

# Toplotno prevajanje skozi vlažne plasti

## Heatconducting through the damp layer

Mitja Slavinec<sup>1\*</sup>, Maja Fras<sup>1</sup>, Daniela Zavec Pavlinič<sup>2</sup>, Igor B. Mekjavič<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko

<sup>2</sup>Biomed d.o.o, Ljubljana

<sup>3</sup>Inštitut Jožef Stefan, Ljubljana

E-Mails: mitja.slavinec@uni-mb.si; fras.maja90@gmail.com; dzpavlinic@gmail.com; igor.mekjavic@ijs.si

\* Avtor za korespondenco; tel. +386 31 320 992

---

**Povzetek:** V članku je predstavljeno prevajanje toplote skozi več zaporednih različnih vpojnih plasti, ki so lahko vlažne. Robni pogoj na zunanji strani je konstantna gostota toplotnega toka. Model je enodimenzionalen in temelji na difuzijski enačbi za toplotno prevajanje. Podaja časovno odvisnost temperaturnega polja v smeri prečno na plasti. Model upošteva stopnjo vlažnosti, zato je primeren za vpojne plasti kot je tekstil. Glede na ujemanje rezultatov simulacije z izmerjenimi, je simulacija uporabna za opis prevajanja toplote skozi zaščitne obleke. Numerične simulacije omogočajo razširitev za poljubno mnogo različnih plasti, kar omogoča analizo meritev toplotnega prevajanja skozi različna oblačila ali napoved razmer za različne strukture zaščitnih oblek ter vpliv vlažnosti plasti na stopnjo zaščite.

**Ključne besede:** toplota, toplotno prevajanje, izparevanje, temperatura, požarna lutka, zaščitna oblačila.

**Abstract:** The article presents the heat transfer through successive layers of different absorbent, which may be damp. Boundary condition on the outside is the constant heat flow density. The model is one-dimensional and is based on the heat diffusion equation for the heat transfer. It gives the time dependence temperature field in the direction perpendicular to the layers. The model takes into account the level of humidity, so it is suitable for the absorbent layer such as textiles. According to the matching simulation results with measured, the simulation used to describe heat transfer through protective clothing. Numerical simulations allow for the extension of any number of different layers, thereby allowing measurements of heat conduction through different clothing or forecast conditions for various structures protective clothing layers and the influence of humidity on the level of protection.

**Key words:** heat, heat transfer, vaporization, temperature, fire doll, protective clothing.

---

### 1. Uvod

Oblačila morajo izpolnjevati veliko različnih pogojev, povezanih s fiziološkimi značilnostmi ljudi, zagotavljanjem udobja in njihovega namena uporabe. Eden izmed osnovnih fizikalnih kriterijev je ustrezna toplotna izolacija, zato je dober opis prevajanja toplote skozi oblačilapri tem ključnega pomena. Toplotna izolacija običajno zmanjšuje oddajanje

telesne toplote ljudi, v nekaterih primerih pa gre za obraten proces, ko z ustreznimi zaščitnimi oblačili telo varujemo pred opeklinami zaradi izpostavljenosti visokim temperaturam in plamenu. Tak primer so npr. zaščitna oblačila gasilcev. Najnevarnejše razmere med gašenjem nastopijo, ko zaradi vdora kisika v zaprte prostore pride do kratkotrajnih eksplozij in ogenj plane z jakostjo gostote toplotnega toka  $j_0 = 100 \text{ kW/m}^2$  ali več.

Takšne razmere seksperimentalno preiskujejo s posebnimi požarnimi lutkami iz negorečega materiala [1]. Lutke so opremljene s temperaturnimi senzori, ki merijo, kako se na površini spreminja temperatura in iz ustreznega toplotnega toka potem sklepajo na obseg in stopnjo opeklin, ki bi jih v primerljivih okoliščinahkoža dejansko utrpela [2-8]. Tovrstni poskusi so razmeroma zahtevni in dragi. Do sedaj so raziskave obravnavale predvsem prevajanje toplote pri nižjih gostotah toplotnega toka [9], ni pa še bil izdelan tovrsten teoretičen model in numerična simulacija za opis prevajanja toplote skozi zaščitna oblačila, ki bi ustrezno pojasnjeval rezultate poskusov in tudi dajal možnosti napovedi glede na različne okoliščine, ki v naravi lahko nastopijo.

V članku je opisan osnovni mehanizem prevajanja toplote [10,11] skozi zaščitna oblačila, na osnovi katerega je razvita numerična simulacija. Analitične rešitve namreč obstojijo le za najenostavnejše geometrije in konfiguracije [11-14], simulacija pa omogoča obravnavo prevajanja toplote skozi več različnih plasti zaščitnih oblačil, hkrati pa omogoča razširitev za opis specifičnih okoliščin, kot je navlaženospodnje perilo, destruktivne spremembe zaščitne obleke in podobno.

V nadaljevanju je predstavljen opis vlažnosti spodnjega perila z modelom efektivnih fizikalnih količin in prevajanje toplote skozi več različnih plasti v zaščitnem oblačilnem sistemu. Pri slednjem je zunanja plast izpostavljena velikemu toplotnemu toku, kot nastane pri plamenu, vsaj ena izmed notranjih plasti pa naj bo vlažna. Prevajanje toplote je opisano v približku pol neskončne limite plan-paralelnih plasti.

## 2. Prevajanje toplote

Prevajanje toplote opisuje Fourierov zakon [15], ki pravi, da je gostota toplotnega toka  $j$  sorazmerna gradientu temperature  $\nabla T$ , sorazmernostni faktor pa je toplotna prevodnost  $\underline{\lambda}$  dane snovi:

$$\vec{j} = \underline{\lambda} \nabla T. \quad (1)$$

Analitične rešitve gornje enačbe so znane za enostavne geometrije (plošča, valj, krogla) ali enodimenzionalne primere [11-14]. Pri reševanju večdimenzionalnih nestacionarnih primerov, pa se v splošnem poslužujemo numeričnih in grafičnih metod [13, 16].

V nadaljevanju bomo prevajanje toplote skozi steno cevi nadomestili z približkom plan-paralelnih plasti, saj je krivinski radij človeškega telesa  $R$ , in s

tem obleke, velik v primerjavi s skupno debelino vseh plasti oblačil  $d$ . Relativna napaka takega približka je reda velikost  $d/2R$ , kar v praksi znaša manj kot 1%. Naslednji približek je limita pol neskončne plasti, kar je prav tako smiselno, saj nas zanimajo razmere na površini kože tj. na globini nekaj mm v primerjavi z nekaj 100 mm kot je  $R$ . Robni pogoj na zunanji strani plasti je stalna gostota toplotnega toka s čimer opišemo prej omenjeno izpostavljenost zaščitnih oblačil segrevanju z  $j_0$ .

V modelu ne upoštevamo nagubanosti oblačil. Gube nastanejo slučajno, njihova velikost in število pa je odvisno od tega, kako ohlapna ali oprijeta je obleka.

Ob gornjih predpostavkah se enačba (1) poenostavi in v enodimenzionalnem približku dobi obliko:

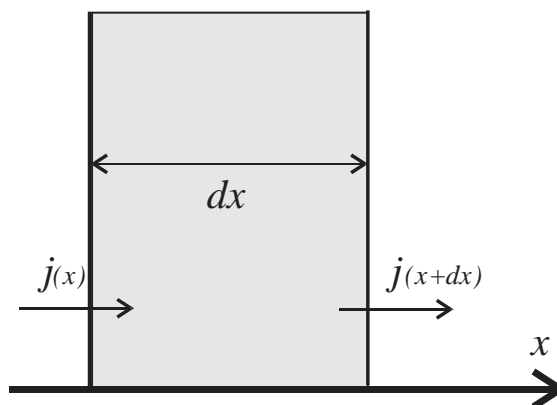
$$j = \lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2)$$

kjer je  $j$  velikost gostote toplotnega toka pravokotno na plasti (v smeri osi  $x$ ).

Plast v mislih razrežemo na tanke rezine z debelino  $dx$  kot kaže slika 1. Zapis toplotne bilance za posamezno rezino je:

$$\frac{\partial j}{\partial x} = \frac{\partial (r c T)}{\partial t}, \quad (3)$$

kjer je  $r$  gostota in  $c$  specifična toplota snovi.



Slika 1. V opazovani rezini snovi z debelino  $dx$ , se zaradi razlike toplotnih tokov s časom spreminja toplota  $Q$ .

Ko združimo enačbi (2) in (3), pri čemer toplotno prevodnost in specifično toplotno obravnavamo kot neodvisni od temperature, dobimo difuzijsko enačbo:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (4)$$

kjer je  $D = \lambda/\rho c$  difuzijska konstanta [11-13]. Difuzijska konstanta določa tipičen čas v katerem sistem reagira na spremembo zunanje temperature.

Enačbo (4) rešujemo pri začetnem pogoju:

$$T(x,0) = T_0 \quad (5a)$$

in robnih pogojih:

$$-\lambda \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = j_0, \quad (5b)$$

$$T(x \rightarrow \infty, t) = T_0, \quad (5c)$$

kar ustreza razmeram, ko je na začetku ob času  $t=0$  temperatura povsod enaka začetni temperaturi  $T_0$ . Na površini, pri  $x=0$ , potem obleko grejemo s konstantno gostoto toplotnega toka  $j_0$ , globoko v notranjosti, ko gre  $x$  preko vseh meja, pa ostaja temperatura nespremenjena  $T_0$ .

Pri takih robnih pogojih za enačbo (4) obstoji (kvazi) analitična rešitev [13]:

$$T(x,t) = T_0 + \frac{j_0}{\lambda} \left[ \sqrt{\frac{4\alpha t}{\pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4\alpha t}} - x \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \right], \quad (6)$$

kjer je  $\operatorname{erfc}(u)$  komplementarna error funkcija definirana kot:

$$\operatorname{erfc}(u) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-u^2} du. \quad (7)$$

### 3. Vpliv vlage na fizikalne količine

Zaradi zelo visokih temperatur in velike fizične aktivnosti med opravljanjem zelo intenzivnega dela se gasilci intenzivno znojijo, kar navlaži njihovo spodnje perilo. Vpliv vlage na spodnje perilo bomo opisali z modelom učinkovitih fizikalnih količin. Učinkovito toplotno prevodnost  $\lambda_e$  v linearnem približku izračunamo kot ustrezno obteženo povprečno vrednost toplotne prevodnosti perila in vode:

$$\lambda_e = \lambda_p \frac{1}{1+r_v} + \lambda_v \frac{r_v}{1+r_v}, \quad (8)$$

kjer je  $\lambda_p$  toplotna prevodnost perila,  $\lambda_v$  toplotna prevodnost vode in  $r_v = m_v/m_p$  relativni delež mase vode  $m_v$  v perilu  $m_p$ . Na enak način izračunamo učinkovito specifično toploto vlažnega perila  $c_e$ :

$$c_e = c_p \frac{1}{1+r_v} + c_v \frac{r_v}{1+r_v}, \quad (9)$$

kjer je  $c_p$  specifična toplota perila in  $c_v$  specifična toplota vode.

Pri učinkoviti gostoti pa upoštevamo, da je spodnje perilo porozno in je zato skupen volumen spodnjega perila in vode manjši od vsote posameznih volumnov:

$$V_e = V_p + k_p V_v, \quad (10)$$

kjer je  $k_p$  količnik, ki meri kolikšen delež prostornine vode prispeva k skupni prostornini in je povezan s poroznostjo spodnjega perila in količino vode. Količnik  $k_p$  bi bil 0, če bi bilo malo vode in zelo porozno perilo, tako da bi se vsa voda vpila v perilo ter 1 če perilo ne bi bilo porozno. Upoštevaje enačbo (10) se učinkovita gostota  $\rho_e$  izraža kot:

$$\rho_e = \rho_p \frac{1+r_v}{1+k_p r_v \frac{\rho_p}{\rho_v}}, \quad (11)$$

kjer je  $\rho_p$  gostota perila.

Glede na to, da sta površini suhega in mokrega perila približno enaki, lahko upoštevaje enačbo (10) izrazimo učinkovito debelino vlažnega perila  $d_e$ :

$$d_e = d_p \left( 1 + k_p r_v \frac{\rho_p}{\rho_v} \right), \quad (12)$$

kjer je  $\rho_v$  gostota vode in  $d_p$  debelina suhega perila. V gornjih izračunih smo predpostavili, da se perilo enakomerno navlaži z vodo, kar je glede na dokaj enakomerno znojenje vzdolž po koži telesa dober približek.

V primeru vlažnega perila uporabimo učinkovite fizikalne količine izračunane iz gornjih enačb za ustrezno količino vode.

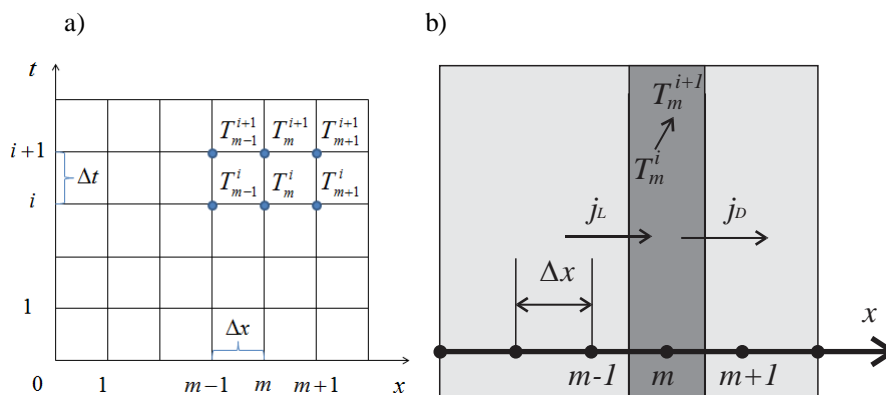
### 4. Numerična simulacija

Rešitev (6) je analitična za homogeno snov. Zaščitna oblačila pa so sestavljena iz več plasti z različnimi debelinami in različnimi fizikalnimi lastnostmi. Rešitve takega sistema bomo poiskali numerično s pomočjo metode končnih diferenc [13,

17, 18], s krajevno in časovno diskretizacijo, kot je prikazano na sliki 2a.

Sistem razdelimo na  $M$  enakih plasti debeline  $\Delta x = d/M$ . Posamezno plast označuje indeks  $m$ . Celoten sistem krajevno opišemo z  $M + 1$  indeksi  $(0, 1, \dots, m - 1, m, m + 1, \dots, M)$ . Podobno določimo tudi časovni

korak  $\Delta t = t/N$ , kjer je  $t$  celoten čas opazovanja in  $N$  število časovnih korakov. Posamezen časovni korak označimo z indeksom  $i$ . Vozlišča mreže prikazane na sliki 2a določajo temperaturo  $T_m^i$  plasti  $m$  v časovnem koraku  $i$ .



**Slika 1.** Numerično reševanje nestacionarnega prevajanja toplote skozi ravno ploščo: a) diskretizacija kraja in časa in b) numerično reševanje na primeru ravne plošče.

Toplotna bilanca posamezne plasti je podana z enačbo (3). Tako z leve kot z desne strani naj v določenem časovnem intervalu  $i$  v opazovano plast  $m$  pritekata gostoti toplotnih tokov  $j_L$  in  $j_R$  definirana kot:

$$j_L = \lambda \frac{T_{m-1}^i - T_m^i}{\Delta x} \quad \text{in} \quad (13a)$$

$$j_R = \lambda \frac{T_{m+1}^i - T_m^i}{\Delta x}, \quad (13b)$$

V gornjih enačbah smo uporabili približek linearnega spreminjanja temperature med posameznimi plastmi. Če v enačbi (3) upoštevamo enačbi (13a) in (13b), odvod  $\partial T / \partial t$  preoblikujemo z metodo končnih diferenc v  $(T_m^{i+1} - T_m^i) / \Delta t$ , nestacionarno prevajanje toplote skozi plast  $m$  (slika 2b) opišemo z enačbo:

$$\lambda_m \frac{T_{m-1}^i - T_m^i}{\Delta x} + \lambda_m \frac{T_{m+1}^i - T_m^i}{\Delta x} = \rho_m \Delta x c_m \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t}, \quad (14)$$

kjer so  $\lambda_m$ ,  $\rho_m$ ,  $c_m$  toplotna prevodnost, gostota in specifična toplota oblačila na  $m$ -ti rezini. V primeru, da opisujemo vlažno tkanino uporabimo efektivne količine iz enačb (8) – (12). Temperatura plasti  $m$  v časovnem koraku  $i + 1$  je definirana kot:

$$T_m^{i+1} = T_m^i + \tau (T_{m-1}^i + T_{m+1}^i - 2T_m^i), \quad (15)$$

kjer smo vpeljali t.i. Fourierjevo število mreže, odvod  $t = D\Delta t / \Delta x^2$ , ki velikost časovnega koraka  $\Delta t$  omejuje s kriterijem stabilnosti [13]:

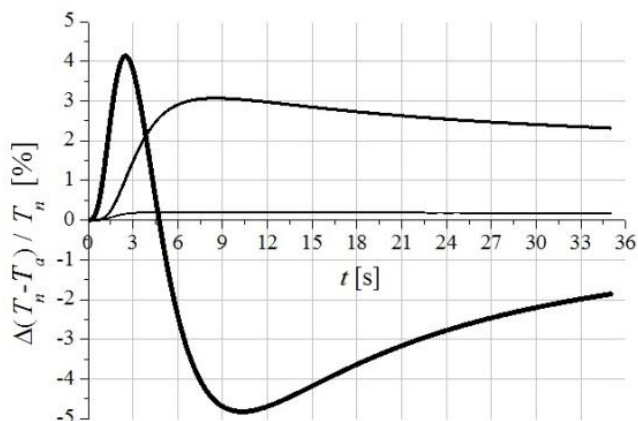
$$\tau = \frac{D\Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{2}. \quad (16)$$

Če  $\Delta t$  ni dovolj majhen, bo rešitev oscilirala in se oddaljevala od prave rešitve.

Podobno z metodo končnih diferenc vpeljemo še robni pogoj:

$$j_0 + \lambda \frac{T_1^i - T_0^i}{\Delta x} = \rho \frac{\Delta x}{2} c \frac{T_0^{i+1} - T_0^i}{\Delta t}. \quad (17)$$

Metodo testiramo na analitično rešljivem primeru homogene snovi, podanim z enačbo (6). Na sliki 3 je graf, ki prikazuje časovno odvisnost temperature pri izbranem  $x$ , izračunano iz enačbe (6), in numerično.



**Slika 3.** Na grafu je prikazana relativna razlika med rezultati simulacije in analitičnimi rešitvami enačbe (6) pri  $x=1,8$  mm in gostoto toplotnega toka  $j_0 = 100$  kW/m<sup>2</sup> skozi snov s toplotno prevodnostjo  $\lambda_0 = 0,31$  W/(mK), gostoto  $\rho_0 = 2200$  kg/m<sup>3</sup> in specifično toploto  $c_0 = 1100$  J/(kgK) za različne numerične delitve časovnega in krajevnega intervala: i) tanka krivulja  $\Delta x = 0,1$  mm in  $\Delta t = 0,2$  ms, ii) srednja krivulja  $\Delta x = 0,1$  mm in  $\Delta t = 2$  ms, in c) debela krivulja  $\Delta x = 0,9$  mm in  $\Delta t = 2$  ms.

Iz grafa na sliki 3 vidimo, da se rezultat numerične simulacije dobro ujema z analitično rešitvijo. Podrobnejša analiza kaže, da je napaka metode odvisna od velikosti numerične delitve časovnega in krajevnega intervala  $\Delta t$  in  $\Delta x$ . Glede na to, da gre za enodimenzionalen primer, numeričen izračun ni zahteven in v praksi lahko izberemo dovolj fini delitvi ( $\Delta t < 0,1$  ms in  $\Delta x < 0,1$  mm), ki napako metode zmanjšata bistveno pod 1%. Izbira delitve je tudi v skladu s pogojem za stabilnost metode, ki ga narekuje enačba (16).

Prehod toplote med dvema različnima plastema obravnavamo enako kot med posameznimi rezinami znotraj posamezne snovi. Posplošitev za različne plasti temelji na linearni superpoziciji prispevkov posameznih plasti, zato lahko tudi v teh primerih privzamemo

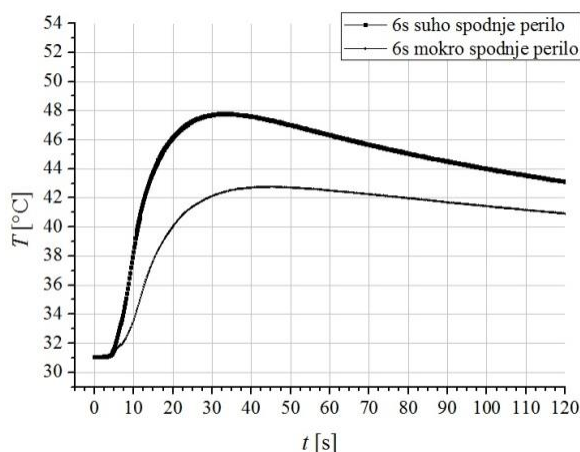
primerljivo relativno napako metode, kot je ocenjena iz primerjave za analitično rešitev ene same plasti.

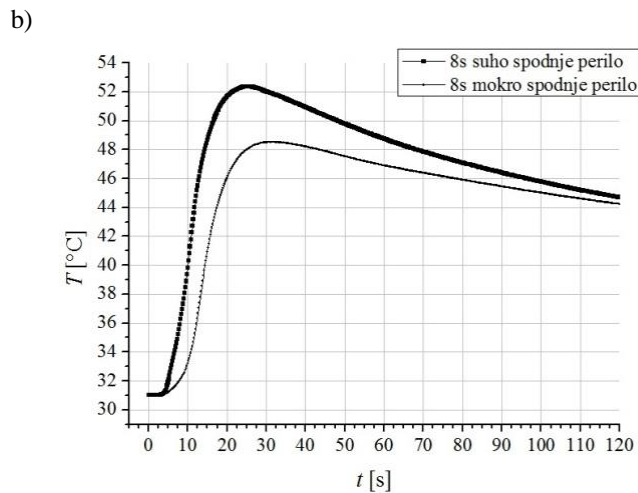
## 5. Rezultati

Simulirali bomo prevajanje toplote pri okoliščinah, kot so običajne pri poskusih z merilno lutko. Omejili se bomo na dve različni konfiguraciji zaščitnih oblek: a) ko je perilo pod zaščitno obleko suho in b) ko je spodnje perilo navlaženo z 0,5 kg vode, kar simulira znojenje gasilcev pri ekstremnih in dolgotrajnih naporih.

Iz grafa na sliki 4a, ki kaže časovno odvisnost temperature na enem izmed senzorjev po gretju 6s v primeru suhega in mokrega spodnjega perila vidimo, da je pri mokrem perilu temperatura na površini merilne lutke občutno nižja kot pri suhem perilu. Podobne so tudi razmere za poskus, pri katerem je gretje trajalo 8s.

a)





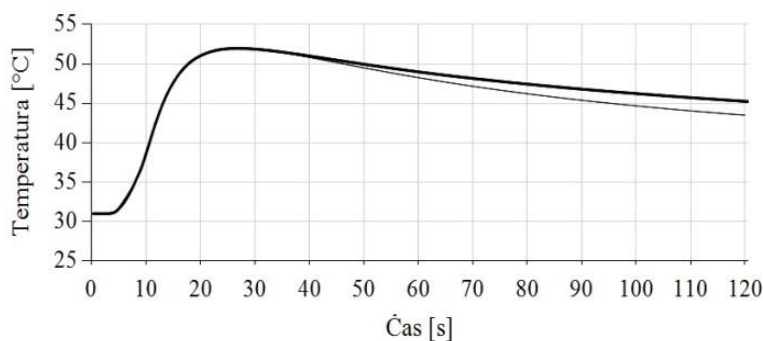
**Slika 4.** Temperatura na površini merilne lutke v primeru suhega in mokrega spodnjega perila za dve različni dolgi časovni periodi izpostavljenosti plamenu a) 6s in b) 8s.

Rezultati so smiselni, saj ima voda zelo veliko specifično toploto, zato akumulira veliko toplote in posledično temperatura spodnjega perila, ter s tem tudi temperatura kože, ostajata nižji.

Groba ocena energijske bilance za 8s trajajočo izpostavljenost plamenu s tipično gosto toplotnega toka  $j_0 = 100 \text{ kW/m}^2$  in 0,5 kg vode pokaže, da se sistem zaščitnih oblačil segreje za  $5^\circ\text{C}$  manj, kar kaže, da vlažno podoblačilo dodatno pripomore k zaščiti pred opeklinami, kar potrjujejo tudi rezultati meritev.

Na osnovi primerjave eksperimentalno dobljenih rezultatov z rezultati numerične simulacije se izkaže, da

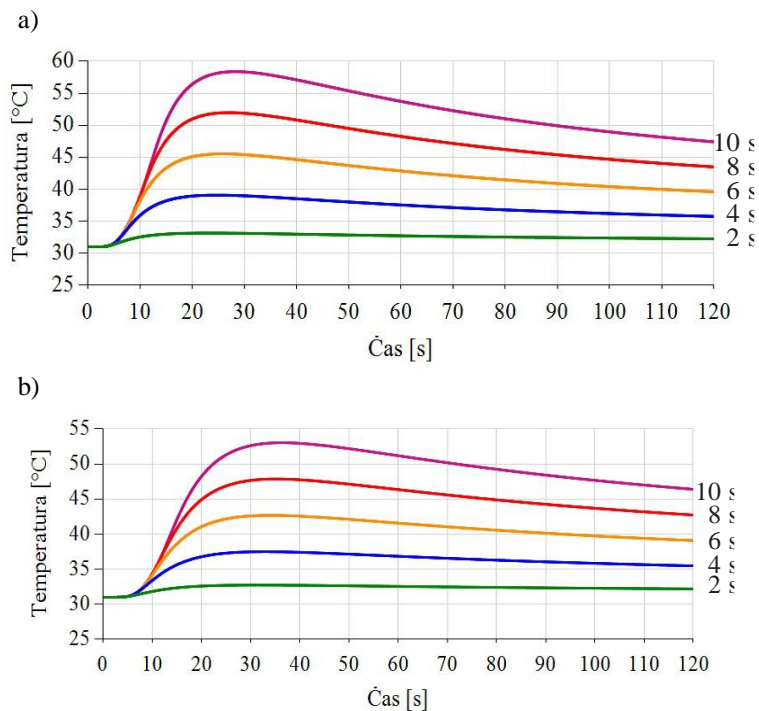
numerična simulacija sistematično daje od 10% do 20% previsoke temperature. Delno je to zaradi napake pri umerjanju gostote toplotnega toka med eksperimentom, v večji meri pa zato, ker vsa sproščena toplota ne preide na lutko, ampak se je del potroši za segrevanje ozračja in laboratorija. Zaradi tega so v simulaciji uporabljene nižje gostote toplotnega toka. Določene so na podlagi najboljšega ujemanja izmerjenih in simuliranih rezultatov. Na sliki 5 vidimo, da numerična simulacija zelo dobro reproducira rezultate meritev in jo lahko z veliko natančnostjo apliciramo za poljuben čas izpostavljenosti plamenu.



**Slika 5.** Primerjava simuliranih rezultatov (tanka krivulja) z eksperimentalno izmerjenimi (debela krivulja) kaže na dobro ujemanje časovne odvisnosti temperature na površini kože.

Glede na dobro ujemanje rezultatov simulacije z izmerjenimi, simulacijo uporabimo za opis prevajanja toplote skozi zaščitne obleke. Slika 6 kaže rezultate simulacije za različne čase segrevanja za suho in mokro

spodnje perilo. Na sliki 6a so predstavljeni rezultati simulacije za gretja, ki so trajala 2s, 4s, 6s, 8s in 10s pri suhem spodnjem perilu, na sliki 6b pa pri mokrem spodnjem perilu.



**Slika 6.** Rezultati simulacije za segrevanje 2s, 4s, 6s, 8s in 10s z gostoto toplotnega toka  $j_0 = 53 \text{ kW/m}^2$  v primeru a) suho spodnje perilo in v primeru b) mokro spodnje perilo.

Iz grafov na sliki 6 lahko razberemo, da vlaga kožo dodatno ščiti pred opeklinami. Za približno 1s se podaljša čas, ko se temperatura na površini kože praktično ne spreminja (časovni zamik, da toplota prodre skozi oblačilo). Prav tako se v vseh primerih sistematično zniža temperatura na površini kože, v primeru 8s izpostavljenosti plamenu, za približno  $5^\circ\text{C}$ .

Teoretičen opis vpliva vlage na prevajanja toplote daje zelo pomembne dodatne informacije glede celovite zaščite pred opeklinami. Na osnovi tega lahko sklepamo, da je učinkovitejše zelo vpojno spodnje perilo, saj dodatna vlaga poveča zaščito pred opeklinami.

Iz grafov tudi lepo razberemo, da zaradi dodatne vlage kritično obdobje (čas, ko je temperatura na površini kože najvišja) zamakne za približno 10s, kar omogoča dodatne možnosti pri reševanju ponesrečencev, kot je npr. intenzivno hlajenje z vodo na površini telesa.

## 6. Zaključek

Rezultati simulacije kažejo, da z uporabljenim modelom lahko dobro opišemo dinamično temperaturno polje od roba oblačila do kože za

različne čase in različne jakosti izpostavljenosti plamenu. Linearni model učinkovitih fizikalnih parametrov učinkovito opiše vpliv vlažne pletenine spodnjega perila, saj so rezultati kvantitativno smiselni in kritično odvisni od količine vlage v perilu. Model je uporaben za simulacijo prehoda toplote skozi poljubno število slojev v zaščitnem oblačilnem sistemu z različnimi fizikalnimi lastnostmi, kar mu daje veliko uporabno vrednost pri analizi opeklin in napovedovanju ogroženosti glede na stopnjo zaščite. Pomembna aplikativna možnost uporabe je tudi na področju modeliranja zaščitnih oblačil in vzpostavljanju njihovih standardov ter različnih protokolov in zaščitnih postopkov.

Prav možnost napovedovanja časovne odvisnosti temperature simulaciji zagotavlja veliko aplikativno vrednost, saj na osnovi teh napovedi lahko ocenimo stopnjo ogroženosti kože v danih okoliščinah.

Nadaljnje možnosti nadgradnje simulacije so na področju dinamičnega profila gostote toplotnega toka, ob upoštevanju izparevanja vlage in degeneracijskih sprememb na površini zaščitnega oblačila zaradi dolgotrajne izpostavljenosti visokim temperaturam in plamenu.

**Literatura**

1. ISO/DIS13506 – Protective clothing against heat and flame – Test method for complete garments – Prediction of burnin jury using an instrumented manikin, 2002.
2. Gašperin, M.; Juričič, Đ.; Mussizza, B. in Mekjavič, I. A model-based approach to the evaluation of flame-protective garments. *ISA Transactions* 2008, 47, 198-210.
3. Camenzind, M.A.; Dale, D.J.; Rossi, R.M. Manikin test for flame engulfment. *Fire and Materials* 2007, 31, 285-295.
4. Crown, E.M.; Dale, J.D. Evaluation of flash fire protective clothing using an instrumented mannequin. Report, University of Alberta, 1992.
5. Elkins, W.; Thompson, J.G. Instrumented thermal manikin. Technical report ASD-TR-73-33. NTIS, 1973.
6. Torvi, D.A. Research in protective clothing for firefighters: State of the art and future directions. *Fire Technology* 1999, 35, 111-130.
7. Zavec Pavlinič, D. i sur. Protupožarni odjevni sustavi i njihovo vrednovanje, *Sigurnost* 2010, 52, 251-262, ISSN 1330-0229.
8. House, J.R. & Mekjavič, I.B.: Using flame manikin to ensure safety and enhance operational capability in military, industrial and rescue services, Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Environmental Ergonomics, ICEE 2007, Mekjavič, Igor B., Kounalakis, Stelios N., Taylor, Nigel A.S. (Eds.), pp. 186-189, Piran, Slovenia, August 19-24, (2007)
9. Prasad, K.; Twilley, W.; Lawson, J.R. Thermal Performance of Fire Fighters' Protective Clothing. 1. Numerical Study of Transient Heat and Water Vapor Transfer. NISTIR 6881, 2002.
10. Halliday, D.; Resnick, R.; in Walker, J. *Fundamentals of Physics*; John Wiley & Sons, New York, 2003.
11. Welty, J.R., Wicks, C.E., Wilson, R.E., Rorrer, G.L. *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*, 5<sup>th</sup> Edition. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2008.
12. Incropera, F.P.; DeWitt, D.P.; Bergman, T.L.; Lavine, A.S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6<sup>th</sup> Edition. John Wiley & Sons, New York, 2007.
13. Cengel, Y.A. *Heat and Mass Transfer, A Practical Approach*, Third Edition. McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 2006.
14. Behera, P. Analysis of Transient Heat Conduction in Different Geometries. Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, 2009.
15. Fourier, J.B.J. *The Analytical Theory of Heat*. University Press, Cambridge, 1878.
16. Minkowycz, W.J.; Sparrow, E.M.; Schneider, G.E. in Pletcher, R.H. *Handbook of Numerical Heat Transfer*. John Wiley & Sons, New York, 1988.
17. Özışık, M.N. *Finite Difference Methods in Heat Transfer*. FL: CRC Press, Boca Ration, 1994.
18. Norrie, D.H. in DeVries, G. *An Introduction to Finite Element Analysis*. Academic Press, New York, 1978.