

Vabljeno predavanje:

Prof. dr. Samo Fošnarič

Univerza v Mariboru  
Pedagoška fakulteta  
Koroška cesta 169  
SI-2000 Maribor

## VPLIV MIKROKLIMATSKIH DEJAVNIKOV NA DELO V ŠOLI

### **Povzetek:**

V današnjem času je šolsko delo neposredno povezano s številnimi obremenitvami. Tem podležejo praktično vsi; od učencev do učiteljev. Poleg vsakodnevnih učnih obremenitev so deležniki vzgojno-izobraževalnega procesa še izpostavljeni tudi vplivom svoje delovne okolice. Pri tem vsem pa ne gre samo za medčloveške odnose in biološki ritem, temveč tudi za druge posredne faktorje, kot so mikroklima, svetloba, hrup, vibracije, sevanja in škodljive snovi. Če skušamo analizirati vse te predpostavke nas hitro pripeljejo do razmišljanj, ki lahko vodijo vse do preobremenjenosti. Dokler je cona delovanja organizma v področju homeostaze, ni večjih problemov. Takrat, ko pa obremenitve preidejo v področje preobremenitev, pride do destabilizacije organizma, kar pa ima lahko za posledico resne zdravstvene probleme. V predavanju tako poskušamo pregledno osvetliti problematiko vpliva nekaterih mikroklimatskih dejavnikov na delo v šoli iz različnih zornih kotov.

### **Ključne besede:**

obremenitve delovnega okolja, šola, učenci, mikroklimatski dejavniki, delovna uspešnost.

## THE INFLUENCE OF MICROCLIMATIC FACTORS ON THE SCHOOL WORK

### **Abstract:**

School work is today directly related to the number of pressures. These pressures have influence on both; on pupils and on teachers. They are also exposed to the impact of their work environment. As well as interpersonal relationships and biological rhythms, other factors are also important. These factors are microclimate, light, noise, vibration, radiation and harmful substances. If we try to analyze all these assumptions, we can begin to think about overloading. As long as the organism is in the area of homeostasis, there are no major problems. However, when the loads go into the area of overload, organism may be destabilized. This can lead to serious health problems. In this lectures, we try to talk about the influence of some microclimatic factors on school work from different angles.

### **Key words:**

work environment pressures, school, pupils, microclimatic factors, work performance.

## I. UVOD

Človek se je oblikoval skozi dolgo evolucijsko obdobje. Pri tem pa se je zelo hitro prilagodil različnim razmeram, ki mu jih je nudil naš planet. Te so izredno impresivne, in sicer od zelo hladno - suhih - arktičnih do zelo toplih - vlažnih - tropskih ter toplo - suhih - puščavskih. Pri tem se posamezni pokazatelji takšnih razmer, kot je npr. temperatura, gibljejo v razponu do 55°C in še več.

Žal pa se ta naš planet, ki predstavlja čudovit biotop, kateremu smo se ljudje in vsa živa bitja čudovito prilagodili, neusmiljeno uničuje. Po ugotovitvah ameriških klimatologov, se klimatski pogoji na Zemlji v zadnjem obdobju opazno spreminjajo. Še posebej zaskrbljujoča so pogorišča ogromnih količin fosilnih goriv, ki smo jim priča v industrializiranih deželah. Hkrati pa se povečuje količina spojin v zraku, ki sicer prepuščajo sončne žarke, vendar hkrati zadržujejo del infrardečega sevanja, katerega Zemlja odboja nazaj v vesolje. Tako prihaja do efekta »tople grede« /Kopetz, 1989/, ki ga pa še dodatno spodbujajo različna termična gibanja zračnih mas ter številni vulkanski izbruhi.

Vsa ta spreminjajoča se dogajanja na našem planetu, pa so prav tako prisotna na samih delovnih mestih v industriji, kot tudi v šoli, kjer se s povečanjem elektronskih naprav in avtomatizacije zmanjšuje metabolična komponenta termoregulacije v škodo osebe, ki izvaja določeno delovno opravilo. Toplotne razmere, katerim je podvržen termoregulacijski sistem človeka, vključujoč neprestano vzdrževanje telesne temperature, ne povzročajo samo neprijetnega subjektivnega občutka mraza ali vročine, temveč zmanjšujejo človekovo fizično in psihofizično zmogljivost. Hkrati pa vodijo do pregretij ali pa podhladitev organizma, ki se v ekstremnih primerih končajo s smrtjo /Umbach, 1978/.

Zato pa danes lahko najdemo čudovito protiutež v tehničnih ukrepih, s katerimi neugodno klimo v prostorih spreminjamo, oziroma uravnavamo tako, da od klimatskih razmer v okolici odvisno količino oddane toplote prilagodimo količini odvečno proizvedene toplote v telesu. Vendar je ta možnost zaradi zelo variabilne proizvodnje toplote v človeškem organizmu samo teoretično uresničljiva. Možno pa je vplivati na takšno uravnoveženje z izbiro ustrezne obleke, ki jo izberemo tako, da ustreza klimatskim in fizičnim aktivnostim v obsegu toplotnega ravnotežja.

## II. NEKATERE ZNAČILNOSTI TERMOREGULACIJE

Stopnja produkcije in izgube telesne toplote je subjektivno pogojena. To variabilnost pa lahko dobro proučujemo, če poznamo fizikalne dejavnike, ki so osnova razumevanju človeškega termoregulacijskega sistema.

Že sama **površina človeškega telesa**, ki je pomemben dejavnik proučevanj je sorazmerno težko merljiva. Zato sta avtorja Gran in Wyndhan izpopolnila formulo (1) po Du Bois and Du Bois /1915/, za izračun površine človeškega telesa:

$$S_{Du} = 0,202 \text{ m}^{0,425} \text{ h}^{0,725} \quad (\text{m}^2) \quad (1)$$

$S_{Du}$  - površina telesa, imenovana Du Boisova površina ( $\text{m}^2$ )  
 $m$  - masa telesa (kg)  
 $h$  - telesna višina (m)

Pri tej enačbi je treba poudariti, da še kljub temu pomeni le približek temeljitejšim izračunom.

**Sevalna energija** je opredeljena z zakoni termodinamike. Tako jo Stefan Boltzmanova enačba (2) prikazuje kot funkcijo temperature:

$$Q_{\max} = \sigma \varepsilon S T_S^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (2)$$

- $Q_{\max}$  - energija sevanja na površinsko enoto ( $\text{W/m}^2$ )
- $\sigma$  - Stefan - Boltzmanova konstanta ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ )
- $T_S$  - absolutna temperatura določene površine (K)
- $S$  - površina telesa, ki seva ( $\text{m}^2$ )
- $\varepsilon$  - emisijski koeficient

Kakor hitro se poveča telesna temperatura, se hkrati poveča tudi emitirano sevanje v kvalitativni in kvantitativni smeri. Tako je povečanje valovne dolžine malenkost manjše kot povečanje temperature. Npr. 6000 K znaša površinska temperatura Sonca pri najvišji valovni dolžini 0,5  $\mu\text{m}$ , kar ustreza valovni dolžini največje občutljivosti očesa na svetlobo.

Druga, za človeško telo celo pomembnejša, je **svetlobna (Sončna) absorbcija**, katero pa je v področju valovne dolžine vidne in infra-rdeče svetlobe težko določiti. Barva kože igra vsekakor pomembno vlogo pri absorbciji. Na sliki 16 vidimo, spektralno porazdelitev absorbcije svetlobe glede na barvo kože; bela - bledikava koža absorbira 60% Sončnega sevanja, medtem ko črna - temnejša okrog 80%.

Ker človeško telo ni preprosto oblikovano, ga je možno iz različnih zornih kotov razlagati popolnoma drugače. Tako je področje, ki je učinkovito prisotno pri sevanju drugačno, kot celotna površina opazovanega telesa. To nas pripelje do nuje upoštevanja radiacijske geometrije človeškega telesa. Le to lahko ponazorimo s posplošeno enačbo (3, 4) izmenljive **radiacijske toplote**:

$$R = \varepsilon f_{cl} f_{eff} \sigma (T_{cl}^4 - T_R^4) \quad (\text{W/m}^2) \quad (3)$$

$$R = K_R (T_R - T_K) \quad (\text{Js}^{-1}) \quad (4)$$

- $R$  - izmenjava radiacijske toplote na površini telesa ( $\text{W/m}^2$ ) ali ( $\text{Js}^{-1}$ )
- $f_{eff}$  - površinski efektivni faktor
- $f_{cl}$  - površinski faktor oblačila
- $\varepsilon$  - emisivnost
- $\sigma$  - Stefan-Boltzmanova konstanta ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ )
- $K_R$  - sorazmernostni faktor sevanja ( $\text{W/K}$ )
- $T_{cl}$  - površinska temperatura oblečenega telesa (K)
- $T_R$  - srednja temperatura sevanja (K)
- $T_K$  - srednja temperatura kože (K)

Pri tej enačbi je faktor  $f_{eff}$  določen fotografsko na eksperimentalnih osebah. Te faktorje so priporočali že različni avtorji, med njimi tudi Fanger. Prikazani pa so v naslednji preglednici:

Preglednica 1: Efektivno radiacijsko območje človeškega telesa /McIntyre, 1980, str. 30/

POLOŽAJ TELESA	FANGER/1972/	GUIBERT and TAYLOR /1952/
SEDEČI	0,70	0,70
STOJEČI	0,72	0,78
VMESNI	-	0,72

Prenos toplote s **konvekcijo** temelji na fizikalnih predpostavkah izgube telesne tekočine zaradi varovanja telesne toplote. Ponavadi je površinska telesna temperatura višja od okolice. Hkrati pa je toplejša tudi plast zraka, ki je v stiku s kožo in oblačilom. V kolikor je izmenjava toplega zraka spodbujena z zunanjimi dejavniki (npr. vetrom), govorimo o **spodbujeni konvekciji**. V kolikor je ta prisotna po celem telesu pa jo lahko opišemo z enačbama (5, 6):

$$K = K_K v^{0,6} (T_Z - T_K) \quad (\text{Js}^{-1}) \quad (5)$$

ali

$$K = h_K (T_{cl} - T_Z) \quad (\text{W/m}^2 \text{K}) \quad (6)$$

- $K$  - spodbujena konvekcija ( $\text{Js}^{-1}$ )
- $K_K$  - sorazmernostni faktor konvekcije ( $\text{W/K}(\text{ms}^{-1})^{0,6}$ )
- $T_Z$  - temperatura zraka ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_K$  - srednja temperatura kože ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $v$  - hitrost gibaja zraka ( $\text{ms}^{-1}$ )
- $T_{cl}$  - površinska temperatura oblečenega človeka ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $h_K$  - koeficient konveksijskega prenosa ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )

Vrednost indeksa  $K_K$  se pri slečenem človeku giblje okrog  $6,9 \text{ W/K}(\text{ms}^{-1})^{0,6}$  do  $4,7 \text{ W/K}(\text{ms}^{-1})^{0,6}$  za oblečenega človeka. V kolikor pa ni vetrovnega stanja, je konveksijski prenos toplote ob telesu spodbujen na podlagi vzgona toplega zraka tik ob površini telesa. Takšna »**naravna konvekcija**« je prav tako proučevana z različnih vizualnimi tehnikami, npr. fotografijo /Lewis, 1969/.

Izračunamo jo lahko po enačbi (7):

$$K = h_K (T_{cl} - T_Z) \quad (\text{W/m}^2\text{K}) \quad (7)$$

- $K$  - konvekcija ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )
- $h_K$  - koeficient konveksijskega prenosa ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )
- $T_{cl}$  - površinska temperatura oblečenega telesa (K)
- $T_Z$  - temperatura zraka (K)

Toplota se prenaša tudi s procesom **evaporacije**, oz. izhlapevanjem znoja skozi vlažno kožo. Evaporacija vlage skozi kožo predstavlja izmenjavo stanja nekaterih molekul iz tekočega v

plinasto stanje ter v naslednjem trenutku prehod le teh naprej od kože. Ta difuzni proces molekul vodne pare je izražen z enačbo (8, 9) evaporacijske izgube toplote iz vlažne kože:

$$E_Z = h_e (p_k - p_z) \quad (\text{W/m}^2) \quad (8)$$

ali

$$E_Z = K_{Ez} v^{0,6} (p_k - p_z) \quad (\text{Js}^{-1}) \quad (9)$$

- $E_Z$  - izguba toplote z evaporacijo ( $\text{W/m}^2$ ) ali ( $\text{Js}^{-1}$ )
- $K_{Ez}$  - sorazmernostni faktor izhlapevanja znoja ( $\text{W/Pa}(\text{ms}^{-1})^{0,6}$ )
- $h_e$  - koeficient evaporacijskega prenosa ( $\text{W/m}^2 \text{ Pa}$ )
- $p_k$  - parni tlak vode pri temperaturi kože (Pa)
- $p_z$  - parni tlak vode pri temperaturi zraka (Pa)

Sorazmernostni faktor izhlapevanja znoja » $K_{Ez}$ « se giblje v mejah  $9,7 \text{ W/Pa}(\text{ms}^{-1})^{0,6}$  za oblečenega človeka (delovna obleka) in  $13,9 \text{ W/Pa}(\text{ms}^{-1})^{0,6}$  za slečenega človeka. Toploto organizem oddaja tudi z respiracijo, oz. dihanjem. Tako je izguba toplote na določeno površino izračunljiva (10) po Liddell-u /1963/, z upoštevanjem metabolizma:

$$H_{res} = 0,0014 M (34 - T_Z) \quad (\text{W/m}^2) \quad (10)$$

- $H_{res}$  - oddana toplota z dihanjem na površinsko enoto ( $\text{W/m}^2$ )
- $M$  - metabolizem ( $\text{W/m}^2$ )
- $T_Z$  - temperatura zraka ( $^{\circ}\text{C}$ )

Pomembno vlogo pri procesu izmenjave toplote z okolico ima vsekakor tudi obleka. Ta predstavlja določen faktor, ki se lahko izračuna s pomočjo posebnih tabel. Ta faktor je toplotni upor obleke, ki se izraža v (clo) enotah /Gagge in sod., 1971/. Obleka z izolacijsko vrednostjo 1 clo prevaja na  $1\text{m}^2$  površine pri temperaturni razliki  $1^{\circ}\text{C}$  med kožo in zunanjo površino obleke 23 kJ toplote na uro.

Tako dobimo:  $1 \text{ clo} = 0,043 \text{ }^{\circ}\text{C m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ kJ} \quad (11)$

Ali

$$0,155 \text{ m}^2 / \text{W K} \quad (12)$$

Navodila ISO/DP 7933 uporabljajo pojem neposrednega upora obleke I ( $K \text{ m}^2 / W$ ), kar pomeni 1 clo ' 0,155.

Preglednica 2: Tabela faktorjev »clo« in  $I_{cl}$  iz ISO/DP 7933:

OBLEKA		$I_{cl}$	clo
SLIP		0,002	0,01
NOGAVICE	kratke - tanke	0,005	0,03
	debele - kratke	0,006	0,04
PERILO	hlačke, nederček	0,008	0,05
	nogavični pas	0,020	0,13
	kombineža	0,029	0,19
	spodnje hlače	0,009	0,05
SRAJCE	T shirt	0,014	0,09
	lahki, kratki rokavi	0,031	0,20
	lahka, dolgi rokavi	0,043	0,28
SUKNJIČ	topel	0,034	0,22
OBLEKA	lahka	0,026	0,17
	težka	0,098	0,63
PLETENINA	lahka, kratki rokav	0,026	0,17
	topla, dolgi rokav	0,057	0,37
HLAČE	lahke	0,040	0,26
	srednje tople	0,050	0,32
	tople	0,068	0,44
PLAŠČ	topel	0,076	0,49
ČEVLJI	lahki	0,006	0,04

Kot smo do sedaj videli, je proces termoregulacije odvisen od /Mecheels, Umbach, 1976/:

**- presnove (metabolizma)**, pri kateri pretežno z oksidativnim procesom nastaja v organizmu energija. Večji del te energije se spremeni v toplotno (Q), manjši del pa se porabi kot mehanska moč za opravljanje dela (13):

$$M = Q + W \quad (Js^{-1}) \quad (13)$$

odnos W/M pa imenujemo koeficient mehanskega učinka  $\eta$  ( $\text{kJh}^{-1}$ ), tako da je v telesu sproščena toplotna energija enaka (14):

$$Q = M (1 - \eta) \quad (J) \quad (14)$$

M - katabolično sproščena energija ( $Js^{-1}$ )

Q - toplota (J)

W - mehansko delo (J)

$\eta$  - koeficient mehanskega učinka ( $\text{kJh}^{-1}$ )

- izmenjave toplote s **konvekcijo (K)** in **prevajanjem - kondukcijo ( $K_0$ )**, ki je odvisna od temperature kože, temperature zraka, relativne hitrosti gibanja zraka in toplotne upornosti obleke;

- izmenjave toplote s **sevanjem - radiacijo (R)**, ki je odvisna od srednje temperature sevanja okolice in toplotnega sevanja človeka v okolico;

- izgube toplote z **evaporacijo znoja (E<sub>z</sub>)**.

Vsi ti parametri narekujejo izpeljavo enačbe (15) toplotnega ravnotežja, s katero najbolje opišemo izmenjavo toplote med človeškim organizmom in okolico /Verhovnik, 1983/:

$$M \pm R \pm K_o \pm K \pm H_{res} - E_z = \pm S \quad (15)$$

M	- toplota, ki nastaja s procesom metabolizma (W = J/s)
R	- sprejemanje (+) ali oddajanje (-) toplote s sevanjem (W)
K	- sprejemanje (+) ali oddajanje (-) toplote s kondukcijo (W)
K <sub>o</sub>	- sprejemanje (+) ali oddajanje (-) toplote s konvekcijo (W)
H <sub>res</sub>	- oddajanje (-) toplote z dihanjem (W)
E <sub>z</sub>	- oddajanje (-) toplote z izhlapevanjem znoja (W)
S	- kopičenje (+) ali izgubljanje (-) toplote v telesu (W)

V kolikor je telo v toplotnem ravnovesju, bo:

$$S = 0$$

Gledano iz fiziološkega stališča, si predstavljamo telo kot jedro, pokrito s skorjo. Pri tem se neanatomsko determinirane mase spremenjajo v odnosu s klimo.

Organizem vpliva sam s svojo lastno termoregulacijo na izmenjavo toplote z okoljem na dva načina:

- **z odvajanjem toplote s prekrvavitvijo**, kjer gre v hladnem okolju za zožitev žil - **vazokonstrikcijo**, s čimer se zmanjša krvni pretok, skorja ohladi in masa jedra reducira. Nasprotno pa v vročem okolju pride do razširitve žil - **vazodiletacije**, kjer se krvni pretok poveča, skorja segreje in masa razširi;

- **z odvajanjem toplote s potenjem**, ki lahko poteka z difundiranjem vode skozi kožo ali pa z oddajanjem vode skozi izdihan zrak. Najučinkoviteje je oddajanje toplote z **evaporacijo** znoja. Z enim litrom znoja telo izgubi približno 2430 kJ toplote.

Regulacijo toplotne izmenjave s tema dvema mehanizmoma lahko organizem vzdržuje brez napora le v določenih mejah. V skrajnih primerih pa termoregulacija ne more zagotoviti toplotnega ravnotežja med okoljem in organizmom, kar pa lahko ima po določenem času usodne posledice, ki se kažejo v:

- **toplotni izčrpanosti** (kolaps), ki je stanje motene termoregulacije. Termoregulacijski mehanizem se želi osvoboditi čim več toplote z največjo možno periferno vazodiletacijo, zaradi katere lahko postane centralni živčni sistem premalo napajan s krvjo, kar ima lahko za posledico nezavest;

- **toplotnih krčih**, ki nastanejo zaradi prevelike izgube tekočine in s tem elektrolitov;

- **toplotnem udaru** (sončarici), pri kateri popolnoma odpove termoregulacija, tako da se organizem ne more več braniti pred preveliko toplotno obremenitvijo. Vse se kaže v obliki zelo visoke telesne temperature, povečanega pulza, večje hitrosti dihanja, suhe in vroče kože;

- **prevelikem oddajanju toplote** v mrzlem okolju, s čimer se organizem podhladi.

Posledice so lahko prehladna obolenja, ozeblina ali zmrznenje posameznih udov ali celega telesa./Gspan, P., 1984, str. 23 – 24/

Koliko toplote oddaja organizem s pomočjo posameznega mehanizma toplotne izmenjave, je odvisno predvsem od razmer v okolju. Sprejemanje in proizvajanje na eni strani ter oddajanje toplote na drugi strani pa naj bi bili v ergonomskih pogojih zmeraj v ravnovesju oziroma v mejah udobja.

Temperatura telesa se regulira z živčnimi mehanizmi, ki delujejo s pomočjo centra za temperaturno regulacijo v hipotalamusu. Te mehanizme aktivirajo posebni detektorji, ki zaznavajo višino telesne temperature. Pri znojenju npr. posebni mehanizmi z vzdrževanjem določenega področja v prednjem delu hipotalamusa z električnim impulzom ali toploto spodbudijo znojenje. Ti impulzi se prenašajo po avtonomnih poteh v hrbtne možgane od tam pa po živcih v kožo. Na naslednji sliki, ki prikazuje žlezo znojnico, je videti, da je to tubularna žleza, ki izloča znoj po prevodnih kanalčkih, ki vodijo navzven skozi dermis in epidermis kože./Guyton, 1990/

Znano je, da lahko telo pri suhem zraku ob temperaturi med 16 in 55°C neprenehoma zadržuje notranjo temperaturo med 36 in 38°C.

Nepravilnosti v temperaturni regulaciji organizma lahko nastanejo zaradi abnormalnosti v samih možganih ali pa zaradi delovanja toksičnih snovi na centre za temperaturno regulacijo. Naslednja slika prikazuje vzroke za vročinsko stanje. To so bakterijske bolezni, možganski tumorji in drugi pogoji, ki lahko dovedejo do toplotnega udara.

### **III. ELEMENTI PROUČEVANJA KLIMATSKIH OBREMENITEV OTROK V ŠOLI**

Klimatske obremenitve, oziroma z njimi povezan toplotni stres, so odvisne od štirih klimatskih in dveh neklimatskih parametrov. Le ti v določenem okolju usmerjajo izmenjavo toplote med človeškim telesom in okoljem, ter sestavljajo t.i. toplotno okolje človeka /Verhovnik, 1983/. Termično udobje je rezultat uravnovešenega procesa izmenjave toplote in je torej odvisno od klimatskih in neklimatskih parametrov.

Klimatski parametri:

- temperatura zraka ( $T_z$  (°C))
- parni tlak ( $p_z$  (mbar)) ali relativna vlaga (RV (%))
- hitrost gibanja zraka (m/s)
- toplotno sevanje, izraženo kot srednja temperatura sevanja ( $\overline{T_R}$  (°C)) ali globus temperatura ( $T_g$  (°C))

Neklimatski parametri:

- bazalni ali delovni metabolizem ( $M$  (kJ/m<sup>2</sup> h))
- toplotni upor obleke ( $I_{cl}$  (clo))

Vseh šest variabel se med seboj kombinira, ter na ta način, ne glede na specifičnost posameznika ustvarja veliko število možnih kombinacij.

## temperatura in vlažnost zraka

**Suha temperatura** zraka ( $T_z$ ) je tista temperatura, ki jo prikazuje navadni termometer na katerega ne deluje vsebina vodne pare v zraku. **Vlažna temperatura** ( $T_v$ ) pa je najnižja temperatura, ki jo prikazuje termometer, katerega rezervoar je prekrit z vlažno tkanino, ko se zrak z določeno hitrostjo giblje okoli rezervoarja.

**Relativna vlaga** (RV) je kvocient med absolutno in maksimalno vlago izraženo v odstotkih. Lahko se izračuna iz izmerjene suhe in vlažne temperature zraka z uporabo specifičnih nomogramov in psihometrijskih kart, ali po formuli (16, 17):

$$RV = \frac{p_z}{p_v} \cdot 100 \quad (\%) \quad (16)$$

in

$$p_z = p_v - 0,66 \cdot (T_z - T_v) \cdot \frac{P}{1000} \quad (\text{mbar}) \quad (17)$$

- $p_z$  - parcialni vodni parni tlak v zraku (mbar)
- $p_v$  - zasičeni vodni parni tlak (mbar)
- $T_z$  - temperatura suhega zraka ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_v$  - vlažna temperatura zraka ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $p$  - zračni tlak (mbar)

Za merjenje suhe in vlažne temperature zraka obstajajo različni instrumenti. Najbolj pa je v uporabi **Assmanov psihrometer**, ki ga sestavljata suhi in vlažni živosrebrni termometer ter ventilator, katerega naloga je ustvarjati neprestano gibanje zraka okrog rezervoarja termometra. Vsi ti instrumenti so nam v pomoč pri ponazoritvi primarnih procesov uravnavanja toplotne bilance človeka - **suhega pretoka toplote** ( $H_c$ ), ki ga sestavljajo procesi kondukcije, konvekcije in sevanja v odvisnosti od kožne temperature ( $T_k$ ) in temperature zraka ( $T_z$ ).

## hitrost gibanja zraka

S povečanjem temperaturnih razlik se povečuje tudi suhi pretok toplote s površine kože v okolico. Slednji je pa odvisen tudi od velikosti površine obleke skozi katero prehaja toplota ter toplotnega upora obleke ( $R_c$ ). Vse lahko ponazorimo z enačbo (18) /Gottwik, 1984/:

$$H_c = \frac{(T_k - T_z) \cdot A}{R_c} \quad (\text{W}) \quad (18)$$

- $H_c$  - suhi pretok toplote (W)
- $T_k$  - srednja temperatura kože ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_z$  - temperatura zraka v okolici ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $A$  - površina, skozi katero prehaja toplota ( $\text{m}^2$ )
- $R_c$  - toplotni upor obleke ( $\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )

Pri procesu **kondukcije** prihaja do toplotnega prehoda med posameznimi delci, ki se nahajajo v stanju mirovanja. Na ta način je količina toplote, ki se s procesom kondukcije vodi s površine telesa v okolico skozi plast oblačila, odvisna še od različnih parametrov, ki opisujejo lastnosti oblačila. Tako je prenos toplote s kondukcijo po /ISO 7933, 1989/ interpretiran z naslednjo enačbo (19):

$$K_o = \frac{\lambda}{d} \cdot A \cdot (T_k - T_z) \quad (W) \quad (19)$$

- K<sub>o</sub> - toplota, ki se prevaja s procesom kondukcije (W)
- λ - koeficient toplotne prevodnosti (W/m.°C)
- d - debelina tekstilne plasti (m)
- A - površina, skozi katero prehaja toplota (m<sup>2</sup>)
- T<sub>k</sub> - srednja temperatura kože (°C)
- T<sub>z</sub> - temperatura zraka v okolici (°C)

Sam proces **konvekcije** bazira na toplotnem prenosu z gibanjem plina ali tekočine. Tako prihaja pri prehodu toplote s površine kože skozi plast oblačila do konvekcije toplote ob njeni površini, ki je v stiku z okolico. Izmenjava toplote s procesom konvekcije pa je odvisna od temperaturnega gradienta in hitrosti gibanja zraka /Verhovnik, 1983/.

### toplotno sevanje

Temperatura sevanja, imenovana srednja **temperatura sevanja** ( T<sub>R</sub> ) je tista temperatura, pri kateri bi idealno črno telo sevalo z isto jakostjo, kot okolica v kateri se opravlja meritev. Tako se pri procesu sevanja oz. radiacije toplota ne glede na medij, prenaša z elektromagnetnim valovanjem, daljšim od 760 nm. Ker v naši neposredni okolici v večini primerov ni predmetov, ki bi bili toplejši kot je naše telo, s procesom sevanja toploto izgubljam, pri čemer je količina oddane toplote odvisna od toplotnega gradienta /Verhovnik, 1983/.

Pri praktičnih meritvah se skoraj vedno uporablja za merjenje srednje temperature sevanja **globus termometer**. Proces analize toplotne obremenitve je sorazmerno enostaven, če so klimatske in neklimatske variable konstantne. Postane pa zelo kompliciran, če se variable med delovnim časom spreminjajo. Celotno obremenitev skušamo izraziti s ponderiranimi vrednostmi, ki odsevajo posamične obremenitve in njihovo trajanje.

Klasični instrumentarij za merjenje klimatskih parametrov sestavljajo, že prej omenjeni Assmanov psihrometer za merjenje suhe in vlažne temperature zraka, katatermometer za merjenje hitrosti gibanja zraka in globus termometer za merjenje temperature sevanja. Danes uporabljamo integrirane elektronske instrumente, s katerimi lahko končne podatke in rezultate hitro in direktno odčitamo.

### metabolizem in toplotni upor obleke

Neklimatska parametra termoregulacije predstavljata metabolizem in toplotni upor obleke. Metabolizem se praviloma meri na posreden način, kot poraba kisika, pri čemer je en liter porabljenega kisika približno ekvivalenten 4,92 do 4,97 kcal ali 20,62 do 20,82 kJ ali 344,4 do 347,9 W.

To lahko ponazorimo z enačbo (20):

$$M = \frac{O_2(l \min^{-1}) \cdot 343,95}{S_{Du}} \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (20)$$

M - metabolizem ( $\text{W m}^{-2}$ )

$S_{Du}$  - površina telesa, imenovana DuBois-ova površina ( $\text{m}^2$ )

Metabolično nastala toplota predstavlja v hladnem okolju »dobrodošlo« komponento, medtem ko v vročem okolju predstavlja določeno obremenitev.

Toplotni upor obleke z izolacijsko vrednostjo 1 clo prevaja na 1  $\text{m}^2$  površine, pri temperaturni razliki 1°C med kožo in zunanjo površino obleke, 23 kJ toplote na uro.

#### IV. VREDNOTENJE TOPLOTNEGA DELOVNEGA OKOLJA

V praksi poskušamo termoregulacijske parametre analizirati in na podlagi tega vrednotiti tako, da uvedemo posebne t.i. toplotne indekse, ki različne kombinacije z enakim fiziološkim učinkom izrazijo z eno samo številko. To zamisel najboljše ponazarjajo krivulje, znane pod imenom "Mean Equivalence Lines - MEL"/Wenzel, 1978/. Iz posebnih psihrometričnih kart lahko razberemo krivulje, ki povezujejo tiste temperature zraka in relativne vlažnosti, pri katerih so ob konstantnem metabolizmu, hitrosti gibanja zraka in toplotnem uporju obleke, srčna frekvenca, rektalna temperatura in srednja temperatura kože enake.

Tako lahko najdemo toplotni indeks, ki z enim številom izraža vseh šest parametrov. Danes obstaja veliko toplotnih indeksov, med katerimi so najbolj pogosti ter največ v uporabi naslednji:

- Efektivna temperatura - ET
- Korigirana efektivna temperatura - KET
- Wet bulb globe temperature index - WGBT1
- WGBT2
- Heat stress index - HSI
- Predicted four hour sweat rate - P4SR

##### **efektivna temperatura (ET) in korigirana efektivna temperatura (KET)**

Za oceno toplotnega stanja in prvenstveno za oceno toplotnega udobja najpogosteje uporabljamo efektivno temperaturo (ET) in korigirano efektivno temperaturo (KET).

ET in KET sta indeksa za oceno toplotnih razmer, ki poskušata s številko opisati občutek toplote, ki ga ima človek v svojem okolju. Ta dva indeksa združujeta v eni številki vpliv temperature zraka, relativne vlažnosti, hitrosti gibanja zraka in delovne obleke delavca. Pri tem upošteva KET dodatno še vpliv toplotnega sevanja. Efektivna temperatura je po definiciji

tista temperatura zaprtega prostora, v katerem je hitrost gibanja zraka enaka nič in v katerem vlada nasičena vlažnost pri kateri ne zaznamo razlike v občutku toplote pri prehodu v prostor, ki ga proučujemo /Sušnik, 1992/.

ASHRAE (American Society of Heating and Refrigeration Engineers) je zaradi prepričanja, da se z ET in KET vlažnosti pri nizkih temperaturah zraka precenjujejo, pri visokih pa podcenjujejo uvedla korigirano metodo označeno z zvezdico (ET\*, KET\*). Razlika je v tem, da stara indeksa izhajata iz izhodiščne klime s 100 % vlage, nova pa iz klime s 50 % vlage.

Za določeno območje velja za izračun ET naslednja enačba (21, 22, 23):

$$ET = 37 - \frac{1}{0,68 - 0,14 \cdot \frac{RV}{100} + \frac{1}{1,76 + 1,4 \cdot v^{0,75}}} \cdot (37 - T_z) - 0,29 \cdot T_z \cdot \left(1 - \frac{RV}{100}\right) \quad (^\circ\text{C}) \quad (21)$$

pri  $v < 0,15$  m/s:

$$ET = \frac{(1,21T_z - 0,21T_v)}{(1 + 0,029(T_z - T_v))} \quad (^\circ\text{C}) \quad (22)$$

ali:

$$ET = 0,492 T_z + 0,19 p_z + 6,47 \quad (^\circ\text{C}) \quad (23)$$

- ET - efektivna temperatura ( $^\circ\text{C}$ )
- RV - relativna vlažnost zraka (%)
- v - hitrost gibanja zraka (m/s)
- T<sub>z</sub> - temperatura zraka ( $^\circ\text{C}$ )
- p<sub>z</sub> - zračni tlak (mbar)
- T<sub>v</sub> - vlažna »Wet-bulb« temperatura ( $^\circ\text{C}$ )

Preglednica 3: Primeri Efektivne temperature pri različni relativni vlagi, hitrosti gibanja zraka in temperaturi zraka (Verhovnik, Polajnar, 1994, str. 104/

Relativna vlaga (%)	Hitrost gibanja zraka (m/s)	Temperatura zraka (°C)	Efektivna temperatura (°C)
100	0,1	25	25
100	0,5	26	25
100	2,0	28	25
75	0,1	27	25
25	0,1	32	25
45	2,0	32	25
10	3,0	37	25

### wet bulb globe temperature index (WBGT)

Ta indeks priporoča National Institute for Occupational Safety and Health (ZDA), kot tudi nekateri drugi. Izraziti ga je mogoče po dveh formulah (24, 25):

$$\text{WBGT} = 0,7 T_v + 0,2 T_g + 0,1 T_z \quad (^\circ\text{C}) \quad (24)$$

pri izrazitem sevanju pa:

$$\text{WBGT} = 0,7 T_v + 0,3 T_g \quad (^\circ\text{C}) \quad (25)$$

- $T_z$  - suha temperatura zraka ( $^\circ\text{C}$ )
- $T_v$  - vlažna temperatura zraka ( $^\circ\text{C}$ )
- $T_g$  - globus temperatura ( $^\circ\text{C}$ )

### heat stress index (HSI)

Ta indeks je uporaben takrat, kadar znojenje predstavlja najbolj pomemben termoregulacijski mehanizem. Z njim se primerja potrebna količina evaporiranega znoja ( $E_{\text{potr.}}$ ), da bi se obdržalo toplotno ravnovesje z maksimalno količino znoja ( $E_{\text{max.}}$ ), ki ga lahko v določenih klimatskih pogojih maksimalno oddamo iz kože.

$$\text{HSI} = \frac{E_{\text{potr.}}}{E_{\text{max.}}} \cdot 100 \quad (26)$$

pri čem je  $E_{\text{potr.}} = M + R + K_o$  ( $\text{kJh}^{-1}$ )

$E_{\text{potr.}}$  - potrebna količina evaporiranega znoja (J/s)

$E_{\text{max.}}$  - maksimalna količina evaporiranega znoja (J/s)

### **predicted four hour sweat rate (P<sub>4</sub> SR)**

Ta indeks se le redko uporablja, čeprav nekateri avtorji menijo, da je najbolj fiziološki /Wenzel, 1978/. S pomočjo tega indeksa določimo količino znoja, ki bi ga človek moral evaporirati pri dani klimi, da bi obdržal toplotno ravnotežje. Njegova uporaba je najustreznejša v izrazito vročih delovnih pogojih, kjer se toplotno ravnotežje lahko uravnava izključno le s pomočjo evaporacije.

## **V. ZAKLJUČEK**

Vemo, da je miselna aktivnost, kot element učenja proces, na katerega lahko zelo hitro in odločujoče vpliva veliko število različnih faktorjev. Vsekakor je eden od teh tudi klimatsko okolje. Poseben problem predstavljajo šolski prostori v času zunanjih - visokih temperatur. V ZDA so naredili več študij in ugotovili, da ima kar 75% učiteljev in učencev probleme s klimatskimi pogoji. Na podlagi teh ugotovitev so zahtevali boljše opremljanje šol s klimatskimi in grelnimi napravami /Pepler, Fabrizio, 1970/. Po Langdon and Loudon /1970/ pa večino vprašanih učiteljev (85%) meni, da se toplotni efekt na učencih izraža predvsem v učnih težavah, zaspanosti, izgubi koncentracije, slabši pozornosti ter omejenem pomnjenju.

O vplivu posameznih dejavnikov šolskega delovnega okolja na miselno aktivnost otrok je bilo tudi pri nas narejeno nekaj raziskav, ki so se poleg toplotnega delovnega okolja dotaknile tudi svetlobnega in zvočnega delovnega okolja (Fošnarič 2003, Fošnarič in Planinšec 2006). Proučevanje vplivov temperature na miselno aktivnost in z njo povezane procese je dokaj težko izpeljiva naloga v realnih okoliščinah. Na to še posebej vpliva izredna variabilnost toplotnih razmer. Kljub temu pa so v ZDA opravili nekaj eksperimentov, s katerimi so ugotovili, da ima temperaturno okolje pomemben vpliv na miselno aktivnost. Npr., skupina znanstvenikov je pozorno opazovala dve skupini udeležencev seminarja elektronike. Ena skupina je proces vodila v moderni učilnici s klimatsko napravo pri temperaturi 24°C. Druga pa v učilnici, ki se je zračila po naravni poti tako, da je temperatura v učilnici okrog poldneva bila okrog 33,6°C. Če pogledamo efektivno temperaturo, se je ta gibala med 21,8 in 27,8°C. Izvedeni primerjalni testi po dveh in štirih tednih seminarjev so pokazali, da skupini ne kažeta nobenih razlik. Le 79% udeležencev skupine, ki je delala v toplotno neugodnih pogojih je tožilo o toplotno neugodnih pogojih dela za učenje.

Vrsto študij je bilo narejenih tudi v okolici Iowe v Lennox Research School. Tukaj so skonstruirali celo dve popolnoma identični učilnici. V času izvedbe eksperimenta so v eni ustvarili toplotno klimo s temperaturo 22,5°C, za katero so menili da je idealna. V drugi pa toplotno klimo z višjo temperaturo, in sicer 26°C. Učenci so v času eksperimenta bili v normalnem učnem procesu. Različne študije so po dolgem obdobju pokazale, da so učenci v temperaturno idealnejših pogojih dosegli boljše rezultate, kar je posledično pomenilo tudi lažje učenje v teh pogojih. Hkrati pa so rezultati tudi pokazali, da so učinki toplotnega okolja veliko bolj kompleksni, kot se to na prvi pogled dozdeva.

Skratka, kompleksnost delovnega okolja in njegov vpliv na številne dejavnike zahtevata dokaj zahtevno obravnavo tako v realnih kot tudi laboratorijskih simulacijskih pogojih.

## VI. LITERATURA

ASHRAE (1992). Thermal Environmental conditions for human occupancy, *ASHRAE Standards*, (New York: ASHRAE), 55 – 74.

Du Bois, D and Du Bois E.F. (1915). The measurement of the surface area of man. *Arsh. Intern. Med.*, Vol. 15, 868-881.

Fošnarič, S. (2003). The influence of traffic noise on children's work efficiency while using a computer at school. *Horizons of Psychology*, Vol. 12 (1), 27-37.

Fošnarič, S. and Planinšec, J. (2006). Prediction of students short-term memory in interdependence with noise. *Studia Psychologica*, Vol. 48 (4), 303-310.

Gage, A. P. in sod. (1971). An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE trans.* Vol. 77 (1), 247-262.

Gottwik, A. (1984). *Angewandte Bekleidungsphysiologie in Bezug auf Stoffauswahl, Schnittkonstruktion und Verarbeitung*. Bekleidungsphysiologisches Institut Hohenstein.

Gspan, P. (1984). *Ekologija dela*. Ljubljana: Založba Iskra Telematika in Zavod SRS za varstvo pri delu.

Guyton, C. A. (1990) *Medicinska fiziologija*. Beograd: Medicinska knjiga.

ISO 7730. 1994 *Moderate Thermal Environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*, International Standardization Organization.

Kopetz, H. (1989). *Warm, Warmer, Tot*. Wien: Die Presse Nr. 12431.

Langdon, F. J. and Loudon, A.G. (1970). Discomfort in schools from overheating in summer. BRS CP 19/70. Building Research establishment. Watford, U.K.

Lewis, T in sod. (1969). Aerodynamics of the human micro-environment. *Lancet*, Vol.1. 1273-1277.

Liddell, D. K. (1963). Estimation of energy expenditure from expired air. *J. Appl. Physiol.* Vol. 18. 25-29.

McIntyre, D. A. (1980). *Indoor Climate*. London: Applied Science Publishers Ltd.

Mecheels, J., Umbach, H. H. (1976). Thermophysiologische Eigenschaften von Kleidungssystemen. Bekleidungsphysiologisches Institut Hohenstein.

Pepler, R. D. and Fabrizio, R.A. (1970). Teachers attitudes and options on air conditioning in schools. *ASHRAE Trans.* Vol. 76 (2). 318-325.

Sušnik, J. (1992). Ergonomska fiziologija. *Radovljica. Didakta.* 30-170.

Umbach, K. H. (1978). *Hautphysiologie und Kleidung*. Bekleidungsphysiologisches Institut Hohenstein.

Verhovnik, V. (1983). *Ekologija in industrijska sanitacija*. Maribor. Tehnska fakulteta Maribor. 5-26.

Wenzel, H.G. (1978). Heat stress upon undressed man due to different combination of elevated environmental temperature, air, humidity and metabolic heat production. A critical comparison of heat stress indices, *J. human Ergon.* Vol. 7. 183-185.

Wyon, D. P. (1970). Studies of children under imposed noise and heat stress. *Ergonomics.* Vol. 13. 598-612.