

PRILOG PREDSKAZIVANJU GLOBALNE TERMIČKE NEUGODNOSTI U PUTNIČKIM VOZILIMA

A CONTRIBUTION TO PREDICTION OF THERMAL DISCOMFORT IN PASSENGER VEHICLES

SVETOZAR GRAHOVAC,
EvoBus GmbH (Musterbau), Mannheim, BRD

Jedan od zadataka proizvođača današnjih vozila predstavlja razvoj novih i optimizacija postojećih sistema za postizanje i održavanje termičke ugodnosti u putničkom prostoru.

Termička neutralnost jeste potreban, ali ne i dovoljan uslov, da se za većinu osoba postigne termička ugodnost.

Pored ispunjavanja uslova termičke neutralnosti tijela kao cjeline, potrebno je i da ne postoji lokalna termička neugodnost na bilo kojem dijelu tijela. Cilj rada je dati prilog predskazivanju globalne termičke neugodnosti tijela kao cjeline. Pored predskazivanja procenta nezadovoljnih iz srednjeg glasa, ukazuje se i na specifičnost termičkih uslova u vozilima. Obrada rezultata na dva sjedišta se oslanja na laboratorijska ispitivanja za izabrane četiri temperature vanjskog vazduha.

One of the aims that the manufacturers of modern vehicles have in mind is the development of new and optimization of the existing systems for achieving and maintaining thermal comfort in the passenger area. Thermal neutrality is a necessary but not sufficient condition for achieving thermal comfort for majority of passengers. In addition to providing the conditions of thermal neutrality of a body as a whole, it is necessary to provide non-existence of any local thermal discomfort on any part of the body as a whole. In addition to the percentage of the dissatisfied, there is a reference to thermal conditions specificity in vehicles. The results obtained from two seats were processed based on laboratory research for selected four outdoor temperatures.

Ključne reči: vozilo; termička ugodnost; procenat nezadovoljnih; ekvivalentna temperatura

Key words: vehicle; thermal comfort; percentage of dissatisfied; equivalent temperature

1. Uvod

Održavanje ugodne klime u određenom zatvorenom prostoru u kome borave ljudi, nalazeći zaštitu od spoljnih nepogodnosti, postoji oduvijek. Kontrolisano održava-

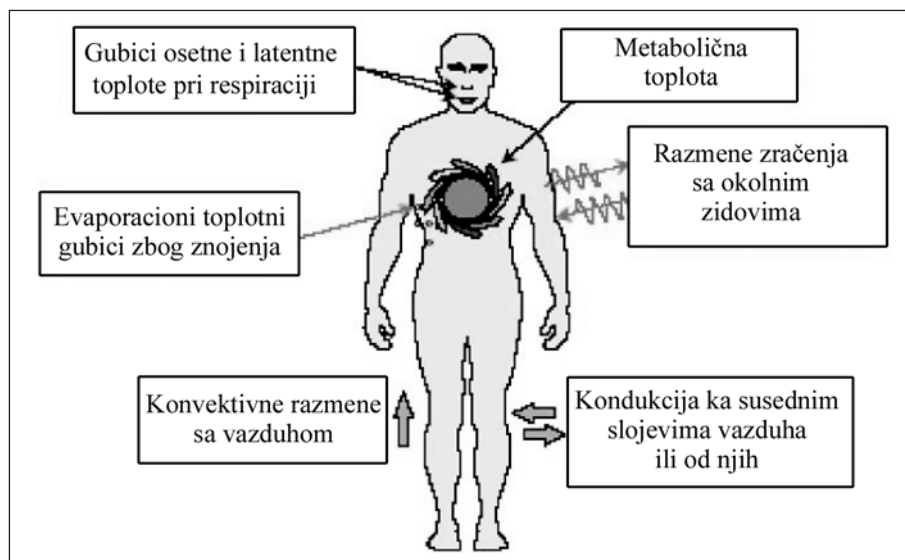
vanje karakteristika sredine zatvorenog prostora u uskim granicama optimalnih vrijednosti naziva se klimatizacijom [1]. U putničkim vozilima se teži postizanju uslova termičke ugodnosti, bez obzira na brzinu vožnje i na uslove okoline, kao što su: temperatura vazduha, vlažnost vazduha, intenzitet sunčevog zračenja, brzina vožnje, uticaj vjetrova, uticaj padavina, itd. Istraživanje termičke ugodnosti u današnjim putničkim vozilima predstavlja još uvijek veliki izazov za njihove proizvođače. Uzroke treba tražiti prije svega u postojanju znatnih odstupanja između vrijednosti temperatura i brzina strujanja vazduha u području glave i nogu. Iz vida ne treba ispustiti ni uticaj hladnih prozorskih stakala zimi, odnosno uticaj razlike zagrijanosti stakala ljeti zbog sunčevog zračenja.

2. Toplotni bilans čovjeka

Čovjekova toplota se odaje okolini na slijedećih pet načina:

- 1) zračenjem (R) sa površine kože ili odjeće na okolne površine ili obratno;
- 2) provođenjem (K) sa površine kože kroz odjeću na predmete sa kojima je čovjek u dodiru;
- 3) konvekcijom (C) na okolni vazduh;
- 4) isparavanjem znoja sa površine kože ili odjeće difuzijom (E_{diff}) i (E_{sw}) znojenjem;
- 5) zagrijavanjem (C_{res}) i vlaženjem vazduha u plućima (E_{res}) prilikom disanja.

Uloga pojedinih načina odavanja toplote na ukupno odatu toplotu je različita i promjenljiva.



Slika 1. Toplotni bilans čovjeka [2]

U uslovima termičke ugodnosti, glavni dio toplote se odaje zračenjem i konvekcijom sa površine kože odnosno odjeće. U uslovima koji su za čovjeka neugodni, toplotna ravnoteža se postiže promjenom odnosa odavanja toplote pojedinim načinima, pa u izvjesnim slučajevima odavanje toplote isparavanjem postaje dominantan vid

termoregulacije. Imajući u vidu da temperatura ljudskog tijela ostaje konstantna, pod uslovom da se osigura ravnoteža između proizvedene i sa okolinom razmijenjene topline, može se za toplotni bilans čovjeka postaviti jednakost:

$$S = M - W \pm R - C - K - C_{res} - E_{res} - E_{diff} - E_{sw} \quad (1)$$

Pozitivna vrijednost desne strane gornje jednačine vodi porastu temperature tijela, dok negativna vrijednost desne strane vodi njenom smanjenju; nula znači da je tijelo u termičkoj ravnoteži. Toplote zračenja (R), konvekcije (C) i provođenja (K) imaju zajedničko svojstvo da utiču na porast temperature okružujuće sredine, pa se zato ove toplote nazivaju osjetnim ili suvim toplotama. U ovaj vid odavanja toplote spada i predaja toplote vazduhu u plućima disanjem (C_{res}). Pri daljim razmatranjima usvaja se pretpostavka da je količina provedene toplote na predmeta (K) sa kojom je gornja površine tijela u kontaktu jednaka količini toplote razmijenjene zračenjem (R) i konvekcijom (C), za slučaj da ova površina nije u kontaktu sa predmetima. Na ovaj način se konduktivni prenos toplote (K) indirektno uzima u obzir. Mehanički rad (W) se zanemaruje.

Količina toplote koju organizam oslobađa isparavanjem znoja (E_{sw}) sa površine kože, odnosno difuzijom vodene pare kroz kožu (E_{diff}), kao i isparavanjem vlage iz pluća disanjem (E_{res}), ne utiče na temperaturu vazduha, nego na njegovu vlažnost, i predstavlja ukupnu skrivenu ili vlažnu toplotu.

3. Teoretske osnove za predskazivanje ukupne termičke neugodnosti

Na slici 2 je šematski prikazana ukupna izolacija ljudskog tijela (I_T) sa pojedinačnim izolacijama. Sa 1 je označena vazдушna izolacija (I_a), a sa 3 izolacija odjeće (I_{cl}).

Na slici 2 se uočava i zatečeni vazduh (2) između ljudskog tijela (4) i odjeće (3).

3.1. Predskazivanje srednjeg glasa za globalnu ili ukupnu termičku neugodnost

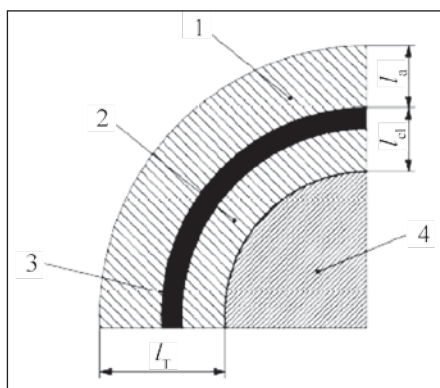
Tabela 1. Sedmostepena skala [4]

Srednji glas						
+3	+2	+1	0	-1	-2	-3
Vruće	Toplo	Umjereno toplo	Neutralno	Umjereno hladno	Svježe	Hladno

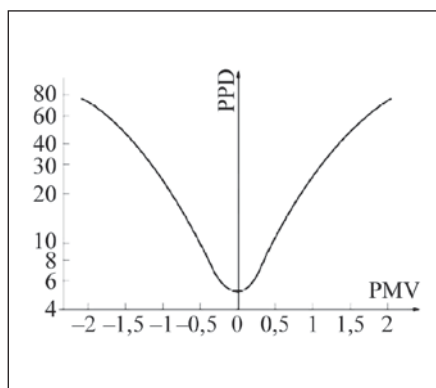
Na slici 3 je prikazana zavisnost između procenta nezadovoljnih (PPD) i srednjeg glasa (PMV).

Primjena indeksa srednjeg glasa PMV preporučuje se u granicama između -2 i +2. Pored preporučenih granica za PMV, potrebno je i da se šest ključnih parametara nalazi u granicama:

– metabolična toplota (M) 46 W/m² do 232 W/m² (0,8 met do 4 met);



Slika 2. Šematski prikaz izolacije ljudskog tijela [3]



Slika 3. Ovisnost (PPD) procenta nezadovoljnih od (PMV) srednjeg glasa [4]

- izolacija odjeće (I_{cl}) 0 m²K/W do 0,310 m²K/W
(0 clo do 2 clo);
- temperatura sredine (t_a) 10°C do 30°C;
- srednja temperatura zračenja (t_r) 10°C do 40°C;
- brzina nastrojavanja osobe (v_{ar}) 0 m/s do 1m/s;
- parcijalni pritisak vodene pare 0 Pa do 2700 Pa.

$$PMV = [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot [(M - W) \pm R - C - C_{res} - E_{res} - E_{diff} - E_{sw}] \quad (2)$$

Predskazani procenat nezadovoljnih može se odrediti prema slijedećem izrazu:

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) \quad (3)$$

3.1.1. Razmjena toplote zračenjem preko vanjske površine R

U hladnim zimskim danima čovjek predaje toplotu na hladne okružujuće površine temperature t_r putem zračenja; radi se o toplotnim gubicima ljudskog organizma. Ljeti je moguća obratna situacija, da čovjek prima toplotu putem zračenja od toplijih okružujućih površina – radi se o toplotnim dobitcima. Koeffcijent razmjene toplote zračenjem između površine osobe (koža i odjeća) i okružujućih površina (prozori, zidovi, grijača tijela) određuje se iz izraza:

$$h_r = \frac{a \cdot f_{ef} \cdot s - [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4]}{(t_{cl} - t_r)} \quad (4)$$

S obzirom da neki dijelovi tijela ne izmjenjuju toplotu sa okolinom nego između sebe (ruke i tijelo, unutrašnje strane nogu), nužno je za procjenu udjela površine u zračenju uvesti korekcionni faktor f_{ef} :

$$f_{ef} = \frac{A_r}{A_{Du}} \quad (5)$$

Površina tijela po Du Bois-u za osobu visine h [m] i težine T [kg] određuje se prema izrazu:

$$A_D = 0,202 \cdot T^{0,425} \cdot h^{0,725} \quad (6)$$

Za osobu tešku 70 kg i visoku 170 cm gornjim izrazom se dolazi do površine tijela od 1,8 m². Za približnu srednju vrijednost f_{ef} od 0,72 dolazi se do izraza:

$$R = f_{cl} \cdot h_r \cdot (t_{cl} - t_r) = 3,96 \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] \cdot 10^{-8} \quad (7)$$

Za srednju emitovanost spoljne površine obučenog tijela ϵ uzima se vrijednost od 0,97, a za Štefan-Boltzmanovu konstantu vrijednost 5,671 W/m²K⁴.

3.1.2. Gubitak toplote konvekcijom preko vanjske površine C

Pošto je temperatura površine odjeće t_{cl} viša od temperature okolnog vazduha t_a , to se vazduh u kontaktu sa toplom površinom zagrijava. Razmjena toplote konvekcijom određuje se izrazom:

$$C = f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \quad (8)$$

Za koeficijent prelaza toplote prirodnom konvekcijom koristi se izraz:

$$h_c = 2,38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0,25} \quad (9)$$

Za koeficijent prelaza toplote prisilnom konvekcijom koristi se izraz:

$$h_c = 12,1 \cdot (v_{ar})^{0,5} \quad (10)$$

U primjeni se računaju obe vrijednosti i uzima veća vrijednost. Za faktor površine odjeće f_{cl} , tj. odnos vanjske površine obučenog tijela i površine nagog tijela za $I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, vrijedi izraz:

$$f_{cl} = 1,00 + 1,290 \cdot I_{cl} \quad (11)$$

dok za $I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ vrijedi izraz:

$$f_{cl} = 1,05 + 0,645 \cdot I_{cl} \quad (12)$$

Za temperaturu površine odjeće vrijedi izraz:

$$t_{cl} = t_{sk} - I_{cl} \cdot \{3,96 \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] \cdot 10^{-8} + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)\} \quad (13)$$

Za srednju temperaturu kože t_{sk} vrijedi izraz:

$$t_{sk} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) \quad (14)$$

3.1.3. Gubitak suve toplote disanjem C_{res}

Toplotna energija se gubi zato što je izdisani vazduh topliji od udisanog, kao i zbog razlike u sadržaju vlage. Važi slijedeća jednakost za gubitak tolotne energije suvom konvekcijom:

$$C_{res} = 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \quad (15)$$

Temperatura izdisanog vazduha se uzima da iznosi 34°C. Ovaj gubitak toplote se može i zanemariti.

3.1.4. Gubitak vlažne toplote disanjem E_{res}

Za gubitak toplotne energije zbog razlike količine pare izdisanog i udisanog vazduha, vrijedi izraz:

$$E_{res} = 1,7 \cdot M \cdot (5867 - p_a) \cdot 10^{-5} \quad (16)$$

Ovaj gubitak toplote utiče samo na promjenu vlažnosti okružujućeg vazduha i ne zanemaruje se.

3.1.5. Gubitak toplote isparavanja zbog difuzije vode kroz kožu E_{dif}

Gubitak toplote isparavanja zbog difuzije vode kroz kožu (E_{dif}) određuje se prema izrazu:

$$E_{dif} = 3,05 \cdot (p_{sk} - p_a) \cdot 10^{-3} \quad (17)$$

Za određivanje pritiska zasićenja p_{sk} za pripadajuću temperaturu kože t_{sk} vrijedi izraz:

$$p_{sk} = 5733 - 6,99 \cdot (M - W) \quad (18)$$

Uvrštavanjem gornjeg izraza za p_{sk} u jednačinu (17) dolazi se do izraza:

$$E_{dif} = 3,05 \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] \cdot 10^{-3} \quad (19)$$

Gubitak toplote difuzije vode kroz kožu dešava se stalno, bez kontrole termoregulacionim sistemom.

3.1.6. Gubitak toplote isparavanjem zbog znojenja E_{sw}

Gubitak toplotne energije radi isparavanja znoja, predstavlja jedan od najefikasnijih načina razmjene toplote sa okolinom, čime se veoma efikasno sprečava porast unutrašnje temperature tijela i pri visokim fizičkim aktivnostima. Za gubitak toplote isparavanjem zbog znojenja vrijedi izraz:

$$E_{sw} = 0,42 \cdot (M - W - 58,15) \quad (20)$$

Zu aktivnosti, kod kojih je $(M - W) \leq 58,15$ W/m² vrijedi jednakost $E_{sw} = 0$.

4. Rezultati i zaključak

U tabeli 2 su dati rezultati za dva sjedišta u trećem redu iza vozača. Sjedište (A) se nalazi do lijevog prozora, a sjedište (B) do sredine vozila. Ulazne veličine su odre-

đene prema [5] za homogenu okolnu klimu klase C i usrednjene za vremenske intervale od 180 s. Sa porastom temperature vanjskog vazduha, raste i relativna vlažnost vazduha na sjedištima, znači parcijalni pritisak vodene pare raste, što objašnjava opadnje ukupne vlažne toplote.

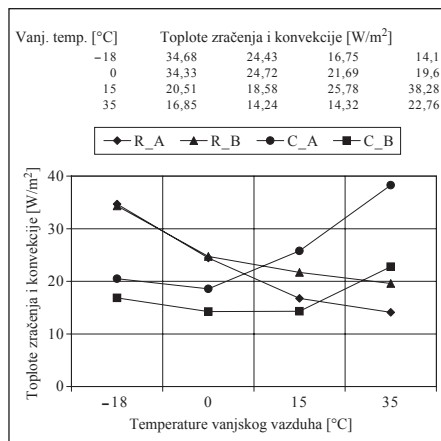
Tabela 2. Rezultati za sjedišta A i B

1. Zajedničke ulazne veličine	Veličine određene prema ISO 7726							
Temperatura vanjskog vazduha [°C]	- 18		- 0		15		35	
Metabolična toplota [W/m ²]	58,15							
Statička izolacija odjeće [clo]	1,03						0,79	
Vlažnost vazduha na sjedištu B [%]	15,88		20,12		44,23		58,50	
1.1. Ulazne veličine za sjedišta	A	B	A	B	A	B	A	B
Temperatura vazduha u vozilu [°C]	22,87	22,26	25,06	25,47	25,04	25,58	24,35	25,08
Brzina strujanja vazduha [m/s]	0,32	0,11	0,33	0,18	0,51	0,14	0,60	0,19
Temperatura crne kugle [°C]	19,77	20,06	23,83	24,02	24,71	24,60	24,60	24,95
2. Pojedinačne izlazne veličine	Veličine određene prema ISO 7730, ISO 9920 i SAE							
Srednja temperatura zračenja [°C]	18,04	18,59	22,30	22,77	24,18	23,88	25,03	24,83
Srednja temperatura kože [°C]	34,07							
Temperatura površine odjeće [°C]	25,47	25,90	27,38	27,87	27,63	28,32	27,98	28,90
Ukupna izolacija tijela [clo]	1,52	1,72	1,50	1,62	1,41	1,66	1,17	1,38
Ukupna vlažna toplota [W/m ²]	20,25	20,32	19,46	19,39	16,37	16,18	14,84	14,52
Suva toplota preko kože [W/m ²]	55,19	51,18	43,01	38,96	42,53	36,01	52,38	42,36
Operativna temperatura [°C]	21,07	20,41	24,02	24,25	24,75	24,75	24,56	24,97
Ekvivalentna temperatura [°C]	19,44	20,55	22,73	23,83	22,94	24,59	22,29	24,41
Predskazani srednji glas PMV [-]	- 1,18	- 0,93	- 0,33	- 0,06	- 0,10	0,34	- 0,64	0,05
Procenat nezadovoljnih [%]	34,75	23,46	7,26	5,07	5,19	7,46	13,72	5,02

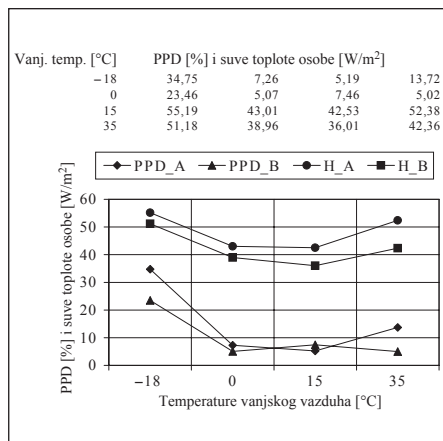
Temperatura odjeće i ukupna izolacija imaju statičke vrijednosti za brzine strujanja vazduha ispod vrijednosti (0,15 m/s), a za veće brzine vazduha se vrši korekcija statičkih vrijednosti. Iz tabele 2 proizlazi da operativna i ekvivalentna temperatura imaju približno iste vrijednosti za brzine vazduha od 0,11 m/s. Rastom brzine vazduha, raste i razlika između operativne i ekvivalentne temperature. Obe temperature

se određuju za specijalne slučajeve sredine, ekvivalentna temperature za ($t_a = t_r, v_{ar} = 0$), a operativna temperature za ($t_a = t_r, v_{ar} = v_{ar}$) za stvarnu suhu toplotu preko kože. Na slici 4 su date toplote zračenja (R) i toplote konvekcije (C).

Toplota konvekcije je direktno zavisna od brzine kretanja vazduha, a toplota zračenja indirektno. Na slici 5 su dati suva toplota i procenti nezadovoljnih na sjedištima A i B. Uzročnik znatnog odstupanja datih vrijednosti za istraživana sjedišta je brzina vazduha. Odstupanja datih vrijednosti bi bila vrlo mala za iste brzine vazduha na sjedištima A i B. Brzina strujanja vazduha je jedini parametar koji skoro ugrožava usvojenu pretpostavku homogene klime klase C na sjedištima [5].



Slika 4. Toplote zračenja i konvekcije za sjedišta A i B



Slika 5. Procenat nezadovoljnih i ukupne suve toplote za sjedišta A i B

Literatura

- [1] **Todorović B.**, *Klimatizacija*, SMEITS, Beograd, 2005.
- [2] **Silva, M. C. G.**, *Measurements of comfort in vehicles*, Measurement Science and Technology, Vol. 13, R41 – R60; 2002.
- [3] *** DIN EN ISO 9920, *Ergonomie der thermischen Umgebung – Abschätzung der Wärmeisolation und des Verdunstungswiderstandes einer Bekleidungskombination*, 2007.
- [4] *** DIN EN ISO 7730, *Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV – und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit*, 2006.
- [5] *** DIN EN ISO 7726 *Umgebungs-klima – Instrumente zur Messung physikalischer Größen*, 2002.
- [6] *** SAE J 2234 *Equivalent Temperature*, Surface Vehicle Information Report, 2007.