



Új ruházati ellenállásmodell a nyári individuális emberi hőterhelés elemzésére

Ács Ferenc, Kristóf Erzsébet, Zsákai Annamária

ELTE, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék, acs@staff.elte.hu

DOI:10.56474/légkor.2026.2.3

E munkában bemutatunk egy új ruházati ellenállás modellt, amely alkalmazható az individuális nyári emberi hőterhelés számszerűsítésére. A modellt ruházati termikus és párolgási ellenállás modulok alkotják. A modellt testtömeg-mérések alapján becsüli az izzadás mértékét, és leírja a ruházati termikus, illetve párolgási ellenállás hőszabályozó izzadástól való függését. A megfigyeléseket egy személy végezte Martonvásáron, 2023 nyarán. Az észlelő feküdt, minimális ruházatot viselve. Ha az izzadás mértéke nagy (0,5 kg/30 perc), akkor a ruházati termikus és párolgási ellenállás kicsi (0,2-0,6 clo), és fordítva, ha az kicsi (0,1 kg/30 perc), akkor a ruházati termikus és párolgási ellenállás nagy (4 clo feletti). A kapcsolat mindkét esetben exponenciálisan csökkenő regressziós függvényekkel jellemezhető. Ha nagy a besugárzás és reakcióképpen az izzadás mértéke is nagy, a szimulált ruházati termikus ellenállás értékek 0 clo körül vannak, ami a besugárzással járó hőtöbblet sikeres ellensúlyozását jelenti.

A new clothing resistance model for the analysis of individual human thermal load in summer

In this work, we present a new clothing resistance model that can be used to quantify the individual summer human thermal load. The model consists of clothing thermal and evaporative resistance modules. The model estimates the amount of sweating based on body weight measurements. The model characterizes the dependence of clothing thermal and evaporative resistances on thermoregulatory sweating. The observations were made by one person in Martonvásár in the summer of 2023. The observer was lying down wearing minimal clothing. If the rate of sweating is high (0.5 kg/30 minutes), then the thermal and evaporative resistance of clothing is low (0.2-0.6 clo), and conversely, if it is low (0.1 kg/30 minutes), then the thermal and evaporative resistance of clothing is high (above 4 clo). In both cases, the relationship can be characterized by exponentially decreasing regression functions. If the radiation is high and, as a reaction, the amount of sweating is also high, the simulated clothing thermal resistance values are around 0 clo, which means that the excess heat associated with radiation is successfully offset.

Az első ruházati ellenállás modellek energiaegyenlegen alapuló termikus ellenállás (hőtranszporttal szembeni ellenállásról van szó) modellek voltak és a múlt század 70-es éveiben jelentek meg (Auliciems and de Freitas, 1976; Yan and Oliver, 1996; Yan, 2005). Ács és mtsai. követték e modellek filozófiáját, de az emberi test hőterhelésének becslésére szolgáló ruházati termikus ellenállás ($r_{cl,t}$) számítását másképpen végezték (Ács et al., 2021), mint az előbbi szerzők (Burton and Edholm, 1955; Yan and Oliver, 1996). Megmutatták, hogy az $r_{cl,t}$ jelentős mértékben függ a humán tényezőktől (Ács et al., 2019, 2021, 2022, 2023) is. E modellekben az izzadás mértékét, mint bemenő változót nem használtuk, így a nagy hőtöbblettel járó klímákban vagy időjárás helyzetekben nem volt alkalmazható (ekkor az $r_{cl,t}$ értéke negatív), mivel az energiaegyenleg nem teljesült.

Az előbbi probléma csak úgy oldható meg, ha mérés-sel becsüljük az izzadás mértékét. Ezzel a modell termikus ellenállás modulja kiegészül egy párolgási ellenállás modullal. Mindkét modul a komfortos ruházat karakterisztikáit jellemzi. A komfortos ruházat az, amelynek hőszigetelő képessége mindig biztosítja az emberi test és a környezete közötti hőegyensúlyt, valamint, amelynek vízgőztranszporttal szembeni ellenállása mindig lehetővé teszi azt, hogy a ruházat száraz maradjon.

A megfigyelések során nagy volt a környezeti hőtöbblet. A megfigyeléseket 2023. június 12–október 2. közötti időszakban végeztük. A megfigyelő aktivitása: éber megfigyelés fekvő helyzetben, ruházata: a viselkedési normáknak megfelelő minimális ruházat.

E tanulmány céljai a következők: 1) az új ruházati termikus és párolgási ellenállás modell bemutatása, 2) az adatgyűjtés módszertanának leírása, 3) a modelleredmények ismertetése és elemzése, valamint 4) az $r_{cl,t}$ értékeknek a hőszabályozó izzadás mértékétől való függésének elemzése.

Alapvető eszközök

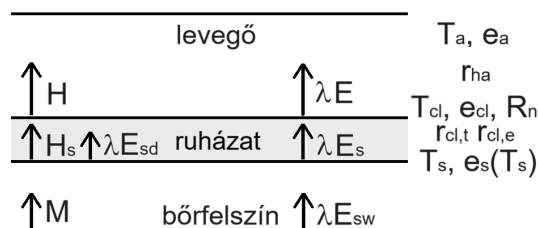
Megfigyeléseink, méréseink során a következő eszközöket használtuk: 1) napozómatracal rendelkező nyugágy, 2) Orion gyártmányú házi mérleg. Az eszközök képei Ács et al. (2024a) munkájának 1. ábráján láthatók. A házi mérleg mérési pontossága 0,1 kg.

A ruházati ellenállás modell

Alapegyenletek

A modell az energiaegyenleg alkalmazásán alapuló 1-rétegű ruházati ellenállás modell (Campbell and

Norman, 1998; Katić et al., 2016). A ruházat szorosan tapad az emberi testhez, alulról (bőrfelszín) az emberi testből felszabaduló metabolikus hőáramsűrűség és vízáramsűrűség (verejtékezés), míg felülről (ruhafelszín) a környezeti hőtöbblet vagy hőhiány terheli. Az energiaegyenlegek jellemzik a belépő és a kilépő hőáram-sűrűségeket a ruházat és a légkör (a ruhafelszín), valamint a ruházat és a bőrfelszín határán. A ruházat hőtartalom-változását nem vettük számításba. A ruházat paraméterei: a hőszigetelő képessége (a hőtranszporttal szembeni ellenállása), a nedvességszigetelő képessége (a víztranszporttal szembeni ellenállása) és a sugárzásátvitelt meghatározó tulajdonságai (albedó, emisszivitás). Az előbbi két paraméter a környezeti hőterhelés és az izzadás mértékének függvényében változik, és jellemzi az egyén és az időjárás közötti kapcsolatrendszer. A ruházatnak komfortosnak kell lennie, azaz, benne jó kell éreznünk magunkat. Ez azt jelenti, hogy mindig száraznak kell maradnia függetlenül a verejtékezés mértékétől, és nem szabad éreznünk benne sem hőtöbbletet, sem hőhiányt, függetlenül attól, hogy milyen az aktivitásunk és mekkora a környezeti hőterhelés. Ennyire ideális ruházat a valóságban nincs, így a modellünkkel becsült ruházati paraméterek egy képzeletbeli ruházat paraméterei. A ruházat sugárzási tulajdonságai a modell bemenő paraméterei. A képzeletbeli ruházat hőtranszportjainak és állapotathatózóinak sematikus rajza az 1. ábrán látható.



1. ábra. A képzeletbeli ruházatot jellemző hő- és nedvesség-transzportok és állapotathatózóik. H - a ruhafelszín és a levegő közötti szenzibilis hőáramsűrűség, λE - a ruhafelszín és a levegő közötti látens hőáram-sűrűség, T_a - a levegő hőmérséklete, e_a - a levegő parciális vízgőznyomása, T_{cl} - a ruhafelszín hőmérséklete, e_{cl} - parciális vízgőznyomás a ruha felszínén, R_n - a ruhafelszín sugárzási egyenlege, r_{ha} - a ruhafelszín és a levegő közötti hőtranszportra vonatkozó aerodinamikai ellenállás, H_s - a bőrfelszín és a ruházat közötti szenzibilis hőáram-sűrűség, λE_{sd} - a bőrfelszín és a ruházat közötti száraz bőrfelszíni párolgás, λE_{sw} - a bőrfelszín és a ruházat közötti nedves bőrfelszíni párolgás, vagy másképpen: a hőszabályozó izzadás látens hőáram-sűrűsége, T_s - a bőrfelszín hőmérséklete (34°C), $e_{s(T_s)}$ - a T_s hőmérsékletre tartozó telítési parciális vízgőznyomás, $r_{cl,t}$ - a ruházat termikus ellenállása, $r_{cl,e}$ - a ruházat párolgási ellenállása és M - a metabolikus hőáram-sűrűség.

A környezeti hőtöbblet, vagy hőhiány erősen függ a besugárzási viszonyoktól is, így a ruhafelszínre vonatkozó sugárzási egyenleg is meghatározó környezeti tényező. A két energiaegyenleg, valamint a sugárzási egyenleg a következőképpen írható fel:

$$M - H_S - \lambda E_S - W = 0, \quad (1)$$

$$R_{ni} - H_{res} - \lambda E_{res} - H - \lambda E + H_S + \lambda E_S = 0, \quad (2)$$

$$R_{ni} = R_{ni} - 4\epsilon_c \cdot \sigma \cdot T_a^3 \cdot (T_{cl} - T_a), \quad (3a)$$

$$R_{ni} = S \cdot (1 - \alpha_c) - (\epsilon_c - \epsilon_a) \cdot \sigma \cdot T_a^4, \quad (3b)$$

ahol W az aktivitás során használt izmok munkájának áram-sűrűsége (Auliciems and Kalma, 1979), H_{res} a légzés során felszabaduló szenzibilis hőáram-sűrűség, λE_{res} a légzés során felszabaduló látens hőáram-sűrűség, R_{ni} a ruha felszínére vonatkozó nettó izotermális sugárzási energiaáram-sűrűség, S a napsugárzás energia áram-sűrűsége, α_c a ruházat albedója, ϵ_c a ruházat emisszivitása, ϵ_a a troposzféra emisszivitása és σ a Stefan-Boltzmann-állandó.

Parametrizációk

A modellben a hőtranszportok leírására a következő parametrizációkat használtuk:

$$H_S = \rho \cdot c_p \cdot \frac{T_S - T_{cl}}{r_{cl,t}}, \quad (4)$$

$$H = \rho \cdot c_p \cdot \frac{T_{cl} - T_a}{r_{Ha}}, \quad (5)$$

$$\lambda E_S = \frac{\rho \cdot c_p}{\gamma} \cdot \frac{e_s(T_S) - e_{cl}}{r_{cl,e}}, \quad (6)$$

$$\lambda E_S = \lambda E_{sd} + \lambda E_{sw}, \quad (6a)$$

$$\lambda E_{sd} = 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot (256 \cdot T_S - 3373 - e_a), \quad (6b)$$

$$\lambda E_{sw} = \frac{1}{A_f} \cdot \lambda \cdot \frac{dm}{dt}, \quad (6c)$$

$$\lambda E = \frac{\rho \cdot c_p}{\gamma} \cdot \frac{e_{cl} - e_a}{r_{Ha}}, \quad (7)$$

$$\lambda E_S = \lambda E. \quad (8)$$

A bőrfelszíni párolgás (6a) a száraz bőr és a verejtékkal borított bőr párolgásának összege. A száraz bőr

párolgásának képletében (6b) a T_S °C-ban (34 °C), míg az e_a Pa-ban van megadva (Fanger, 1970). Az izzadás mértéke (6c) egyelőre nem szimulálható kellő pontossággal az élettani folyamatok leírása alapján. Van egy egyszerű becslés, ami a (6c), ebben A_f az emberi test felszíne, λ a párolgás látens hője és dm/dt az izzadással okozott testtömegcsökkenés, azaz a kiizzadt vízmennyiség az egységnyi időben. Ez az aktivitás előtt, valamint az aktivitás után mért testtömeg és időpont értékekből könnyen meghatározható. Az angol nyelvű szakirodalom ezt az λE_{sw} -t „regulatory sweating”-nek nevezi. Az ún. „hőszabályozó izzadás” mellett van még az ún. „required sweating” (tükörfordításban „szükséges izzadás”) fogalma. Ezt az izzadást az energiaegyenleg maradék tagjaként határozzák meg. Kihangsúlyozandó, hogy a két módon meghatározott izzadás sokszor és igen nagy mértékben különbözik. A (6c) alkalmazása ugyan macerás, de véleményünk szerint ez az egyetlen megbízható módszer az izzadás mértékének becslésére. Modellünk alapfeltételezése, hogy a (8)-as egyenlet érvényes. Ez a biztosítéka annak, hogy a ruházat száraz maradjon (nincs sem konvergencia (nedvesedik a ruházat), sem divergencia (szárazodik a ruházat)), ugyanis csak száraz ruházatban érezzük magunkat komfortosan. Ez logikus, mert a nedves ruházat előbb-utóbb kényelmetlenné válna a hűtőhatása miatt. Az A_f -et Dubois and Dubois (1915) képlete alapján számítottuk.

A ruházati párolgási ellenállás modell

A ruházati párolgási modell két alapvető fontosságú kimenő változója az e_{cl} és az $r_{cl,e}$. A (6a), a (7) és a (8) kombinálásával könnyen kifejezhető az e_{cl} ,

$$e_{cl} = e_a + \left(\lambda E_{sd} + \lambda E_{sw} \right) \cdot \frac{\gamma}{\rho c_p} \cdot r_{Ha}, \quad (9)$$

és mivel a λE_{sd} és a λE_{sw} is könnyen becsülhető a bemenő meteorológiai és humán (testtömeg, magasság) változók alapján, az e_{cl} könnyen számítható. Látható az is, hogy (6), (7), (8) és (9) alkalmazásával az $r_{cl,e}$ is kifejezhető a következőképpen:

$$r_{cl,e} = \frac{\rho c_p}{\gamma} \cdot \frac{e_s(T_S) - e_a}{\lambda E_{sd} + \lambda E_{sw}} - r_{Ha}. \quad (10)$$

Az r_{Ha} parametrizálását már több munkában ismertettük, így pl. az Ács et al. (2021, 2024) munkákban is. Az $r_{cl,e}$ mértékegysége [$s \cdot m^{-1}$], de a szakirodalomban vízgőztranszportra vonatkozó [clo] mértékegység is létezik. $1 \text{ clo-e} = 0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{W}^{-1}$, ami alapján $1 \text{ clo-e} = 0,155 \cdot (\rho \cdot c_p / \gamma) = 0,155 \cdot (1,2 \cdot 1004 / 0,65) = 287,3 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$.

A ruházati termikus ellenállás modell

A ruházati termikus ellenállás modell kimenő változói a T_{cl} és az $r_{cl,t}$. Fejezzük ki őket!

Az (1)-ből kifejezhető a H_s és leírható mint

$$H_s = M - \lambda E_s - W = Hu. \quad (11)$$

Itt röviden Hu -val jelöltük a humán hőáram-sűrűségeket különbségét. A (2), (5), (8) és a (11) kombinálásával felírhatjuk a következő egyenletet:

$$R_n - H_{res} - \lambda E_{res} - \rho c_p \cdot \frac{T_{cl} - T_a}{r_{Ha}} + Hu = 0. \quad (12)$$

A T_{cl} végső alakja, miután behelyettesítjük a (3a)-at a (12)-be, a következő:

$$T_{cl} = T_a + \frac{R_n - H_{res} - \lambda E_{res} + Hu}{\frac{\rho \cdot c_p}{r_{Ha}} + 4 \cdot \epsilon_c \cdot \sigma \cdot T_a^3}. \quad (13)$$

Vegyük észre, hogy a T_{cl} becslésénél mind az (1)-et (bőrfelszín energiaegyenlege a ruházat alatt), mind a (2)-t (a ruhafelszín energiaegyenlege) felhasználtuk, azaz, ezen hőmérséklet nagyságát mind a környezeti, mind a humán tényezők befolyásolják. A (4) és a (11) kombinálásával kifejezhető az $r_{cl,t}$

$$r_{cl,t} = \rho \cdot c_p \cdot \frac{T_s - T_{cl}}{Hu}. \quad (14)$$

A (13) és a (14) új egyenletek, és annak a ruházatnak a termikus tulajdonságait jellemzik, amely megteremti a hőegyensúlyt (nincs sem hőtöbblet, sem hőhiány) az emberi test és környezete között. Mivel hőegyensúlyt teremtő ruházatról van szó, e ruházat imaginárius, azaz képzeletbeli. Az $r_{cl,t}$ mértékegysége [$s \cdot m^{-1}$], de a szakirodalomban a hőtranszportra vonatkozó [clo] mértékegység terjedt el. $1 \text{ clo-t} = 0,155 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$, ami alapján $1 \text{ clo-t} = 0,155 \cdot (\rho \cdot c_p) = 0,155 \cdot (1,2 \cdot 1004) = 186,7 \text{ s m}^{-1}$.

Az operatív hőmérséklet

Az operatív hőmérséklet ismert hőterhelés mutató. A következőképpen becsültük:

$$T_o = T_a + \frac{R_n}{\rho \cdot c_p} \cdot r_{Ha}. \quad (15)$$

Ahogy látjuk, a környezeti tényezőktől (lég hőmérséklet, sugárzás és szél) függ, a humán tényezőktől való függése elhanyagolható (az r_{Ha} parametrizációjában van elrejtve).

Az izzadásról röviden

A szakirodalom kétféle izzadást különböztet meg: a hőszabályozó és a szükséges izzadást. A hőszabályozó izzadást testtömegmérések alapján becsülik, ezzel szemben a szükséges izzadást az emberi test energiaegyenlegének maradék tagjaként határozzák meg. Látható, hogy az előbbi módszer megbízhatóbb információkon nyugszik, e tanulmányban is e módszert használtuk.

A mérések, megfigyelések helyszíne

A megfigyelések helyszíne: Martonvásár, a megfigyelő családi házának udvara. Ezen helyszín kiválasztása lehetővé tette azt, hogy a tömegmérés kezdete, vége, valamint az aktivitás (pihenés fekvő helyzetben) kezdete, vége közötti időszak hossza a lehető legrövidebb legyen.

Adatok

A tanulmányban időjárási és humán adatokat használtunk.

Időjárási adatok

A modell meghajtására szolgáló időjárási elemek a következők: léghőmérséklet, légnedvesség, átlagos szélsébség, a szélőkés sebessége, felhőzet és a relatív napfénytartam. Az összes adatot az utóbbi kettő kivételével a HungaroMet (Magyar Meteorológiai Szolgálat Nonprofit Zrt.), vagy az Időkép cégek automata állomásairól írtuk át, melyek légvonalbeli távolsága a megfigyelések helyszínétől kevesebb, mint 3 km. Ezek az adatok 10-perces átlagok. A felhőzet és a relatív napfénytartam értékeit a kiválasztott 10-perces időintervallumra a megfigyelő észlelte. A teljes besugárzás $W \cdot m^{-2}$ -ben kifejezett órás érték (Mihailović and Ács, 1985), és arra az órákzre vonatkozik, amelyben történt a 10-perces megfigyelés. Összesen 44 megfigyelést végeztünk 2023. június 12-től október 2-ig tartó időszakban. Az észlelt elemek a következő határok között változtak: a napsugárzás $370\text{--}870 \text{ W m}^{-2}$, a léghőmérséklet $22,2\text{--}33,0 \text{ }^\circ\text{C}$, az átlagos szélsébség $0,3\text{--}5,8 \text{ m s}^{-1}$, a relatív nedvesség $41\text{--}78\%$ és a felhőzet $0\text{--}0,9$ között változott. Összefoglalva: a globálisugárzás nagy volt, alkalmakként extrém nagy, az esetek többségében a léghőmérséklet nagyobb, mint $25 \text{ }^\circ\text{C}$, a levegő száraz, a legváltozékonyabb elemek a szélsébség és a felhőzet. Ez az állapot nyáron, az alföldi régiókban tipikus.

Humán adatok

Humán méréseket 1 ember végzett, a megfigyelő. A humán adatok információt adnak 1) a humán állapothatározókról, 2) a viselt ruházatról, 3) a testtömegről közvetlenül az aktivitás előtt és után, valamint 4) a testtömeg mérések időpontjairól és így a megfigyelés időtartamáról.

A megfigyelő testtömege 89 kg, magassága 190 cm, neme férfi, kora 68 év. A megfigyelések során mindig tomanadrágot viselt, és mindig fekvő helyzetben volt. A megfigyelések előtt és után volt testtömeg mérés, valamint a mérések időpontjának rögzítésére is sor került.

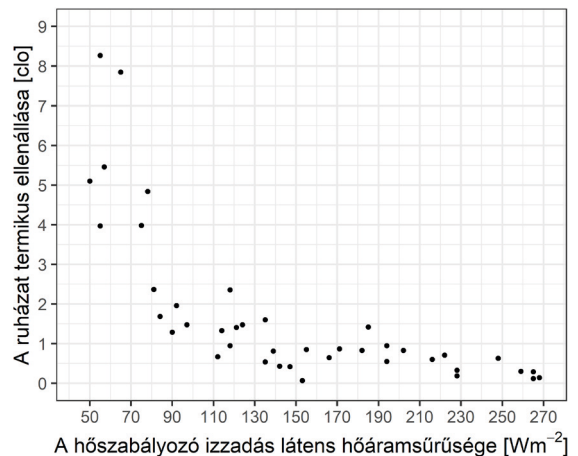
Eredmények

Minden méréskor számítottuk az imaginárius, maximálisan komfortos ruházat termikus és párolgási ellenállását, az operatív hőmérsékletet, a képzelt ruházat felszíni hőmérsékletét, parciális vízgőznyomását és a bőrfelszíni párolgás látens hőáram-sűrűségét. Külön elemeztük a) a ruházat termikus ellenállásának, $r_{cl,t}$ és a hőszabályozó izzadás látens hőáram-sűrűségének λE_{sw} kapcsolatát, b) a ruházat párolgási ellenállásának, $r_{cl,e}$ és az λE_{sw} kapcsolatát, c) az operatív hőmérséklet és a ruházat felszíni hőmérsékletének kapcsolatát, valamint d) az $r_{cl,t}$ értékek változásait az λE_{sw} értékek változásaira.

A ruházati termikus ellenállás és a hőszabályozó izzadás látens hőáram-sűrűségének kapcsolata

A képzelt komfortos ruházat termikus ellenállásának és a hőszabályozó izzadás látens hőáram-sűrűségének kapcsolatát reprezentáló pontfelhő a 2. ábrán látható.

Láthatjuk, hogy az $r_{cl,t}$ értékek igen nagyok is lehetnek, volt néhány 10 clo-t feletti értékünk is, ez akkor van, amikor a λE_{sw} kicsi. Hogyan magyarázhatók ezek az extrém clo-t értékek? Ehhez nézzük meg a (14)-et! Ezekben az esetekben a $T_{cl} > T_s$, ezért a $Hu < 0$, de nem sokkal, hanem 0 közeli, és mivel 0 közeli és a nevezőben van, az $r_{cl,t}$ extrém nagy lesz. Az $r_{cl,t}$ tart a végtelenbe, amikor a Hu tart a nullához, így az extrém $r_{cl,t}$ értékek inkább matematikailag és nem fizikailag értelmezendők. A legkisebb $r_{cl,t}$ értékek 0,10 clo-t körülílik, ekkor a bőrfelszíni párolgás 160-270 W m⁻², és a hőérzetünk neutrális, azaz, a termikus komfort állapotában vagyunk. Ezekben az esetekben a $Hu < 0$, és -100 W m⁻² körüli. Láthatjuk azt is, hogy az $r_{cl,t} - \lambda E_{sw}$ kapcsolat exponenciális függvényvel közelíthető.

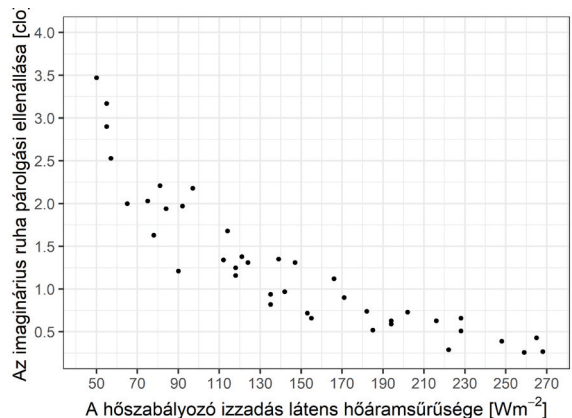


2. ábra. A megfigyelő képzelt ruházata termikus ellenállásának és a hőszabályozó izzadása látens hőáram-sűrűségének kapcsolatát reprezentáló pontfelhő. A pontok száma megegyezik a megfigyelések számával.

A ruházat párolgási ellenállásának és a hőszabályozó izzadás látens hőáram-sűrűségének kapcsolata

A képzelt ruházat párolgási ellenállásának és a hőszabályozó izzadás látens hőáram-sűrűségének kapcsolatát reprezentáló pontfelhő a 3. ábrán látható.

A kapcsolat jellege ugyanolyan, mint az $r_{cl,t}$ esetében: exponenciálisan csökkenő. A λE_{sw} növekedésével az $r_{cl,e}$ csökken. Nagyságának alakulását az $e_s(T_s) - e_a$ különbség, valamint a λE_{sw} kormányozzák. Az $r_{cl,e}$ értékek 0,26-3,5 clo-e értékek között változtak. E tartomány megfelel 75-1006 s m⁻¹ értékű tartománynak. Hangsúlyozzuk ki, hogy ezek az értékek a $\lambda E = \lambda E_s$ feltételből következnek.

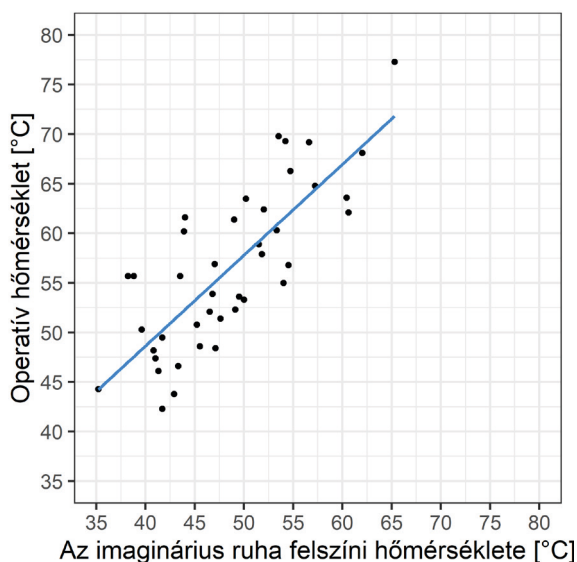


3. ábra A megfigyelő képzelt ruházata párolgási ellenállásának és a hőszabályozó izzadása látens hőáram-sűrűségének kapcsolatát reprezentáló pontfelhő. A pontok száma megegyezik a megfigyelések számával.

Az operatív hőmérséklet és a ruházat felszíni hőmérsékletének kapcsolata

A szimulált T_{cl} értékeket összevetettük az operatív hőmérséklet értékeivel, ami egy ismert környezeti hőterhelés mutató. A kapcsolatot reprezentáló pontfelhőt a 4. ábrán láthatjuk.

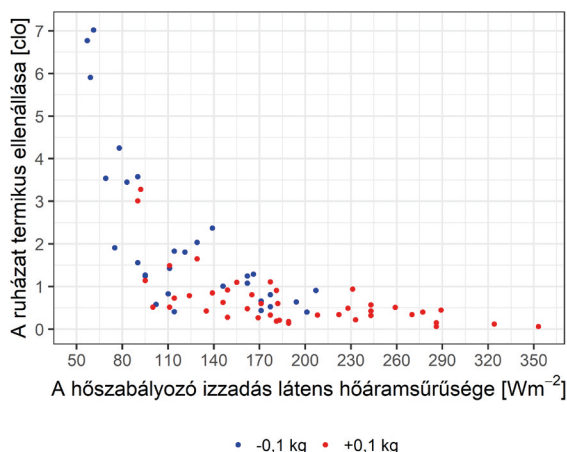
A T_o minden esetben nagyobb, mint a T_{cl} . A legnagyobb különbségek 10-13 °C körül vannak, de a pontok szóródásának mértéke elfogadható, a kapcsolat regressziós egyenessel jellemezhető, egyenlete $T_o = 0.92 \cdot T_{cl} + 11.96$. Vegyük észre azt is, hogy a T_{cl} legkisebb értéke 35 °C, azaz, méréseink során mindig nagyobb volt, mint a T_s . A legnagyobb T_{cl} értékek 60-62 °C körül vannak.



4. ábra Az operatív hőmérséklet és a megfigyelt képzelet ruházata felszíni hőmérsékletének kapcsolatát reprezentáló pontfelhő. A pontok száma megegyezik a megfigyelések számával.

A ruházat termikus ellenállásának érzékenysége a hőszabályozó izzadás látens hőáram-sűrűségének változásaira

Említettük, hogy a házimérleg pontossága 0,1 kg. Tekintettel arra, hogy a kiizzadt vízmennyiség értékek 0,1-0,6 kg között változtak, megnéztük, hogyan változnak meg az $r_{cl,t}$ értékek ezen kiizzadt vízmennyiségek 0,1 kg-al való megnövelésére (+0,1 kg), valamint 0,1 kg-al való csökkentésére (-0,1 kg). A kapott pontfelhőket az 5. ábrán láthatjuk.



5. ábra A megfigyelt képzelet ruházata termikus ellenállásának és a 0,1 kg-al megnövelt (piros), valamint 0,1 kg-al csökkentett (kék) izzadság látens hőáram-sűrűségének kapcsolatát reprezentáló pontfelhők.

A két pontfelhő viszonyát illetően láthatjuk, hogy a) a λE_{sw} értékek mentén el vannak tolódva (a piros pontok legnagyobb λE_{sw} értékei 320-350 W m⁻² között vannak, ezzel szemben a kék pontok legnagyobb λE_{sw} értékei 200 W m⁻² körüliek) és b) hasonló eltolódás észlelhető az $r_{cl,t}$ értékek között is (a piros pontok legnagyobb $r_{cl,t}$ értékei 3 clo-t körülílik, míg a kék pontok esetében ez 6-7 clo-t). A két pontfelhő közötti átfedés a 0,5-1,2 clo-t tartományban a legnagyobb. E tartományban a hőszabályozó izzadás látens hőáram-sűrűség értékei többnyire 140-200 W m⁻² körüliek. Az ábra egyértelműen mutatja az $r_{cl,t}$ értékek érzékenységét a λE_{sw} értékek változásaira, de a kapcsolat változatlanul exponenciális függvénnyel jellemezhető.

Röviden a modelltől és alkalmazhatóságáról

A modell a ruhafelszínre és a bőrfelszínre felírt energiaegyenlegeken alapul és ennek köszönhetően a ruházat hőmérsékletének becslésére is alkalmas. A T_{cl} számítása során az izzadás, ami a bőrfelszíni párolgás domináns tagja, meghatározó komponense az energiaegyenlegnek. Szerepe és nagysága összemérhető a sugárzási egyenleg fontosságával. A nagy besugárzás eseteiben $T_{cl} > T_s$, de mivel az ilyen esetekben a $Hu < 0$, az $r_{cl,t} > 0$, azaz, a modell alkalmazható. De, mi határozza meg a Hu értékét? A $Hu = M - \lambda E_s - W$, a modellben a fekvő helyzetre vonatkozó $M = M_b + 15$, a $W = 0,25 \cdot (M - M_b)$, ami alapján az $M = 55$ W m⁻² és a $W = 3,75$ W m⁻². Ha az izzadás mértéke 0,1 kg/30 perc és a megfigyelt testfelszíne 2,1 m², akkor a $\lambda E_{sw} = 66$ W m⁻².

Így, a $Hu = 55 - 66 - 3,75 = -14,75 \text{ W m}^{-2}$. Belátható, hogy már a közepes mértékű besugárzáskor ($S \approx 500 \text{ W m}^{-2}$) izzadhatunk 0,1 kg/30 perc mértékben, akkor is, ha fekszünk. Extrém nagy besugárzások esetén (850 W m^{-2}) az izzadás mértéke nagyobb, legyen pl. 0,5 kg/45 perc, ami 220 W m^{-2} . Ebben az esetben a $Hu = 55 - 220 - 3,75 = -168,75 \text{ W m}^{-2}$. Ez markánsan csökkenti az $r_{cl,t}$ értékét, amely tart a nullához, ami a termikus komfort. E példák azt mutatják, hogy a besugárzással járó hőterhelést az izzadás hűtőhatásával ellensúlyozzuk, és e modell alkalmas e tipikus nyári hőterhelések jellemzésére a humán komfort szempontjai alapján is.

Legvégül, jegyezzük meg, hogy a modell minden aktivitástípusra futtatható, így pl. gyaloglás vagy futás esetén is. Az alkalmazhatóság nagymértékben függ a Hu előjelétől. A nyári helyzetekben ($T_{cl} > T_s$) a modell csak akkor alkalmazható, ha a $Hu < 0$. A Hu előjele viszont nagymértékben függ az $(M - \lambda E_{sw})$ különbségtől. Hangsúlyozandó, hogy az M és a λE_{sw} nem függetlenek egymástól, ugyanis az M növekedésével nő a λE_{sw} is. A két változó egymás közötti kapcsolata azonban sok szempontból ismeretlen, ráadásul, mindkét változó erősen egyénspecifikus, ezért nehéz általánosítani. Legeslegvégül, jegyezzük meg, hogy e kutatások már nem a humán biometeorológia, hanem az antropológia tárgykörébe tartoznak.

Diszkusszió

A ruházat akkor komfortos, ha száraz és ha termikusan neutrális. A termikus neutralitás azt jelenti, hogy a ruházatban nem fázunk, de melegünk sincs. E modellben megvalósítottuk az előbbi követelményeket. A termikus neutralitás feltételét azzal, hogy alkalmaztuk a ruházatra és az emberi testre vonatkozó energiaegyenlegeket, a száraz ruházat feltételét pedig azzal, hogy a bőrfelszín és a ruhafelszín elhagyó látens hőáramsűrűségeket kiegyenlítettük. Így, a ruházatot nemcsak termikus, hanem nedvességi szempontból is jellemeztük, ennek megfelelően a modell egy termikus és egy párolgási modulból áll. Ilyenként ez egy új modell, a nemzetközi angol nyelvű szakirodalomban még hasonló sincs. A párolgási modul alkalmazásával a termikus modult az extrém nyári időjárási helyzetekben is alkalmazhattuk, így a modellünk az év minden évszakában és időjárási helyzetében alkalmazható. A hőhiányos helyzetekben (tél, ősz, éjszaka) ugyanazokat az eredményeket adja, mint az előbbi ruházati ellenállás modellünk (Ács *et al.*, 2021, 2022, 2023), amellyel nem becsültük a T_{cl} -t és a λE_{sw} -t. Kihangsúlyozandó az is, hogy e modell minden aktivitásra alkalmazható,

ha az aktivitást jellemző M és λE_{sw} ismert. Az előbbi modelljeinkben az aktivitás főleg $1,1 \text{ m s}^{-1}$ sebességű gyaloglás volt. A modellünk alkalmazhatóságának vizsgálata gyaloglás és futás során a jövőbeni kutatásaink egyik fontos célja. Mondhatjuk, hogy a modellünk „univerzális”, olyan szempontból, hogy elvileg alkalmazható minden klímában, időjárásban és aktivitás során. A modell meghatározó élettani változói az M és a λE_{sw} , amelyek erősen aktivitás-függőek.

Az előbbi fejezetben már említettük, hogy a modell alkalmazhatósága szempontjából nagyon fontos az M és a λE_{sw} egymáshoz való aránya. A λE_{sw} függ az M -től, de e függés mértéke, módja nincs számszerűsítve. A λE_{sw} függ a hőterheléstől is, ugyanakkor saját tapasztalatunk alapján mondhatjuk, hogy a közepes (500 W m^{-2}) és nagy (850 W m^{-2}) besugárzási viszonyokban a λE_{sw} értékei megjósolhatatlanok, kiszámíthatatlanok, mert $50\text{--}270 \text{ W m}^{-2}$ között is lehetnek. A modellben használt λE_{sw} a hőszabályozó izzadás (angolul: regulatory sweating), ez nem tévesztendő össze és egyenlő a „szükséges” izzadással (angolul: required sweating), amit az energiaegyenlegről kapunk maradék tagként.

A kapott $r_{cl,t}$ és $r_{cl,e}$ értékeket nem tudjuk verifikálni, mert ezek a komfortot biztosító képzelt ruházatra vonatkoznak. A valós, viselt ruházat sok mindenben eltér e képzelt ruházattól. A különböző ruházati termikus ellenállás modellek összehasonlításával Ács és mtsai. (2023) foglalkoztak, a fő megállapításuk az volt, hogy az emberek általában úgy öltözködnek, hogy nincsenek a környezettel termikus egyensúlyban. Ugyanakkor azt is tudjuk, hogy izzadásunk során a ruházat általában benedvesedik (nedvességnövekedés a ruhában), azaz, nem marad száraz, mert a látens hőáramsűrűségek nem egyenlők, hanem konvergensek. A modell határozottan jó működik, amikor a besugárzás extrém nagy (800 W m^{-2}) és az izzadás mértéke is nagy (minimum 0,3 kg/30 perc). Ekkor az $r_{cl,t}$ értékek 0,6 clo-t körülílik, ami már termikusan neutrális közeli állapotnak tekinthető (Ács *et al.*, 2022). Az ilyen helyzetekben tényleg helytálló a „hőszabályozó izzadás” kifejezés. Az ilyen esetekben az $r_{cl,t}$ értékek is a legalacsonyabbak, 0,2–0,7 clo-e körülílik. Aláhúzendő, hogy a termikus és a párolgási ellenállás modellek nem függetlenek egymástól, azaz, az $r_{cl,t}$ értékek alakulását a párolgási modell is kormányozza a ruházat energiaegyenlegén, vagyis a T_{cl} számított értékén keresztül. Az $r_{cl,t}$ és az $r_{cl,e}$ termikus és párolgási ellenállások erősen függenek a λE_{sw} -től. E függés exponenciálisan csökkenő regressziós függvényen is jellemezhető. A λE_{sw} individuális emberi reakció az időjárás

hőterhelésére, a viselt ruházatra és az adott aktivitásra. Minden egyén esetében ez más és más, az általánosításra keresztmetszeti (egy időjárási helyzetben több ember mérése) megfigyelésekre van szükség.

Konklúzió

E munkában továbbfejlesztettük a ruházati ellenállás modellek filozófiáját. E modelleket eddig (Ács *et al.*, 2019, 2021, 2022, 2023) csak a téli évszakban és a hideg klímákban alkalmazták, mert az izzadás folyamatát nem vették számításba a ruházati termikus ellenállás becslése során. E munkában a koncepciót változtatva mértük az izzadás mértékét és a ruházat termikus ellenállása mellett a ruházat párolgási ellenállását is becsültük. A megfigyeléseket 1 személy végezte fekvő helyzetben 2023 nyarán. A fő következtetéseink a következők: 1) a nyári nagy hőtöbblet sikeresen szimulálható ruházati ellenállás modellel is mérve az izzadás mértékét, 2) az új modell sikeres alkalmazásához igen fontos az M és a λE_{sw} minél pontosabb ismerete, és 3) az M és a λE_{sw} fontos változók a humán biometeorológiai modellekben, de kapcsolatukról keveset tudunk.

Irodalom

- Auliciems, A. and de Freitas, C.R., 1976: Cold stress in Canada: a human climatic classification. *Int. J. Biomet.* 20, 287–294.
- Auliciems, A. and Kalma, J.D., 1979: A Climatic Classification of Human Thermal Stress in Australia. *J. Appl. Meteorol.* 18, 616–626. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8470.1981.tb00373.x>.
- Ács, F., Kristóf, E., Zsákai, A., 2019: New clothing resistance scheme for estimating outdoor environmental thermal load. *Geogr. Pannonica* 23, 245–255. <https://doi.org/10.5937/gp23-23717>
- Ács, F., Zsákai, A., Kristóf, E., Szabó, A. and Breuer, H., 2021: Human thermal climate of the Carpathian Basin. *Int. J. Climatol.* 41. <https://doi.org/10.1002/joc.6816>
- Ács, F., Zsákai, A., Kristóf, E., Szabó, A.I. and Breuer, H., 2022: Individual local human thermal climates in the Hungarian lowland: Estimations by a simple clothing resistance-operative temperature model. *Int. J. Climatol.* 43, 1273–1292. <https://doi.org/10.1002/joc.7910>
- Ács, F., Szalkai, Z., Kristóf, E. and Zsákai, A., 2023: Thermal Resistance of Clothing in Human Biometeorological Models. *Geogr. Pannonica* 27, 83–90. <https://doi.org/10.5937/gp27-40554>
- Ács, F., Kristóf, E. and Zsákai, A., 2024: Esszé az emberi hőterhelésről és hőérzékelésről. *Légekör*, 69, 111–120. <https://doi.org/10.56474/legkor.2024.2.5>
- Ács, F., Kristóf, E. és Zsákai, A., 2024a: A pulzus és a bőrfelszíni párolgás időjárástól való függése: elemzés kiválasztott nyári időjárási helyzetekre. *Légekör*, 69, 231–241.
- Burton, A.C. and Edholm, O.G., 1955: Man in a Cold Environment. Edward Arnold, London, 273.
- Campbell, G.S. and Norman, J.M., 1998: An introduction to Environmental Biophysics. Springer, New York, USA, 286.
- Dubois, D. and Dubois, E.F., 1915: The Measurement of the Surface Area of Man. *Arch. Inter. Med.* 15, 868–881. <https://doi.org/10.1001/archinte.1915.00070240077005>
- Fanger, P.O., 1970: Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering. Danish Technical Press, Copenhagen, 244 pp.
- Katić, K., Li, R. and Zeiler, W., 2016: Thermophysiological models and their applications: A review. *Build. Environ.* 106, 286–300. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.031>
- Mihailović, D.T. and Ács, F., 1985: Calculation of daily amounts of global radiation in Novi Sad. *Időjárás* 89, 257–261.
- Yan, Y.Y. and Oliver, J.E., 1996: The Clo: A Utilitarian Unit to Measure Weather/Climate Comfort. *Int. J. Climatol.* 16, 1045–1056. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199609\)16:9<1045::AID-JOC73>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199609)16:9<1045::AID-JOC73>3.0.CO;2-O).
- Yan YY., 2005: Human Thermal Climates in China. *Physical Geography* 26(3), 163–176. <https://doi.org/10.2747/0272-3646.26.3.163>.