

N. Pejnović, B. Frančević*

ISPITIVANJE PRIJENOSA TOPLINE KOD ZAŠTITNE ODJEĆE PRIMJENOM TERMOVIZIJSKE KAMERE

UDK 687.17.072:681.78
PRIMLJENO: 25.4.2018.
PRIHVAĆENO: 4.3.2019.

Ovo djelo je dano na korištenje pod Creative Commons Attribution 4.0 International License



SAŽETAK: Infracrvena termografija je beskontaktna metoda mjerenja energije zračenja objekta koji se promatra. Temperatura površine objekta dobiva se indirektno mjerenjem energije zračenja objekta promatranja. U radu su prikazane mogućnosti primjene infracrvene termografije za ispitivanje prijenosa topline u zaštitnoj odjeći. Iz rezultata mjerenja zaštitne odjeće može se odrediti efektivna toplinska izolacija za zimsku zaštitnu odjeću pri niskim temperaturama pri radu u vanjskom okolišu.

Ključne riječi: termofiziološka udobnost, zaštitna odjeća, infracrvena termografija (ICT)

UVOD

Termofiziološka udobnost je jedan od aspekata ljudske udobnosti kako u zatvorenom tako i na otvorenom radnom prostoru. Preduvjet je funkcioniranje termoregulacijskog sustava tijela i njegovih reakcija na temperaturu okoline, izvedenu radnu aktivnost i korištenu izolaciju odjeće. Odjeća i radna aktivnost pomažu i održavaju termofiziološku udobnost radnika koji rade u hladnim uvjetima. Odjeća za zaštitu od hladnoće slična je uobičajenoj odjeći za svakodnevnu uporabu. Zaštitna odjeća štiti tijelo od hladnoće, a slična je odjeći za svakodnevnu uporabu i jedina je toplinska barijera između ljudskog tijela i hladnog okoliša (*Horvat, Regent, 2009.*). Kod zaštitne odjeće bitni zahtjevi su toplinska izolacija, nepropusnost na vjetar, a vodonepropusnost je opcija. Zaštitna odjeća koja štiti od hladnoće u ovom slučaju je istovremeno upozoravajuća odjeća uočljiva s velike udaljenosti. Osnovna svrha ove vrste odjeće je upozoriti sudionike u prometu na prisut-

nost korisnika takve vrste odjeće i zaštititi radnika od hladne okoline (*Pejnović i sur., 2016.*). Ovu vrstu odjeće, kao dio osobne zaštitne opreme, koriste radnici Zagrebačkog holdinga Podružnica Zagrebparking na radnom mjestu kontrolora u Odjelu javnih parkirališta. U opisu radnog mjesta radnika kontrolora je kontrola kupljenih parkirnih karata, izdavanje dnevnih parkirnih karata, kontrola ispravnosti parkirnih automata, te dolazi glavnim dispečerima o nepropisno parkiranim automobilima. U slučaju snježnih padalina, kontrolor je zadužen za čišćenje i posipanje parkirališta solju. Radnici kontrolori veći dio svojeg radnog vremena provode na javnoprometnim površinama, dakle na otvorenom radnom prostoru, te su kao takvi izloženi nepovoljnim vremenskim uvjetima.

Za određivanje raspodjele temperatura na zaštitnoj odjeći koristila se termovizijska kamera. To je beskontaktna metoda mjerenja temperature pomoću infracrvenog zračenja, gdje se prikazuje i mjeri termalna energija tijela da toplija područja (tijelo radnika i zaštitnu odjeću) prikazuje toplijim, svjetlijim bojama, a hladnija područja tamnijim bojama (*Mijović i sur., 2009.*). Što je viša emitirana temperatura tijela radnika, to je

*Natalija Pejnović, mag. ing. techn. text., (natalija.pejnovic@hzjz.hr), Hrvatski zavod za javno zdravstvo, Rockefellerova 7, 10000 Zagreb, Branko Frančević, bacc. ing. sec., (branko.francevic@zgh.hr), Zagrebački holding Podružnica Zagrebparking, Šubićeva 40/III, 10000 Zagreb.

veća količina emitiranog IC zračenja. Da bi se iz zračenja prispio na osjetnik kamere izračunala korektna vrijednost temperature promatranog objekta, potrebno je poznavati svojstva površine objekta, temperaturu okolišnih objekata, udaljenost kamere od promatranog objekta, temperaturu i relativnu vlažnost zraka (Angelova, 2017.). Cilj ovog rada je usporedba različitih kompleta zaštitne odjeće za zaštitu od hladnoće u uvjetima niskih temperatura primjenom termovizijske kamere.

NAČINI PRIJENOSA TOPLINE

Jedan od čimbenika u dizajnu odjeće je omogućiti toplinsku ravnotežu između proizvedene topline i gubitka topline u okoliš. Međutim, proizvodnja topline tijela ovisi o količini fizičkog rada i uvjetima okoliša. U mirovanju tijelo proizvodi toplinu ekvivalentnu toplini koju proizvodi žarulja sa žarnom niti od 100 W. Prilikom hodanja ili težeg fizičkog rada tijelo proizvodi toplinu do 300 W. Povećanjem fizičkog rada povećava se i proizvodnja toplinske energije (Havenith, 2002.). Međusobna povezanost fizioloških i fizičkih čimbenika kod čovjeka i promjena fizičkih čimbenika utječe na fiziološko stanje (slika 1). Odnos između fizioloških odgovora tijela i termičkog okruženja (uključujući odjeću mikrookoliša) je složen. Promjena u jednom od ekoloških (fizičkih) čimbenika može utjecati na jedan ili više fizioloških odgovora.

Udobnost je subjektivna i relativna kategorija koja ovisi o pojedinačnim reakcijama i percepciji tijela čovjeka. Kada je proizvodnja topline jednaka gubitku topline, tijelo je u stanju termofiziološke udobnosti (Mijović i sur., 2009.).

Količina topline Q može se definirati kao oblik toplinske energije koja se prenosi između tijela i njegove okoline zbog razlike temperature, ΔT . Toplinska energija koja prelazi s tijela više temperature na tijelo niže temperature određuje se jednačinom:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad [1]$$

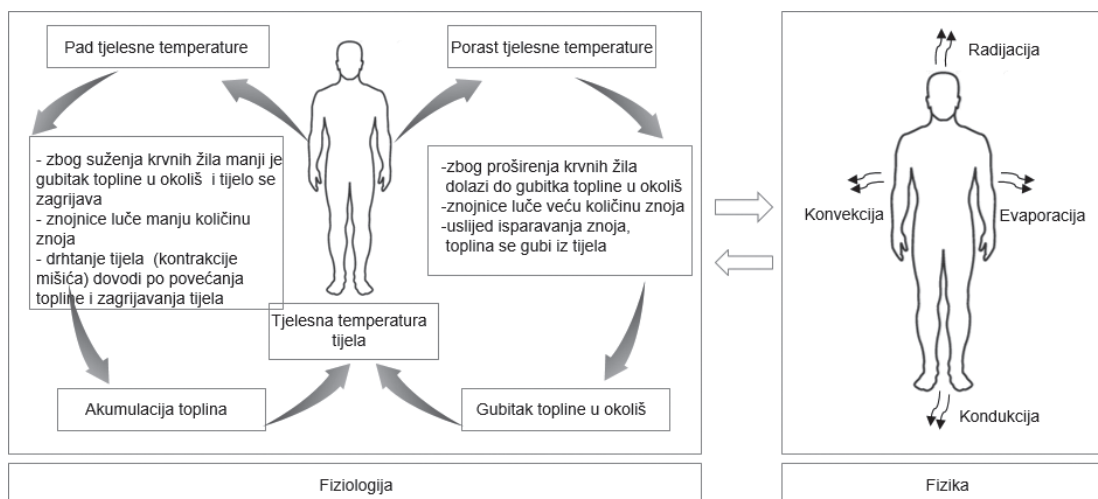
gdje je Q količina topline u J, c specifični toplinski kapacitet tvari u J/kgK i ΔT razlika početne temperature T_1 i krajnje temperature T_2 u K. Često je potrebno odrediti i brzinu prijenosa topline, tj. derivaciju topline po vremenu dQ/dt u J/s ili W. Tada prijenos topline varira u vremenu i za vremenski interval od t_1 do t_2 uzima se ukupna količina prenesene toplinske energije Θ da je:

$$\Theta = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dQ}{dt} dt \quad [2]$$

U slučaju da je $dQ/dt = \text{const.}$ dobiva se za vremenski interval Δt da je:

$$\Theta = \frac{dQ}{dt} \Delta t \quad [3]$$

Prijenos toplinske energije događa se jedino ako postoji razlika u temperaturi i prijenos se provodi od tijela više temperature prema tijelu



Slika 1. Povezanost fizioloških i fizičkih čimbenika kod čovjeka
Figure 1. Relationship between physiological and physical factors in humans

niže temperature. Uzimaju se tri oblika prijenosa topline: kondukcija, konvekcija i radijacija. Kod kondukcije prijenos topline ostvaruje se kada su tijelo i odjeća u kontaktu. Brzina prijenosa topline kondukcijom dQ/dt kroz sloj odjeće konstantne debljine Δx proporcionalan je razlici temperatura ΔT kroz sloj i površini tijela i odjeće A okomitoj na pravac prijenosa topline, te obrnuto proporcionalan debljini sloja odjeće Δx

$$\frac{dQ}{dt} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad [4]$$

gdje konstanta proporcionalnosti λ je toplinska vodljivost materijala i predstavlja mjeru sposobnosti provođenja topline kroz materijal odjeće.

Prijenos toplinske energije konvekcijom je između odjeće i vanjskog okoliša. Brže strujanje zraka rezultira većim prijenosom topline konvekcijom. Brzina prijenosa topline konvekcije određuje se izrazom:

$$\frac{dQ}{dt} = h \cdot A \cdot (T_t - T_o) \quad [5]$$

gdje je h koeficijent prijenosa topline konvekcijom, A oplošje tijela s kojeg se prenosi toplina, T_t temperatura odjeće. Koeficijent h određuje se eksperimentalno, a ovisi o geometriji oplošja, prirodnom strujanju zraka, te svojstvima fluida kod termalnog manekena. Na površini odjeće temperatura je jednaka temperaturi zraka.

Prijenos topline od tijela prema okolišu bio bi veći kada osoba nije obučena jer je temperatura oplošja tijela veća. Zato je osnovna funkcija odjeće sprečavanje prijenosa topline s tijela na okoliš. Time se dobiva da odjeća djeluje kao izolator koji stvara toplinski otpor. Toplinski otpor R je omjer temperaturne razlike ΔT podijeljen s rezultirajućim toplinskim tokom dQ/dt po jedinici površine A i time se dobiva:

$$R = \frac{\Delta T \cdot A}{\frac{dQ}{dt}} \quad [6]$$

Uvrštavanjem jednadžbe [4] u jednadžbu [6] dobiva se:

$$R = \frac{\Delta x}{\lambda} \quad [7]$$

Iz čega slijedi da je toplinski otpor R veći ako je sloj odjeće Δx veći i ako je toplinska vodljivost materijala odjeće λ manja. Kod više slojeva materijala potrebno je poznavati debljinu sloja odjeće

Δx i njegovu toplinsku vodljivost λ . Kada se uzima materijal za izolaciju od hladnoće, potrebno je poznavati danu vrijednost efektivne toplinske izolacije I_{cle} . U Tablici 1. prikazane su vrijednosti efektivne toplinske izolacije za više slojeva materijala.

Tablica 1. Efektivna toplinska izolacija I_{cle} u odnosu na temperaturu okoliša ($^{\circ}\text{C}$) i vrijeme izlaganja (h) (HRN EN 342)

Table 1. Effective thermal insulation of clothing I_{cle} and ambient temperature conditions ($^{\circ}\text{C}$) for heat balance at different durations of exposure (h) (HRN EN 342)

Toplinska izolacija I_{cle} $\text{m}^2 \text{K/W}$	Lagana radna aktivnost pri stojećem položaju 75 W/m^2	
	8 h	1 h
0,310	11	-2
0,390	7	-10
0,470	3	-17
0,540	-3	-25
0,620	-7	-32

Na temelju izračunate vrijednosti toplinskog otpora R zaključuje se kakva je efektivna toplinska izolacijska sposobnost materijala zaštitne odjeće. Efektivna izolacijska svojstva zaštitne odjeće ili izolacija koristi se kod odjeće pri temperaturama nižim od $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ jer se kod nižih temperatura upotrebljava više slojeva (tekstil, zrak, voda), a i više slojeva tekstila.

EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj eksperimenta je ispitati prijenos topline u zaštitnoj odjeći kod četiri različita kompleta. Kompleti su pažljivo dizajnirani kako bi se osigurala optimalna udobnost nošenja u umjerenom i hladnom klimatskom okruženju. Kod svih kompleta stavljeno je težište na funkcionalnost. Prvi komplet sastoji se od zimske jakne, podjakne, hlača s utopljenjem (flis uložak za hlače) i zimske kape. Drugi komplet ima manju energetska vrijednost jer nema podjaknu, a ima zimsku jaknu, hlače s utopljenjem (flis uložak za hlače) i kapu. Treći komplet sastoji se od zimske jakne ispod koje se nalazi proljetna jakna, hlače s utopljenjem (flis uložak za hlače) i zimske kape. Četvrti komplet sastoji se od zimske jakne, flis jakne, hlača s

utopljenjem (flis uložak za hlače) i zimske kape. Zadatak ispitanika u ovome eksperimentu bio je obavljanje fizičke aktivnosti u određenom vremenu. Aktivnost se sastoji od kontrole i naplate parkiranja na javnim parkiralištima.

U radu je korištena termovizijska infracrvena kamera *Flir i5* temperaturnog mjernog područja od 0 °C do 250 °C s mogućim odstupanjima od ± 2 °C ili 2 % prilikom očitavanja, te automatskog podešavanja oštine, tj. fokusa slike. To je beskontaktni uređaj koji detektira infracrvenu energiju (toplinu) i pretvara je u elektronički signal koji se obrađuje te stvara toplinsku sliku na monitoru. Infracrvena kamera tip *Flir i5* korištena je za mjerenje razlike temperatura na različitim mjestima na zaštitnoj odjeći (slika 2). Temperaturna osjetljivost je 0,08 °C na 30 °C, rezolucija prostora 1,3 mrad, detektor Focal Plane Array (FPA), mikrobolometar 320x240 piksela i raspon rezolucije 7,5 do 13 μm (*Mijović i sur., 2009.*). Kamera je ergonomskog dizajna i kvalitetno izrađena prema IP43 standardu za zaštitu od vlage i tvrdih dijelova. U odnosu na veličinu ima relativno veliki osvijetljen LCD zaslon u boji s dijagonalom od 7 cm (2,8") ispod kojeg je smješteno nekoliko tipki za mijenjanje postavki, pregledavanja slika, uključivanja i isključivanja i sl.

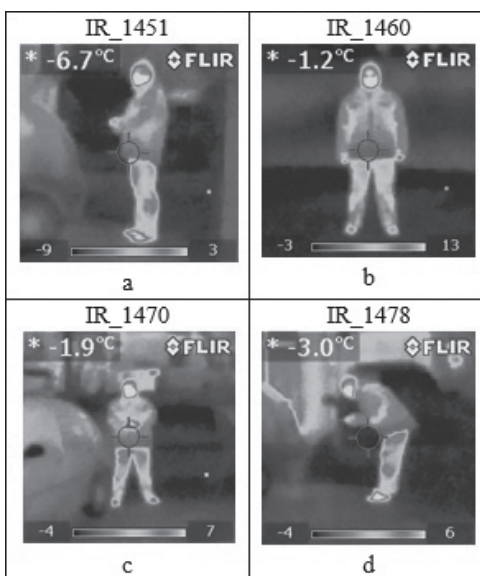


Slika 2. Termovizijska kamera *Flir i5*
Figure 2. *Flir i5* thermovision camera

Za promatranje promjene temperature tijela odabrana je prednja i stražnja strana tijela radnika. Radnik je imao na sebi zaštitnu odjeću što čini komplet. Vanjski radni uvjeti bili su: temperatura 0 °C, rel. vlažnost 89 %, smjer vjetra sjeverni N, brzina vjetra 0,2 m/s.

REZULTATI

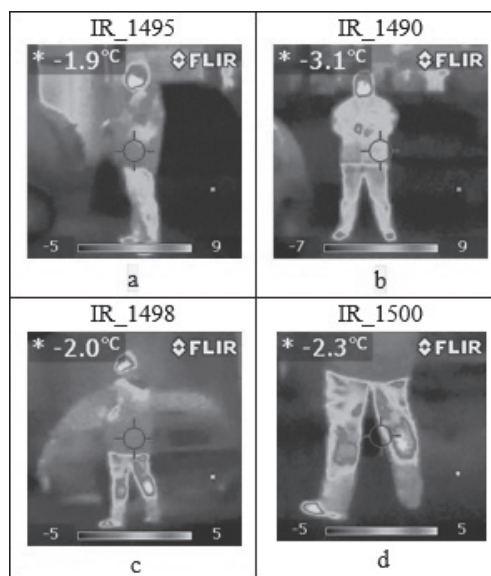
Rezultat termografskog mjerenja raspodjele temperature je termogram koji u određenom kodu boja daje sliku temperaturne raspodjele na površini tijela ispitanika i zaštitne odjeće. Temperaturna raspodjela posredno daje informaciju o različitim stanjima same površine ili je pak odraz strukture i unutrašnjeg stanja promatranog objekta. Za usporedbu rezultata u ovome radu izdvojeni su rezultati dobiveni za ispitanika sa zaštitnom odjećom (stari komplet s podjакnom) 10 min nakon izlaganja hladnom okolišu od 0 °C (slika 3a-d). U sredini termograma nalazi se pokazivač koji pokazuje temperaturu u određenoj točki, a rezultat tog mjernog područja prikazuje se brojanom vrijednošću u gornjem lijevom kutu, te iznosi -6,7 °C. U donjem dijelu termograma prikazana je temperaturna skala u rasponu od -9 do 3 °C. To znači da je najtamnijom plavom bojom prikazana temperatura od -9 °C, što u ovom slučaju predstavlja temperaturu okolnog prostora i tijela u prostoru, dok crvena, prelazeći u bijelu boju, predstavlja najviše temperature ovog termograma. Također, može se jasno vidjeti raspored temperature, odnosno kako niti jedna nije konstantna, već se pojavljuje nekoliko različitih. Najtoplija područja nalaze se u donjem dijelu odjeće zbog dobre izolacije. Točnije u dijelu natkoljenice i potkoljenice, pri čemu se može zaključiti da je tu više slojeva materijala. Temperatura se dijagonalno smanjuje prema preklopu donjeg i gornjeg dijela odjeće gdje je približno -1,9 °C, a to znači da je potrebno provjeriti nije li odjeća prevelika.



Slika 3. Termogrami zaštitne odjeće u umjerenom i hladnom okruženju na 0 °C - komplet s podjакnom

Figure 3. Protective clothing thermograms in a moderate and cold environment at 0 °C – set with under jacket

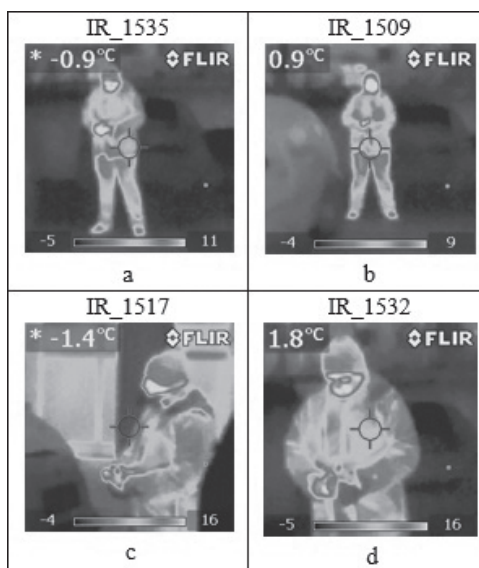
Na slici 4 prikazan je termogram zaštitne odjeće (komplet bez podjакne). Prema temperaturnoj skali, može se vidjeti da se temperature kreću u rasponu od -7 °C do 9 °C, a na zaštitnoj odjeći od -2 °C do 5 °C. Najniže temperature označene plavom bojom predstavljaju okolni prostor.



Slika 4. Termogrami zaštitne odjeće na 0 °C - komplet bez podjакne

Figure 4. Protective clothing thermograms at 0 °C - set without under jacket

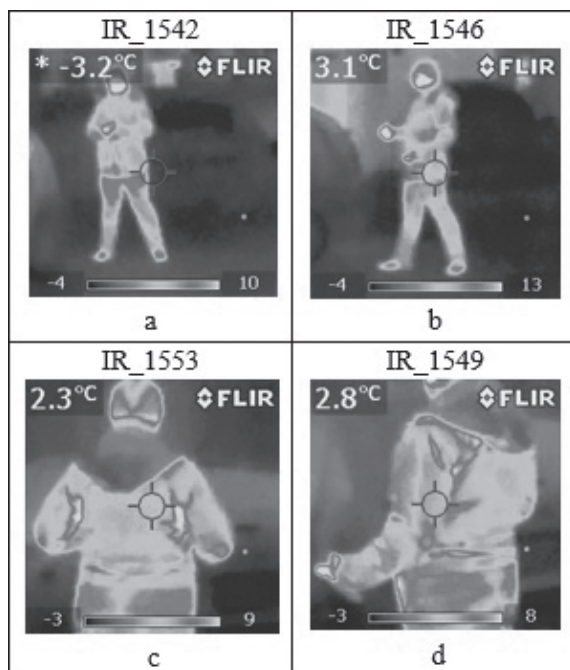
Slika 5 prikazuje termograme zaštitne odjeće - komplet s flis jaknom. Temperaturna skala na četiri slike prikazuje temperaturu u rasponu od -5 °C do 16 °C. Najviša temperatura pojavljuje se u srednjem dijelu gornje odjeće i gornjem dijelu u predjelu natkoljenica, a niže temperature na rukavima.



Slika 5. Termogrami zaštitne odjeće na 0 °C - komplet s flis jaknom

Figure 5. Protective clothing thermograms at 0 °C - set with fleece jacket

Na slici 6 prikazan je termogram zaštitne odjeće - komplet s flis jaknom i hlače s utopljenjem (flis uložak za hlače). Prema temperaturnoj skali može se vidjeti da se temperature kreću u rasponu od -4°C do 10°C . Najveće vrijednosti raspodjele temperature su u srednjem dijelu gornje odjeće i gornjem dijelu natkoljenica, a najniže na srednjem dijelu gornje odjeće i rukavima.



Slika 6. Termogrami zaštitne odjeće na 0°C - komplet s proljetnom jaknom

Figure 6. Protective clothing thermograms at 0°C - set with spring jacket

ZAKLJUČAK

Mjerenje temperature infracrvenom kamerom je jednostavna metoda određivanja opterećenja radnika tijekom nekog rada i funkcija zaštitne odjeće pri niskim temperaturama. Termografskim snimkama provjerava se stanje toplinske izolacije zaštitne odjeće, kvaliteta ugrađenih materijala, prisutnost vlage u zaštitnoj odjeći. Nakon obavljenog mjerenja i analiziranja dobivenih termograma snimljenih termovizijskom infracrvenom kamerom Flir i5, uz dodatno objašnjene funkcije i mogućnosti koje kamera pruža, može se zaključiti da se javljaju određena odstupanja na svim dijelovima površina odjeće i šavovima, odnosno

temperature nisu u potpunosti ravnomjerno raspoređene diljem dijelova odjeće radnika. Hladne ruke i noge najčešće su pritužbe radnika kod niskih temperatura okoline. Dinamičkim praćenjem temperature tijela i zaštitnih odjevnih predmeta kao i fizioloških parametara tijela radnika moguće je komparirati cjelokupno ponašanje radnika i zaštitnih odjevnih predmeta koje on nosi.

LITERATURA

Angelova, R.A.: *Working in Cold Environment: Clothing and Thermophysiological Comfort*, Occupational Health, 2017, Dr. Orhan Korhan (Ed.), InTech, dostupno na: <https://www.intechopen.com/books/occupational-health/working-in-cold-environment-clothing-and-thermophysiological-comfort>, pristupljeno: 11. 4. 2018.

Direktiva vijeća 89/686/EEZ o usklađivanju zakonodavstva država članica u odnosu na osobnu zaštitnu opremu, dostupno na: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:31989L0686&from=HR>, pristupljeno: 18.10.2017.

Geršak, J., Maričić, M.: Složeni koncept projektiranja funkcionalne zaštitne odjeće, *Tekstil*, 62, 2013., 1-2, 31-37., dostupno na: <http://hrcak.srce.hr/142613>, pristupljeno: 12.10.2017.

Havenith, G.: The interaction of clothing and thermoregulation, *Exogenous Dermatology*, 5, 2002., 1, 221-230.

Horvat, J., Regent, A.: *Osobna zaštitna oprema*, Veleučilište u Rijeci, Rijeka, 2009.

HRN EN 13688:2013 - *Zaštitna odjeća - Opći zahtjevi*, Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 2013.

HRN EN ISO 20471:2013/A1:2016 - *Upozoravajuća odjeća visoke vidljivosti - Metode ispitivanja i zahtjevi*, Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 2013.

HRN EN 14058:2017 - *Zaštitna odjeća - Odjevni predmeti za zaštitu od hladne okoline*, Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 2017.

Hursa Šajatović, A., Dragčević, Z., Zavec Pavlinić, D.: Oblikovanje zaštitne odjeće, obuće i opreme s ergonomskog stajališta, *Sigurnost*, 59, 2017., 3, 227 - 236.

Mijović, B., Skenderi, Z., Camara, J., Reischl, U., Colby, C., Mermerian, A.: Inflatable Mannequin for Testing Thermal Properties of Clothing. *Proceedings of the 17th World Congress on Ergonomics*, Beijing, China, August 9-14, 2009.

Mijović, B., Skenderi, Z., Salopek, I.: Comparison of Subjective and Objective Measurement of Sweat Transfer Rate, *Collegium Antropologicum*, 33, 2009., 2, 315-320.

Pejnović, N. i sur.: Zaštitna odjeća u primjeni, 5. međunarodni stručno-znanstveni skup „Zaštita na radu i zaštita zdravlja“, 17.- 20. 9. 2014., Zadar.

Pejnović, N. i sur.: Upozoravajuća odjeća uočljiva s velike udaljenosti, 6. međunarodni stručno-znanstveni skup „Zaštita na radu i zaštita zdravlja“, 21.- 24. 9. 2016., Zadar.

Pejnović, N.: Osobna zaštitna oprema za zaštitu tijela, *Sigurnost*, 57, 2015., 3, 229 -242.

Popis hrvatskih normi za osobnu zaštitnu opremu, N. N., br. 110/09.

Pravilnik o uporabi osobnih zaštitnih sredstava, N.N., br. 39/06.

Pravilnik o stavljanju na tržište osobne zaštitne opreme, N.N., br. 89/10.

Regent, A.: Nova europska legislativa o osobnoj zaštitnoj opremi, *Sigurnost*, 58, 2016., 2, 155-162.

Reischl, U., Goonetilleke, R., Mijović, B., Skenderi, Z.: Thermal Characteristics of Infrared Radiation Protective Vests, *Sigurnost*, 53, 2011., 1, 51-56.

Salopek Čubrić, I., Skenderi, Z., Mijović, B.: Primjena termografije i subjektivnog ispitivanja pri evaluaciji udobnosti, *Sigurnost*, 51, 2009., 3, 193-200.

Vučinić, J.: *Osobna zaštitna sredstva i oprema*, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2007.

Upute za korištenje FLIR i5, dostupno na: <https://www.omega.com/manuals/manualpdf/M5150.pdf>, pristupljeno: 2. 3. 2018.

Zakon o Zaštiti na radu, N. N. br. 71/14, 118/14.

Zavec Pavlinić, D., Mekjavić, I.: Extreme Environmental Conditions Require Optimal Military Clothing Ensembles, *Book of Proceedings of the 5th International Textile, Clothing and Design Conference 2010 - Magic World of Textiles / Dragčević, Zvonko; Hursa Šajatović, Anica; Vučasinović, Edita (ur.)*, Zagreb, Tekstilno-tehnološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2010, 535-539.

TESTING HEAT TRANSFER IN PROTECTIVE CLOTHING USING A THERMOVISION CAMERA

SUMMARY: Infrared thermography is a contactless method of measuring radiation energy of an object being observed. The surface temperature of the object is obtained indirectly by measuring the radiation energy of the object under observation. The paper presents the possibilities of applying infrared thermography to test heat transfer in protective clothing. From the results of the measurements, it can be determined what comprises an effective thermal insulation for winter protective clothing when working in an outdoor low temperature environment.

Key words: *thermophysiological comfort, protective clothing, infrared thermography (IRT)*

*Subject review
Received: 2018-04-25
Accepted: 2019-03-04*