

Kvantificiranje utjecaja linijskih toplinskih mostova metodom infracrvene termografije

Mergim Gaši¹, doc.dr.sc. Bojan Milovanović²

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

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

Sažetak

Među najvažnijim parametrima za proračun toplinskih gubitaka u zgradi zasigurno su 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

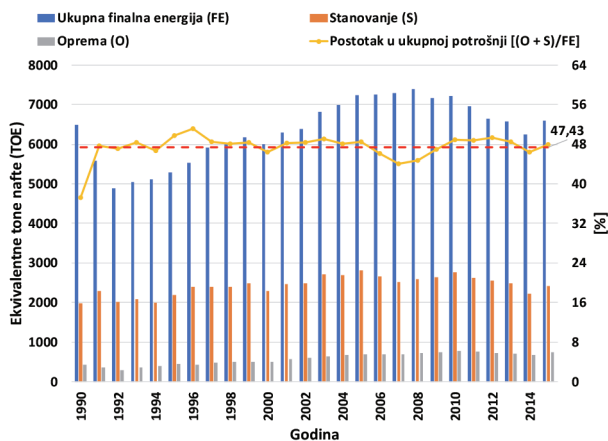
Abstract

One of the most important parameters for calculating heat losses in buildings is definitely the heat transfer coefficient, U , and the linear thermal transmittance, Ψ . This paper proposes a method based on infrared thermography (IRT) for calculating the Ψ value for the existing buildings with real impacts of thermal bridges. The result is presented via a thermogram showing the parameters required to quantify the influence of thermal bridges, while simultaneously measuring the indoor and outdoor air temperature. This method represents a quick and effective tool for defining actual heat losses through the weakest zones along the external envelope of buildings – thermal bridges

Key words: thermal bridges, infrared thermography, heat losses, building, thermal 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. Kvalitetno izvođenje građevinskih radova može biti skupo, a i vremenski zahtjevno. Razlog tome može biti nepristupačnost građevinskih elemenata na kojima se pojavljuju toplinski mostovi – potrebno je postaviti skelu kako bi se fizički došlo do nedostataka koji uzrokuju toplinske mostove. Nadalje, ako se toplinski most otkrije snimanjem infracrvenom kamerom, teško je odrediti njegovu ozbiljnost. U ovom radu opisat će se 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 trenutačno 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) [5-7].



Slika 1. Potrošnja energije u Hrvatskoj u periodu od 1990. do 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, može se primijeniti 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 s vanjskom ovojnicom zgrade, spojeve vanjske ovojnice s prozorima ili vratima [11] ili na mjestima prodora vlage uzrokovane infiltracijom kiše ili kapilarnim upijanjem vode iz tla [12]. Nadalje, povećan toplinski tok na vanjskoj ovojnici 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 ovojnici 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 građevna materijala, zbog prisutnosti zračnih pukotina, zbog toplinsko nezaštićenih konstrukcijskih elemenata, na mjestima potpunih ili djelomičnih prodora vanjske ovojnice zgrade materijalima s različitim toplinskim svojstvima, zbog promjene debljine materijala, zbog razlike između unutarnje i vanjske površine – spojevi poda, zida, stropa.

Kod projektiranja toplinskih mostova proračun se izvodi prema normama 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], a za detaljniji proračun primjenjuje se 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

Proces prijenosa topline prilikom snimanja termografskom kamerom prikazan je na slici 2., [14]. Ukupna energija zračenja koju kamera registrira dana je izrazom (1):

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

gdje je:

W_{tot} - ukupna energija zračenja koja dopiye do kamere prilikom fokusiranja na mjerenu površinu, [J]

W_{obj} - energija koju promatrana površina zrači prema kameri, [J]

W_{refl} - energija okoliša koja se reflektira od promatrane površine, [J]

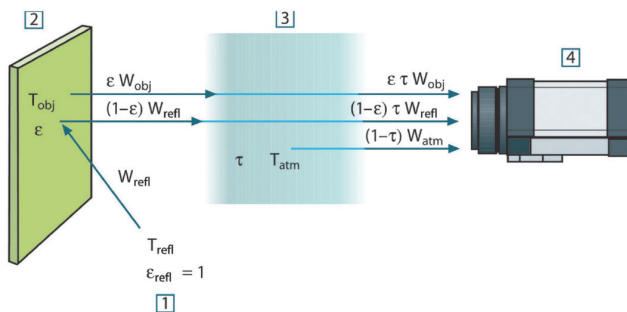
W_{atm} - energija koju emitira atmosfera između promatrane površine i infracrvene (IC) kamere, [J]

τ - koeficijent transmisije atmosfere

ε - koeficijent emisivnosti promatrane površine.

Dio zračenja koji se emitira od promatrane površine do kamere izgubi se zbog transmisivnosti 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.

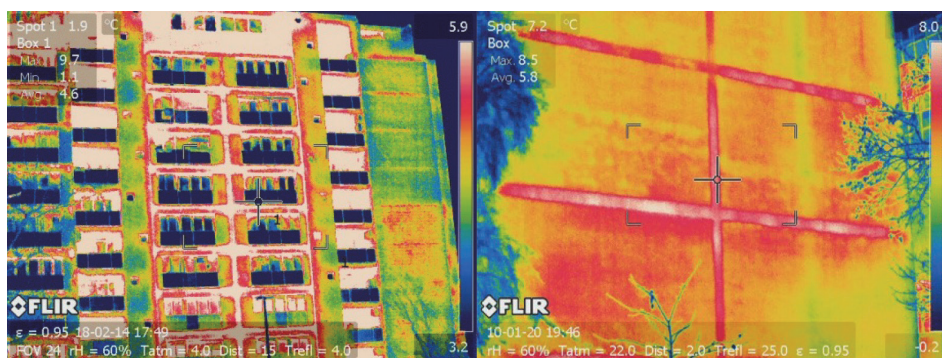
Za što bolju interpretaciju fizikalnog modela prolaska topline pomoću infracrvene termografije potreban je niz parametara: prije samog mjerenja potrebno je odrediti koeficijent emisivnosti površine i reflektiranu temperaturu T_{refl} , temperaturu i relativnu vlažnost zraka te udaljenost kamere od promatrane površine [15]. Iz određene emisivnosti površine i reflektirane temperature može se iz termograma odrediti točna temperatura 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 pojedinih 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 °C [16]. 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 obično je trodimenzionalan ili dvodimenzionalan. Kod dvodimenzionalnog toplinskog toka utjecaj se toplinskog mosta prikazuje na osnovi duljinskog koeficijenta prolaska topline Ψ [W/mK], prema izrazu (2). Slika 4. prikazuje parametre potrebne za određivanje koeficijenta Ψ .

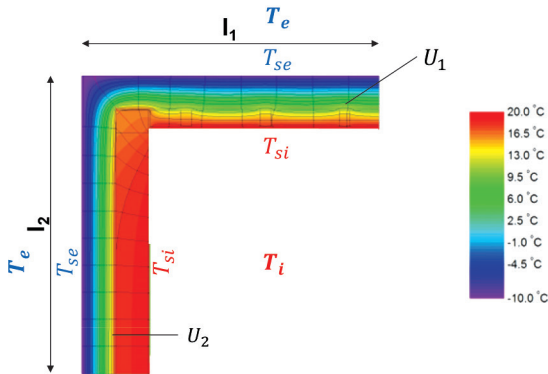
$$\Psi = L_{2D} - \sum_{k=1}^n U_k \cdot l_k \quad (2)$$

gdje je:

L_{2D} - koeficijent toplinske veze dobiven iz 2D proračuna komponente koja razdvaja dva promatrana okoliša, [W/mK]

U_k - plošni koeficijent prolaska topline 1D komponente k koja razdvaja dva promatrana okoliša, [W/m²K]

l_k - duljina na koju se odnosi vrijednost U_k , [m]
 N - broj 1D komponenata.



Slika 4. Prikaz parametara za proračun koeficijenta ψ

Toplinski se mostovi dakle kvantificiraju koeficijentom Ψ koji je jednak povećanju stacionarnog toplinskog toka kroz linijski toplinski most, u odnosu na neporemećeno stanje. S obzirom na to 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 koeficijenta prolaska topline Ψ . U nastavku će biti prikazan teoretski raspis izraza na osnovi 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 izraza (2) se, u tom području, računa pomoću izraza (3):

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

gdje je:

h_{out} - vanjski plošni koeficijent prijelaza topline, [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

T_k - je površinska temperatura vanjskog k-tog sloja, [K]

T_{out} - temperatura vanjskog zraka, [K]

T_{in} - temperatura unutrašnjeg zraka, [K].

Izraz (3) vrijedi za slučaj toplinski tok usmjeren od vanjske površine prema unutrašnjosti zgrade, tj. kada je vanjska temperatura veća od unutarnje. Ako se pretpostavi da je toplinski tok koji prolazi kroz građevinski element generiran zračenjem i strujanjem, tada se prijenos topline opisuje izrazima (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 je:

P_{conv} - snaga toplinskog toka od zračenja, [W]

P_{rad} - snaga toplinskog toka od strujanja, [W]

A - površina kroz koju se odvija toplinski tok, [m²]

σ - Stefan-Boltzmannova konstanta koja iznosi $5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴.

Ukupana snaga toplinskog toka se pretpostavlja jednakoj snazi toplinskog toka P_{cond} [W] koji prolazi kroz k -ti 1D sloj prema izrazu (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. Izraz (3) moguće je dobiti izjednačavajući izraz (6) s izrazom (4) – pritom se zanemaruje toplinski tok zračenjem jer 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 $h_{out} = 25$ W/m²K, snaga toplinskog toka strujanjem jednaka 25 W. Tako dobiven koeficijent prolaska topline (U -vrijednost) opisan je u normi HRN EN ISO 6946 [17]. Za detaljniji proračun U -vrijednosti potrebno je koristiti numeričke simulacije u skladu s normom HRN EN ISO 10211 [10]. Koeficijent h_{out} [W/m²K] u izrazima (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 pomoću izraza (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 pomoću izraza (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 pomoću izraza (9):

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

gdje je:

T_{tb} - temperatura očitana IC kamerom na površini toplinskog mosta, [K]

l_{tb} - širina toplinskog mosta ako je toplinski most vertikalni ili visina toplinskog mosta ako je toplinski most horizontalni, [m]

R_{se} - vanjski plošni otpor prolasku topline, [m²K/W].

Uvrštavanjem izraza (8) i (9) u izraz (2) dobiva se konačan izraz za računanje koeficijenta Ψ :

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

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

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

gdje je:

R_{si} - unutarnji plošni otpor prolasku topline, [m²K/W]

h_{in} - unutarnji plošni koeficijent prijelaza topline unutarnjeg k-og 1D sloja, [W/m²K]

T_k - unutarnja površinska temperatura k-tog sloja, [K].

Drugi način određivanja koeficijenta Ψ je na osnovi 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 jer 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 očitane 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:

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

Ako se s N ($j = 1 \dots N$) označi ukupan broj piksela koji čine toplinski most na termogramu, tada se ukupna površina toplinskog mosta računa pomoću jednadžbe (13). Nadalje, plošni koeficijent prijelaza topline može se pretpostaviti konstantnim i označiti sa h_{tb} [W/m²K] s obzirom na to 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 slučaj bez prisutnosti toplinskog mosta, izraz (14):

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

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

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

Izraz (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, izraz (17):

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

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

Za toplinski most sa slike 4. koeficijent Ψ bi glasio:

$$\Psi = (I_{tb} - 1) \cdot (U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2) \quad (18)$$

4 Zaključak

Određivanje duljinskog koeficijenta prolaska topline Ψ predstavlja velik problem u pogledu energetske učinkovitosti s obzirom na to da mnogi projektanati kod proračuna toplinskih gubitaka kroz toplinske mostove koriste paušalne dodatke, te vrijednosti dane u atlasima toplinskih mostova i normama koje se odnose na 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 pri ocjenjivanju toplinskih gubitaka bez korištenja kompliciranih numeričkih modela i opreme (za mjerenja gustoće toplinskog toka). Prikazana metoda može se koristiti samo u slučaju određivanja toplinskih gubitaka kroz toplinske mostove na postojećim zgradama.

Tijekom mjerenja treba 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 pri određivanju površine toplinskog mosta jer je teško prosuditi koji piksel pripada toplinskom mostu, a koji ne pripada. Nadalje, metoda ICT može se koristiti i pri određivanju 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 pridonose toplinskim gubitcima u zgradi, U-vrijednost i koeficijent Ψ .

Jedan od problema koji se javlja kod ove metode jest određivanje visine/širine toplinskog mosta s obzirom na to 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 izračunan 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 jer se u tom slučaju plošni koeficijent prijelaza topline ne može smatrati konstantom nego ga treba dovesti u korelaciju s brzinom vjetra po površini – koja postaje dodatni parametar koji je potrebno kontinuirano bilježiti.

Literatura

- [1] Eurostat, TSDPC320|Final energy consumption by sector. Dostupno na: <https://www.econdb.com/dataset/TSDPC320/>. [Pristupljeno: 26-lip-2018].
- [2] Lehmann, B., Ghazi Wakili, K., Frank, T., Vera Collado, B., Tanner, C.: Effects of individual climatic parameters on the infrared thermography of buildings, *Applied Energy*, 110 (2013), pp. 29–43, 2013.
- [3] Milovanović, B.: Application of Infrared Thermography for Defect Characterization in Reinforced Concrete, University of Zagreb, Faculty of civil engineering, 2013.
- [4] Rosina, E., Spodek, J.: Using infrared thermography to detect moisture in historic masonry: a case study in Indiana, *APT Bulletin*, 34 (2003) 1, pp. 11–16, 2003.
- [5] Nardi, I., Sfarra, S., Ambrosini, D.: Quantitative thermography for the estimation of the U-value: State of the art and a case study, *Journal of Physics: Conference Series*, 547 (2014) 1.
- [6] Ohlsson, K.E.A., Olofsson, T.: Quantitative infrared thermography imaging of the density of heat flow rate through a building element surface, *Applied Energy*, 134 (2014), pp. 499–505.
- [7] Choi, D.S., Ko, M.J.: Comparison of various analysis methods based on heat flowmeters and infrared thermography measurements for the evaluation of the in situ thermal transmittance of opaque exterior walls, *Energies*, 10 (2017) 7.
- [8] Zore, Z.: Infracrvena termografija, *Lijecnicki Vjesnik*, 134 (2012) 5–6, pp. 194–195.
- [9] InfraTec, No Title, 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*. Zagreb, 2017.

- [11] Dudić, S.P., Ignjatović, I.M., Šešlija, D.D., Blagojević, V.A., Stojiljković, M.M.: Leakage quantification of compressed air on pipes using thermovision, *Thermal Science*, 16 (2013) SUPPL.2, pp. 555–565.
- [12] Barreira, E., De Freitas, V. P., Delgado, J.M.P.Q., Ramos, N.M.M.: Thermography Applications in the Study of Buildings Hygrothermal Behaviour, pp. 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
- [14] Flir Systems, FLIR Thermal Camera ETS - 320 , pp. 96, 2017.
- [15] Asdrubali, F., Baldinelli, G., Bianchi, F.: A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings, *Applied Energy*, 97 (2012), pp. 365–373.
- [16] RESNET, Interim Guidelines for Thermographic Inspections of Buildings, pp. 31, 2012.
- [17] Croatian Standard Institute, *HRN EN ISO 6946 - Građevni djelovi i građevni elementi - Toplinski otpor i koeficijent prolaska topline - Metode proračuna*. Zagreb, 2017.