

Mladi za napredek Maribora 2016

33. srečanje

# **TERMOREGULACIJSKI MODEL ČLOVEKA**

Raziskovalno področje:

**FIZIKA IN ASTRONOMIJA**

Raziskovalna naloga

Avtor: NINA JERMAN

Mentor: JURIJ ILJAŽ

Šola: II. GIMNAZIJA MARIBOR

Maribor, 2016

Mladi za napredek Maribora 2016

33. srečanje

# **TERMOREGULACIJSKI MODEL ČLOVEKA**

Raziskovalno področje:

FIZIKA IN ASTRONOMIJA

Raziskovalna naloga

Maribor, 2016

## Vsebina

1. Povzetek .....	4
2. Zahvala .....	4
3. Uvod .....	5
4. Metodologija dela.....	6
5. Termoregulacija.....	6
5.1 Koža in krvni pretok.....	7
5.2 Potenje in drugi mehanizmi.....	7
6. Definicija toplotnega ugodja .....	9
7. SIST EN ISSO 7730:2005.....	13
7.1 Lokalno toplotno nelagodje.....	15
7.2 Določitev idealne temperature.....	16
8. Termoregulacijski model.....	17
8.1. Zgodovina.....	17
8.2. Termoregulacijski model – Yokota, 2008.....	18
9. Primerjava modela s standardom .....	23
9.1. Diskusija rezultatov .....	26
10. Eksperiment.....	29
10.1. Uvod .....	29
10.2. Merilna oprema .....	30
10.3. Hipoteze .....	32
10.4. Rezultati meritve .....	32
10.4.1. Lahka oblačila .....	32
10.4.2. Normalna oblačila .....	33
10.4.3 Debela oblačila.....	34
10.5 Primerjava rezultatov meritev s termoregulacijskim modelom in SIS EN ISO 7730:2005 .....	35
10.5.1 Termoregulacijski model.....	35
10.5.2 Tanka oblačila .....	36
10.5.3 Normalna oblačila .....	37
10.5.4 Debela oblačila .....	38
10.6. Diskusija rezultatov .....	38
11. Zaključek.....	41
Viri .....	42
Viri slik.....	43

## **1. Povzetek**

Termoregulacija je eden izmed ključnih procesov našega telesa, ki omogoča ohranjanje optimalne telesne temperature. Za normalno delovanje človeškega telesa mora biti tako proizvodnja, kot oddajanje toplote v ravnovesju, kar je osnovni pogoj za normalno telesno temperaturo in s tem povezano celično presnovo in delovanje organizma kot celote. Kot rečeno težimo k homeostazi, zato smo temu tudi prilagodili ter podredili gradnjo različnih objektov idealni temperaturi telesa (jedra), ki jo želimo vzdrževati. Kljub novim razvitim modelom, se dandanes še vedno uporablja standard, star več kot sedemdeset let, ki temelji na empiričnemu oziroma statističnem zbiranju podatkov. V raziskovalni nalogi sem se osredotočila na pomanjkljivosti empiričnega modela in primerjala podatke dobljene na empirični način s podatki pridobljenimi na podlagi termoregulacijskega modela. Ustreznost obeh modelov sem preverjala tudi z lastnim eksperimentom.

## **2. Zahvala**

Zahvaljujem se mentorju za ves vložen trud in pomoč ter Fakulteti za strojništvo Maribor za vso potrebno opremo pri izvajanjem eksperimentu.

### 3. Uvod

Vsako znanje, ki ne vodi do novih vprašanj hitro odmre, saj ni zmožno ohranjati temperature potrebne za vzdrževanje življenja.

»Wisława Szymborska«

Temperatura predstavlja pomemben faktor, ki vpliva na zadovoljstvo posameznika, tako je na primer Hsiang tal (2013) našel korelacijo med višjo temperaturo in agresivnostjo posameznika. Z višanjem temperature je ugotovil, da so se znotraj skupinski konflikti povečali za 14%. Za 4% pa se je dvignila stopnja nasilja na osebni ravni. V primeru nižjih temperatur pa je Alan Hedge (2004) ugotovil, da vodijo v nižjo stopnjo produktivnosti.

Ker sem sama precej »zmrzljiv« tip človeka in ker me velikokrat zebe v najrazličnejših prostorih ter pogojih, sem se odločila raziskati področje temperaturnega ugodja in s tem povezano optimalno temperaturo prostora oziroma termoregulacijo človeka na sploh.

Obstoječi standard SIST EN ISO 7730:2005, določa optimalno temperaturo prostora za normalno bivanje ljudi, na osnovi njihove aktivnosti in debeline oblačil, in sicer na empirični način. Do optimalne temperature prostora so prišli na statistični način z subjektivno oceno ljudi v prostoru, ali jih zebe ali pa jim je vroče. Seveda obstajajo pa tudi termoregulacijski modeli, kot je model Yokota (2008), ki napove odziv telesne temperature (temperaturo jedra in površinske temperature kože) na osnovi metabolizma oziroma dejavnosti človeka, ter izgub toplote preko oblačil, potenja, dihanja itd., ter s katerim je možno napovedati ali človeka zebe ali pa mu je vroče.

Tako sem se v svoji raziskovalni nalogi osredotočila narediti primerjavo obstoječega standarda SIST EN ISO 7730:2005, ki določa optimalno temperaturo prostora na empiričen način s temperaturo prostora pridobljeno na osnovi termoregulacijskega modela, ki temelji ne na statistiki temveč na fizikalnem dogajanju. Sistema sem pri tem poskusila tudi ovrednotiti z lastnim eksperimentom, ter s tem poglobiti svoje znanje na področju toplote oziroma termoregulacije človeka.

#### 4. Metodologija dela

Raziskovalna naloga, ki jo predstavljam, obsega teoretični del in eksperimentalno preverjanje teorije. Najprej sem natančno preučili obstoječo literaturo. Gre za tematiko, ki je obravnavana pretežno v člankih in spletnih virih, književno literaturo pa je nemogoče najti. Pri izvedbi eksperimenta sem uporabila izdelane termoelemente, opisane v poglavju 10.1 in računalniški program Scilab. Dobljene rezultate sem obdelala s pomočjo programa Excel.

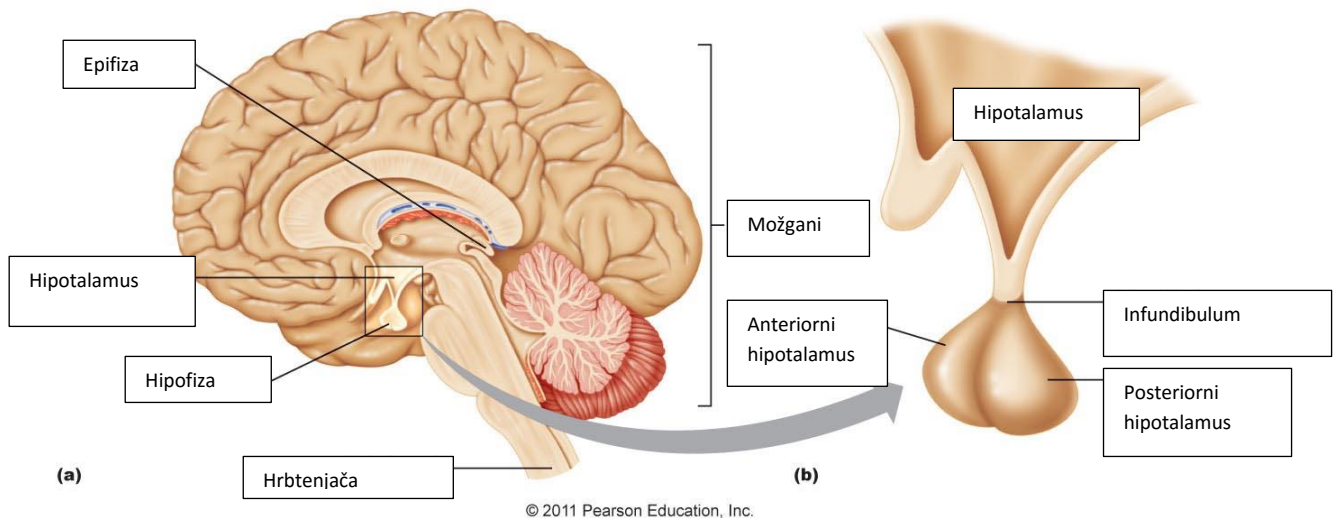
#### 5. Termoregulacija

Termo-regulacija je proces, ki omogoča človeškemu telesu, da vzdržuje kar se da konstantno notranjo temperaturo jedra. Stanje pri katerem je notranja temperatura optimalna se imenuje homeostaza. Vsi termo-regularni mehanizmi so uravnani tako, da težijo k homeostazi.

Zdrava temperatura se giblje med 36 °C in 36,8°C. V primeru, da telesna temperatura pade za 3°C, lahko povzroči hipotermijo in s tem srčni zastoj, kap ali celo smrt. Če pa telesna temperatura naraste na 42°C, lahko človek utрпи poškodbe možganov.

V mirovanju se večina toplote porabi za pravilno delovanje organov in dihanje, nekaj pa za potek procesov pri termogenezi (proces generiranja toplote ob porabi energijskih zalog, kadar zunanja temperatura pade pod neko kritično mejo). Okrog 18% celotnega energijskega toka metabolizma se proizvede v glavi, 69% v trupu, ostalo pa v rokah in nogah. Vrednost metabolizma je odvisna od starosti, višine, mase, mišične mase in telesne pripravljenosti. Tako se s staranjem vrednost metabolizma zmanjša, človek potrebuje vedno manj energije za razvoj celic, prav tako se zmanjša delež mišične mase. (Healthline, Kimberly Holland)

Hipotalamus je del možganov, ki uravnava temperaturo telesa. Leži na področju za očmi in pod drugim možganskim predelom, ki se imenuje talamus in rahlo levo nad hipofizo, kot je razvidno iz slike 1. Nekatere živčne celice v hipotalamusu so občutljive na mraz, druge pa na vročino. Kadar pride v možgane prehladna, ali pretopla kri kot je normalno, hipotalamus vključi mehanizem za uravnavanje temperature. Anteriorni hipotalamus nadzira reflekse v primeru pregrevanja (potenje, vazodilatacija), medtem ko pa posteriorni hipotalamus nadzira reflekse v primeru ohlajanja (termogeneza, vazokonstrikcija) (Guyton, A.C. 1996).



*Slika 1: lega in deli hipotalamusa*

### 5.1 Koža in krvni pretok

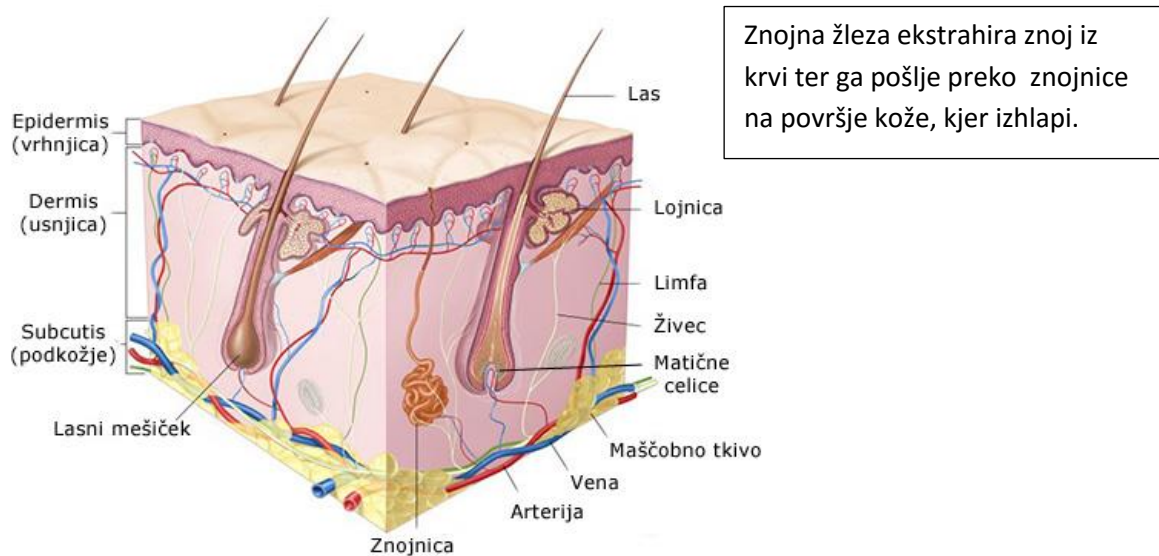
Koža je zaradi kondukcije organ, ki v veliki meri določa izgubo ali absorpcijo toplote iz okolice. Količino toplote, ki doseže kožo iz globljih tkiv, se lahko uravnava preko spremembe pretoka krvi v koži. V primeru pregretega telesa pride do vazodilatacije- krvne žile blizu kože se razširijo, s čemer se poveča pretok krvi skozi kožo in s tem oddajanje toplote, telesno jedro pa se ohlaja. Obraten proces se zgodi pri ohlajanju telesa, torej pride do skrčenja žil oziroma vazokonstrikcije, kar zmanjša pretok in s tem tudi izgubo toplote (Guyton, A.C. 1996).

Dandanes številne živali uporabljajo kožuh/perje, kot termo-regulacijski mehanizem, saj se naježi v primeru pohladitve (s tem se poveča debelina plasti, skozi katero prehaja toplota-toplotni tok je v skladu z zakonom o prevajanju toplote manjši). Človeška dlaka je skozi evolucijo v veliki meri zgubila na pomenu segrevanja, le-to pa je človek nadomestil z uporabo oblek. Seveda se tudi danes človek »naježi« v primeru ohlajanja, da bi zmanjšal toplotne izgube.

### 5.2 Potenje in drugi mehanizmi

V primeru segrevanja se začnemo potiti (izločati znoj preko znojnice, razvidno iz slike 2), saj s tem povečamo odvod toplote iz površine kože v okolico na račun hlapenja. V primeru intenzivnega mišičnega dela se zaradi metabolizma mišičnega tkiva temperatura le-tega močno dvigne in s tem tudi temperatura telesa (jedra). Pri tem pride do pregrevanje telesa pri čemer lahko človeško telo izloči tudi do 1.600 ml/h znoja (VMC, 2015).

Pomemben dejavnik predstavlja relativna vlažnost v okolju, saj v suhem okolju izhlapi večina znoja, v vlažnem okolju, kot je džungla, pa je izhlapevanje veliko manj učinkovito, saj je zrak že nasičen z vodo. V primeru okolja z zelo visoko vlažnostjo predstavlja potenje dejansko le neučinkovito izgubo vode in elektrolitov. Potenje se pojavi, ko zunanja temperatura preseže 30 °C – 31 °C, oziroma se temperatura jedra dvigne nad 37 °C. Druga dva mehanizma izmenjave toplote z okolico pa sta še sevanje in konvekcija. Sevanje je najizrazitejše v poletnih mesecih oziroma sončnih dnevih, ko preko sončnega sevanja telo sprejme energijo oziroma toploto iz okolice. Telo tudi seva toploto navzven, kar predstavlja izgubo toplote, vendar le v primeru, ko je temperatura okolice nižja od temperature telesa oziroma površine kože. Konvekcija ali prestop pa predstavlja mehanizem oziroma izmenjavo toplote iz površine na okoliško tekočino, lahko je to zrak ali pa voda, ko se kopamo. Intenzivnost je seveda odvisna od hitrosti gibanja tekočine, prenos toplote pa se vrši v eno ali drugo smer, odvisno od temperaturne razlike med telesom in okoliško tekočino. Če je temperatura zraka ali vode nižja od temperature telesa, potem telo oddaja toploto, v nasprotnem primeru pa toploto dobiva (plavanje v mrzli vodi ali pa tuširanje s toplo vodo).



*Slika 2: Potenje*

Med mehanizme termo-regulacije prištevamo tudi hormone kateholamin. Pod njihovim vplivom se v hladnem okolju arteriole in venule skrčijo (s tem preusmerijo toploto na delovanje esencialnih organov). V primeru vročega okolja, pa se toplota deloma prenese iz venske krvi na arterijsko, kar pasivno preprečuje prevelik dotok segrete venske krvi v jedro



telesa. Takšen način prenosa toplote imenujemo protitočna izmenjava. Med kateholamine spadata tudi adrenalin in noradrenalin (Joh, T. H.; Hwang, O.,1987).

Pomembno funkcijo ima tudi kortizol, poznan tudi kot eden izmed glavnih stresnih hormonov. Ta poviša krvni tlak, sladkor in imunosupresijo. Kortizol se lahko sprošča na več načinov:

- Po nevrogeni poti: Dražljaji iz okolice ali znotraj organizma, ki so posledica stresnih razmer, spodbudijo hipotalamus k izločanju kortikoliberina.
- Preko adrenalina: Adrenalin je stresni hormon, ki se prvi začne pospešeno izločati v stresnih razmerah in med drugim poveča nastajanje ACTH v hipofizi.
- Preko citokinov: Citokini nastajajo kot odgovor na vnetne dražljaje, tumorje itd.

Glavno vlogo absorpcije prevzame koža: človeško telo absorbira približno 85 % izgube toplote pod normalnimi pogoji v okolju (Zhang 2003). Pri toplotni senzaciji gre za občutek, ki ga vzbudi temperatura in odraža odgovor termoreceptorjev. Ker je toplotno občutje povezano s tem kako se ljudje »počutijo«, je ni mogoče definirati pod fizičnimi ali psihičnimi pogoji (Hensen 1991). Na podlagi Hensenja (1981) je toplotna občutljivost kože različna v različnih delih telesa.

## 6. Definicija toplotnega ugodja

Hensen (1991) definira toplotno ugodje kot » stanje v katerem ni gonilnih impulzov, da bi spreminjali okolje.« Definicija po sistemu ASHRAE pa se glasi »stanje uma, katerega zadovoljstvo se izraža na podlagi toplotnega okolja« (ASHRAE 2004).

Toplotno ugodje je povezano z toplotnim ravnovesjem telesa, na katerega vplivajo osebni in parametri okolja (Hensen 1991). Parametri okolja so:

- temperatura zraka
- povprečna sevalna temperatura okolice

Temperatura je določena s površinsko temperaturo obodnih sten in kotnim faktorjem med osebo in določeno površino. Za poenostavitev meritve in izračuna lahko uporabimo povprečno sevalno temperaturo, ki jo izmerimo s pomočjo globus termometra. Za določitev srednje sevalne temperature moramo upoštevati vpliv konvekcije z uporabo ustreznega nomograma (<http://www.ee.fs.uni-lj.si/EnergijaInOkolje/vaja2.htm>, 23.12.2015) .

- prepih

Prepih je tok zraka v zaprtem prostoru. Ker je njegova smer vedno enaka, je prepih bolj neprijeten kot veter, saj na telesu ohladi samo ozko območje in zato lahko ljudem povzroči resne težave (Simon Tiher, 2016). Podan je v enoti  $\{m/s\}$

- relativna vlažnost

Relativna vlažnost je določena kot razmerje med delnim tlakom vodne pare in tlakom nasičenja (tlak nasičenja je parcialni tlak vodne pare, ki jo zrak še lahko sprejme) pri določeni temperaturi (HyperPhysic,2014), . Podana je v odstotkih.

Osebni parametri pa so:

- stopnja aktivnosti
- stopnja metabolizma

Metabolizem ali presnova- zajema kemične in fizikalne procese, pri katerih nastajajo ter se razgrajujejo snovi v organizmu. V presnovo so prav tako vključeni procesi, v katerih pridobiva organizem potrebno energijo. Pri presnovi imajo bistven pomen encimi, ki katalizirajo kemijske reakcije. Posamezne encimsko katalizirane reakcije sestavljajo bolj ali manj zaključene procese v postopku metabolizma določene snovi. Takšno sosledje reakcij imenujemo metabolna pot. Stopnja metabolizma opiše hitrost porabe kalorij. Človeško telo porablja kalorije kot vir energije za vitalne procese, kakor tudi pri športni aktivnosti. (<http://www.thehealthsuccesssite.com/metabolic-rate.html>,21.12.2015)

Razpon endogene proizvodnje toplote,  $M$ , je odvisen od stopnje zahtevnosti izvajanega dela, starosti, spola, velikosti, fizične pripravljenosti in stopnje aktivnosti in meri približno 40 do  $800 W/m^2$  (ali 1-21 W/kg za povprečnega človeka ). Če se temperatura telesnega jedra spremeni, v primeru shranjevanja toplote zaradi nahajanja v vročem okolju ali pa zaradi bolezni (vročina) potem se metabolizem tudi spreminja. Pri nizkih temperaturah, na primer pri tresavi termogenezi, lahko telo poveča proizvodnjo toplote do štirikrat ali petkrat v primerjavi z normalno ravno v mirovanja.

Bazalni metabolizem - minimalna količina energije (kalorij), ki je potrebna za vzdrževanje vseh življenjsko pomembnih funkcij v mirovanju (McNab, B. K. 1997). Ta predstavlja kar do 70 % skupne porabe energije. To je energija, ki se porablja za dihanje, poganjanje krvi po telesu, delovanje živčnega sistema, ohranjanje telesne temperature, normalno delovanje

prebavil, izdelavo novih krvnih celic, hormonov itd. Delež je odvisen od številnih dejavnikov (starosti, spola, prehrane, bolezni, zunanje temperature, dednosti, hormoni...). Preostala energija, okrog 30 % , se porabi za vse ostale aktivnosti. Bazalni metabolizem se večinoma meri v temni sobi, po osmih urah spanca in po dvanajstih urah odkar oseba ni jedla, zato ker je pomembno, da je prebavni sistem neaktiven (Mets, 2015)

Standardni bazalni metabolizem za 70 kg človeka je približno 1,2 W / kg , vendar pa se lahko spreminjajo s spremembami v aktivnosti, telesno maso, dieto, ravno endokrinega sistema. Na bazalni metabolizem najverjetneje ne vpliva primer življenja v vročem podnebj.

- toplotna upornost oblačil

*Razpredelnica 1: Oblačila in njihova toplotna upornost*

Oblačilo	clo	$\frac{m^2K}{W}$
Spodnje perilo		
Spodnje hlače	0,03	0,005
Podhlače	0,10	0,016
Spodnja majica	0,04	0,006
Kratka majica	0,09	0,014
Majica z dolgimi rokavi	0,12	0,019
Spodnje hlače in modrček	0,03	0,005
Majice/bluze		
Kratki rokavi	0,15	0,023
Tanki dolgi rokavi	0,20	0,031
Normalni dolgi rokavi	0,25	0,039
Flanelasta majica, dolgi rokavi	0,30	0,047
Tanka bluza z dolgimi rokavi	0,15	0,023
Hlače		
Kratke hlače	0,06	0,009
Dolge hlače	0,25	0,039

Flanelaste dolge hlače	0,28	0,043
Obleke/krila		
Poletno krilo	0,15	0,023
Zimsko krilo	0,25	0,039
Poletna obleka, kratki rokavi	0,20	0,031
Zimska obleka, dolgi rokavi	0,40	0,062
Kombinezon	0,55	0,085
Pulover		
Telovnik, brez rokavov	0,12	0,019
Tanek pulover	0,20	0,031
Pulover	0,28	0,043
Debel pulover	0,35	0,054
Jakne		
Poletna jakna	0,25	0,039
Jakna	0,35	0,054
Delavska jakna	0,30	0,047
Visoko izolacijska oblačila, kožuh		
Kombinezon	0,90	0,140
Hlače	0,35	0,054
Jakna	0,40	0,062
Telovnik	0,20	0,031
Oblučila za zunaj		
Plašč	0,60	0,093
Puhovka	0,55	0,085
Parka	0,70	0,109
Nogavice	0,02	0,003
Debele nogavice do gležnjev	0,05	0,008
Debele dolge nogavice	0,10	0,016
Najlonske nogavice	0,03	0,005
Čevlji (tanek podplat)	0,02	0,003
Čevlji (debel podplat)	0,04	0,006
Škornji	0,10	0,016

Rokavice	0,05	0,008
----------	------	-------

Iz tabele je možno razbrati toplotno izolacijo določenih oblačil. Za izračun celotne izolacije oblačil posameznika seštejemo posamične vrednosti izolacije nošenih oblačil.

Glede na pregledano je toplotno ugodje, ko se človeško telo ne trudi uravnati telesne temperature oziroma je v ravnotežju z okolico, s tem pa je delovanje termoregulacijskih mehanizmom minimalno. Seveda je toplotno ugodje povezano z netom pretoka energije oziroma toplote skozi telo in je odvisno od stopnje aktivnosti, temperature okolice in stopnje oblečenosti. Ker mene v mirovanju večkrat zebe je potrebno zmanjšati toplotne izgube na račun tega da se bolj oblečem ali pa dvigniti temperaturo okolice.

## **7. SIST EN ISO 7730:2005**

SIST EN ISO 7730:2005 je uveljavljen mednarodni standard, ki predstavlja metode za napovedovanje splošnega toplotnega občutka in stopnje nelagodja ljudi, ki so bili izpostavljeni zmernemu toplotnemu okolju. Ta omogoča analitično določanje in interpretacijo toplotnega ugodja s pomočjo izračunov PMV (pričakovano povprečno glasovanje) in PPD (pričakovan procent nezadovoljstva).

Indeks PMV je prvi je uvedel Fanger leta 1970. Ta napoveduje povprečno vrednost glasov večje skupine ljudi po 7-stopenjski toplotno senzacijski lestvici, ki je razvidna v tabeli 2. Ta temelji na toplotnemu ravnovesju človeškega telesa. Toplotno ravnovesje se ohranja, ko je notranjo proizvajanje toplote ekvivalentno izgubi le-te v okolje.

Metoda PMV združuje štiri fizikalne spremenljivke (temperatura zraka, hitrost zraka, povprečno sevalno temperaturo okolice in relativno vlažnostjo) in dve osebni spremenljivki (izolacija oblačil in raven dejavnosti).

*Razpredelnica 2: sedem stopenjska toplotno-senzacijska lestvica*

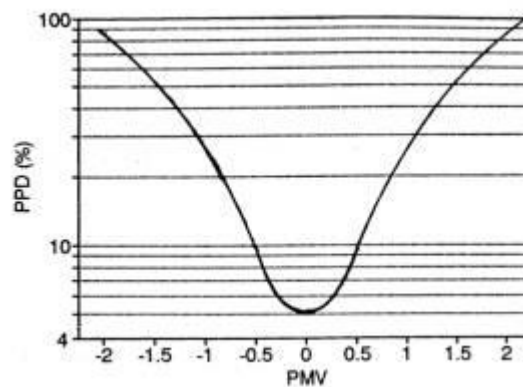
+3	vroče
+2	toplo
+1	Nekoliko toplo
0	Nevtralno
-1	Nekoliko mrzlo
-2	Mrzlo
-3	Zelo mrzlo

Za toplotno ugodje je določeno stanje, pri katerem je:

$$- 0,5 < PMV < 0,5$$

in

$$PPD < 10\% \text{ (prikazuje slika 3)}$$



*Slika 3: PMV v odvisnosti od PDD*

Ta standard se nanaša na zdrave posameznike, ki se nahajajo v notranjih prostorih, kjer je toplotno ugodje zaželeno. Da se tudi aplicirati na druga okolja.

Torej PMV (pričakovano povprečno glasovanje) napoveduje povprečno vrednost glasovanja večje skupine ljudi, ki so izpostavljeni enakemu okolju. Glasovi posameznikov pa so razpršeni okoli te srednje vrednosti. Na podlagi teh lahko napovemo število ljudi, ki se bo najverjetneje v tem okolju počutili nelagodno (prevroče ali premrzlo).

PPD je indeks, ki določuje kvantitativne napovedi ljudi, ki se bodo v določenem okolju počutili nelagodno. Ti bodo glasovali: *vroče, toplo, mrzlo* ali *zelo mrzlo* na sedem stopenjski toplotno-senzacijski lestvici (Tabela 2).

Če imamo podano vrednost PMV, lahko izračunamo PPD s pomočjo empirične enačbe:

$$PPD = 100 - 95 \exp(-0,03353PMV^4 - 0,2179PMV^2) \quad (7.01)$$

### 7.1 Lokalno toplotno nelagodje

PPD in PMV izražata toplotno nelagodje telesa kot celote. Vendar nezaželeno segrevanje in konvekcija na posameznem delu telesa lahko tudi povzroči občutek nelagodja. Najpogostejši vzrok je prepih, nelagodje pa lahko povzroči tudi abnormalno velika razlika temperature vertikalnega zraka med glavo in gležnji, kot posledica prevročih ali prehladnih tal, ali zaradi sevalne temperaturne asimetrije.

## 7.2 Določitev idealne temperature

Spodaj je podan primer tabele (tabela 3) iz katere je moč razbrati primerno temperaturo prostora glede na katero se človek najboljše počuti pri stopnji aktivnosti  $58 \text{ W/m}^2$  (1 met)

Tabela 3: Primer določitve idealne temperature prostora po SIST EN ISO 7730:2005

Oblačila		Temperatura °C	Relativna hitrost zraka $\frac{m}{s}$							
Clo	$\frac{m^2}{KW}$		0,10	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	1,00
0	0	26	-1,62	-1,62	-1,96	-2,34				
		27	-1,00	-1,00	-1,36	-1,69				
		28	-0,39	-0,42	-0,76	-1,05				
		29	0,21	0,13	-0,15	-0,39				
		30	0,80	0,68	0,45	0,26				
		31	1,39	1,25	1,08	0,94				
		32	1,96	1,83	1,71	1,61				
		33	2,50	2,41	2,34	2,29				
0,25	0,039	24	-1,52	-1,52	-1,80	-2,06	-2,47			
		25	-1,05	-1,05	-1,33	-1,57	-1,94	-2,24	-2,48	
		26	-0,58	-0,61	-0,87	-1,08	-1,41	-1,67	-1,89	-2,66
		27	-0,12	-0,17	-0,40	-0,58	-0,87	-1,10	-1,29	-1,97
		28	0,34	0,27	0,07	-0,09	-0,34	-0,53	-0,70	-1,28
		29	0,80	0,71	0,54	0,41	0,20	0,04	-0,10	-0,58
		30	1,25	1,15	1,02	0,91	0,74	0,61	0,50	0,11
		31	1,71	1,61	1,51	1,43	1,30	1,20	1,12	0,83

Iz razpredelnice je možno razbrati, da se najbolj idealna temperatura pri  $0,039 \frac{m^2}{KW}$  in relativni hitrosti zraka  $0,10 \frac{m}{s}$  nahaja na intervalu med  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  in  $28 \text{ }^\circ\text{C}$ .



## 8. Termoregulacijski model

### 8.1. Zgodovina

Zgodovina raziskav na področju prenosa toplote pri človeku:

*Razpredelnica 4: zgodovina termoregulacijskih modelov*

Leto	Prispevek
1927	Bazett in McGlone merita temperaturni profil v rokah. Ugotovila sta, da se pomembni gradienti nahajajo le par centimetrov pod kožo, če kožo izpostavimo hladnemu zraku.
1933	Burton trdi, da se fizikalne zakone prenosa toplote da aplicirati na žive sisteme.
1948	Pennes razvije matematični model prenosa toplote v tkivu na temelju perfuzijskega pretoka krvi, sicer na invazivnem merjenju temperature tkiva podlakti in kot takšen še danes velja za enega splošno najbolj uporabljenega ter znanega.
1961	Wissler objavi prvi več-elementni človeški termični model. Ta model je bil analitičen ter zahteval ročno reševanje.
1964	Wissler razvije človeški termoregulacijski model, z uporabo metode končnih razlik.

1966

Stolwijk in Hardy dodata termoregulacijo drhtenja in potenja, k tri-elementnem človeškem toplotnem modelu. Ta model je bilo možno uporabljati na analognem računalniku.

1970

Stolwijk razvije digitalni model človeške termoregulacije, za potrebe NASA-e (izdelava vesoljske obleke za program Apollo).

(Daniel W. Hensley, 2013)

## 8.2. Termoregulacijski model – Yokota, 2008

Termoregulacijski model, ki ga bomo obravnavali, je sestavljen iz dveh energijskih enačb, in sicer za človeško jedro in kožo, ki je obdana s pasivnim izolacijskim mehanizmom – oblačili (Kim et al., 2013; Yokota et al., 2008). Kompleksnejši mehanizem toplotne izmenjave z okolico, kot je sevanje in konvekcija (prestop), bi lahko bil tvorjen z dodanim členom, vendar se bomo v našem primeru zadovoljili s predlaganim dvo-enačbenim termoregulacijskim modelom Yokote (2008) za primerjavo s SIST EN ISO 7730:2005 standardom.

V tem poglavju bom detajlneje predstavila uporabljen termoregulacijski model, skupaj z enačbami in obrazložitvijo posameznih členov, ter kako smo prišli do časovno odvisne napovedi temperature telesa z uporabljenim modelom. Na koncu pa bo tudi na kratko predstavljeno kako se določi optimalna temperatura prostora z uporabo termoregulacijskega modela.

Model uporablja neinvazivne meritve kot osnovne vnose, vključno s stopnjo srčnega utripa (HR), okoljskimi pogoji (delovna temperatura ali temperatura okolice, relativna vlaga, hitrost vetra, srednja obsevalna temperatura SRT - (MRT obleko (izolacija in prepustnost), poleg človeških antropometričnih vrednosti (višina, teža).

S pomočjo parametrov, ki so v modelu uporabljeni, je mogoča natančnejša določitev energijskih pretokov tako v jedru kot koži, telesne temperature in termofizioloških odzivov. Pri metabolizmu ( $M$ ), kot izvor toplote je privzeto, da nastane v jedru človeka. Prenos toplote iz jedra v okolje oziroma toplotne izgube pa so opisane s respiratornimi izgubami ( $Q_{res}$ ), prevodnostjo toplote skozi tkivo do kože ( $Q_k$ ), s konvekcijo prek perfuzijskega pretoka krvi med jedrom in kožo ( $Q_{bf}$ ), ter zunanjim delom ( $W_{ext}$ , tj. plezanje na hrib, dvigovanje uteži itd.).  $W_{ext}$  le redko poteka v daljših časovnih pogojih, saj jih je količinsko težko določiti in meriti v realnem času, zato ga je večkrat mogoče zanemariti (Yokota et al. 2008).

Prva enačba termoregulacijskega modela predstavlja zakon o ohranitvi energije za jedro, ki ga lahko zapišemo v naslednji integralni obliki:

$$S_c = M - Q_{res} - Q_k - Q_{bf} - W_{ext} . \quad (8.01)$$

V tej enačbi predstavlja  $S_c$  akumulirano energijo (v primeru ko proizvedena in izgubljena energija v jedru nista uravnoteženi).  $M$  predstavlja metabolično produkcijo toplote.  $Q_{res}$  je respiratorna izguba toplote,  $Q_k$  je pasivna toplotna prevodnost od jedra do kože,  $Q_{bf}$  je izguba toplote zaradi krvnega toka med kožo in jedrom,  $W_{ext}$  pa je izguba energije, kot posledica zunanjega dela (tek, plezanje...).

Akumulacijo energije znotraj jedra lahko zapišemo tudi s sledečo enačbo:

$$S_c = m_c c_{pj} \frac{\partial T_j}{\partial t} , \quad (8.02)$$

pri čemer  $m_c$  predstavlja maso jedra (predstavlja približno 95 % teže človeka),  $m_c \approx 0.95 \cdot m$  (Yokota et al., 2008). Kapaciteta jedra je zapisana kot  $c_{pj}$ , ta je  $c_{pc} = 3492 \text{ J/kg K}$  (Gagge et al., 1971),  $T_j$  pa predstavlja temperaturo jedra oziroma telesa.

Metabolična produkcija toplote je bila vzeta kot znana vrednost oziroma konstanta in enaka standardu SIST EN ISO 7730:2005 zaradi medsebojne primerjave. Produkcija zaradi metabolizma je drugače določena oziroma jo lahko določimo z enačbo:

$$M = [0.68 + 4,69(HR_{ratio} - 1) - 0,052(HR_{ratio} - 1)(T_a - 20)]58,1A_d , \quad (8.03)$$

pri čemer je  $HR_{ratio}$  razmerje med srčnim utripom pri delu in mirovanji ter  $A_d$  Duboisova površina telesa, ki je bila določena s pomočjo empirične enačbe (Ki met al., 2013):

$$A_D = 0,202 \cdot m^{0,425} \cdot h^{0,725}, \quad (8.04)$$

pri čemer  $m$  predstavlja maso,  $h$  pa višino človeškega telesa. V model sem vnesla povprečno višino in maso človeka, ki znašata) 71,3kg in 1,7m (Kim et al., 2013; Yokota et al., 2008).

Pri človeku je respiracija v primerjavi s skupno oddano toploto zanemarljiva, izračuna pa se jo po naslednji enačbi (Fanger, 1972; Kraning and Gonzalez, 1991):

$$Q_{res} = 0.0014 \cdot M \cdot (34 - T_a) + 0.0023 \cdot M \cdot (44 - p_a), \quad (8.05)$$

$T_a$  predstavlja temperaturo okolice,  $p_a$  pa je tlak uparjene vode v okolici. Da enačba deluje, mora biti temperatura okolice podana v °C, tlak vodne pare pa v *Torrih*. Relativna vlažnost je definirana kot razmerje med parcialnim tlakom vodne pare in ravnotežjem parnega tlaka vode, ki je odvisno od temperature okolice. Posledično je parcialni tlak vodne pare v okoliškem zraku odvisen od relativne vlažnosti in temperature okoliša. To vse je lahko opisano s sledečo enačbo:

$$p_a = \varphi \cdot p_s = \varphi \cdot \exp\left(20.386 - \frac{5132}{T_a}\right) \quad (8.06)$$

$\varphi$  predstavlja relativno vlažnost,  $T_a$  pa temperature okolice v Kelvinovi skali.

Prevajanje toplote med jedrom in kožo je opisano s klasično enačbo prevoda (Gagge *et al.*, 1971):

$$Q_k = A_d \cdot k \cdot (T_j - T_k), \quad (8.07)$$

pri čemer  $k$  predstavlja prevodnost tkiva med jedrom in kožo;  $k = 5.28 \text{ W/m}^2\text{K}$  (Gagge *et al.*, 1971),  $T_k$  pa je reprezentativna temperature kože.

Prenos toplote med jedrom in kožo je enak in se določi po enačbi:

$$Q_{bf} = A_d \cdot \omega_{bf} \cdot c_{bf} \cdot (T_j - T_k), \quad (8.08)$$

$\omega_{bf}$  predstavlja perfuzijski pretok krvi v koži in je pri toplotnem ugodju bolj ali manj konstanten  $\omega_{bf} = 1,75 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$  kar sovпада z vrednostjo  $\omega_{bf} = 6,3 \text{ l/h} \cdot \text{m}^2$  (Gagge *et al.*, 1971).  $c_{bf}$  pa je specifična toplota krvi, ki je bila vzeta kot  $c_{bf} = 4186,8 \text{ kJ/kgK}$  (Gagge *et al.*, 1971; Kim *et al.*, 2013).

Izguba energije kot posledica zunanjega dela je bila zanemarjena, ker smo privzeli da je oseba v stanju mirovanja, kakor tudi zato, ker je zanjo zelo težko pridobiti realne podatke (Yokota *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2013).

Izguba toplote iz jedra telesa je tako odvisna od temperature kože, okolice, krvnega pretoka v koži, kakor tudi relativne vlažnosti. Končno obliko enačbe (7.01) lahko sedaj z upoštevanjem posameznih členov zapišemo tudi v diferencialni obliki:

$$m_c c_{pc} \frac{\partial T_c}{\partial t} = M - Q_{res}(M, T_a, p_a) - A_d \cdot k \cdot (T_j - T_k) - A_d \cdot \omega_{bf} \cdot c_{bf} \cdot (T_j - T_k). \quad (8.09)$$

Prikazana oblika je uporabljena za časovno odvisen izračun temperature jedra telesa.

Podobno, kot smo zapisali zakon o ohranitvi energije za jedro telesa lahko zapišemo v integralni obliki zapišemo tudi zakon o ohranitve energije za kožo:

$$S_{sk} = (Q_k + Q_{bf}) - Q_{dry} - Q_{evap}, \quad (8.10)$$

kjer je  $S_{sk}$  vsota vseh toplotnih tokov skozi kožo in predstavlja akumulacijo toplote. Kot je razvidno iz enačbe energijsko bilanco kože določajo konvekcija prek perfuzijskega pretoka krvi med jedrom in kožo  $Q_{bf}$ , prevodnost toplote skozi tkivo do kože  $Q_k$ , izgubo toplote s kože v okolico preko oblačil  $Q_{dry}$  in toplotna izguba zaradi izhlapevanja oziroma potenja  $Q_{evap}$ .

V našem primeru ne bomo upoštevali parametra toplotni izgub zaradi izhlapevanja  $Q_{evap}$ , saj je oseba v mirovanju in se zato ne poti.

Za akumulacijski člen  $S_k$  lahko zapišemo enačbo:

$$S_k = m_k c_{pk} \frac{\partial T_k}{\partial t}, \quad (8.11)$$

pri čemer je  $m_{sk}$  masa kože, ki predstavlja 5 % teže človeka;  $m_k \approx 0.05 \cdot m$ .  $T_k$  pa je reprezentativna temperatura kože. Toplotna specifična kapaciteta kože,  $c_{pk}$  je bila enačena z toplotno kapaciteto jedra;  $c_{pk} \approx c_{pc}$  (Yokota *et al.*, 2008; Gagge *et al.*, 1971) in znaša  $3492 \frac{J}{kgK}$ .

Toplotno izgubo zaradi oblačil lahko zapišemo z klasično enačbo prenosa toplote:

$$Q_{dry} = \frac{T_k - T_o}{R}, \quad (8.12)$$

$R$ , predstavlja toplotno upornost obleke in sloja okoliškega zraka,  $T_o$  pa je operativna temperatura, ki je ekvivalentna povprečni sevalni temperaturi (MRT) in temperature okolice ( $T_a$ ). V raziskovalni nalogi bom enačila MRT s temperaturo okolice,  $T_o = T_a$ . Toplotni upor  $R$  v modelu (7.18) predstavlja korigirano toplotno upornost oblačil  $R_{clt}$ , ki je bila povzeta po standardu zaradi medsebojne primerjave standarda in termoregulacijskega modela. Toplotna upornost oblačil se korigira zaradi vpliva konvekcije oziroma vetra po sledeči enačbi:

$$R = R_{clt} \cdot \exp[-0.281 \cdot (v_{air} - 0.15) + 0.44 \cdot (v_{air} - 0.15)^2 - 0.492 \cdot v_{walk} + 0.176 \cdot v_{walk}^2], \quad (8.13)$$

pri čemer je  $v_{air}$  hitrost zraka ob osebi in  $v_{walk}$  hitrost hoje dotične osebe. Seveda ker oseba miruje, je bila hitrost hoje zanemarjena:  $v_{walk} = 0$ .

Zakon o ohranitve energije za kožo se tako z upoštevanjem enačb posameznih členov lahko zapiše tudi v obliki

$$m_k c_{pk} \frac{\partial T_k}{\partial t} = A_d \cdot k \cdot (T_j - T_k) + A_d \cdot \omega_{bf} \cdot c_{bf} \cdot (T_j - T_k) - \frac{T_k - T_a}{R}. \quad (8.14)$$

Tako enačbi (7.09) in (7.14) predstavljata uporabljen dvo-enačbeni termoregulacijski model, ki je sklopljen preko temperature telesa oziroma jedra in napove časovno obnašanje temperature kože in jedra.

Uporabljen model je prezahteven za analitično določitev časovnega poteka temperature kože in jedra, zato je bil iz strani Fakultete a strojništvo izdelan programski paket s programskim jezikom *SciLab* za izračun le-tega. Rešitev pri tem temelji na metodi končnih razlik, pri čemer je bil časovni korak izbran kot 1 s.

Vhodni podatki, ki so potrebni za temperaturni odziv človeka oziroma izračun, so začetna temperatura jedra in kože, višina in masa osebe, hitrost vetra, metaboličen izvor toplote, upornost oblačil in zunanja temperatura oziroma temperatura prostora. Kot že omenjeno smo za maso osebe in višino izbrali kar povprečno višino in maso:  $m = 71,3 \text{ kg}$ ,  $h = 1,7 \text{ m}$ . Za začetno temperaturo jedra smo izbrali temperaturo  $36,6 \text{ }^\circ\text{C}$  in kože  $34,1 \text{ }^\circ\text{C}$ , saj naj bi pri teh dveh temperaturah bil človek v toplotnem ugodju oziroma je termoregulacija osebe najmanj aktivna. Za metabolični izvor toplote, upornost oblek ter hitrosti vetra pa smo izbrali vrednosti iz standarda SIST EN ISO 7730:2005, pri različni aktivnosti in izolaciji oblačil osebe zaradi medsebojen primerjave z termoregulacijskim modelom.

Ob izbrani temperaturi okolice pri termoregulacijskem modelu smo za čas 2 h dobili temperaturni odziv človeka. V primeru nizke temperature okolice, se je človek v tem času ohlajal, v primeru previsoke temperature okolice pa pregreval. Tako je bil cilj najti optimalno temperaturo okolice pri kateri bo temperatura jedra ostala nespremenjena, torej  $36,6 \text{ }^\circ\text{C}$  in to temperaturo primerjati s temperaturo okolice po standard

## **9. Primerjava modela s standardom**

V tem poglavju bom prikazala primerjavo med optimalno temperaturo okolice za toplotno ugodje človeka povzete po standardu SIST EN ISO 7730:2005 in izračunano temperaturo okolice s prej opisanim termoregulacijskim modelom.

Pri tem sem se odločila da bom naredila primerjavo optimalne temperature na devetih različnih primerih, v odvisnosti od aktivnosti človeka, prepiha in stopnje oblečenosti. Za stopnjo metabolizma sem se odločila vzeti...(mirovanje, rahlo delo in intenzivno delo) za stopnjo oblečenosti pa običajne dnevne obleke ter na koncu delovno obleko, ki predstavlja večjo toplotno izolativnost med telesom in okolico.

### 1. SKLOP

Stopnja metabolizma: 1,0 met ( $70 \frac{W}{m^2}$ )

Relativna vlažnost: 50%

Prepih:  $0,1 \frac{m}{s}$

Dnevna obleka: 0,25 clo ( $0,039 \frac{m^2K}{W}$ ) in 1,00 clo ( $0,155 \frac{m^2K}{W}$ ); ter delovna obleka 2,00 clo ( $0,310 \frac{m^2K}{W}$ )

### 2. SKLOP

Stopnja metabolizma: 1,6 met ( $93 \frac{W}{m^2}$ )

Relativna vlažnost: 50%

Prepih:  $0,5 \frac{m}{s}$

Dnevna obleka: 0,25 clo ( $0,039 \frac{m^2K}{W}$ ) in 1,00 clo ( $0,155 \frac{m^2K}{W}$ ); ter delovna obleka 2,00 clo ( $0,310 \frac{m^2K}{W}$ )

### 3. SKLOP

Stopnja metabolizma: 2,0 met ( $116 \frac{W}{m^2}$ )

Relativna vlažnost: 50%

Prepih:  $1,0 \frac{m}{s}$

Dnevna obleka: 0,25 clo ( $0,039 \frac{m^2K}{W}$ ) in 1,00 clo ( $0,155 \frac{m^2K}{W}$ ); ter delovna obleka 2,00 clo ( $0,310 \frac{m^2K}{W}$ )

S spreminjanjem temperature okolice v modelu sem prišla do različnih temperaturnih odzivov. Želja je da je temperatura telesa konstantna oziroma da je oseba v toplotnem ravnotežju z okolico. Ko je bil časovni potek telesne temperature oziroma jedra konstanten, takrat je temperatura okolice predstavljala optimalno oziroma idealno temperaturo za vzdrževanje ravnovesja človeškega telesa. Izračune sem ponovila za vsak sklop posebej in dobljene rezultate vnesla v *razpredelnico 5* ter jih primerjala z rezultati pridobljenimi na podlagi SIST EN ISSO 7730:2005 (*razpredelnica 6*).



*Razpredelnica 5: pridobljeni podatki s pomočjo termoregulacijskega modela*

Okolje Termo	Dnevna oblačila 0,25clo (0,039 $\frac{m^2K}{W}$ )	Dnevna oblačila 1,0 clo (0,155 $\frac{m^2K}{W}$ )	Delovna oblačila 2,0 clo (0,310 $\frac{m^2K}{W}$ )
Stopnja metabolizma: 1,0 met (70 $\frac{W}{m^2}$ ) Relativna vlažnost: 50 % Prepih: 0,1 $\frac{m}{s}$	30,48 °C	24,48 °C	17,87 °C
Stopnja metabolizma: 1,6 met (93 $\frac{W}{m^2}$ ) Relativna vlažnost: 50 % Prepih: 0,5 $\frac{m}{s}$	31,23 °C	22,73 °C	15,20 °C
Stopnja metabolizma: 2,0 met (116 $\frac{W}{m^2}$ ) Relativna vlažnost: 50% Prepih: 1,0 $\frac{m}{s}$	29,60 °C	19,38 °C	10,48 °C

Okolje	Dnevna oblačila 0,25clo ( $0,039 \frac{m^2K}{W}$ )	Dnevna oblačila 1,0 clo (0,155 $\frac{m^2K}{W}$ )	Delovna oblačila 2,0 clo (0,310 $\frac{m^2K}{W}$ )
Stopnja metabolizma: 1,0 met ( $70 \frac{W}{m^2}$ ) Relativna vlažnost: 50 % Prepih: $0,1 \frac{m}{s}$	27,39 °C	23,26 °C	18,00 °C
Stopnja metabolizma: 1,6 met ( $93 \frac{W}{m^2}$ ) Relativna vlažnost: 50 % Prepih: $0,5 \frac{m}{s}$	26,36 °C	20,37 °C	12,73 °C
Stopnja metabolizma: 2,0 met ( $116 \frac{W}{m^2}$ ) Relativna vlažnost: 50 % Prepih: $1,0 \frac{m}{s}$	25,50 °C	18,25 °C	9,33 °C

### 9.1. Diskusija rezultatov

Ugotovila sem, da je optimalna temperatura izračunana s pomočjo termoregulacijskega modela v povprečju višja, kar je tudi razvidno iz primerjave razpredelnice 5 in 6. Do odstopanja pa pride le pri prvem sklopu podatkov, ko je upornost oblačil 2,0 clo. Torej termoregulacijski model napove, da bi morala biti optimalna temperatura prostora za toplotno udobje višja, kot jo napove obravnavani standard. Iz primerjave je tudi razvidno, da je temperatura okolice lahko neprimerno nižja, če smo bolj oblečeni oziroma če smo aktivni. V primeru stopnje metabolizma  $116 \frac{W}{m^2}$  in v delovnih oblačilih je lahko temperatura prostora le okoli 10 °C. Možnosti za razliko med termoregulacijskim modelom, ki temelji na fizikalnem pojavu prenosa toplote in empiričnem standardu je lahko več:

## 1. SIST EN ISSO je prilagojen bolj moškim kot ženskam

Metabolizem moškega je lahko za 35% procentov višji kot metabolizem ženske (Chantal Vella). Ker je standard prilagojen povprečnemu moškemu, so temperature empiričnega modela v povprečju nižje, kot temperature izračunane s pomočjo termoregulacijskega modela.. (komentar: ravno ne razumem ko preberem, po premisleku pa razmišljam, ker je termoregulacijski model povprečen tako za ženske kot moške, napove višjo temperatura ravno zaradi žensk) Na splošno je optimalna temperatura ženske za 3 °C višja od optimalne temperature moškega (22 °C za moške in 25 °C za ženske). Kljub neskladja glede optimalne temperature okolja, pa je razlika optimalne temperature kože za ženske in moške zanemarljiva (ženske: 32,4 °C-22,6 °C; moški: 32,8°C-33,8°C). Za primerjavo je povprečna hitrost metabolizma v skupini žensk, ki opravljajo nezahtevno pisarniško delo  $48 \pm 2 \text{ W/m}^2$ , kar je znatno nižje od ASHRAE-jevih standardnih vrednosti za metabolično proizvodnjo toplote ob isti aktivnosti (sedeče počivanje:  $60 \text{ W/m}^2$ , sedeče lahko pisarniško delo:  $70 \text{ W/m}^2$ ).

Dve glavni vhodni spremenljivki modela ISSO 7730:2005 sta metabolizem in izolacija oblačil, čeprav je natančnost teh spremenljivk slabo definirana. Kljub temu so standardne referenčne vrednosti tabulirane in v uporabi po celem svetu. Z upoštevanjem hitrosti metabolizma je metabolični ekvivalent (*met*) uporabljan za izražanje metabolične vrednosti določene aktivnosti relativno na hitrost metabolizma ob počivanju, in njegova vrednost ( $1 \text{ met} = 4.186 \text{ kJ/kg h} \approx 58 \text{ W/m}^2$ ) je po dogovoru določen kot hitrost metabolizma ob počivanju pri 70 kg težkem, 40-letnem moškem. Ta dogovor ima lahko nezanemarljive posledice, saj lahko vrednost  $58 \text{ W/m}^2$  preceni proizvodnjo toplote ob počivanje pri ženskah za kar 35 %.

## 2. Staranje

Podobno, s staranjem, se osnovna hitrost metabolizma zmanjšuje. Zaradi tega lahko trenutni standardi za notranjo klimo narobe predstavljajo potrebe ženske in starejše populacije. Model PMV/PPD temelji na uporabi vrednosti metabolizma za izračun zunanjih pogojev, ki zadovoljijo termično ravnovesje med telesom in zunanjim okoljem. Kljub temu, z biofizičnega zornega kota, je potrebno zadovoljiti tudi termično ravnovesje znotraj telesa.

### 3. Biofizične lastnosti

Notranje termično ravnovesje je določeno s strani metabolizma in sestave toplotne izolacije, ki jo nudijo tkiva (sestava telesa in cirkulacija krvi pod kožo). Vpliv toplotne izolacije je posebej pomemben v primeru primerjave med vitkostjo in debelostjo. Dodatna izolacija zaradi tkiv se kaže kot večji temperaturni gradient med jedrom telesa in kožo ter nižjo povprečno temperaturo kože pri debelih v primerjavi z vitkimi. Posledično tudi te fiziološke značilnosti določajo toplotne zahteve od okolja. PMV/PPD model je bil objavljen v sedemdesetih letih in takrat biofizični modeli, ki vključujejo vpliv toplotne izolacije zaradi tkiv, niso bili v širši uporabi. Od takrat so bili razviti številni biofizični modeli človeškega toplotnega ravnovesja in znanje, pridobljeno z njimi, bi bilo lahko uporabljeno za izboljšavo PMV/PPD modela.

### 4. Psihično stanje posameznika

Na odločitev ljudi je lahko vplival tudi stres, saj so bili v trenutku, ko so se morali odločiti, postavljeni v stresno situacijo, kar je lahko povzročilo dvig nivoja kortizola, adrenalina in noradrenalina (glavnih treh stresnih hormonov). Zaradi teh hormonov se človek začne potiti, dvigne se tudi nivo metabolizma. Posledično je človeku topleje, kot bi mu bilo v situaciji, v kateri ne bi bil izpostavljen stresu.

### 5. Naključne spremenljivke

V poskusu se niso mogli izogniti naključnih spremenljivkam, ki bi znale vplivati na posameznikovo presojo. Tako na primer, če je posameznik slabe volje, bo morda temperature dojemal hladneje, kot tisti, ki je dobre volje. Problem se pojavi tudi, če je poskus izveden v času nahoda in prehlada, saj bo prehlajene posameznike bolj zeblo, kot tiste, ki so zdravi.

## 10. Eksperiment

### 10.1. Uvod

Za poskus sem se odločila, ker sem želela preveriti natančnost termoregulacijskega modela. Zanimalo me je tudi, ali se bodo pridobljeni podatki bolj skladali s SIST EN ISO 7730:2005 ali s termoregulacijskim modelom.

Odločila sem se, da bom preiskovanca postavila v dnevno sobo, kjer družina preživlja največ časa. Ker predstavlja enega najpomembnejših prostorov v vsakem stanovanju, me je zanimalo kako se moramo obleči, da se bomo počutili najlagodnejše. Ker je dnevna soba prostor, kjer se po navadi sproščamo, je tudi preiskovanec ležal (miroval). Poskus sem izvedla v treh sklopih:

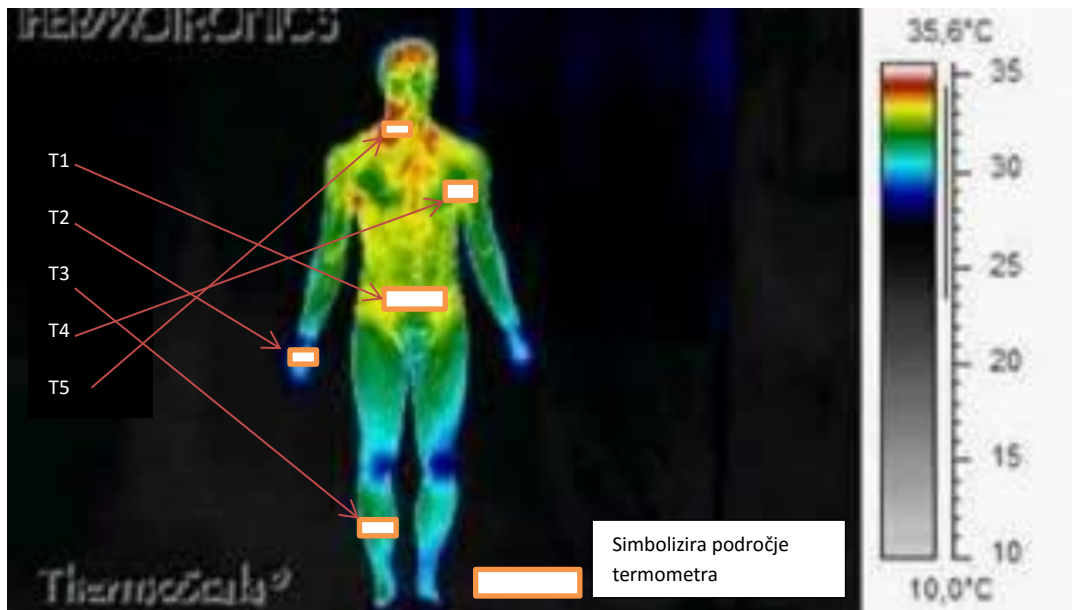
1. Sklop: preiskovanec je bil oblečen v kratke hlače, majico, nogavice, spodnje hlače;  $0,26 \text{ clo} / 0,04 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$
2. Sklop: preiskovanec je bil oblečen v spodnje hlače, dolge hlače, nogavice, kratko majico, tanjši pulover;  $0,65 \text{ clo} / 0,101 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$
3. Sklop: preiskovanec je bil oblečen v spodnje hlače, debelejšše dolge hlače, kratko majico, puhovko (debeli izolacija), nogavice;  $0,93 \text{ clo} / 0,155 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$

Na podlagi *razpredelnice 1* sem ocenila upornost oblačil. Seveda to ni natančna metoda določevanja upornosti oblačil, vendar zato ker primerjam rezultate s SIST EN ISO 7730:2005, ki uporablja ta način, bo to zadostovalo.

Med poskusom sem na 3 min merila srčni utrip preiskovanca. Preiskovancu sem predstavila Fangerjevo toplotno senzacijsko lestvico (*razpredelnica 2*) in mu naročila, naj se glede na njo opredeli.

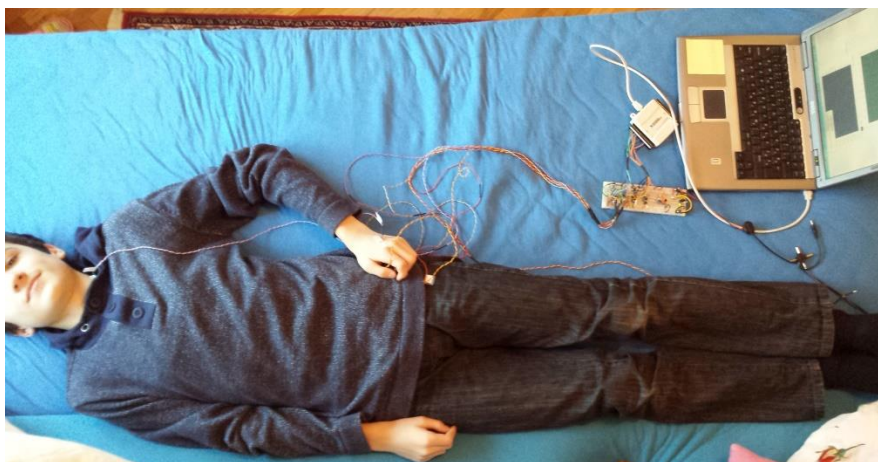
Na preiskovanca sem prilepila pet toplotnih senzorjev (termoelementov) na različna mesta njegovega telesa: na dlan, vrat, pod pazduho (temperatura jedra), na trebuh in nogo (področja so prikazana na *sliki 4* in *sliki 5*).

Šesti termometer je meril temperaturo okolice.



*Slika 4: področje termoelementov na preiskovančevem telesu*

Termometri so merili spremembo temperature vsakih 10s. Vsak sklop poskusa je trajal 30min. Poskus bi izvajala dlje vendar je preiskovanca pri prvem sklopu zeblo, pri drugem pa mu je bilo pretoplo. Da bi se izognila prehladu sem poskus omejila na 1h 30min.

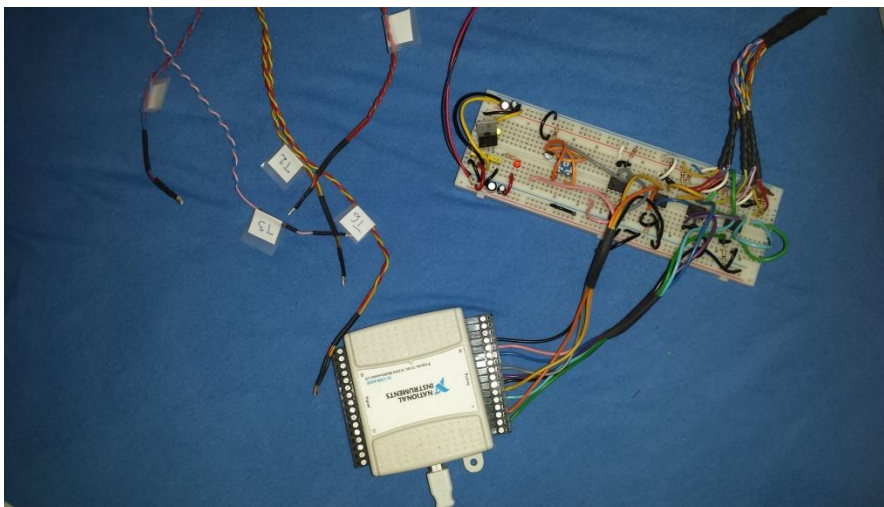


*Slika 5: preiskovanec pri merjenju*

## 10.2. Merilna oprema

Temperaturo telesa oziroma površinsko temperaturo kože sem merila z uporovnimi tipali ITS NDK0 reda velikosti  $5\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ , kar ima za poledico zelo kratek odzivni čas, saj nima velike termične mase. Tako senzor hitro sledi spremembi temperature. V bistvu gre za uporovni temperaturni senzor z referenčno upornostjo  $1000\ \Omega$  pri  $0\ \text{°C}$ . Vezje za napajanje senzorjev oziroma merjenje spremembe upornosti in s tem posledično temperature je bilo

izdelano s strani Fakultete za strojništvo, Univerze v Mariboru. Analogni signal, ki ponazarja spremembo upornosti temperaturnega senzorja, je bil nato zajeman elektronsko s pomočjo NI-USB 6008 DAQ kartico, ki je direktno priključena v računalnik. Preko programske opreme NI LabView 8.5 so bili nato signali oziroma napetost posameznih senzorjev pretvorjeni preko upornosti v temperaturno skalo in časovno zajemani vsakih 10 s. Potrebe po hitrejšem zajemanju ni bilo saj je temperaturni odzivi telesa na zunanjo spremembo relativno počasen. Na spodnji sliki je prikazano vezje, temperaturna tipala in DAQ kartica za zajem podatkov. Vsa opisana oprema za izvedbo eksperimenta je bila posredovana iz strani Fakultete za strojništvo.



*Slika 6: slika vezja in termoelementov*

Srčni utrip preiskovanca sem merila s pomočjo nadlaktnega merilnika krvnega tlaka (Sanitas SBM 21), vsake tri minute.

### 10.3. Hipoteze

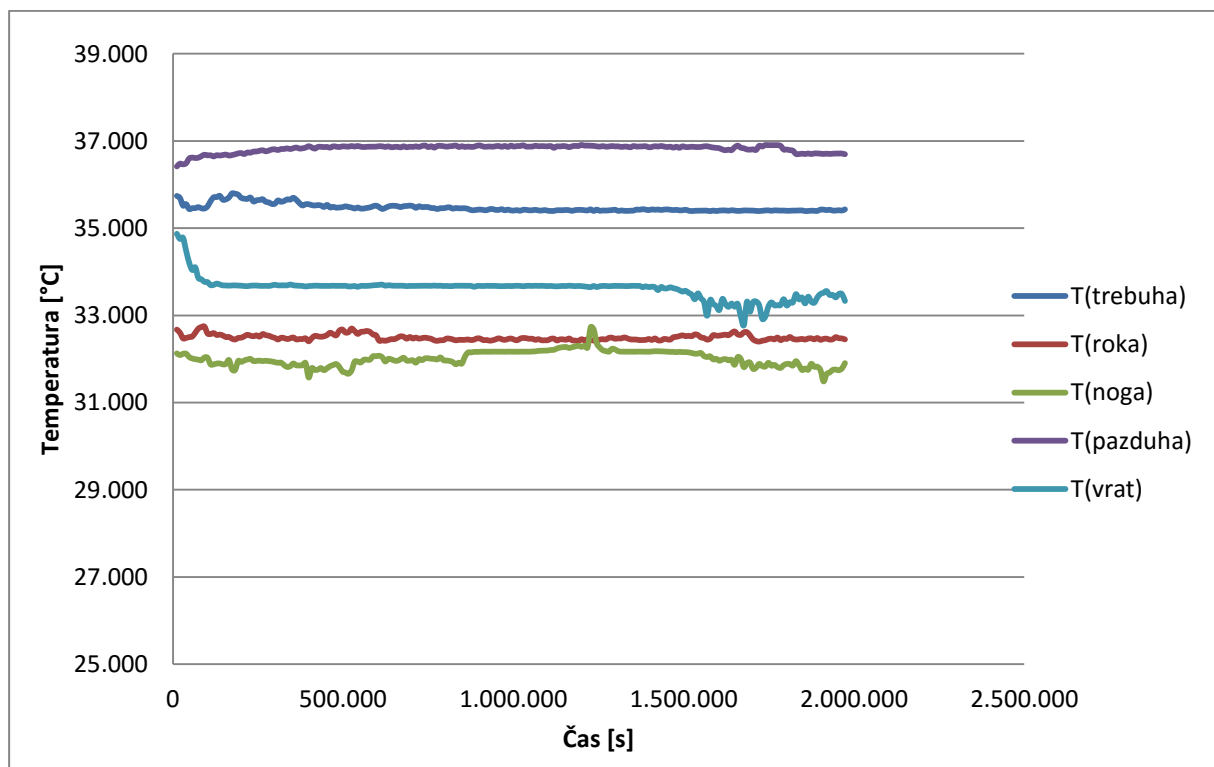
Pred poskusom sem si postavila hipoteze:

- *Hipoteza 1:* termoregulacijski model bo boljše opisal idealno temperaturo posameznika, kot SIST EN ISSO 7730:2005,
- *Hipoteza 2:* termoregulacijski model je dovolj natančen za načrtovanje notranjega okolja bivalnih prostorov.

### 10.4. Rezultati meritve

#### 10.4.1. Lahka oblačila

*Graf 1: spreminjanje temperature različnih delov telesa v odvisnosti od časa pri lahkih oblačilih*



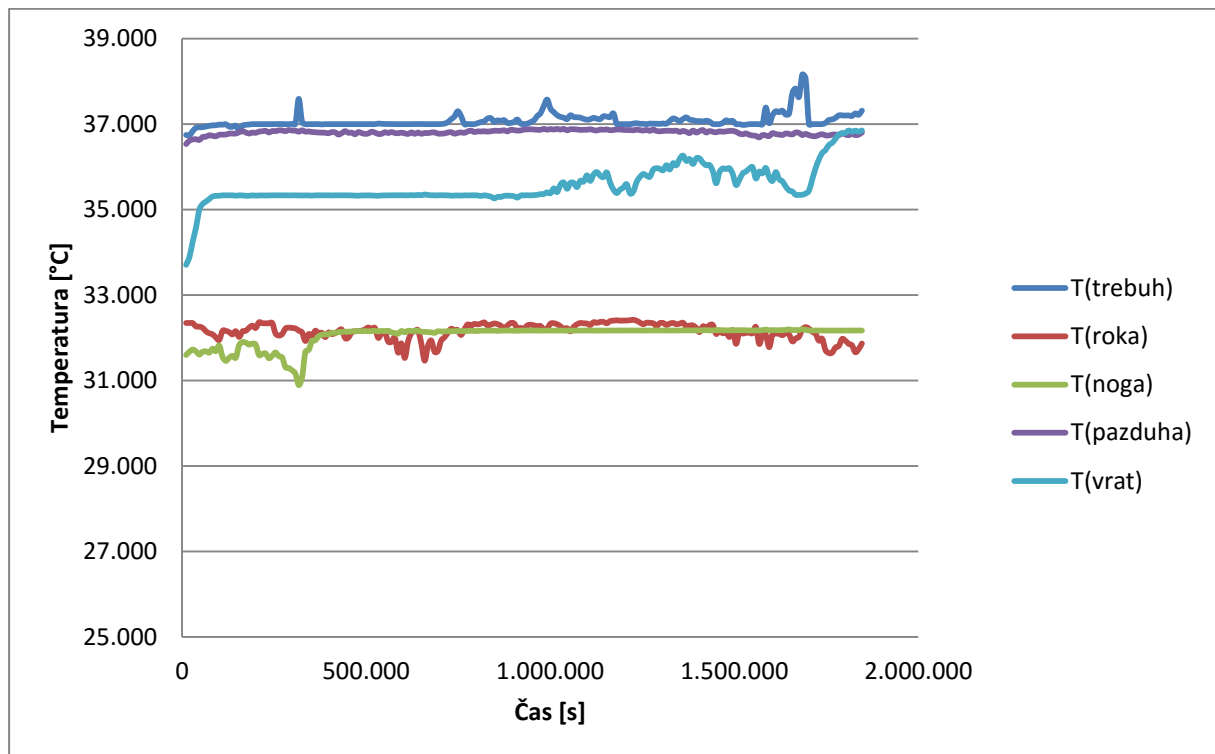
V prvem sklopu poskusa je bil preiskovanec najtanjše oblečen. Po 7min (420s) je rekel da ga zebe in se opredelil po sedem stopenjski senzacijski lestvici z -2 (mrzlo). Iz *grafa 1* je razvidno da je po približno sedmih minutah sunkovito padla temperatura na področju preiskovančevega vratu, nekoliko pozneje pa temperatura na področju trebuha. Temperatura dlani tudi nekoliko upade, medtem ko pa temperatura noge le niha. Predvidevam, da ker je bil



preiskovanec moškega spola, se zaradi gostih dlak na nogi (ki učinkujejo kot izolator) ni bistveno spreminjala.

#### 10.4.2. Normalna oblačila

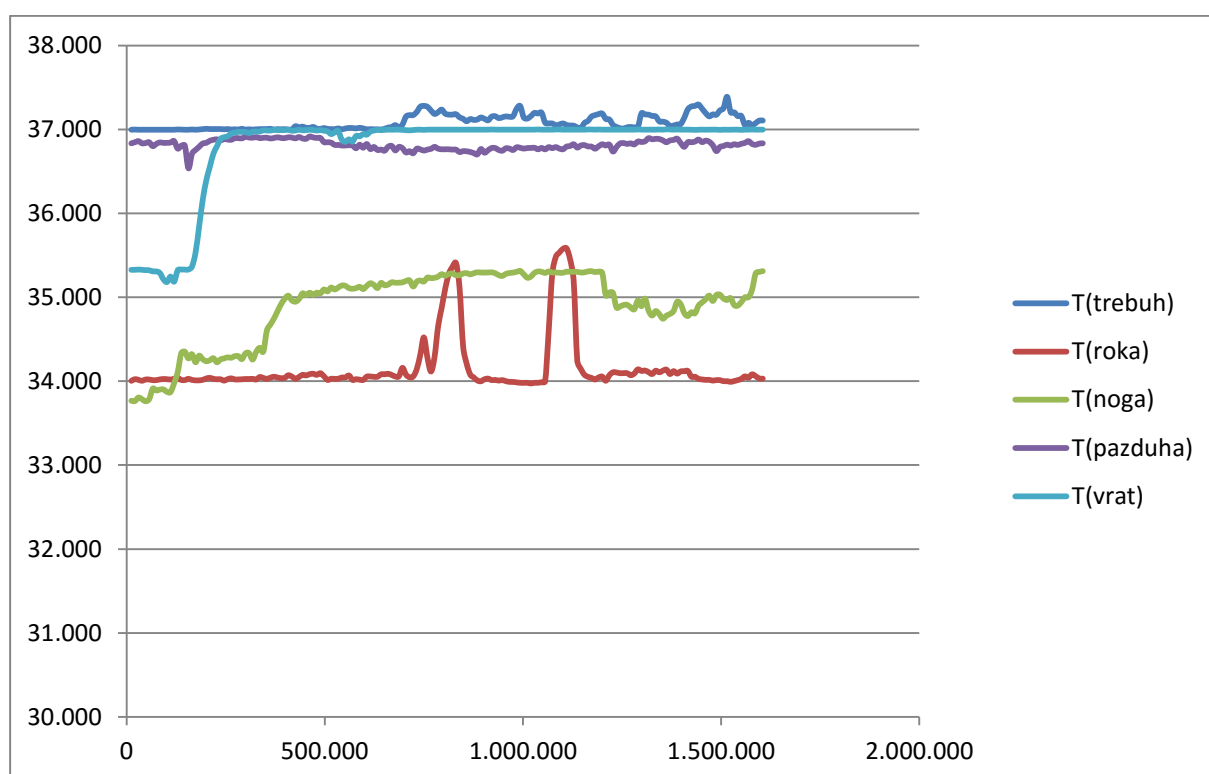
*Graf 2: spreminjanje temperature različnih delov telesa v odvisnosti od časa pri normalnih oblačilih*



Iz grafa 2 je razvidno, da temperatura dlani nekoliko niha (standardna deviacija je približno 0,20°C). Temperatura na področju vrata se najprej dvigne, saj je ta vaja sledil sklopu, pri katerem je bil preiskovanec najtanjše oblečen (najtanjša izolacija) in se je temperatura preiskovanca dvignila, ko si je oblekel oblačila z debelejšo izolacijo, podobno se zgodi tudi pri temperaturi na področju trebuha. Temperatura noge je večinoma konstantna.

### 10.4.3 Debela oblačila

Graf 3; spreminjanje temperature različnih delov telesa v odvisnosti od časa pri debelih oblačilih



V tretjem sklopu poskusa sem preiskovanca najdebelejše oblekla. Iz *grafa 3* je razvidno, da se temperatura na področju vrata in noge najprej sunkovito dvigne. Najbolj preseneča temperatura roke, ki se na dveh odsekih sunkovito dvigne nato pa ponovno zniža na ponovno zniža na  $(34,00 \pm 0,35)^{\circ}\text{C}$ , eden izmed razlogov bi znalo biti premikanje roke preiskovanca ki je povečala cirkulacijo v roki in dvignila temperaturo kože. Po 6 min je preiskovanec rekel da mu je rahlo vroče (+1, glede na *razpredelnico 2*).

## 10.5 Primerjava rezultatov meritev s termoregulacijskim modelom in SIS EN ISO 7730:2005

### 10.5.1 Termoregulacijski model

Ker termoregulacijski model napove spremembo reprezentativne temperature kože, je bilo potrebno določiti povprečno temperaturo kože oziroma reprezentativno temperaturo kože iz meritev. Le-to sem določila kot vsoto temperatur izmerjenih na različnih delih telesa, utežene z odstotkom površine posameznega dela. Pri tem sem upoštevala odstotek kože, ki pokriva določen del telesa: glava in vrat predstavljata 9 %, obe nogi 36 %, trup 36 %, 18 % roke in 1 % genitalije. Ker temperature nisem merila na področju genitalij, sem ta del pri izračunu izpustila. Tako je enačba za izračun povprečne temperature kože sledeča:

$$0,09T_{glave+vrata} + 0,36T_{nog} + 0,18T_{rok} + 0,36xT_{trupa} = T_k \quad (10.1)$$

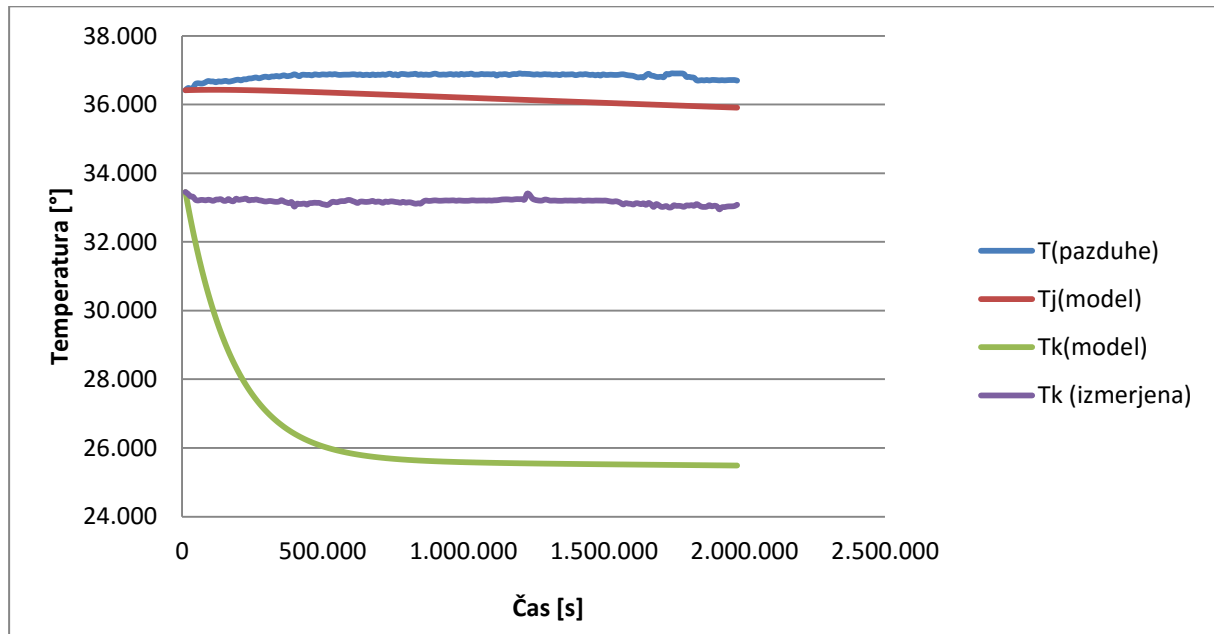
Začetno temperaturo jedra sem enačila z začetno temperaturo izmerjeno pod pazduho ( $T_4=T_j$ ). Prav tako sem tudi predpisala začetno reprezentativno temperaturo kože, dobljene iz meritve oziroma po enačbi (10.1).

Masa preiskovanca znaša 67 kg, višina pa 180 cm. Stopnjo metabolizma sem izračunala s pomočjo enačb 8.03 in 8.04. Zato, ker je bila oseba v mirovanju, je bil  $HR_{ratio}$  enak 1. Vrednost metabolizma tako znaša: 73,98 W/m<sup>2</sup>.

Povprečna temperatura okolice je bila določena iz meritev in znaša 22,25 °C.

## 10.5.2 Tanka oblačila

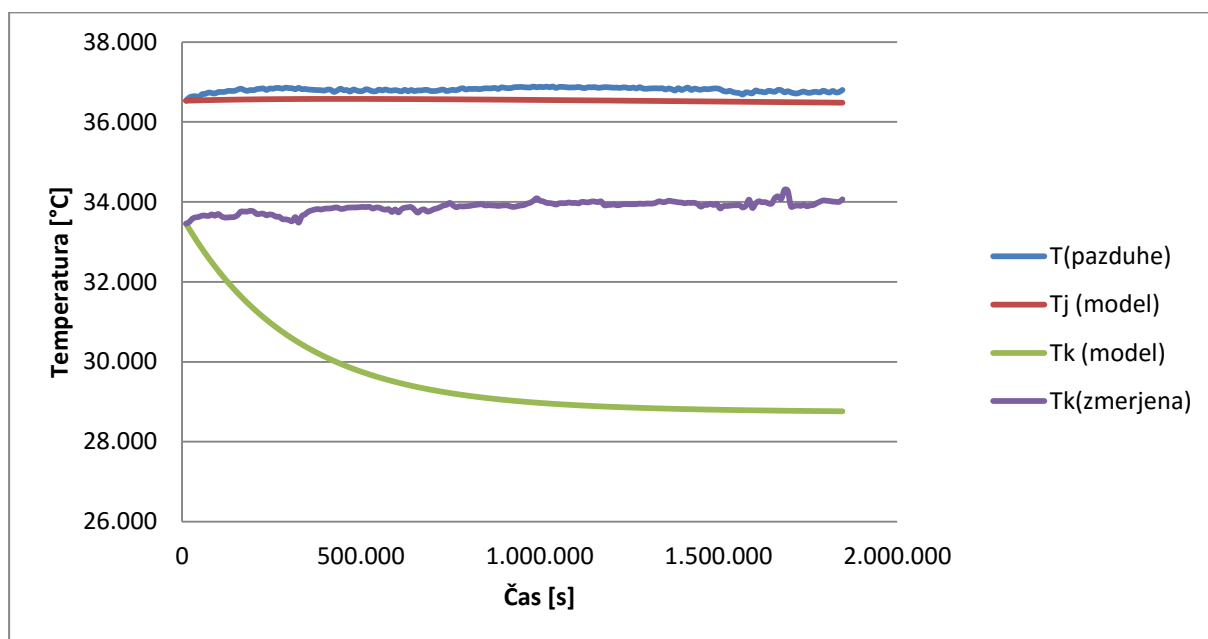
Graf 4: spreminjanje izračunane temperature jedra in kože v primerjavi s spreminjanjem izmerjene temperature skozi čas pri tankih oblačilih



Iz grafa 4 je razvidno, da temperatura jedra izračunana s pomočjo termoregulacijskega modela linearno upada, medtem ko pa se je izmerjena temperatura jedra najprej dvigala, nato pa začela upadati (po 25min). Izračunana temperatura kože sunkovito pada, medtem ko pa se izračunana povprečna temperatura kože giba skoraj konstanto. Časovno razliko od trenutka ko je začelo preiskovanca zebsti in do trenutka ko je začela temperatura jedra preiskovancu dejansko upadati, lahko razložimo s tem, da je preiskovanca začelo zebsti že, ko je temperatura na področju vrata in trebuha začela upadati.

### 10.5.3 Normalna oblačila

Graf 5: spreminjanje izračunane temperature jedra in kože v primerjavi s spreminjanjem izmerjene temperature skozi čas, pri normalnih oblačilih

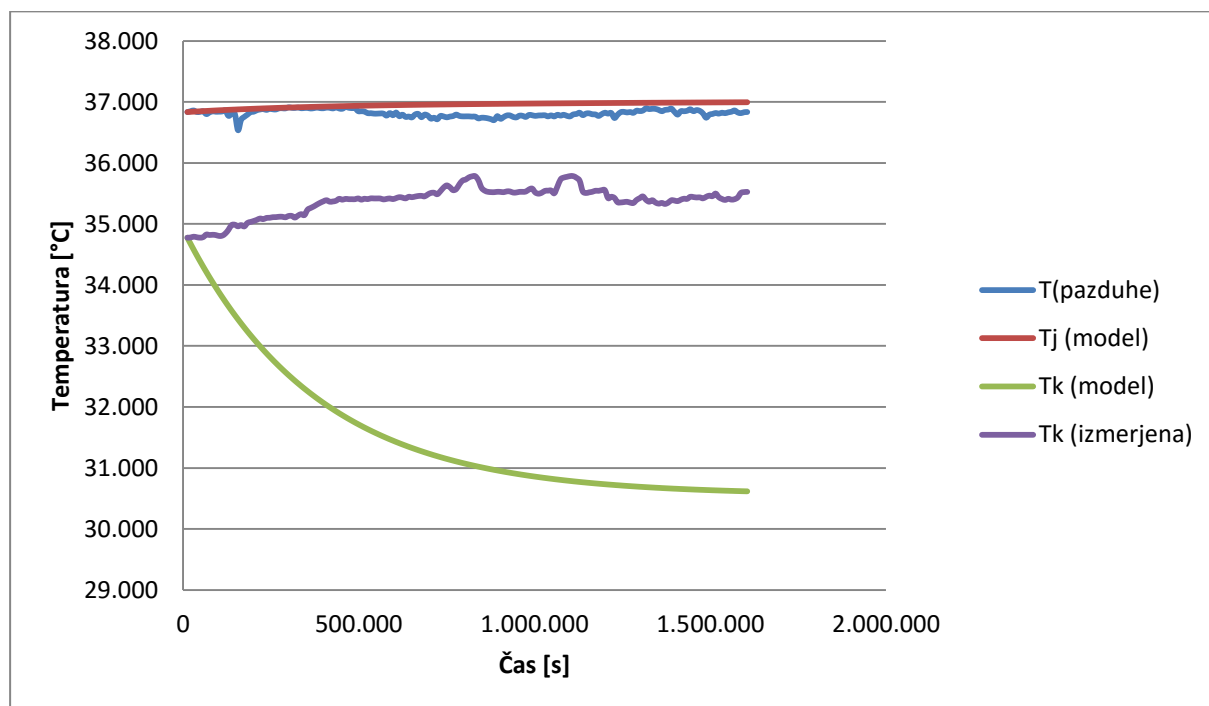


Ob primerjavi podatkov *grafa 5* ugotovimo, da je izmerjena temperatura jedra skoraj konstantna in meri skoraj enako kot temperatura jedra pridobljena s pomočjo termoregulacijskega modela. Kakor pri prejšnjem poskusu, tudi tokrat temperatura kože, izračunane s pomočjo termoregulacijskega modela, najbolj odstopa.

Po tridesetih minutah merjenja se je preiskovanec opredelil, da ga ne zebe, ali mu je vroče (nevtralna temperatura). Zanimalo me je, kolikšna bi bila izračunana idealna temperatura pri danih parametrih. Izračunan rezultat je znašal 23,32°C, kar je 1,7°C več, kot je bila dejanska temperatura okolice. Glede na SIST EN ISO 7730:2005 pa se idealna temperatura za dane spremenljivke nahaja na intervalu med 24°C in 25°C.

#### 10.5.4 Debela oblačila

Graf 6: spreminjanje izračunane temperature jedra in kože v primerjavi s spreminjanjem izmerjene temperature skozi čas, pri debelih oblačilih



Iz grafa 6 je razvidno, da izmerjena temperatura kože narašča, medtem ko pa izračunana temperatura kože še vedno pada. Izmerjena in izračunana temperatura jedra se postopoma zvišujeta.

#### 10.6. Diskusija rezultatov

Kot prvo sem na začetku naletela na problem, ker se preiskovanec ni znal glede na sedem stopenjsko senzacijsko lestvico definirati. Problem SIST EN ISO 7730:2005 je, da so bili vsi podatki zbrani empirično, kar pomeni, da temeljijo na zmožnosti presoje posameznika, za katero vrednost v sedem stopenjski toplotno-senzacijski lestvici se bo odločil. Potrebno je omeniti tudi to, da se je moral posameznik sam odločiti, kje je meja v njegovem občutju med nekoliko mrzlim in mrzlim. Obstaja možnost, da dva različna posameznika, ki morda občutita isti občutek, pojmujeta mrzlo in nekoliko mrzlo drugače. Ker sem sama naletela na ravno ta problem, sem preiskovanca vprašala ali se mu je bilo v prvem sklopu poskusa bolj nelagodno kot pri tretjem. Na podlagi tega se je preiskovanec odločil, da mu je bilo v prvem poskus bolj

neprijetno kot pri tretjem. Problema odločanja s tem nisva mogla povsem rešiti, saj je bilo postavljeno vprašanje zelo subjektivno glede na posameznika (nekateri ljudje bolj tolerirajo toplo okolje kot hladno in obratno).

Kljub temu, da je termoregulacijski model dobro opiše spreminjanje temperature jedra, je v vseh treh sklopih razvidna velika razlika med izmerjeno temperaturo kože na različnih predelih telesa in izračunano. Eden glavnih problemov termoregulacijskega modela je, da kožo obravnava kot celoto, medtem ko pa je napačno trditi, da je temperatura kože v rokah enaka temperaturi kože na trebuhu. Najlepše razvidno je pri tretjem sklopu podatkov, kjer izračunana temperatura kože pada, kljub temu, da je bil posameznik oblečen v visokoizolacijska oblačila in se je opredelil, da mu je toplo.

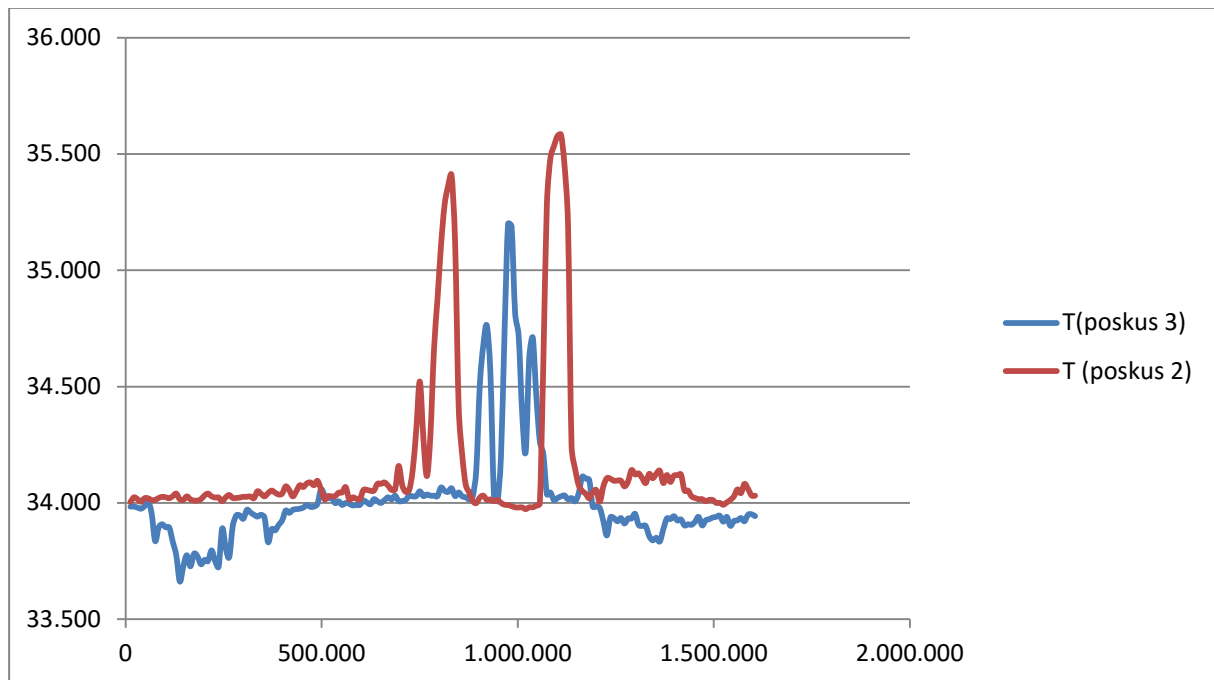
Pri analizi podatkov *grafa 1* in *grafa 2* sem ugotovila, da se čas, ko je preiskovanec oznanil da ga zebe ali mu je toplo, sklada s spremembo temperature na področju vrata. Razlog za močno padanje temperature kože pri termoregulacijskem modelu lahko iščemo tudi v predpisanem pretoku krvi skozi kožo. Le-ta je bila predpisana kot  $6,3 \text{ l/m}^2 \text{ h}$ , vzeta po literaturi. Pri eksperimentu ne vemo kolikšen je bil dejanski pretok krvi skozi kožo, saj je nismo merili. V primeru, ko je pretok krvi skozi kožo večji oziroma manjši, se spreminja tudi temperatura kože. Sklepamo lahko le da je pri dejanskem eksperimentu bil pretok krvi skozi kožo višji, kar poviša temperaturo kože, le-to pa bi lahko preverili le z meritvijo pretoka oziroma bolj naprednim eksperimentom. Torej če povzamemo, stopnja ugodja v prostoru je odvisna ob temperature naše kože, kar je pa odvisno od posameznika (glede na prekrvavljenost ipd.).

Pri drugem sklopu podatkov, ko se je posameznik opredelil z 0 (nevtralna temperatura) glede na *razpredenico 2*, sem izračunala vrednost idealne temperature na podlagi termoregulacijskega modela ter izpisala podatke za iste parametre glede na SIST EN ISO 7730:2005 in prišla do ugotovitve, da je termoregulacijski model bolj natančen kot SIST EN ISO 7730:2005. Kljub temu pa potrebuje nove izboljšave. Najpomembnejša izboljšava bi bila, da bi model moral deliti temperaturo različnih delov telesa. Netočnosti se lahko pojavijo tudi zaradi tega, ker sem privzela, da je preiskovančev tok krvi skozi kožo konstanten.

Poskus sem sicer izvedla trikrat, vendar sem zaradi tehničnih težav morala prvi eksperiment ovreči. Drugi poskus je bil opisan v tej raziskovalni nalogi. Poskus sem še tretjič ponovila, zato ker me je zanimalo, ali je mogoče (še posebej razvidno iz eksperimenta tretjega skopa),

da se temperatura kože na roki zveča zaradi premikanja prstov. Po ponovni izvedbi sem prišla do ugotovitve, da je premikanje prstov oziroma generacija toplote v mišicah ter večje prekrvavljenosti prstov in dlani, možen vzrok za spremembo v temperaturi.

*Graf 7: primerjava temperature v dlani pri prvem in drugem poskusu*



Poskus bi bil natančnejši če bi ga izvajala daljše časovno obdobje. Velik vpliv na dobljene rezultate ima tudi določitev upornosti oblačil, na podlagi *razpredelnice 1*, zato ker ne zajema dovolj široki spekter različnih oblačil. Posledično izračunanju idealne temperature okolja pri drugem sklopu poskusa najn natančen.



## 11. Zaključek

Kljub zastarelosti SIST EN ISSO 7730:2005 se dandanes ta empirična metoda še vedno uporablja. Z raziskovalno nalogo sem prišla do ugotovitev, da kljub temu, da termoregulacijski model potrebuje določene posodobitve, je primernejši za pridobivanje optimalne temperature. Ker je termoregulacijski model natančneje določil idealno temperaturo prostora kot standard, sem lahko potrdila *hipotezo 1* in *hipotezo 2*.

Termoregulacijski model je toliko bolj uporaben in natančen zaradi njegove prilagodljivosti, saj se da aplicirati na vsako okolje, neprimerno pomembnejšo vlogo pa igra pri izdelavi vesoljnih plovil, kjer je okoliška temperatura esencialna (glede na debelino skafandra ipd.).

Ker se SIST EN ISSO 7730:2005 aplicira na zdrave posameznike, je termoregulacijski model veliko bolj primeren za gradnjo bolnic in podobnih ustanov, kjer posameznikovo zdravje ni idealno. Empirični model tudi zgubi svojo točnost v primeru domov za ostarele, saj je metabolična aktivnost nižja.

Moja raziskovalna naloga kakor odgovarja, tudi odpira številna nova raziskovalna vprašanja, kot na primer kako natančneje določati toplotno upornost različnih oblačil in kako najlažje, natančneje in neinvazivno določiti pretok krvi po koži posameznika.

## Viri

- Charles, K. E. (10. 10 2003). Fanger's Thermal Comfort and Draught Models . Kanada .
- Daniel W. Hensley, A. E. (2013). 50 Years of ComputerSimulation of the Human Thermoregulatory System.
- Dusan Fiala, K. J. (1999). A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system. *Journal of Applied Physiology* .
- Energija in okolje*. (brez datuma). Prevezeto 2. 1 2016 iz <http://www.ee.fs.uni-lj.si/EnergijaInOkolje/vaja2.htm>
- Guyton, A. (1996). *Textbook of Medical Physiology*. Philadelphia: W.B. Saunders Company.
- Harvard.edu*. (brez datuma). Prevezeto 2. 12 2015 iz <http://people.seas.harvard.edu/~jones/cscie129/pages/health/thermreg.htm>
- Holland, K. (4. 6 2013). *Healthline*. Prevezeto 20. 12 2015 iz <http://www.healthline.com/health/thermoregulation#Overview1>
- HyperPhysic*. (brez datuma). Prevezeto 17. 1 2016 iz <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/kinetic/relhum.html>
- Joh, T. H., & Hwang, O. (1987). *Dopamine Beta-Hydroxylase: Biochemistry and Molecular Biology*.
- Jung-Hyun Kim, W. J. (2013). Application of thermoregulatory modeling to predict core and skin temperatures in firefighters. *International Journal of Industrial Ergonomics* 43, 115-120.
- Klein, S. (19. 4 2013). *Huffpost Healty living*. Prevezeto 1. 13 2016 iz [http://www.huffingtonpost.com/2013/04/19/adrenaline-cortisol-stress-hormones\\_n\\_3112800.html](http://www.huffingtonpost.com/2013/04/19/adrenaline-cortisol-stress-hormones_n_3112800.html)
- MYVMC* . (21. 11 2011). Prevezeto 23. 12 2015 iz <http://www.myvmc.com/anatomy/sweating-perspiration/>
- SIST EN ISO 7730:2005. (11 2005). Slovenski inštitut za standarizacijo .
- The health success site*. (brez datuma). Prevezeto 1. 12 2016 iz <http://www.thehealthsuccesssite.com/metabolic-rate.html>
- Jurij Iljaž. *Reševanje inverznih problemov prenosa toplote v tkivu z metodo robnih elementov*. PhD diss., Univerza v Mariboru, 2012.
- J. A. Harris, F. G Benedict, *A biometric study of human basal metabolism*, pridobljeno 6.5.2015 iz <http://www.pnas.org/cgi/reprintframed/4/12/370>

## Viri slik

- Slika 1:  
[https://droualb.faculty.mjc.edu/Course%20Materials/Physiology%20101/Chapter%20Notes/Fall%202007/figure\\_06\\_02\\_labeled.jpg](https://droualb.faculty.mjc.edu/Course%20Materials/Physiology%20101/Chapter%20Notes/Fall%202007/figure_06_02_labeled.jpg), 15.12.2015, 17:25
- Slika 2: <http://www.biolkarna.si/files/content/image/KOZMETIKA/IZPADANJE-LAS/Topkrin%20Amino-s-tem%20500%20/3>, 27.12.2015, 16:48
- Slika 3: <http://www.ee.fs.uni-lj.si/EnergijaInOkolje/vaja2.htm>
- Slika 4:  
<http://usatunofficial.files.wordpress.com/2011/01/meditherm.gif?w=495&h=569>, 9.1.2016, 19:34
- Slika 5: lasten arhiv
- Slika 6: lasten arhiv