza topline unutarnjeg k -og 1D sloja, a T_k [K] je unutarnja površinska temperatura k -tog sloja.

Drugi način određivanja koeficijenta Ψ je preko koeficijenta učestalosti toplinskog mosta l_{tb} . Iz digitalnog zapisa IC kamere (termograma) moguće je očitati temperaturu pojedinog piksela na području toplinskog mosta $T_{pixel,si}$ [K], te svakom pikselu može se teoretski pridijeliti površina A_{piksel} [m²]. Određivanje piksela koji pripadaju toplinskom mostu u pravilu nije baš jednostavno s obzirom da je teško prosuditi do kud je točno utjecaj toplinskog mosta prisutan. Zamjenska širina toplinskog mosta može se odrediti iz razmaka točaka infleksije krivulje koja aproksimira temperaturu očitano u smjeru širine toplinskog mosta (npr. polinomom). Površina toplinskog mosta je zatim jednaka površini pravokutnika duljine l_{tb} i širine b (razmak točaka infleksije). Ukupna snaga toplinskog toka P_{tb} [W] na čitavom području toplinskog mosta jednaka je:

$$P_{tb} = h_{tb,j} \cdot A_{piksel,j} \cdot \sum_{j=1}^N (T_{i,j} - T_{piksel,si,j}) \quad (12)$$

Ako se s N ($j = 1...N$) označi ukupan broj piksela koji sačinjavaju toplinski most na termogramu, tada se ukupna površina toplinskog mosta računa preko jednadžbe (13). Nadalje, plošni koeficijent prijelaza topline može se pretpostaviti konstantnim i označiti sa h_{tb} [W/m²K] s obzirom da je termogram snimljen u istom trenutku za cijelo područje.

$$A_{1D} = N \cdot A_{piksel} \quad (13)$$

Koeficijent učestalosti toplinskog mosta l_{tb} predstavlja omjer snage toplinskog toka u realnom slučaju (s toplinskim mostom) u odnosu na slučaju bez prisutnosti toplinskog mosta – jednadžba (14):

$$l_{tb} = \frac{P_{tb}}{P_{1D}} = \frac{h_{tb,j} \cdot A_{piksel,j} \cdot \sum_{j=1}^N (T_{i,j} - T_{piksel,si,j})}{h_{1D} \cdot A_{1D} \cdot (T_i - T_{1D,si})} \quad (14)$$

Uvrštavanjem jednadžbe (13) u jednadžbu (14) i s pretpostavkom da je $h_{1D} = h_{tb}$ slijedi:

$$l_{tb} = \frac{\sum_{j=1}^N (T_{i,j} - T_{piksel,si,j})}{N \cdot (T_i - T_{1D,si})} \quad (15)$$

Jednadžba (15) osim toplinskih gubitaka uzrokovanih toplinskim mostom može prikazati i povećanje koeficijenta prolaska topline (U vrijednosti) zbog prisutnosti toplinskog mosta:

$$U_{tb} = U_{1D} \cdot l_{tb} \quad (16)$$

Veza između koeficijenata l_{tb} i Ψ se dobije iz odnosa povećanog stacionarnog toplinskog toka kroz linijski toplinski most, u odnosu na neporemećeno stanje – jednadžba (17):

$$l_{tb} = \frac{Q + \Psi}{Q} \quad (17)$$

gdje Q [W/mK] predstavlja toplinski tok bez prisutnosti toplinskog mosta.

Za toplinski most sa **Slika 4** koeficijent Ψ bi glasio:

$$\Psi = (l_{tb} - 1) \cdot (U_1 \cdot l_1 + U_2 \cdot l_2) \quad (18)$$

4 Zaključak

Određivanje duljinskog koeficijenta prolaska topline ψ predstavlja velik problem u pogledu energetske učinkovitosti s obzirom da velik broj projekata kod proračuna toplinskih gubitaka kroz toplinske mostove koristi paušalne dodatke, te vrijednosti dane u atlasima toplinskih mostova i normama koji vrijede za određene tipove toplinskih mostova. Takav način proračuna u pravilu daje prevelike vrijednosti koeficijenta ψ , pa samim time i prevelike toplinske gubitke. Kod zgrada gotovo nulte energije (nZEB) i pasivnih kuća malo odstupanje stvarne vrijednosti koeficijenta ψ od vrijednosti uzete pojednostavljenim proračunom može značiti veliku razliku u stvarnoj potrošnji energije zgrade.

Analiza toplinskih mostova pomoću metode ICT je uobičajena u dijagnosticiranju toplinskih svojstava zgrade, ali samo u pogledu pronalaženja toplinskih mostova. Postupak opisan u ovom radu je poprilično jednostavan i mogao bi biti koristan kod ocjenjivanja toplinskih gubitaka bez korištenja kompliciranih numeričkih modela i opreme (za mjerenja gustoće toplinskog toka). Kod mjerenja je potrebno očitati temperaturu unutrašnjeg i vanjskog zraka, a površinska temperatura elemenata se očitava pomoću infracrvene kamere, iz termograma – s unutarnje ili vanjske strane zgrade. Problem nastaje kod određivanja površine toplinskog mosta jer je teško presuditi koji piksel pripada toplinskom mostu, a koji ne. Nadalje, metoda ICT može se koristiti i kod određivanja koeficijenta prolaska topline (U-vrijednosti) građevinskih elemenata in situ. Kod te metode se kontinuirano mjere isti parametri potrebni za kvantificiranje utjecaja toplinskog mosta pa je moguće osim jednog parametra, U-vrijednosti, dobiti dva parametra koji najviše doprinose toplinskim gubicima u zgradi, U-vrijednost i koeficijent ψ .

Jedan od problema koji se javlja kod ove metode je određivanje visine/širine toplinskog mosta s obzirom da nije uvijek jednostavno iz termograma očitati potrebne podatke – nije moguće fizički izmjeriti visinu/širinu toplinskog mosta već je potrebno iz termograma izračunati potrebne dimenzije preko položaja kamere (njenog nagiba, udaljenosti od mjerene površine), te položajima piksela na slici u odnosu na referentne točke kojima znamo stvarne koordinate.

Koeficijent ψ određen na ovaj način izračunat je uz pretpostavku stacionarnih uvjeta prolaska topline, a ti uvjeti u stvarnosti ne postoje. Potrebno je prije samog mjerenja građevinski element dovesti u kvazistacionarne uvjete okoliša. U stvarnosti je takve uvjete vrlo teško postići. Druga opcija je kontinuirano mjerenje potrebnih temperatura u određenom vremenskom intervalu, te statistička obrada dobivenih rezultata. To dovodi do dodatnih problema s obzirom da se u tom slučaju plošni koeficijent prijelaza topline ne može smatrati konstantom nego ga treba dovesti u korelaciju sa brzinom vjetra po površini – koja postaje dodatni parametar koji je potrebno kontinuirano bilježiti.

Literatura

- [1] Eurostat, „TSDPC320|Final energy consumption by sector“. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.econdb.com/dataset/TSDPC320/>. [Pristupljeno: 26-lip-2018].
- [2] B. Lehmann, K. Ghazi Wakili, T. Frank, B. Vera Collado, C. Tanner, „Effects of individual climatic parameters on the infrared thermography of buildings“, *Applied Energy*, 110, str. 29–43, 2013.
- [3] B. Milovanović, „Application of Infrared Thermography for Defect Characterization in Reinforced Concrete“, University of Zagreb, Faculty of civil engineering, 2013.
- [4] E. Rosina, J. Spodek, „Using infrared thermography to detect moisture in historic masonry: a case study in Indiana“, *APT bulletin*, 34, br. 1, str. 11–16, 2003.
- [5] I. Nardi, S. Sfarra, D. Ambrosini, „Quantitative thermography for the estimation of the U-value: State of the art and a case study“, *Journal of Physics: Conference Series*, 547, br. 1, 2014.
- [6] K. E. A. Ohlsson, T. Olofsson, „Quantitative infrared thermography imaging of the density of heat flow rate through a building element surface“, *Applied Energy*, 134, str. 499–505, 2014.
- [7] D. S. Choi, M. J. Ko, „Comparison of various analysis methods based on heat flowmeters and infrared thermography measurements for the evaluation of the in situ thermal transmittance of opaque exteriorwalls“, *Energies*, 10, br. 7, 2017.
- [8] Z. Zore, „Infracrvena termografija“, *Lijecnicki Vjesnik*, 134, br. 5–6, str. 194–195, 2012.
- [9] InfraTec, „Industries & Applications“. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.infratec-infrared.com/thermography/industries-applications/>. [Pristupljeno: 28-lip-2018].
- [10] Croatian Standard Institute, „HRN EN ISO 10211 - Toplinski mostovi u zgradarstvu - Toplinski tokovi i površinske temperature - Detaljni proračuni“. [Na internetu]. Dostupno na: <https://hrn4you.hzn.hr/>.
- [11] S. P. Dudić, I. M. Ignjatović, D. D. Šešlija, V. A. Blagojević, M. M. Stojiljković, „Leakage quantification of compressed air on pipes using thermovision“, *Thermal Science*, 16, br. SUPPL.2, str. 555–565, 2013.
- [12] E. Barreira, V. P. De Freitas, J. M. P. Q. Delgado, N. M. M. Ramos, „Thermography Applications in the Study of Buildings Hygrothermal Behaviour“, str. 171–192, 2008.
- [13] Croatian Standard Institute, „HRN EN ISO 14683 - Toplinski mostovi u zgradarstvu - Linearni koeficijent prolaska topline - Pojednostavljene metode i zadane utvrđene vrijednosti“. [Na internetu]. Dostupno na: <https://hrn4you.hzn.hr/>.
- [14] Flir Systems, „FLIR Thermal Camera ETS - 320“, str. 96, 2017.
- [15] F. Asdrubali, G. Baldinelli, F. Bianchi, „A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings“, *Applied Energy*, 97, str. 365–373, 2012.
- [16] Croatian Standard Institute, „HRN EN ISO 6946 - Građevni dijelovi i građevni elementi - Toplinski otpor i koeficijent prolaska topline - Metode proračuna“. [Na internetu]. Dostupno na: <https://hrn4you.hzn.hr/>.