



Esszé az emberi hőterhelésről és hőérzékelésről

Ács Ferenc, Kristóf Erzsébet, Zsákai Annamária

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

DOI:10.56474/legkor.2024.2.5

Viselt ruházatunkat alapvetően a kültéri (időjárás) vagy beltéri (a helység mikroklímája) hőterhelés és annak érzékelése határozza meg. Életünkben a termikus komfort megléte vagy elérése alapvető fontossággal bír. E tanulmányban a kültéri levegőkörnyezet hőterhelését becsültük egy ruházati termikus ellenállás-operatív hőmérséklet modell alapján, és a hőterhelést megfigyelt hőérzet-kategóriák hozzárendelésével is jellemeztük. A hőterhelés és a hőérzet közötti kapcsolatrendszer a Kárpát-medence alföldi régióiban jellemző ún. hideg-típusú időjárási helyzetekben (ld. Kislexikon) elemeztük. Megállapítottuk, hogy Magyarország alföldi területein, nyáron, nagy besugárzás és magas léghőmérséklet esetén az operatív hőmérséklet (T_o) 70–80 °C is lehet. Télen -10 °C körüli léghőmérséklet és derült égbolt esetén a T_o kisebb -20 °C-nál és a ruházati termikus ellenállás 3–3,5 clo (mértékegység a ruhák hőszigetelő képességére, 1 clo = 0,155 m²·°C·W⁻¹) körüli. Ilyenkor az emberek hőterhelésében és szubjektív hőérzékelésében nagy különbségek lehetnek. A termikus komfort állapotában a ruházati termikus ellenállás 0–0,5 clo közötti, a T_o pedig 20 és 30 °C között változik. Ilyenkor a hőterhelés és a hőérzet emberek közötti változékonysága a legkisebb.

Essay on human thermal load and thermal perception

The clothing we wear is basically determined by the outdoor (weather) or indoor (local microclimate) thermal load and its perception. Experiencing or achieving thermal comfort is a fundamental aspect of our lives. In this study, we estimated the thermal load of the outdoor air environment based on a clothing thermal resistance-operative temperature model, and we also characterized the thermal load by assigning the observed thermal sensation categories. The thermal load-thermal perception relationships are analysed for „cold-weather” situations (weather in which clothing resistance values are greater than zero) in the lowland regions of the Carpathian Basin. We found that in summer in lowland areas of Hungary, in case of high irradiation and high temperature (thermal sensation category: very warm), the operative temperature (T_o) is about 70–80 °C. In winter, at air temperatures around -10 °C and in clear sky conditions (thermal perception category: very cold), T_o is less than -20 °C and clothing thermal resistance is 3–3.5 clo (measurement unit for the thermal insulation of clothes, 1 clo = 0.155 m²·°C·W⁻¹). In such cases, there can be large interpersonal differences in people’s thermal load and thermal perception. In the thermally neutral state, clothing thermal resistance varies roughly between 0–0.5 clo and T_o between 20 and 30 °C. In these cases, the interpersonal variability of thermal load and thermal perception is the smallest.

1.1. Az emberi hőterhelés-modellek és a PET index hőérzet-kategóriái

Manapság már egy tucat emberi hőterhelést szimuláló modell van (*de Freitas and Grigorieva, 2015; Potchter et al., 2018*). Az első modelleket egy-egy kiválasztott meteorológiai elem alkotta (*Bruce, 1916; Macpherson, 1962*), vagy valamilyen kombinációjuk (*Thom, 1959*). A múlt század második felében azonban megjelentek az emberi test energiaegyenlegén alapuló komplexebb modellek is (*Fanger, 1970; Gagge et al., 1971*), melyek népszerűsége állandóan nőtt. E modellekben ún. „standard” vagy „átlagos” ember szerepel. Így pl. a leggyakrabban használt PET-modellben (PET-Physiological Equivalent Temperature (Fiziológiailag Ekvivalens Hőmérséklet)) a „standard” ember egy fiktív ember, aki 35 éves, férfi, 75 kg-os és 175 cm magas. E „standard” ember hőérzetét *Matzarakis and Mayer (1996)* jellemezte. A hőterhelést a PET indexszel írták le, dimenzióját °C-ban adták meg. A PET tehát egy °C-os dimenzióval rendelkező hőterhelés-mutató, amit indexnek kereszteltek el. A °C-ban kifejezett PET index határértékei és a hőérzet-kategóriák közötti kapcsolatot az 1. táblázat szemlélteti.

PET index (°C) határértékei	Hőérzet-kategória
41 < PET	nagyon forró
35 < PET ≤ 41	forró
29 < PET ≤ 35	meleg
23 < PET ≤ 29	enyhén meleg
18 < PET ≤ 23	neutrális
13 < PET ≤ 18	enyhén hűvös
8 < PET ≤ 13	hűvös
4 < PET ≤ 8	hideg
PET ≤ 4	nagyon hideg

1. táblázat. A PET index °C-ban kifejezett határértékei és a PET index modellben szereplő „standard” ember hőérzet kategóriái közötti kapcsolat.

Matzarakis and Mayer (1996) nem ismertették az eljárást, a módszertant, ami alapján megállapították a PET index formájában kifejezett hőterhelés határértékek és a hőérzet-kategóriák közötti kapcsolatot. Utaltak arra, hogy e táblázat a nyugat- és közép-európai

klímában élő, e klímához alkalmazkodott „standard” emberre vonatkozik. Említsük meg, hogy Nyugat- és Közép-Európa klímája *Köppen (1936)* szerint többnyire *Cfb* (*C*–meleg mérsékelt, *f*–nincs szezonális csapadék évi változásában, *b*–meleg nyár) klímaképlettel jellemezhető, míg *Feddema (2005)* szerint e klíma “hűvös, nedves”, “hűvös, nyirkos”, vagy “hűvös, száraz” a “hőmérséklet nagy, vagy extrém ingadozásával”. Legvégül megemlítendő az is, hogy a komfort zónát (neutrális hőérzet) jellemző hőterhelés határértékek klímától klímáig változnak (*Cohen et al., 2013; Potchter et al., 2018*).

1.2. Az emberi hőérzékelés mechanizmusa

Az emberi hőérzékelést termoreceptoroknak (az érzőreceptorok egyik fajtája) nevezett specializált hámsejtek végzik. Négy termoreceptor fajta van: a meleg, a hideg, a fájdalmasan meleg és a fájdalmasan hideg érzékelésére specializált receptorok. Amennyiben a bőrfelszín hőmérséklete 33 °C-os, azt az emberi test termikusan közömbösnek (se nem hideg, se nem meleg) érzékeli. A hideg receptorok a 15–33 °C-os tartományban, a fájdalmasan hideg receptorok pedig a 15 °C-nál alacsonyabb hőmérsékleteken lépnek működésbe. A meleg termoreceptorok 33–45 °C-os tartományban, míg a fájdalmasan meleg receptorok a 45 °C-nál magasabb hőmérsékletek esetén regisztrálnak. A receptorokban a környezeti hőterhelés hatására elektromos ingerület keletkezik, amit szaknyelven akciós potenciálnak nevezünk. Ez az akciós potenciál a receptorok falán jön létre, a fal külső és belső oldala közötti potenciálkülönbséget jelenti. A sejtfal két oldala közötti potenciálkülönbség a sejtfalba beágyazott ionpumpaként működő fehérjék révén alakul ki. E komplex, ionszűrőként működő fehérjék molekuláris hőmérők, mivel a rajtuk áthaladó iontöltésmennyiség nagysága mérhetően függ a kültéri hőmérséklettől (*Vriens et al., 2014*). Ezekből több fajta van (*Zhang, 2015*), és a fent említett kritikus hőmérsékleti értékek ezen ionpumpák hőmérséklet-függő működéseivel kapcsolatosak. A létrejött akciós potenciál vezetése öntovaterjedő folyamat, hasonló ahhoz a folyamathoz, amit egy puskaporcsíkon tapasztalhatunk, ha a végén meggyújtjuk. Ezen elektromos jelként tovaterjedő ingerület, áttevődve neuronról neuronra, átjutva az idegrostokon eljut az agy különböző tartományaiiba, ahol az hőérzetté konvertálódik. E konverzió fizikai megvalósulásáról a mai napig is keveset tudunk.

1.3. Cél

E tanulmány célja 1) az individuális ruházati termikus ellenállás-operatív hőmérséklet modellt részletes bemutatása, valamint 2) az individuális emberi hőterhelés és hőérzet kapcsolatát jellemző klimatológiai adatbázis értékelésével kapott főbb eredmények ismertetése a) az extrém hőterhelések, b) a hőterhelést meghatározó főbb időjárási elemek és c) az individuális hőterhelések és hőérzetek közötti eltérések vonatkozásában.

2. Módszerek

Négy módszert fogunk ismertetni: az emberi hőterhelést szimuláló ruházati termikus ellenállás modellt, az emberi hőérzékeléssel kapcsolatos módszertani alapelemeket, a hőterhelés és a hőérzet kapcsolatát jellemző adatsorok kezelési módszertanát és a testforma leírására szolgáló Heat-Carter-féle szomatotipizálási módszert.

2.1. Ruházati termikus ellenállás modell

A ruházati termikus ellenállás modell fizikájának részletes leírása megtalálható Ács és munkatársai (2019, 2021a, 2022) tanulmányaiban. A modell a) az emberi test energia-egyenlegén alapul, és b) az emberi testet egy egységes hengerként kezeli (Katić et al., 2016). A modell a ruházattal borított emberi test és a környezet közötti hőcsere-folyamatokat taglalja. A különböző hőszabályozási folyamatok (pl. izzadás, didergés) taglalását viszont mellőzi. Megjegyzendő, hogy az r_{cl} - T_o modell sokkal egyszerűbb, mint a PET modell. A modellben az emberi test belsejének hőmérséklete (37 °C) és a bőrfelszín hőmérséklete (34 °C) határfeltételek. A modell feltételezi, hogy a ruházat a) befedi az emberi testet teljes egészében, b) szorosan tapad a bőrhöz, valamint azt is, hogy a ruházat és a bőrfelszín albedója megegyezik. Kültéri környezetben $1,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($4 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) sebességgel gyalogoló, nem izzadó embert szemlélünk. Ezúttal csak a ruházati termikus ellenállás (r_{cl}), az operatív hőmérséklet (T_o) és az aktivitáshoz tartozó (gyaloglás) metabolikus (M) hőáram-sűrűség számítását ismertetjük. Ez alapján

$$r_{cl} = \rho \cdot c_p \cdot \frac{T_s - T_o}{M - \lambda E_{sd} - \lambda E_r - W} - r_{Hr}, \quad (1)$$

$$T_o = T_a + \frac{R_{ni}}{\rho \cdot c_p} \cdot r_{Hr}, \quad (2)$$

ahol ρ a levegő sűrűsége ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), c_p a levegő állandó nyomáson vett fajhője ($\text{Jkg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$), T_s a bőrfelszín

hőmérséklete (°C) (állandó, 34 °C), r_{Hr} a teresztriális sugárzási és a konvektív hőtranszporttal szembeni kombinált ellenállás paraméter (sm^{-1}), T_a a levegő hőmérséklete (°C), R_{ni} az izotermális sugárzási egyenleg energiaáram-sűrűsége (Wm^{-2}), λE_{sd} a száraz bőr párolgása (Wm^{-2}), λE_r a respirációs párolgás (Wm^{-2}) és W az izmok mechanikai munkavégzésének hőáram-sűrűsége (Wm^{-2}) az adott aktivitás során, a mi esetünkben a gyaloglás során. Mindkét paraméter, az r_{cl} és a T_o is hőterhelés mutató. A fő különbség közöttük az, hogy az r_{cl} ezt hőszigetelésként, míg a T_o hőmérsékletként fejezi ki, egyébként mindkét kifejezés az energiaegyenlegből következik függetlenül attól, hogy ez itt nincs megmutatva. A T_o használata praktikus, és értelemszerűen integrálja a légköri hőterhelést okozó tényezőket. A sugárzási egyenleget az izotermális sugárzási egyenleg bevezetésével és használatával becsültük,

$$R_{ni} = S \cdot (1 - \alpha_{cl}) + \epsilon_a \sigma T_a^4 - \epsilon_{cl} \sigma T_o^4, \quad (3)$$

ahol S a teljes besugárzás, α_{cl} a ruházat albedója, ϵ_a a légkör emisszivitása, ϵ_{cl} a ruházat vagy a bőrfelszín emisszivitása és σ a Stefan–Boltzmann állandó. A modellünkben $\alpha_{cl} = 0,25\text{--}0,27$, $\epsilon_{cl} = 1$. A függőleges felszín helyett vízszintes felszínt választottunk a minél egyszerűbb számítások végett. A globálsugárzást a relatív napfénytartam rsd alapján becsültük Mihailević és Ács (1985) munkája alapján,

$$S = Q_0 \cdot [\alpha + (1 - \alpha) \cdot rsd], \quad (4)$$

ahol Q_0 az adott órára vonatkozó globálsugárzási állandó ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{óra}^{-1}$) derült égbolt esetén, és α ugyan ezen óráközre vonatkozó dimenziótlan sugárzási állandó. A relatív napfénytartam a hőérzet-megfigyelések időtartamára (5–10 perc) és az emberi testre vonatkozó adat, azaz, egyenlő a napsütötte emberi test időtartamának és a hőérzet-megfigyelés időtartamának hányadosával. Jelezzük, hogy az $S \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ dimenzióban megkapott értékét Wm^{-2} dimenzióra konvertáltuk! A kombinált sugárzás-konvektív ellenállási paraméter r_{Hr} a sugárzási r_R és a konvektív tagok r_{Ha} következő kombinációja:

$$\frac{1}{r_{Hr}} = \frac{1}{r_{Ha}} + \frac{1}{r_R}, \quad (5)$$

$$r_{Ha} [\text{sm}^{-1}] = 7.4 \cdot 41 \cdot \sqrt{\frac{D}{U_{1.5}}}, \quad (6)$$

$$\frac{1}{r_R} = \frac{4\epsilon_{cl}\sigma T_a^3}{\rho c_p}, \quad (7)$$

ahol D (m) annak a hengernek az átmérője, amellyel közelítjük az emberi testet, $U_{1,5}$ a levegő emberi testhez viszonyított áramlási sebessége az ember mell-magasságában (ez kb. 1,5 m). $U_{1,5}$ -t a 10 m-es magasságban mért sebességből becsültük a neutrális rétegződéshez tartozó profil alapján.

Weyand *et al.* (2010) alapján az adott aktivitáshoz tartozó metabolikus energiaáram M (W) (a mi esetünkben gyalogoló ember) a következőképpen becsülhető,

$$M = M_b + M_w, \quad (8)$$

ahol M_b az alapanyagcsere hőáram-sűrűsége (a nyugalmi helyzetben levő ember) és M_w a gyalogolás metabolikus hőáram-sűrűsége. Mindkét tag az ember állapothatározói (pl. nem, kor (év), testtömeg M_{bo} (kg), magasság L_{bo} (cm)) alapján becsülhető. M_b -parametrizációk vannak, ezeket Frankenhfield *et al.* (2005) tekintették át. Ezek közül Mifflin *et al.* (1990) parametrizációja az egyik legjobb:

$$M_b^{jérfi} [kcal\cdot nap^{-1}] = 9.99 \cdot M_{bo} + 6.25 \cdot L_{bo} - 4.92 \cdot kor + 5, \quad (9)$$

$$M_b^{nó} [kcal\cdot nap^{-1}] = 9.99 \cdot M_{bo} + 6.25 \cdot L_{bo} - 4.92 \cdot kor - 161. \quad (10)$$

A képletekben a ma már nem szokványos $kcal$ mértékegység szerepel, tudnunk kell, hogy $1 kcal = 10^3 cal$ és $1 cal = 4,187 J$. Ahhoz, hogy az M_b -t Wm^{-2} -ben megkaphassuk, az emberi test felszínét A (m^2) is becsülnünk kell. Az A -t Dubois and Dubois (1915) képlete alapján számítottuk ismerve az M_{bo} -t és az L_{bo} -t,

$$A = 0.2 \cdot M_{bo}^{0.425} \cdot \left(\frac{L_{bo}}{100}\right)^{0.725}. \quad (11)$$

$$M_w = 1.1 \cdot \frac{3.80 \cdot M_{bo} \cdot \left(\frac{L_{bo}}{100}\right)^{-0.95}}{A} \quad (12)$$

Az M_w -t Weyand *et al.* (2010) alapján parametrizáltuk, Weyand *et al.* (2010) munkájának (1)-es képlete az 1 m-es hosszúságú útra vonatkozik. Mivel a mi esetünkben a másodpercenként megtett út hossza 1,1 m, Weyand (1)-es formuláját 1,1-del szoroztuk. Elosztva ezt az értéket A -val, megkapjuk az M_w -t Wm^{-2} -ben. A $\lambda E_{sd} + \lambda E_r$ összeg az M alapján is becsülhető Campbell and Norman (1998) szerint. W -t Auliciems and Kalma (1979) alapján számítottuk.

2.2. A hőérzet megfigyelése

E tanulmány első két szerzője (humán állapotathatározók és metabolikus hőáram-sűrűség jellemzőik az 1. táblázatban vannak) végzett hőérzet-megfigyeléseket. A megfigyelés olyan szempontból sajátos, hogy a hőérzet-skálát diszkrét hőérzet-kategóriák alkotják a megfigyelés számszerűsíthetősége miatt. Az általunk használt hőérzet kategóriák a következők: “nagyon hideg”, “hideg”, “hűvös”, “neutrális”, “enyhén meleg”, “meleg” és “nagyon meleg”. A megfigyelések protokollszerűen zajlottak: termikusan neutrális környezetből jöve, minimum 5 perces kültéri kitétségekben lenni ugyanazon a helyen a neutrális hőérzethez tartozó ruházatban, sapka, kesztyű használata nélkül. A megfigyelők nem izzadtak, nem dideregtek, és nem éreztek semmilyen vérkeringésbeli változást az 5–10 perces megfigyeléseik során. Megemlítendő az is, hogy a megfigyelők itt születve adaptálódtak a régió klímájához. A régió klímája Köppen (1936) értelmezésében Cfb (C -meleg mérsékelt, f -nincs szezonális csapadék évi változásában, b -meleg nyár), míg Feddema (2005) értelmezésében “hűvös, száraz, a hőmérséklet extrém ingadozásával”.

Láthatjuk, hogy Köppen szerint a klímánk “meleg mérsékelt”, meleg nyárral, míg Feddema szerint “hűvös”, a hőmérséklet extrém ingadozásával. E leírások inkább ellentmondanak egymásnak, mintsem illeszkednek egymáshoz. A leírás nem a hőterhelést, hanem a hőérzetet jellemzi, ami viszont szubjektív és individuális. Egyik motivációnk hőérzet-megfigyeléseink során az volt, hogy klímánkat a hőérzet szempontjából minél pontosabban jellemezzük.

2.3. A hőterhelés és a hőérzet adatok kezelése

A hőterhelést meghatározó időjárás adatokat és a hőérzet adatokat egyidőben gyűjtöttük, azaz, az időjárási adatok a hőérzékélés időtartamára vonatkoznak. Ezen adatsorokat minőségileg ellenőriztük, úgy, hogy megvizsgáltuk az időjárási adatokból számított hőterhelés és a megfigyelt hőérzet-kategória közötti megfelelést. Csak az egymással párosítható hőterhelés-hőérzet adatpárokat vittük be az adatbázisba. A megfeleltetést mind az r_{cl} -hőérzet mind a T_o -hőérzet adatpárookra elvégeztük. Minden egyes megfeleltetés során egy r_{cl} érték, egy T_o érték és a megfigyelt hőérzet-kategória összeegyeztethetőségét ellenőriztük. Az r_{cl} esetében értelemszerűen csak a hőhiányt jellemző hőérzet-típusok lehetségesek, így a “nagyon hideg”, a “hideg”,

a “hűvös” és a “neutrális” hőérzet-típusok. Ugyanis, az r_{cl} egy ellenállás paraméter, ezért csak pozitív lehet (a negatív ellenállás értelmezhetetlen). A 0 clo körüli r_{cl} értékhez értelemszerűen csak neutrális (közömbös) hőérzet-kategória párosítható. A T_o esetében a párosítás értelemszerűen kiterjed az összes hőérzet-típusra a “nagyon hidegtől” kezdve a “neutrálison” át a “nagyon melegig”. Az adatsorunkat statisztikailag is karcúsítottuk, úgy, hogy a T_o értékekből az 5. percentilis alatti és a 95. percentilis feletti értékeket kihagytuk az elemzéseinkből.

2.4. A Heath-Carter-féle testforma osztályozás

A morfológiai testalkat számszerű jellemzésére vezették be 1990-ben a Heath-Carter-féle testalkat-osztályozó módszert, amely napjaink antropometriai vizsgálataiban még mindig a leggyakrabban használt módszer a testalkat tipizálásakor (Carter és Heath, 1990). Több előnye közül kiemelendő, hogy néhány testméret ismeretében egyszerre becsülhető az emberi test relatív zsírossága (endomorfia komponens), a csontzat-izomzat kifejezettsége (mezomorfia komponens) és a nyúlánkság mértéke (ektomorfia komponens) is. E három szomatotípus (Izd. Kislexikon) komponens dominanciaviszonyai (melyik komponens vagy melyik kettő komponens dominál az alkatban) pedig lehetőséget teremtenek arra, hogy a vizsgált személy alkatát a Carter (2002) által bevezetett 13 alkati típus egyikébe besorolhassuk. Az egyéni, illetve a csoportokra jellemző, átlagos szomatotípusokat a kétdimenziós szomatotérképén tudjuk megjeleníteni. A térképen a három komponens transzponálásával nyert x-y koordináták segítségével helyezendők el a szomatotípusok egy gömbháromszöghöz viszonyítva. A gömbháromszög három csúcsa az extrém endomorf, mezomorf, illetve ektomorf alkati típusokat reprezentáló pontok (lásd 5. Eredmények). Megjegyzendő, hogy valós alkati típusok vannak a háromszög területén kívül is, azaz, a gömbháromszög oldalai nem jelölnek ki határokat az alkati típusok előfordulásában. A szomatotérkép középső régiójában elhelyezkedő, ún. centrális alkati típusok esetében a három komponens egyenlő mértékben alakítja a testalkatot, egyik komponens sem dominál a testalkatban.

3. A megfigyelések helyszínei

A megfigyelések helyszínei: Martonvásár és Budapest XIV. kerületének kertvárosi része. A martonvásári és a budapesti helyszínek képeit a Google Maps

helymeghatározó szoftver segítségével állítottuk elő, ezek az 1. és a 2. ábrán láthatók.

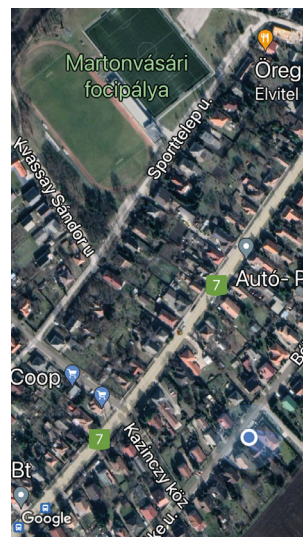
4. Adatok

Két adattípus van: időjárási és humán adatok. Ezek főbb jellemzőit a következőkben taglaljuk.

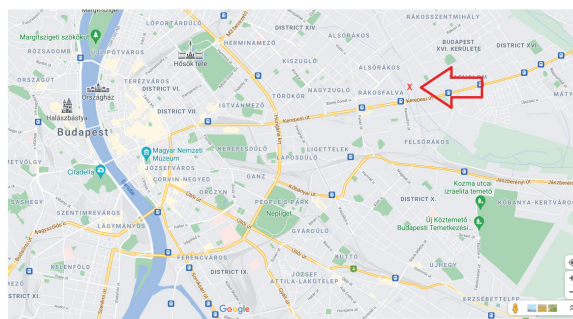
4.1. Időjárási adatok

Az időjárási adatok közül a léghőmérsékletet, a légnedvességet, a szélesebséget, a szél-erősséget, a felszíni légnyomást, a felhőzetet és relatív napfénytartamot használtuk. Az összes adatot az utóbbi kettő kivételével a HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Non-profit Zrt. vagy az Időkép Kft. automata állomásairól írtuk át, melyek légvonalbeli távolsága a megfigyelések helyszínétől három km-nél kisebb volt. A felhőzet és a relatív napfénytartam adatokat a megfigyelők biztosították. A teljes besugárzást a 2.1. fejezetben ismertetett parametrizáció alapján ((4)-es képlet) számítottuk. Hőérzet-megfigyeléseket csak 2 személy végzett, a továbbiakban ők 1. és 2. személyként szerepelnek.

Az 1. személy megfigyelési időszaka 2020. április 1-jétől 2021. február 20-áig tartott. Az adott időszakban igen változatos volt az időjárás, és voltak mind nappali (a bejövő napsugárzás nagyobb, mint nulla), mind esti/éjjeli (nincs napsugárzás) megfigyelések. A megfigyelések kb. 40%-a az esti/éjjeli időszakra



1. ábra. A hőérzet-megfigyelés helyszíne (kék pont) Martonvásáron a Google Maps helymeghatározó szoftver alapján.



2. ábra. A hőérzet-megfigyelés helyszíne Budapesten a Google Maps helymeghatározó szoftver alapján.

esett, ekkor a léghőmérséklet -11 és 28 °C között változott, többnyire szélsőséges uralkodott, de voltak igen szeles esetek is, amikor az átlagos szélsőségek 4 és 7 ms⁻¹ közötti értékeket vett fel. A relatív nedvesség 40-100% volt. A nappali időszakban a becsült globálisugrás 10 és 850 Wm⁻² közötti, míg a léghőmérséklet -9 és 32 °C között változott. Az esetek többségében mérsékelt erősségű (2–3 ms⁻¹) szél uralkodott, de nem volt ritka a nagyobb (az átlagos szélsőségek 6–7 ms⁻¹, a szélsebesség pedig nagyobb volt, mint 10 ms⁻¹), vagy a kisebb (1 ms⁻¹-nél is kisebb sebességek) széljárás sem. A relatív nedvesség 20–100% között változott.

A 2. személy megfigyelési időszaka 2020. április 7-e és 2021. március 2-a között volt. A megfigyelések számának kb. 2/3-a anticiklonális időjárási helyzetre vonatkozik. A felszíni légnyomás 993 és 1038 hPa értékek között változott és a megfigyelések során egyszer sem volt csapadék. Az esti/éjjeli időszakban (a megfigyelések kb. 35%-a) a léghőmérséklet -10 és 23 °C, a relatív nedvesség 40 és 100%, míg az átlagos szélsőségek 0,1 és 6,7 ms⁻¹ között változott. A nappali időszakban ezek a változások valamelyest nagyobbak voltak; a léghőmérséklet -9 és 34 °C, a relatív nedvesség 15 és 100%, míg az átlagos szélsőségek 0,1 és 7,8 ms⁻¹ között volt megfigyelhető.

4.2. Humán adatok

A következő humán állapotjelzőket használtuk: testtömeg (a legfontosabb), magasság, nem és kor. Ezeket és a metabolikus (alapanyagcsere, M_b , gyaloglás, M_w és az $M_b + M_w$ összeg) hőáram-sűrűségeket az 1. és a 2. személyre, valamint az átlagos magyar férfit (3. személy) és nőt (4. személy) vonatkozóan a 2. táblázat tartalmazza.

Személyek	Nem	Kor [év]	Testtömeg [kg]	Magasság [cm]	Alapanyagcsere hőáram-sűrűsége [Wm ⁻²]	A gyaloglás hőáram-sűrűsége [Wm ⁻²]	A teljes hőáram-sűrűség [Wm ⁻²]
1. személy	férfi	64	89,0	190,0	40,8	94,5	135,3
2. személy	nő	34	64,5	160,5	38,6	10,9	142,5
3. személy	férfi	19	85,5	179	45,2	101,7	146,9
4. személy	nő	33	65,5	169	38,8	96,1	134,9

2. táblázat. Négy ember humán állapotjelzői és metabolikus hőáram-sűrűségei (1. személy: szerző1, 2. személy: szerző2, 3. személy: az átlagos magyar férfit reprezentáló férfi, 4. személy: az átlagos magyar nőt reprezentáló nő).

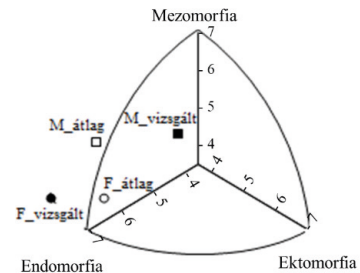
Mint ahogy már mondtuk, az 1. és a 2. személy adatait a hőérzet és a hőterhelés közötti kapcsolat jellemzése végett használtuk. A 3. és a 4. személy metabolikus hőáram-sűrűsége igen jó közelíti az átlagos magyar férfi és nő metabolikus hőáram-sűrűségét. Az életkor nem volt szempont az emberek kiválasztása során. Az emberi adatok változékonyságának hatása a humán hőterhelésre és hőérzékelésre *Ács et al. (2021b)* cikkében került részletesebb taglalásra.

5. Eredmények

5.1. A vizsgált személyek szomatotípusa

A tanulmányban feltüntetett négy ember szomatotípusait a 3. ábra szemlélteti.

Az európai népek felnőtt férfiainak testalkata általában mezomorfa, ektomorfa vagy endomorfa-mezomorfa, amely alkati típusok az életkor előre haladtával endomorfa alkati típusok felé tolódnak el, felnőttkorban



3. ábra. Az átlagos felnőtt férfi ($M_{\text{átlag}}$, mezomorfa-endomorfa) és átlagos felnőtt női ($F_{\text{átlag}}$: egyensúlyos endomorfa) alkati típusok a Kárpát-medencében és a vizsgált felnőtt férfi ($M_{\text{vizsgált}}$: endomorfa mezomorfa) és felnőtt nő ($F_{\text{vizsgált}}$: egyensúlyos endomorfa) szomatopontjai. Az 3. ábra síkban szemléltendő.

a férfiak testének relatív zsírtartalma is fokozódik. Ebben a képben beleillik a vizsgált felnőtt férfi mezo-morf testalkata, amely alkati típust a csontozat-izomzat robuszticitása mellett az enyhén megnövekedett zsírtartalom jellemez. Ezzel szemben a felnőtt nők átlagos testformája egyensúlyos endomorf a reprodukciós szerepekre visszavezethetően megnövekedett zsírtartalom miatt. A vizsgálatban szereplő felnőtt nő morfológiai testalkata is a női átlagos testalkattal jellemezhető, egyensúlyos endomorf alkati típusú (3. ábra). Vegyük észre, hogy a vizsgált személyek testalkatai közötti eltérés nagyobb, mint az átlagos magyar férfi és nő közötti testalkati eltérés.

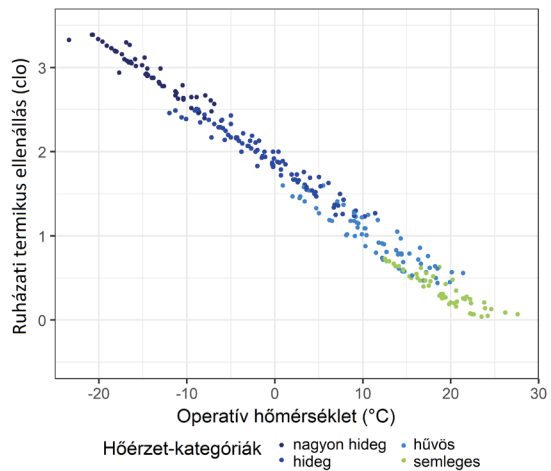
5.2. A testalkat típusok és a metabolikus hőáram-sűrűségek közötti kapcsolat

Összevetve a 3. ábrában látható testalkat típusokat és a 2. táblázatban feltüntetett metabolikus hőáram-sűrűségeket, egyértelműen látható, hogy a metabolikus hőáram-sűrűségek személyek közötti kicsi eltérései ellenére a testalkat típusok közötti eltérések észrevehetően nagyok. Az is nyilvánvaló, hogy a négy ember adatai alapján nem mondhatunk semmi bizonyosat az M és a testalkat típusok közötti esetleges kapcsolat jellegéről.

5.3. A ruházati termikus ellenállás és az operatív hőmérséklet kapcsolata

Az operatív hőmérséklet [(2)-es egyenlet] a ruhafelületre vonatkozó energiaegyenleg egyenletéből levezethető, hőmérséklet dimenziójával rendelkező, hőterhelést kifejező paraméter. Ugyan függ a mellmagasságban mért emberi test kerülettől az r_{Ha} -án keresztül, de mivel ez a függés igen gyenge, emberfüggetlen paraméterként kezelhetjük. A ruházati termikus ellenállás függ mind a T_o -tól, mind az M -tól, azaz mind időjárás-, mind emberfüggő paraméter. Ez miatt minden $r_{cl}-T_o$ kapcsolat individuális jellegű. Az 1. személyre vonatkozó $r_{cl}-T_o$ pontfelhőt a 4. ábrán láthatjuk.

Láthatjuk, hogy e pontok hőérzet-kategóriák szerint vannak színezve, így az adott hőterheléshez tartozó hőérzet kategória is leolvasható. A pontfelhők nyilván a modell (1) -es egyenlete szerint alakulnak, de a pontok színezése miatt hőérzet-információt is közvetítenek. A megfigyelések legfontosabb humán-klimatológiai információi a következők: 1) a megfigyelési helyszínen a T_o kb. -25 és 25 °C között változhat, 2) e tartománynak megfelelő r_{cl} tartomány 3,5 és 0 clo értékek közé esik, 3) a neutrális hőérzethez (a termikus komfort állapota) tartozó T_o és r_{cl} tartományok 20-30 °C és 0,5 – 0 clo,



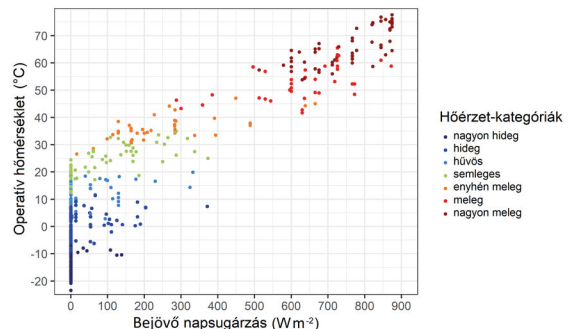
4. ábra. Az 1. személyre vonatkozó $r_{cl}-T_o$ pontfelhő átlagos szélesség esetén.

rendre, 4) a szomszédos hőérzet-kategóriák (pl. hűvös/hideg, vagy hűvös/neutrális) pontjai átfedik egymást, ami egyértelműen mutatja azt, hogy a hőérzet-skála folytonos és nehezen bontható diszkrét tartományokra.

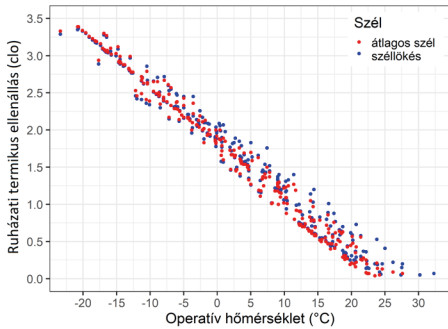
Az éjjeli és nappali napszakaszokra vonatkozó T_o -globálsugárzás pontfelhőt átlagos szélesség esetén 1. személyre vonatkozóan az 5. ábra szemlélteti.

Szembetűnő, hogy az éjjeli időszakban a hideg hőérzet-kategóriák mellett a neutrális hőérzet-kategória még előfordul, de meleg hőérzet-kategóriák nincsenek, vagy legalább is nem regisztráltunk. Az is egyértelmű, hogy a „nagyon-meleg” hőérzet kategória kialakulásában döntő szerepe van a napsugárzásnak. Az 5. ábra azt is egyértelműen bizonyítja, hogy a léghőmérséklet és a napsugárzás a két legfontosabb környezeti hőterhelés- és hőérzet-alakító tényező. A szél hőterhelés- és hőérzet-alakító szerepét a 6. ábra szemlélteti.

Látható, hogy ezen az ábrán nem ábrázoltuk a hőérzet-kategóriákat, annak ellenére, hogy a nagyobb szellőkések pillanataiban jelentős lehet a hűtő hatás.



5. ábra. Az 1. személyre vonatkozó T_o -globálsugárzás pontfelhő átlagos szélesség esetén. A hőérzet kategóriákat színekkel fejeztük ki a nappali ($S>0$), valamint az éjjeli ($S=0$) időszakokban egyaránt.

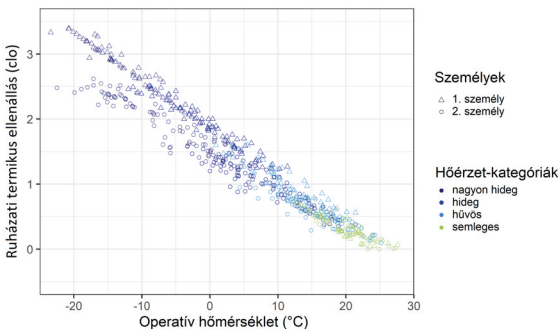


6. ábra. Az 1. személyre vonatkozó $r_{cl}-T_o$ pontfelhő átlagos szélsébség és szellőkés esetén.

E pillanatszerű hőérzet-hatást bizonyossággal regisztrálni lehetetlen, ugyanakkor modellel becsülhető a hőterhelés-csökkentő hatás az átlagos szélsébség és a szellőkés esetén szimulált r_{cl} és T_o értékek összehasonlításával. A szimulált eredmények alapján a szellőkés hűtő hatása 0–0,3 clo közötti r_{cl} érték növekedést eredményez (a kék pontok a piros pontok felett vannak) a hőhiányos állapotokban. Ez a különbség valamelyest kisebb a neutrális esetben, amikor az r_{cl} 0 clo körüli.

Mint ahogy mondtuk, az $r_{cl}-T_o$ pontfelhők különböznek embertől emberig. Az emberek közötti különbségek az emberek metabolikus hőáram-sűrűségein, M -en keresztül jutnak kifejezésre. Minél nagyobbak az emberek közötti M -eltérések, annál nagyobbak az r_{cl} -beli különbségek. Az 1. és a 2. személyre vonatkozó $r_{cl}-T_o$ pontfelhőket a 7. ábra szemlélteti.

Vegyük észre, hogy az 1. és a 2. személy közötti M -különbség kicsi, mindössze 7 Wm^{-2} , ami a személyek M -értékeinek kb. 5%-a, és láthatjuk, hogy ezen kicsi eltérés is egyértelműen észrevehető a 7. ábrán. Az eltérések az extrém hőterhelések esetében a legnagyobbak, akár 1 clo értékűek is, a közömbös (neutrális) esetben a legkisebbek, 0,1–0,2 clo körüliek.



7. ábra. Az 1. és a 2. személyre vonatkozó $r_{cl}-T_o$ pontfelhő a hőérzet-kategóriákkal együtt átlagos szélsébség esetén.

Hőérzet-kategória	Az 1. személyre vonatkozó ruházati termikus ellenállás (r_{cl}) határértékek (clo)	A 2. személyre vonatkozó ruházati termikus ellenállás (r_{cl}) határértékek (clo)
neutrális	$0 < r_{cl} < 0,7$	$0 < r_{cl} < 0,6$
hűvös	$0,4 < r_{cl} < 1,6$	$0,2 < r_{cl} < 1,0$
hideg	$1,2 < r_{cl} < 2,5$	$0,3 < r_{cl} < 1,5$
nagyon hideg	$2,3 < r_{cl} < 3,4$	$1,2 < r_{cl} < 2,7$

3. táblázat. A ruházati termikus ellenállás határértékek hőérzetkategoriónként és személyenként.

5.4. A hőérzet és a hőterhelés kapcsolata

Az 1. és a 2. személyre vonatkozó hőérzet-hőterhelés kapcsolatát reprezentáló pontfelhőket a 8. ábra szemlélteti. A hőterhelést a ruházati termikus ellenállás paraméterével jellemeztük.

Az 1. személyt a háromszögek, míg a 2. személyt a körök reprezentálják. Az r_{cl} -értéktartományokat külön-külön minden hőérzet-kategóriára és személyre a 3. táblázat szemlélteti.

Az 1. személyre 370, míg a 2. személyre 317 pont van. Mindegyik pont egy időjárási helyzetre vonatkozik. A 8. ábra és a 3. táblázat alapján megállapíthatjuk, hogy 1) a “hűvös” és a “neutrális” hőérzet-kategóriák esetében lett az 1. és a 2. személy közötti r_{cl} -különbség a legkisebb. A hőhiány növekedésével a személyek közötti r_{cl} -különbségek is növekednek; így a “nagyon hideg” hőérzet-kategória esetében lettek ezek a különbségek a legnagyobbak. 2) A diszkrét hőérzet-kategóriákat a hőérzékelés számszerűsíthetősége végett vezetjük be, ugyanakkor az is nyilvánvaló, hogy a hőérzet-skála folytonos. Ez abból is látható egyértelműen, hogy a szomszédos hőérzet-kategóriába eső pontok keverednek, azaz, nincs egyértelmű határ közöttük. A pontok keveredése értelemszerűen mindkét személy esetében megfigyelhető. Ez nyilvánvalóan azt is mutatja, hogy a hőérzékelés szubjektív, egyén-specifikus folyamat.

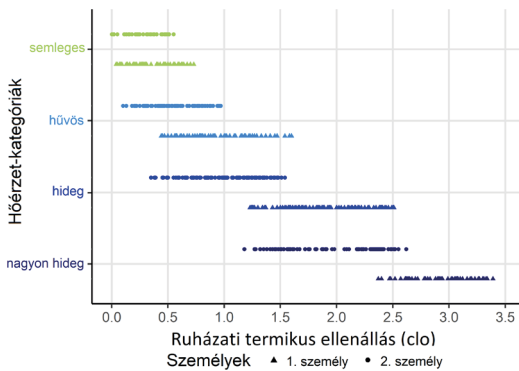
Hasonlóképpen megalkothatók az 1. és a 2. személyre vonatkozó hőérzet-operatív hőmérséklet kapcsolatát reprezentáló pontfelhők. Ezeket a 9. ábrán láthatjuk.

Vegyük észre, hogy a “nagyon meleg” hőérzet kategória a $T_o > 50 \text{ °C}$ -nál esetekben jelentkezik. Ezen extrém hőterheléseket a nagy globálsugárzás okozza.

5.5. Az átlagos magyar férfi és nő hőérzete

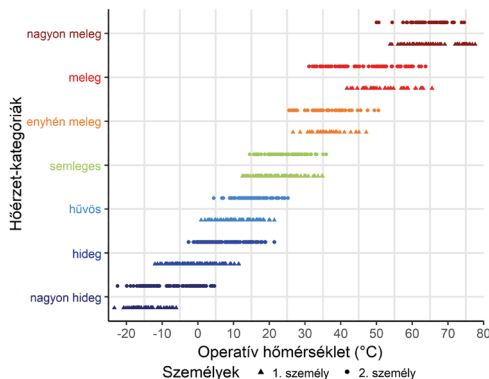
A 3. és a 4. személy nem végzett hőérzékelést és a hőérzékeléssel kapcsolatos meteorológiai megfigyeléseket. A kérdés az, hogy mondhatunk-e akármilyen bizonyo-

6. Összefoglalás



8. ábra. Az 1. és 2. személyre vonatkozó hőérzet-ruházati termikus ellenállás kapcsolatát reprezentáló pontfelhők.

sat az ő hőérzetükkel kapcsolatban az 1. és 2. személy hőérzete alapján? A hipotézisünk az, hogy igen, mivel a személyek M értékei közötti különbségek kicsik, maximálisan 12 Wm^{-2} . Bizonyossággal mondhatjuk, hogy a mérsékelt hőhiányok (r_{cl} 0 és 1 clo közötti) esetén a hőérzetük megegyező az 1. és 2. személy hőérzetével, azaz „neutrális”, vagy „hűvös” hőérzet-kategóriák fordulnak majd elő. Nagy valószínűséggel mondhatjuk ezt az „enyhén meleg” hőérzetet kiváltó időjárási helyzetekre is, de a legextrémebb hőérzet-kategóriák esetében már az individuális különbségek jelentős nagyságúak lehetnek, olyan szempontból, hogy ami valakinek „nagyon hideg”, az már a másik személynek csak „hideg”, de semmiféleképpen sem azt, hogy „neutrális”. Ugyan ez igaz a fordított esetben is, a nagy hőtöbbletek során. Így például nagy hőtöbblet esetén mondhatják, hogy „nagyon meleg”, vagy „meleg” van, de már elvértve, sokkal kisebb valószínűséggel mondhatják, hogy „enyhén meleg”, vagy még annál is hidegebb, azaz „neutrális” a hőérzetük. Az is kijelenthető, hogy az átlagos magyar férfi és nő hőérzékélése között nincs szignifikáns különbség.



9. ábra. Az 1. és 2. személyre vonatkozó hőérzet-operatív hőmérséklet kapcsolatát reprezentáló pontfelhők.

E tanulmányban egy új individuális ruházati termikus ellenállás – operatív hőmérséklet modellt ismertettünk az időjárás vagy az éghajlat emberi hőterhelésének szimulálására. A modell legfőbb tulajdonsága az, hogy a metabolikus hőáram-sűrűséget a lehető legegyszerűbb módon szimulálja, úgy, hogy az emberek közötti individuális különbségek is kifejezésre jutnak. A modell azért is egyszerű, mert nem tartalmaz semmilyen hőszabályozási folyamatot. A modell a hőterhelés mellett hőérzet-becslésre is alkalmas, ha az individuális hőterhelés-hőérzet kapcsolatot jellemző regressziós görbe ismert. E regressziós görbe a hőterhelés és a hőérzet egyidejű megfigyelésével állapítható meg, ami a tanulmányban két személy esetében meg is történt mind hőhiányt mind hőtöbbletet eredményező időjárási helyzetekben.

E tanulmány legfontosabb eredményei a következők: 1) annak ellenére, hogy az emberek közötti metabolikus hőáram-sűrűség különbségek kicsik (12 Wm^{-2} -nél kisebbek), az emberek közötti testforma eltérések nagyok is lehetnek (pl. az endomorf mezomorf és az egyensúlyos endomorf testalkatok közötti eltérés), 2) a „neutrális” hőérzethez tartozó (komfort zóna) ruházati termikus ellenállás értéktartomány 0 és 0,5 clo közötti; a T_o értéktartomány pedig $20\text{-}30 \text{ }^\circ\text{C}$ közötti, 3) kisebb hőhiányok (0,3 és 1 clo közötti r_{cl} értékek) esetén a különböző M -kel és testalkatokkal rendelkező emberek hőérzetei azonosnak vehetők, 4) extrém hőterhelések során (pl. nagy hőhiány esetében, amikor az r_{cl} nagyobb, mint 2 clo) az emberek közötti hőterhelés és hőérzet különbségek nőnek, 5) nyáron, nagy besugárzás és magas hőmérséklet esetén („nagyon meleg” hőérzet-kategória) a T_o $70\text{-}80 \text{ }^\circ\text{C}$. Télen, éjjel, az extrém hidegben és derült égbolt esetén („nagyon hideg” hőérzet-kategória) a T_o $-25 \text{ - } -20 \text{ }^\circ\text{C}$, az r_{cl} pedig 3-3,5 clo.

Aláhúzó, hogy ezek az adatok nem fiktív, hanem konkrét kültéri hőterhelésben részesülő, gyalogló személyekre vonatkoznak, akik a Köppen-féle Cfb klímához (meleg-mérsékelt klíma meleg nyárral a csapadék szezonális ingadozása nélkül), vagy a Feddema-féle „hűvös, száraz klíma, a hőmérséklet extrém szezonális ingadozásával” típusú klímához alkalmazkodtak. Legvégül, megjegyzendő, hogy alföldi klímánk hőterheléséhez tartozó hőérzet-kategória a „hűvös” (Feddema szóhasználat), és nem a „meleg mérsékelt” (Köppen szóhasználat), ezt többéves hőterheléssel és hőérzékéléssel kapcsolatos kutatásaink alapján (Ács *et al.*, 2021a, 2022) mondhatjuk. Még egyszer összegezve: a Kárpát-medence alföldi térségében a C-típusú köppeni klímához tartozó hőérzet nem „meleg mérsékelt”, hanem „hűvös”.

Irodalom

- 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., and Zsákai A.*, 2019: New clothing resistance scheme for estimating outdoor environmental thermal load. *Geographica Pannonica* 23(4), 245–255. <https://doi.org/10.5937/gp23-23717>
- Ács F., Zsákai A., Kristóf E., Szabó A. and Breuer H.*, 2021a: Human thermal climate of the Carpathian Basin. *Int. J. Climatol.* 41, E1846–E1859. <https://doi.org/10.1002/joc.6816>
- Ács F., Zsákai A., Kristóf E. és Szalkai Zs.*, 2021b: Milyen a legmegfelelőbb ember a klímaosztályozási célokra alkalmazandó humán termikus klíma vizsgálatokban. Megjelent: V. Orvosmeteorológiai Konferencia Jegyzőkönyve, Magyar Meteorológiai Társaság (Szerk. Dunkel Z.), Budapest, 13–17.
- Ács F., Zsákai A., Kristóf E., Szabó A. 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>
- Bruce J.L.*, 1916: Vortrag. Royal. Society. NSW (public health section, 14.11.1916).
- Campbell G.S. and Norman J.M.*, 1998: An introduction to Environmental Biophysics. Springer, New York, USA, 286.
- Carter J.L. and Heath B.H.*, 1990: Somatotyping: development and applications. Cambridge University Press, Cambridge, 503 pp.
- Carter J.L.*, 2002: The Heath-Carter anthropometric somatotype-instruction manual. Department of Exercise and Nutritional Sciences San Diego State University. <https://www.mdthinducollege.org/ebooks/statistics/Heath-CarterManual.pdf>
- Cohen P., Potchter O., and Matzarakis, A.*, 2013: Human thermal perception of coastal Mediterranean outdoor urban environments. *Appl. Geogr.* 37, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.11.001>
- de Freitas C.R. and Grigorieva E.A.*, 2015: A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices. *Int. J. Biometeorol.* 59, 109–120. <http://doi.org/10.1007/s00484-014-0819-3>
- 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, Copenhagen 244 pp.
- Feddema J.J.*, 2005: A Revised Thornthwaite-type Global Climate Classification. *Phys. Geogr.* 26, 442–466. <https://doi.org/10.2747/0272-3646.26.6.442>
- Frankenfield D., Roth-Yousey L., and Compher C.*, 2005: Comparison of Predictive Equations for Resting Metabolic Rate in Healthy Non-obese and Obese Adults: A Systematic Review. *J. Am. Diet. Assoc.* 105, 775–789. <https://doi.org/10.1016/j.jada.2005.02.005>
- Gagge A.P., Stolwijk J.A.J., and Nishi Y.*, 1971: An effective temperature scale based on a simple model of human physiological temperature response. *ASHRAE Trans.* 72, 247–262.
- 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>
- Köppen W.*, 1936: Das geographische System der Klimate). In (eds.: Köppen, W. and Geiger, R.) Handbuch der Klimatologie, Bd. 1, Teil C, Borntraeger, Berlin, 44.
- Macpherson R.K.*, 1962: The Assessment of the Thermal Environment. A Review. *B. J. Ind. Med.* 19, 151–164. <https://doi.org/10.1136/oem.19.3.151>
- Matzarakis A., Mayer, H.*, 1996: Another kind of environmental stress: thermal stress, *WHO News* 18, 7–10.
- Mifflin M.D., St Jeor S.T., Hill L.A., Scott B.J., Daugherty S.A., and Koh, Y.O.*, 1990: A new predictive equation for resting energy expenditure in healthy individuals. *Am. J. Clin. Nutr.* 51, 241–247. <https://doi.org/10.1093/ajcn/51.2.241>
- Mihailović D.T. and Ács, F.*, 1985: Calculation of daily amounts of global radiation in Novi Sad. *Időjárás* 89, 257–261.
- Potchter O., Cohen P., Lin T.P., and Matzarakis A.*, 2018: Outdoor human thermal perception in various climates: A comprehensive review of approaches, methods and quantification. *Sci. Total Environ.* 631–632, 390–406. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.276>
- Thom E.C.*, 1959: The discomfort index. *Weatherwise* 12, 57–60.
- Zhang X.*, 2015: Molecular sensors and modulators of thermoreception. *Channels* 9(2), 73–81, <https://doi.org/10.1080/19336950.2015.1025186>
- Vriens J., Nilius B., and Voets T.*, 2014: Peripheral thermosensation in mammals. *Nature Reviews Neuroscience* 15, 573–589. <https://doi.org/10.1038/nrn3784>
- Weyand P.G., Smith B.R., Puyau M.R., and Butte, N.F.*, 2010: The mass-specific energy cost of human walking is set by stature. *J. Exp. Biol.* 213, 3972–3979. <https://doi.org/10.1242/jeb.048199>