

Merjenje vpliva velikosti vira pri termovizijski kameri

Slavko Kodrič, Igor Pušnik, Janko Drnovšek

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: skodric@gmail.com

Povzetek. V članku je opisana problematika merjenja vpliva velikosti vira s termovizijsko kamero. Za ta namen so bile načrtovane in izdelane različne zaslonke, s katerimi omejujemo sevanje črnega telesa skozi zaslonko do termovizijske kamere. Opisani so obdelava termovizijskih slik z zaslonkami z eno in več režami različnih dimenzij, merjenje temperature posameznih pikselov na zaslonki s kvadrati ter primerjava izmerjenih temperatur pri zaslonkah z enakimi dimenzijami rež in kvadratkov. V sklepih so podane ugotovitve o obdelavi in interpretacije termovizijskih slik ter grafičnih prikazov meritev vpliva velikosti vira.

Ključne besede: termovizija, vpliv velikosti vira, termovizijska kamera

Measurement of the size of source effect of a thermal imager

The paper describes the problem of the size of source effect of a thermal imager. Custom tiles were made with rectangular and square apertures to measure the size of source effect. The tiles limit the radiation heat flux of a blackbody that reaches the thermal imager. Processing the thermal images using the tiles with one and more rectangular apertures is described. The temperature measurement of individual pixels using a tile with squares is presented. A comparison is made of the measured temperatures of the tiles with the rectangular and square apertures. In the last chapter, findings from processing and interpretation of the thermal images and graphs are given.

Keywords: thermography, size of source effect, thermal imager

1 UVOD

Brezkontaktno merjenje temperature se v zadnjih letih vedno hitreje razvija in uporablja za različne aplikacije. Današnje termovizijske kamere se s pridom uporabljajo za kvalitativne meritve, veliko manj pa za kvantitativne. Pri zadnjih težko določimo točno temperaturo vira, saj na izračun vpliva veliko parametrov: temperatura okolice, vlažnost zraka, oddaljenost kamere od vira, kot med kamero in virom, emisivnost vira itd. Eden od parametrov je tudi vpliv velikosti vira.

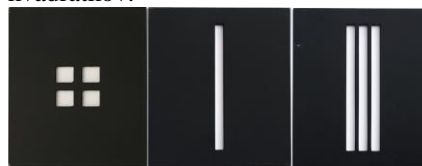
Meritve smo izvajali s kamero najvišjega cenovnega razreda Flir T650sc. Za meritve so bile uporabljene aluminijaste ploščice z različnimi odprtini kvadratne in pravokotne oblike, ki so bile postavljene pred stabilen temperaturni vir oziroma črno telo. Za ovrednotenje vpliva velikosti vira smo izvedli meritve z različnimi ploščicami oziroma zaslonkami na različnih oddaljenostih kamere od zaslonke in pri različnih temperaturah čez celotno merilno območje termovizijske kamere. V članku so opisani različni

postopki meritev vpliva velikosti vira in podani rezultati ter ugotovitve.

2 MERJENJE VPLIVA VELIKOSTI VIRA

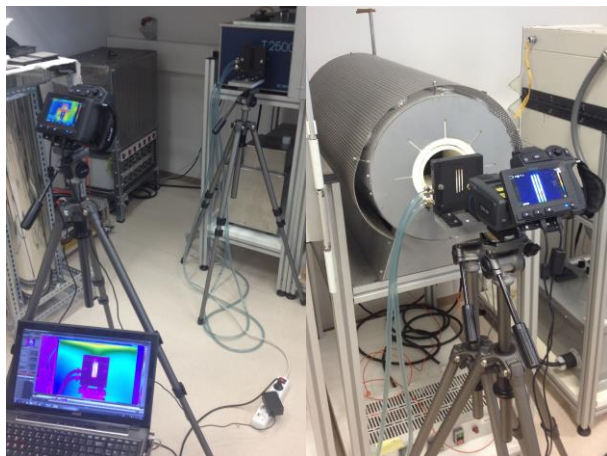
2.1 Načrtovanje meritev in izdelava zaslonk

Stabilno temperaturo vira je zagotavljalo šest različnih črnih teles v laboratoriju za brezkontaktno merjenje. Glede na razpoložljiva črna telesa smo meritve vpliva velikosti vira izvajali na čim širšem temperaturnem območju. Merili smo sevanje črnih teles na prehodu skozi različne zaslonke. Zaradi narave termovizijskih kamer, ki imajo v nasprotju s pirometri pravokotno vidno polje (angl. Field of View - FOV), sestavljeno iz vidnih polj posameznih detektorjev ali pikselov (iFOV), smo načrtovali zaslonke z režami različnih dimenzij, zaslonke z različnim številom rež in različnimi razdaljami med njimi ter zaslonke s kvadratnimi odprtinami. Zaradi velikega števila različnih zaslonk smo zaslonke označili po sistemu, ki je razložen v nadaljevanju. Primer zaslonke z režami: 3(3x)3, kjer prva številka pomeni širino reže, številka v oklepaju število rež na zaslonki, zadnja številka pa medsebojno oddaljenost posameznih rež. Podobno so označene zaslonke s kvadrati, na primer: 5(2x2)5, kjer prva številka pomeni dimenzijo stranice kvadrata, številka v oklepaju mrežo kvadratkov, zadnja številka pa medsebojno oddaljenost posameznih sosednjih kvadratkov.



Slika 1: Različne zaslonke za merjenje vpliva velikosti vira

Pred črno telo smo postavili stojalo za zaslonke na razdaljo približno 10 cm oziroma toliko, kolikor so dopuščala črna telesa in njihova ohišja. Razdalje med kamero in zaslonko smo izmerili z metrom. Kamera, zaslonka in črno telo so bili postavljeni v ravno črto, ki smo jo vizualno določili tako, da je bilo središče črnega telesa na sredini zaslona kamere, slika 2. Pri vseh meritvah je bil fokus kamere nastavljen na zaslonko.



Slika 2: Izvajanje meritev na oddaljenosti kamere od zaslonke 100 cm (levo) in 10 cm (desno)

V času meritev se je beležila in kontrolirala vrednost okoljske temperature in vlažnosti, ki se je upoštevala pri nadaljnji obdelavi termovizijskih slik. Za preprečevanje

velikega nihanja temperature in vlažnosti zraka se je uporabljala klimatska naprava.

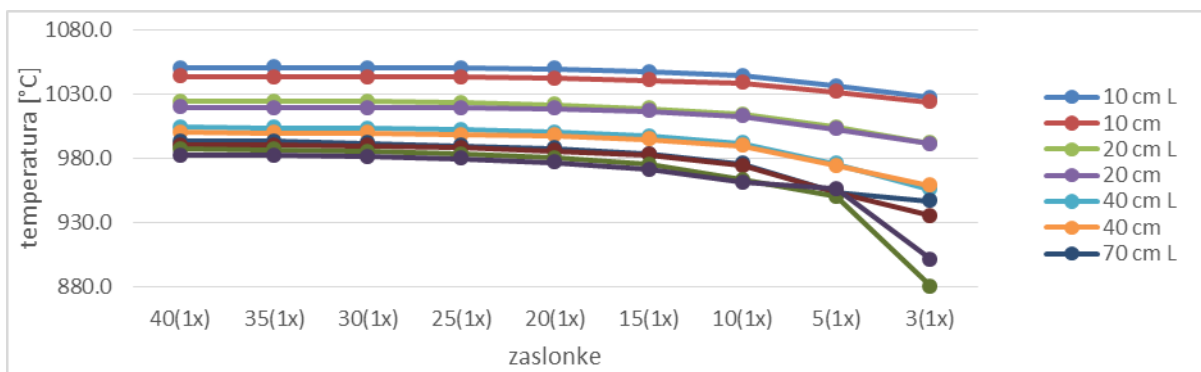
Stabilna temperatura črnih teles se je beležila z referenčnimi termometri. Za doseganje stabilne temperature črnih teles je treba kar precej časa, prav tako smo kamere vklopili pred izvajanjem meritev, da so se ustalile na delovni temperaturi.

Zaslonke so bile izdelane iz 2 mm debelih aluminijastih ploščic z lasersko izrezanimi odprtiniami in pobarvane s črno barvo Pyromark 800, ki ima emisivnost 0,91 v infrardečem spektru od 7 μm do 16 μm .

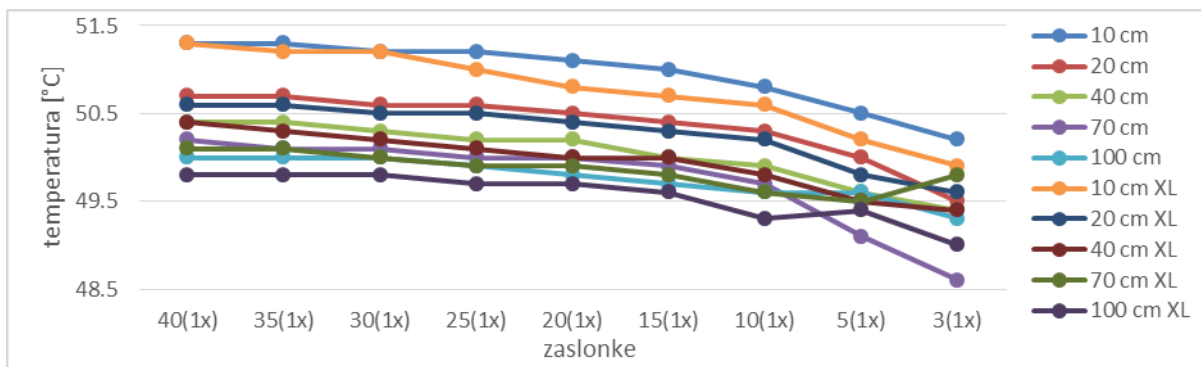
2.2 Obdelava in interpretacija termovizijskih slik

Po prvih meritvah z zaslonkami z režo se je pri obdelavi termovizijskih slik pokazalo, katere zaslonke pridejo v poštev za nadaljnje meritve. Zaradi omejitev, kot sta določena velikost odprtine črnega telesa in razdalja zaslonke od črnega telesa, cela zaslonka ni bila prekrita s stabilnim virom in meritve določenih zaslonk na nekaterih razdaljah niso bile izvedene. Pri večjih razdaljah je bilo na voljo premalo pikselov za določitev povprečne temperature izbranega območja.

Ker smo primerjali izmerjene temperature v odvisnosti od razdalje kamere od zaslonke, je bil pri vseh meritvah fokus ročno nastavljen na površino zaslonke. Prav zaradi tako nastavljenega fokusa je izmerjena temperatura predvsem na krajših razdaljah višja od referenčne vrednosti. Pri meritvah pri 750 $^{\circ}\text{C}$ na razdalji kamere od zaslonke 10 cm je bila referenčna



Graf 1: Primerjava izmerjenih temperatur pri 1000 $^{\circ}\text{C}$ in 1000 $^{\circ}\text{C}$ L



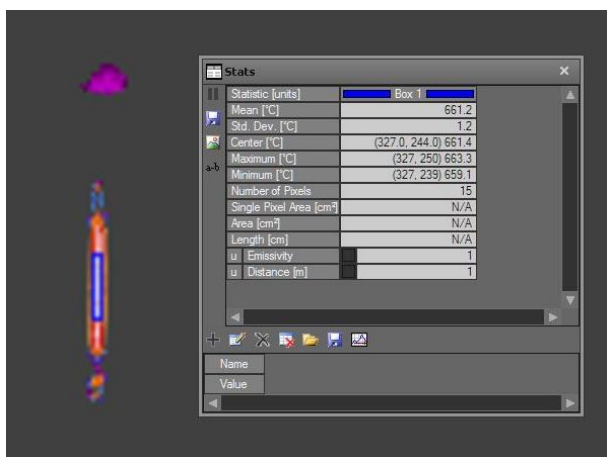
Graf 2: Primerjava izmerjenih temperatur pri 50 $^{\circ}\text{C}$ in 50 $^{\circ}\text{C}$ XL

temperatura črnega telesa $755,60 \pm 0,8 \text{ }^\circ\text{C}$, izmerjena temperatura pa kar $30 \text{ }^\circ\text{C}$ višja. Ta podatek nam pokaže, kako pomembna je pravilna nastavitve fokusa termovizijske kamere pri kvantitativnih meritvah.

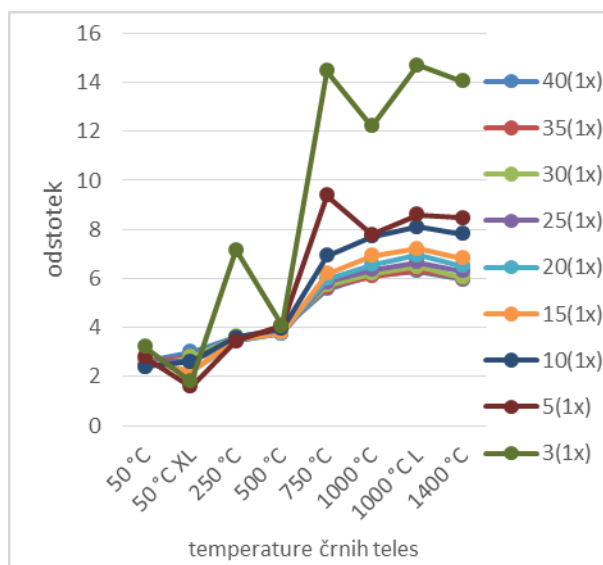
2.2.1 Obdelava termovizijskih slik z zaslonkami z eno režo različnih dimenzij

Obdelava termovizijskih slik je bila mogoča za vse zaslonke z eno režo, razen za zaslonko 1(1x). Na dobljenih grafih vsaka točka pomeni povprečno temperaturo, dobljeno pri obdelavi, ki je povprečje meritev izbranih pikslov. Za relevantno meritev praksa v termoviziji priporoča uporabo bloka vsaj 3x3 piksle [2].

Z obdelavo dobljena povprečna temperatura se pri vseh razdaljah in temperaturah niža z manjšanjem širine zaslonk. Pri narejenih termovizijskih slikah pri večjih razdaljah in zaslonkah z najmanjšo režo nam širina reže ne zagotavlja vsaj treh pikslov za meritev. Meritev je narejena na enem ali dveh stolpcih pikslov in zato manj zanesljiva, kar je dobro vidno na grafu 1 in 2.



Slika 3: Primer meritve povprečne temperature 15 pikslov v enem stolpcu pri reži 3(1x) pri 750 °C na razdalji 100 cm

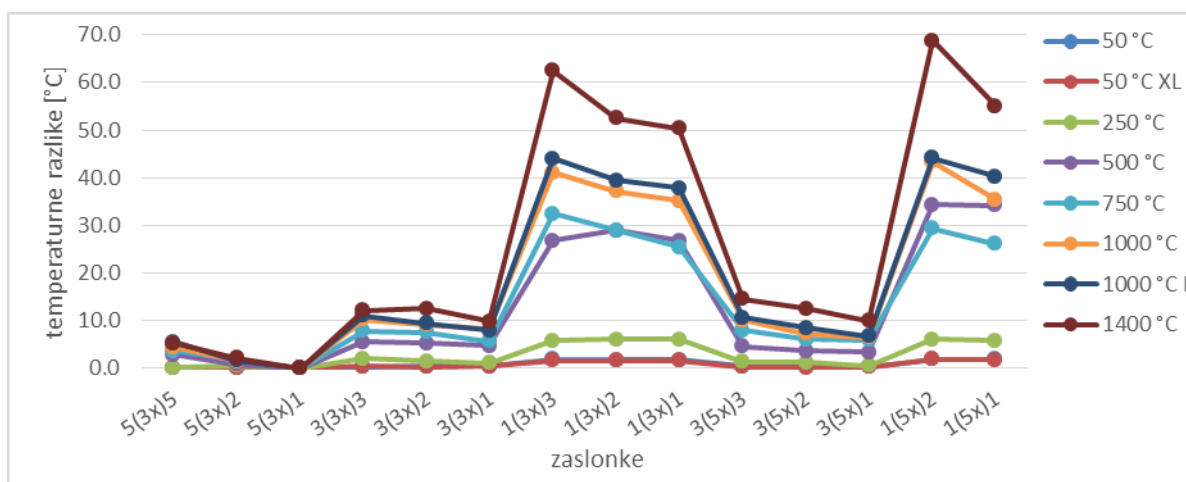


Graf 3: Razlike med maksimalno in minimalno izmerjeno temperaturo, izražene v odstotkih od temperature črnega telesa

Na grafu 3 iz odstotkovnih razlik vidimo, da se razlike povečujejo z manjšanjem širine reže na zaslonkah in višanjem temperatur, izjema je pri 50 °C XL. Najmanjše razlike vidimo pri temperaturi 500 °C. Pri najmanjših zaslonkah, kjer je meritev narejena na enem ali dveh stolpcih pikslov, vidimo, da je odstotek razlik pri višjih temperaturah največji.

2.2.2 Obdelava termovizijskih slik z zaslonkami z več režami različnih dimenzij

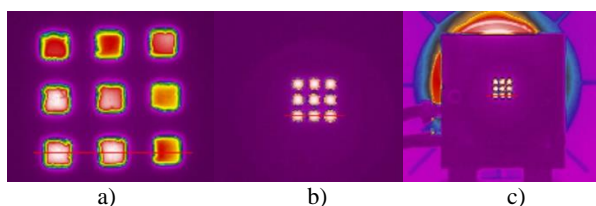
Zaradi vpliva velikosti vira se izmerjena povprečna temperatura pričakovano povečuje z zmanjševanjem razdalje med režami pri vseh dimenzijah rež. Razlike so najmanjše pri 5 mm širokih režah, večje pri 3 mm širokih režah in največje pri 1 mm širokih režah. Z višanjem izmerjene temperature se večajo razlike od maksimuma, kar lahko vidimo na grafu 4.



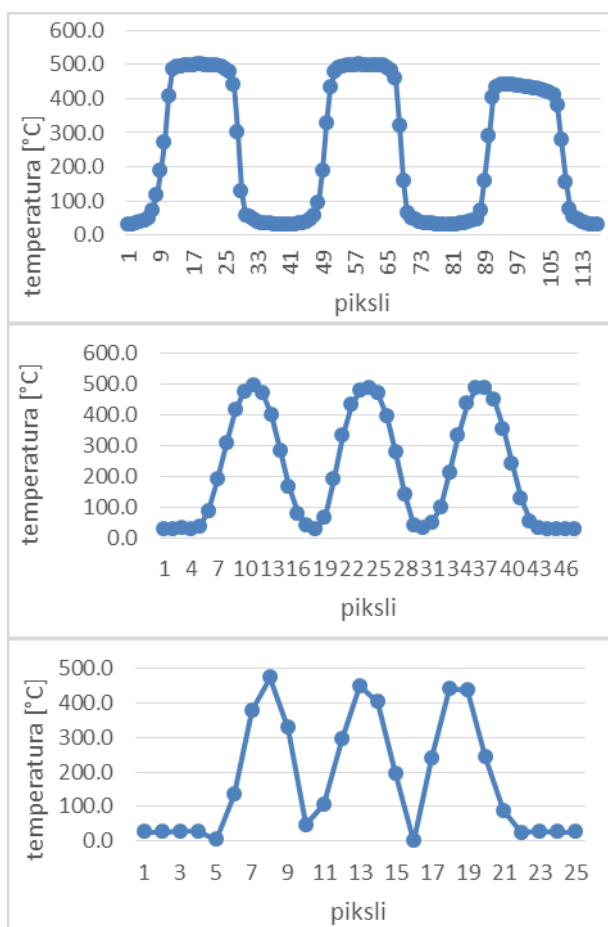
Graf 4: Primerjava odstopanj izmerjenih temperatur od maksimalne pri zaslonkah z več režami

2.2.3 Merjenje temperature posameznih pikselov pri zaslonki 3(3x3)3

Rdeče črte na sliki 4 so zaporedni pikseli za zajem podatkov. Pri razdalji 10 cm je piksel dovolj za določitev povprečne temperature izbranega območja, pri razdalji 40 cm je piksel tako malo, da je negotovost meritve zelo velika, pri razdalji 100 cm pa ni mogoče pridobiti zanesljivih meritev temperature. Temperaturne vrednosti posameznih pikselov so prikazane na grafu 5. Prikazane temperaturne vrednosti pod 100 °C so zunaj merilnega območja kamere, ki je nastavljeno na interval od 100 °C do 650 °C.



Slika 4: Zaslonka 3(3x3)3 z označenim mestom zajema na oddaljenosti a) 10 cm, b) 40 cm in c) 100 cm



Graf 5: Gibanje temperatur zaporednih pikselov na razdalji 10 cm, 40 cm in 100 cm (od zgoraj navzdol)

2.2.4 Primerjava temperatur pri enakih dimenzijah rež in kvadratkov

Za ovrednotenje vpliva velikosti vira smo izbrali primerjavo povprečnih temperatur pri enakih dimenzijah rež in kvadratkov. Izbrane zaslonke so podane v tabeli 1.

Pri skoraj sočasni meritvi temperature pri zaslonkah z režami in kvadrati lahko po obdelavi termovizijskih slik razliko v izmerjeni povprečni temperaturi, ki je prikazana v tabeli 2 za 250 °C, pripišemo vplivu velikosti vira. Pri enaki dimenziji zaslonk z režo in kvadratom je bilo uporabljeno enako število pikselov oziroma ROI (angl. Region of Interest) enake velikosti.

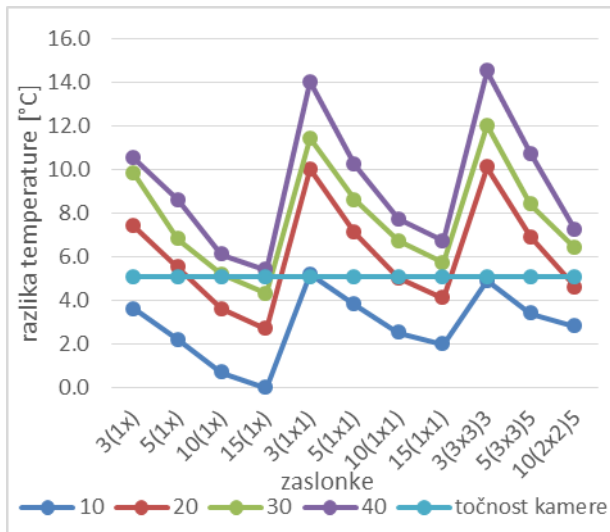
Tabela 1: Izračunane povprečne temperature pri različnih zaslonkah in razdaljah pri 250 °C

temperatura pri določeni razdalji [°C]				
	razdalja [cm]			
zaslonke	10	20	30	40
3(1x)	250,1	246,3	243,9	243,2
5(1x)	251,5	248,2	246,9	245,1
10(1x)	253,0	250,1	248,5	247,6
15(1x)	253,7	251,0	249,4	248,3
3(1x1)	248,5	243,7	242,3	239,7
5(1x1)	249,9	246,6	245,1	243,5
10(1x1)	251,2	248,7	247,0	246,0
15(1x1)	251,7	249,6	248,0	247,0
3(3x3)3	248,8	243,6	241,7	239,2
5(3x3)5	250,3	246,8	245,3	243,0
10(2x2)5	250,9	249,1	247,3	246,5

Tabela 2: Razlike v izmerjeni povprečni temperaturi med zaslonko z režo in kvadratom enakih dimenzij pri 250 °C

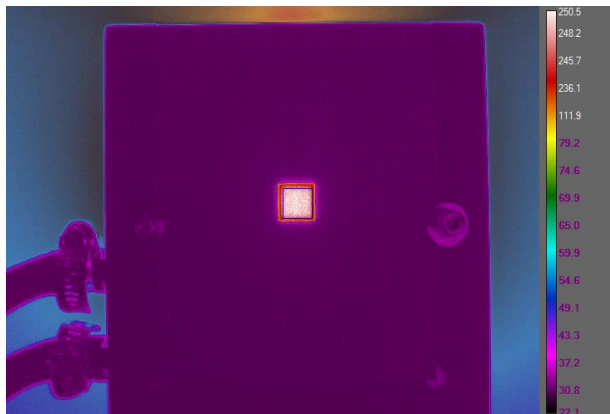
razlika temperature med režami in kvadrati [°C]				
	razdalja [cm]			
zaslonke	10	20	30	40
3(1x) in 3(1x1)	1,6	2,6	1,6	3,5
5(1x) in 5(1x1)	1,6	1,6	1,8	1,6
10(1x) in 10(1x1)	1,8	1,4	1,5	1,6
15(1x) in 15(1x1)	2,0	1,4	1,4	1,3

Razlike temperatur, izmerjenih pri zaslonkah z režami in kvadrati, lahko pripišemo vplivu velikosti vira, saj so bile meritve opravljene v zelo kratkih časovnih presledkih in v kontroliranih razmerah. Točnost, ki jo lahko dosežemo s termovizijsko kamero Flir T650sc, je po navedbah izdelovalca $\pm 2\%$ za temperaturno območje pri 250 °C. Za referenco smo izbrali meritev, v katero je vključeno največje število pikselov z maksimalno izmerjeno temperaturo.



Graf 6: Razlike izmerjenih temperatur od maksimalne v primerjavi z 2-odstotno točnostjo kamere

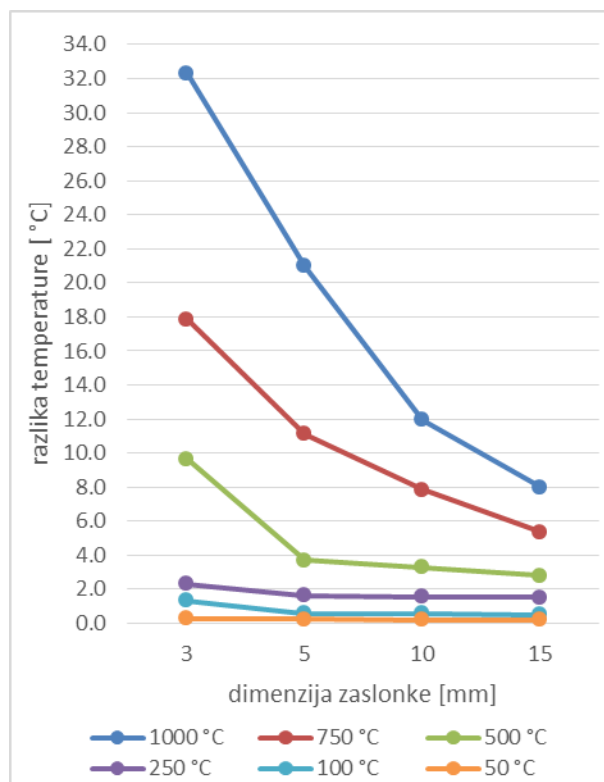
Sama velikost vira v primerjavi z velikostjo vidnega polja kamere se giblje od nekaj pikslov do nekaj tisoč pikslov (tabela 3) oziroma od nekaj odstotkov do nekaj tisočink odstotka za meritve pri 250 °C. Število pikslov, ki jih ima senzor kamere Flir T650sc, je 307.200 v matriki 640 x 480. Na sliki 5 je primer obdelane termovizijske slike. Območje ROI določimo glede na zaslonko s kvadratom ter isto območje uporabimo še za izračun povprečne temperature pri zaslonki z režo in zaslonki z več kvadratkami. Rezultati analize primerjave povprečne temperature rež in kvadratkov so dali pričakovano višje povprečne vrednosti pri režah glede na kvadratke. Pri primerjavi povprečne vrednosti enega kvadratka glede na več kvadratkov pa ne dobimo konsistentnih rezultatov. V nekaterih primerih dobimo v nasprotju s pričakovanji manjše povprečne temperaturne vrednosti pri zaslonkah z več kvadratkami kot pri zaslonkah z enim samim kvadratom. Razlog za to je lahko nepopolno prekrivanje vseh kvadratkov z virom ali prevelika oddaljenost sosednjih kvadratkov za izražanje vpliva velikosti vira.



Slika 5: Velikost ROI, ki znaša 1156 pikslov oziroma 0,38 % FOV kamere pri zaslonki 10(1x1) na 20 cm pri 250 °C

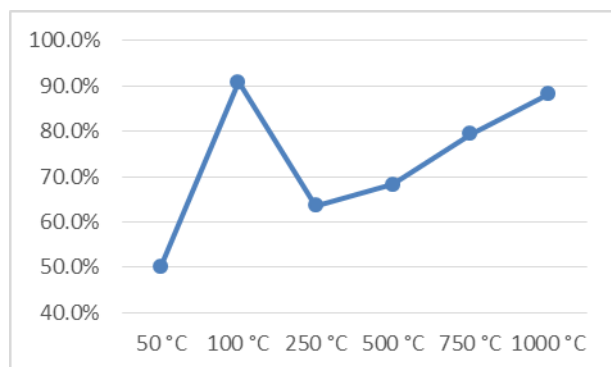
Tabela 3: Število pikslov za izračun povprečne temperature pri 250 °C

Število pikslov, zajetih v meritev				
zaslonke	oddaljenost kamere od zaslonke [cm]			
	10	20	30	40
3(1x), 3(1x1) in 3(3x3)3	225	64	36	16
5(1x), 5(1x1) in 5(3x3)5	784	225	121	64
10(1x), 10(1x1) in 10(2x2)5	4225	1156	529	289
15(1x) in 15(1x1)	10404	2704	1296	729



Graf 7: Povprečja temperaturnih razlik med režami in kvadratkami v odvisnosti od velikosti zaslonk

Z manjšanjem števila pikslov (ROI) za izračun povprečne temperature se razlike med izmerjenimi temperaturami med režami in kvadratkami povečujejo. Še bolj se razlike povečujejo z višanjem temperature vira. Pri 1000 °C je tako povprečna razlika v temperaturi na vseh razdaljah pri 3-mm zaslonki kar 32,3 °C. Seveda se razlika v temperaturi povečuje z oddaljenostjo, kar je posledica manjšanja števila pikslov za izračun povprečne temperature.



Graf 8: Odstotek meritev zunaj meje točnosti kamere za vsa zajeta temperaturna območja

Na grafu 8 lahko nazorno vidimo, da je pri 50 % do 90 % opravljenih meritev za različna temperaturna območja vpliv velikosti vira večji od točnosti kamere, ki jo podaja izdelovalec. Trenutno še noben izdelovalec ne vključuje vpliva velikosti vira v navodila za uporabo termovizijskih kamer. Same meritve za ovrednotenje vpliva velikosti vira so bile zasnovane v okviru zmogljivosti Laboratorija za metrologijo in kakovost. Velika omejitev so majhne odprtine črnih teles, ki so prvotno namenjene pirometrom, saj je pokritost vidnega polja kamere z virom v najboljšem primeru le nekaj odstotkov in se z oddaljenostjo manjša tja do nekaj tisočink odstotka.

3 SKLEPI

Uporaba termovizijskih kamer se iz dneva v dan povečuje, kljub temu pa še ni bil sprejet mednarodni standard, ki bi podal smernice za večjo zanesljivost in točnost meritev. Vpliv velikosti vira je eden od parametrov, ki vpliva tako na kvantitativne kot tudi na kvalitativne meritve temperature s termovizijskimi kamerami. Za ovrednotenje vpliva velikosti vira smo izvedli meritve temperatur na zaslonkah s pravokotnimi režami različnih dimenzij, števila in njihove medsebojne oddaljenosti. Ravno tako smo izvedli meritve z zaslonkami s kvadratki in mrežo kvadratkov.

Vpliv velikosti vira se pri zaslonkah z eno režo kaže kot nižanje izmerjene temperature z manjšanjem širine reže in večanjem razdalje med kamero in zaslonko.

Pri zaslonkah z več režami na različni medsebojni razdalji so izmerjene temperature pričakovano naraščale z manjšanjem medsebojne razdalje. Razdalja 10 cm je edina, pri kateri je bilo mogoče ovrednotiti vse izbrane zaslonke. Predvidevamo lahko, da bi bil trend padanja temperature na drugačnih razdaljah podoben.

Z meritvami pri zaslonki 3(3x3)3 na treh različnih oddaljenostih nazorno vidimo, kako se število uporabnih pikselov za izračun povprečne temperature z oddaljenostjo hitro zmanjšuje.

Primerjava izmerjenih temperatur pri zaslonkah s kvadratki in režami nam jasno pokaže velik vpliv velikosti vira na kvantitativno obdelavo termovizijskih slik. Z omejitvijo sevanja vira z dveh strani (zaslonke z

režami) oziroma štirih strani (zaslonke s kvadratki) dobimo razlike v izmerjeni temperaturi, ki se povečujejo z manjšanjem števila pikselov za izračun povprečne temperature. Še večje razlike pa dobimo pri meritvah pri višjih temperaturah. Razlike v temperaturi so pri več kot 70 % opravljenih meritvah večje od same točnosti kamere, zato bo treba pri kvantitativnih meritvah, kjer želimo točen rezultat, upoštevati tudi vpliv velikosti vira.

LITERATURA

- [1] Kodrič Slavko "Merjenje vpliva velikosti tarče pri termovizijski kameri", *Diplomsko delo*, Ljubljana, 2016.
- [2] Flir T650SC datasheet, <http://www.infraredcamerawarehouse.com/content/FLIR%20Datasheets/FLIR%20T650sc%2045d%20Datashet.pdf>, [dostopano 15.11.2015].

Slavko Kodrič je diplomiral leta 2016 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je kot raziskovalec v Laboratoriju za metrologijo in kakovost. Njegovo raziskovalno delo zajema brezkontaktna merjenja s termovizijskimi kamerami.

Igor Pušnik je diplomiral, magistriral in doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko v letih 1995, 1997 in 2004. Kot izredni profesor je zaposlen v Laboratoriju za metrologijo in kakovost. Poudarek njegovega raziskovalnega dela je na brezkontaktnih temperaturnih merjenjih, medicinski instrumentaciji in energetske učinkovitosti zgradb.

Janko Drnovšek je po magisteriju na Imperial Collegeu of Science and Technology v Londonu doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani in bil nato štiri leta vodja razvoja v IskriEmeco. Od leta 1986 je zaposlen na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je od leta 1996 redni profesor. Ukvarja se s teorijo merjenj, merilnimi metodami in merilno instrumentacijo. Je podpredsednik evropskega združenja nacionalnih meroslovnih laboratorijev Euramet.