

Somogyi Zoltán¹

A kompenzálatlan hőterhelést előidéző mikroklimatikus viszonyok kialakulásának dinamikája a tűzoltó védőruházatban

Dynamics of the Formation of Microclimatic Conditions Causing Uncompensated Heat Stress in Firefighting Protective Clothing

Absztrakt

Jelen kutatás a tűzoltó védőruházatban belüli mikroklima változásainak dinamikáját és hatását vizsgálta a maghőmérsékletre. A vizsgálat alapkérdése volt, hogy kialakulhatnak-e hőterhelést előidéző mikroklimatikus tényezők a tűzoltó védőruházatban a beavatkozások kezdeti szakaszában a tényleges tűzoltást megelőzően. Hogyan változik a maghőmérséklet és bőrhőmérséklet, milyen ütemben alakul ki a kompenzálatlan hőterhelés? Van-e lényeges különbség azonos munkavégzés és külső környezeti feltételek mellett védőruházatot viselve és sportruházatban végrehajtott terhelés élettani mutatói között. A bevetési ruhában (BEV) és a sportruházatban végzett (kontroll, KON) 35 perc időtartamú 9 ± 1 MET egységben megszabott terheléses vizsgálaton a csoportok közötti eredmények alapján két csoport maghőmérséklet (T_c) értékei között jelentős eltérés mutatkozott. BEV-csoportban (átlag $[M] = 38,36$; szórás $[SD] = 0,116$) és a KON-csoportban ($M = 37,99$; $SD = 0,055$) a T_c -értékek szignifikáns ($p = 0,010$) különbséget mutattak. A teszt végén detektált pulzusszámok (HR) esetében a BEV ($M = 163,4$; $SD = 8,414$) és KON ($M = 133$; $SD = 9,848$) csoportok között a statisztikai elemzés szintén jelentős különbséget mutatott ki ($p = 0,0127$). Az adatokból látható, hogy azonos külső terhelés mellett a kontrollcsoportban sem a maghőmérséklet,

¹ Doktori hallgató, Nemzeti Közsolgálati Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskola, e-mail: zoltan.somogyi@katved.gov.hu

sem a bőrhőmérséklet, sem a pulzusszám nem éri el a BEV-csoport értékeit. A védőruházaton belüli mikroklimára jellemző volt, hogy a teszt végén az átlagos légréshőmérséklet 33,58 °C, (SD 1,03), és a relatív páratartalom 80,95% (SD 9,89) volt. Az eredmények alapján igazolható a feltételezés, hogy a beavatkozások kezdeti szakaszában olyan mikroklimatikus viszonyok alakulhatnak ki a védőruházatban, amelyek kompenzálatlan hőterhelés kialakulásához vezethetnek. A mérési adatok további matematikai és statisztikai elemzése kimutatták, hogy a BEV-csoport tagjainál a kompenzálatlan hőterhelést jelző markerek jellemzően a 15. és 18. perc között jelentek meg

Kulcsszavak: kompenzálatlan hőstressz, maghőmérséklet, védőruházat, tűzoltó

Abstract

This research examined the dynamics of microclimate changes within firefighter protective clothing and their effect on core body temperature. The basic question of the study was whether microclimatic factors causing heat stress can develop in firefighter protective clothing during the initial phase of interventions, before the actual firefighting. How do core temperature and skin temperature change, and at what rate does uncompensated heat stress build up? Is there a significant difference between the physiological indicators of exertion performed while wearing protective clothing and those performed in sportswear, under the same working conditions and external environmental conditions? In a 35-minute exercise test performed in the protective clothing (BEV) and sportswear (control, KON) at a specified load of 9 ± 1 MET units, the results between the groups showed a significant difference between the core body temperature (T_c) values of the two groups. In the BEV group (mean $[M] = 38.36$; standard deviation $[SD] = 0.116$) and the KON group ($M = 37.99$; $SD = 0.055$), the T_c values showed a significant ($p = 0.010$) difference. In the case of the heart rates (HR) detected at the end of the test, statistical analysis also showed a significant difference between the BEV ($M = 163.4$; $SD = 8.414$) and KON ($M = 133$; $SD = 9.848$) groups ($p = 0.0127$). The data show that, under the same external load, neither the core temperature, skin temperature, nor heart rate in the control group reached the values of the BEV group. The microclimate inside the protective clothing was characterised by an average air temperature of 33.58 °C (SD 1.03) and the relative humidity was 80.95% (SD 9.89). The results confirm the assumption that in the initial phase of the interventions, microclimatic conditions may develop inside the protective clothing that can lead to uncompensated heat stress. Further mathematical and statistical analysis of the measurement data showed that markers indicating uncompensated heat stress typically appeared between the 15th and 18th minutes in members of the BEV group.

Keywords: uncompensable heat stress, core body temperature, protective clothing, firefighters

Bevezető

A tűzoltók munkavégzése napjainkban elképzelhetetlen védőruházat nélkül. Érdemes azonban vizsgálat tárgyává tenni, hogy a magas fokú védelmi képességekkel rendelkező védőruházat, amely megóvjja viselőjét számos káros külső hatástól, milyen kihívások elé állítja viselője szervezetét. A tűzoltói munkán kívül számos emberi munkatevékenység kedvezőtlen, sőt olykor szélsőséges környezeti feltételek mellett valósul meg. A mélyművelésű bányászattól az úrutazásig terjedő skálán találkozhatunk számos olyan tevékenységgel, ahol az egyén a jelentős fizikai terhelés mellett magas páratartalomnak és/vagy direkt hőszugárzásnak lehet kitéve. Az ilyen magas hőmérsékleten végzett munka kedvezőtlen hatást gyakorolhat az emberi teljesítményre és egészségre, fokozott megterhelést, teljesítménycsökkenést és hővel kapcsolatos megbetegedéseket okozhat.² A hőterhelés áttételesen a munkavégzés számos más kockázati tényezőjét is negatívan befolyásolhatja, módosítva vagy súlyosbítva a gyakori veszélyek kockázatát. A hőterheléssel kapcsolatos ártalmak sokkal gyakoribbak azon munkaköröknél, ahol személyi védőfelszerelést kell viselni a kémiai, biológiai, fizikai (mechanikai, termikus, sugárzási) vagy egyéb veszélyeknek való kitettség csökkentése érdekében.

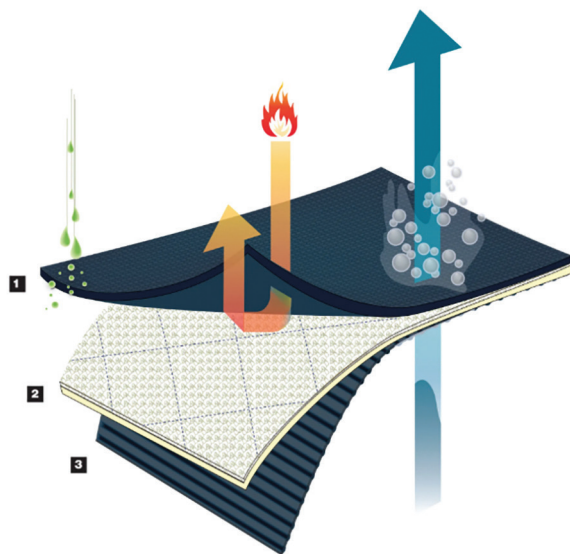
A tűzoltó védőruházat felépítése és hatása a szervezetre

A tűzoltó bevetési védőruhákat funkcionális nézőpontú megközelítésben három kategóriában vizsgálhatjuk: biztonság, hatékonyság és komfort. Könnyen belátható, hogy a felsorolás sorrendje egyben fontossági sorrendet is jelez. Elsőként, a ruházat alapvető célja az emberi test és a környezet közötti védőréteggént a káros hatások eliminálása.³ Ennek érdekében a ruházat többek közt szigetel a víztől és a hőhatásoktól, lángálló, véd a mechanikai sérülések ellen, ellenáll a vegyi anyagok károsító hatásainak és gátolja a statikus feltöltődést. Ezen erősen eltérő jellegű veszélyeztető tényezők elleni védelmet a bevetési védőruha különböző anyagokból álló, többretegű szerkezete biztosítja (1. ábra). A külső borító réteg főként a láng- és mechanikai védelemért, a középső membránréteg a nedvesség kétirányú áramlásának szabályozásáért és hőszigetelésért felel. A legbelső réteg a testbélés, amely a lélegző membránt és hordozórétegét védi a viselés közbeni sérülésektől és az izzadság elvezetését végzi.⁴

² VITRAI 2021.

³ HORVÁTH 2018.

⁴ KUTASI 2025.



1. ábra: A tűzoltó védőruházat rétegei (1. külső réteg, 2. membrán, 3. testbélés)

Forrás: <https://sioenfire.com/en/expertise/assemblies>

A másodlagos funkcionális szempont a hatékonyság, mivel lényeges, hogy az öltözék a munkavégzés hatékonyságát a lehető legkisebb mértékben csökkentse.⁵ A feladat-végrehajtás szempontjából a hatékonyságot befolyásoló tényező lehet a ruházat súlya, az egyes rétegek anyagainak hajlékonysága, rugalmassága, az ízületi mozgástartományokra gyakorolt hatása. A harmadlagos tényező, a viselés komfortja, már erősen szubjektív fogalom. A védőruha műszaki megfelelősége és az általa nyújtott védelem maximális szintje sok esetben ellentétes viselőjének kényelmi igényeivel. Bár a gyártók és a tervezők fejlesztéseik során igyekeznek ezen igényeket is maximálisan figyelembe venni, a gyakorlati alkalmazás során nyert tapasztalat az, hogy tartós viselésük az elhúzódó beavatkozások alkalmával gyakran feszegeti az elviselhető fiziológiai terhelés objektív és szubjektív határát. A védőruházat a munkakörnyezetet, a tűzoltókat körülvevő fizikai teret külső és belső részre osztja. A külső tér, a tűzoltókat a kárhelyszínen körülvevő fizikai tér, amelyet az adott hely időjárási viszonyait mutató meteorológiai mérőszámai (a hőmérséklet, a páratartalom, a légmozgás), valamint a tüzeset környezeti tényezőket módosító hatásai (a tűz következtében keletkező hőszugárzás és módosult hőmérséklet, valamint az oltóvíz párolgásából keletkező páratartalom) írják le. Ezt nevezhetjük makrokörnyezetnek. A belső környezet a védőruházat és a test közötti légrétegben kialakuló mikrokörnyezet. A mikrokörnyezet klímájának kialakulására a metabolikus hőtermelés hatására keletkező hő és az izzadságból keletkező pára, valamint a természeti környezet és a tüzeset által kialakított makrokörnyezet van hatással.

⁵ PÁNTYA 2018.

A mikrokörnyezetet befolyásoló tényezők

Érdemes elsőként elméleti oldalról megvilágítani, hogyan alakul ki a védőruházaton belüli mikrokörnyezet klímája. Az emberi szervezet az állandóság, a homeosztázis fenntartása érdekében hőtermelő és hőleadó folyamatok segítségével bizonyos határok között szabályozni képes belső hőmérsékletét a külső hőhatások okozta eltérések kompenzálása érdekében.⁶ Meleg környezetben, fizikai aktivitás közben a hőszabályzás feladata a felesleges hő leadása. A hőcsere nagy része a bőr felületén történik, főként konvekció, sugárzás és párolgás útján. A környezeti hőmérséklet emelkedésével a konvekciós és radiációs hőátadás csökken, ami azt jelenti, hogy az emberi test egyre inkább az izzadság elpárologtatására támaszkodik a felesleges hő elvezetéséhez. Ha a külső körülmények, a léghőmérséklet, a hőszugárzás, páratartalom, a légsebesség és a ruházat kombinációja elegendő hőelvezetést tesz lehetővé a belső hőtermelés mértékének ellensúlyozásához, a test maghőmérsékletének emelkedése mérsékelt marad, azaz kompenzálódik a hőterhelés. Ha azonban a hőtermelés meghaladja a bőrfelületről történő hővesztesség felső határát a magas környezeti hőmérséklet, a páratartalom, az alacsony szélesebbesség vagy a ruházat magas párolgási ellenállása miatt, akkor a test maghőmérséklete folyamatosan emelkedik, kialakul a kompenzálatlan hőterhelés.⁷

Ha a test természetes hűtőfolyamatai nem képesek a felesleges hő csökkentésére, az még megfelelő adaptáció mellett is befolyással van a fizikai és kognitív teljesítményre.⁸ A tűzoltói beavatkozások során a hőterhelés a makrokörnyezet védőruházaton keresztülhatoló hatásainak, a munkavégzés következtében termelődő belső hő, valamint az izzadság keltette páratartalom hatásainak összegződéséből ered. A fizikai munkavégzés nagy metabolikus hőtermelést eredményez, mivel az izommunkába fektetett energia 70-80%-a hővé alakul át. Ez a hőtermelés nyugalmi helyzetben 70–100 W, közepes intenzitású munkavégzésnél 280–350 W, magas intenzitású terhelés során elérheti az 1000 W-ot.⁹ A védőruházatban az izzadással a hőátadás csökken, mivel a szigetelő rétegek evaporációs ellenállásuknak köszönhetően csak korlátozottan engedik át a vízpárát, így a ruha és test közötti légzésben a relatív páratartalom gyorsan eléri azt az értéket, ahol a párolgás és a test hűtése minimálisra csökken. Hűtés hiányában az emelkedő maghőmérséklet kiváltja a verejtékráta további fokozódását, azonban ez már nem képes további hűtőhatást kiváltani, csak a dehidratáció sebességét növeli.¹⁰ A fokozott mértékű folyadékvesztés hatására jelentősen romlanak a hőszabályozási reakciók, ami tovább súlyosbíthatja a hőterhelés hatásait. Ha a tűzoltók már a beavatkozásaikat megelőzően sincsenek megfelelő hidratáltsági állapotban, és a tűzoltás befejezését követően sem fogyasztanak megfelelő mennyiségű és minőségű folyadékot, a kiszáradás számos tünetét tapasztalhatják. A dehidratációról ismert, hogy érinti az aerob és anaerob képességeket, befolyásolhatja a kognitív funkciókat és az euhydratációhoz képest csökkenti a hőtolerancia idejét.

⁶ PAVLIK 2019: 475.

⁷ RAVANELLI-BONGERS–JAY 2019.

⁸ DICKHUTH 2019: 229.

⁹ CHEUNG–LEE–OKSA 2016.

¹⁰ CHEUNG 2000.

A hőterhelés hatása a motorikus képességekre és a kognitív funkciókra

A tűzoltói beavatkozások a motorikus képességek teljes spektrumát igénylik. Számos kutatási eredmény alátámasztja, hogy a kompenzálatlan hőterhelés és a kapcsoltan fellépő folyadékvesztesség hatással lehet a motorikus képességekre. A hőterhelés hatására fellépő erődeficit egyik lehetséges oka a beavatkozások közben elszenvedett sérüléseknek.¹¹ Miután az erő, a gyorsaság és az állóképesség mind-mind közvetlenül párosíthatók konkrét tűzoltói feladatokhoz, érdemes megvizsgálni a hőterhelés ezekre gyakorolt negatív hatásait. Az erő és az intenzív állóképességi munkavégző képesség egyenes arányban csökken a folyadékvesztesség mértékével. Egy közepesen megterhelő aktivitás során tapasztalható 3-4%-os csökkenés a testtömegben magával hozza az izomerő 2%-os, és az intenzív állóképesség akár 10%-os csökkenését is.¹² Ez a teljesítmény-visszaesés is elgondolkodtató, azonban a hőterhelés legnagyobb mértékben az aerob teljesítményre van hatással. Vizsgálatok kimutatták, hogy tűzoltóknál a hőstressz következtében bekövetkező folyadékvesztesség a plazmatérfogat akár 15%-os csökkenését eredményezi.¹³ A térfogatcsökkenés következtében csökken a verőtérfogat, amit a szervezet a pulzusszám növelésével kompenzál. Ez a kompenzáció azonban nem képes a végtelenségig kielégíteni az izomzat vérellátási igényét, ezért a teljesítmény visszaesik.

A tűzoltókat érő hőhatások nemcsak a kondicionális képességeket, hanem a kognitív és pszichomotoros-koordinációs képességeket is képesek lehetnek negatívan befolyásolni. A test maghőmérsékletének emelkedése negatívan befolyásolhatja a kognitív teljesítményt, ami növeli a hibák kockázatát, és ez tűzoltási helyzetekben kritikus lehet. A kognitív képességek területén a figyelem és az észlelés befolyásolását, a koordinációs képességek közül pedig a térbeli tájékozódó képesség, a mozgás és egyensúly-érzékelés és a komplex reakcióképesség csökkenését okozhatja. Ezen képességek megváltozásának vizsgálata a tűzoltói beavatkozások közben bekövetkező hőterheléssel kapcsolatosan nem túl mélyen kutatott terület.¹⁴ Egy, a témával foglalkozó összefoglaló tanulmány rámutat a korábbi kutatások vegyes, olykor ellentmondásos eredményeire, és kiemeli a további kutatások fontosságát.¹⁵ Biztosnak látszik azonban, hogy a hőstressz kognitív funkciókra gyakorolt hatásai összefüggenek az élet-tani változásokkal és a külső, belső terheléssel. További kísérletek kimutatták, hogy a munkahelyi feladatvégzés hatékonysága visszaeshet, ha a környezeti hőmérséklet meghaladja a 23 °C-ot.¹⁶ Emellett Schmit és munkatársai¹⁷ arra a következtetésre jutottak, hogy a kognitív funkciók zavart szenvednek, amikor a test maghőmérséklete 39 °C fölé emelkedik. Ez azt sugallja, hogy a tűzoltókat veszélyeztetheti a hőstressz, ami végső soron hatással van arra a képességükre, hogy életüket védjenek meg. Ezért fontos megérteni a hőterhelésnek a tűzoltók kognitív képességeire gyakorolt hatásait.

¹¹ SMITH 2008.

¹² JUDELSON et al. 2007.

¹³ SMITH-MANNING-PETRUZZELLO 2001.

¹⁴ CARLTON-ORR 2015.

¹⁵ THOMPSON et al. 2023.

¹⁶ CHEUNG-LEE-OKSA 2016.

¹⁷ SCHMIT et al. 2017.

Kutatások arra a következtetésre jutottak, hogy az olyan megterhelő feladatok, mint az éberség és a figyelem folyamatos fenntartása, a legérzékenyebbek a hőstresszre; ez aggasztó, tekintettel az ilyen feladatok fontosságára a tűzoltásban, a helyzetek összetettségére, amelyeknek a tűzoltó ki van téve, és a nehéz döntésekre, amelyeket meg kell hoznia.¹⁸ Ezzel együtt nem világos, hogy a hőmérséklet pontosan hogyan és milyen mértékben befolyásolja a tűzoltók kognitív képességeit, mivel a kutatások nem reprezentálják teljeskörűen a tűzoltók munkakörülményeit.

Célkitűzés

Jelen kutatás célja az volt, hogy megismerjük a védőruházaton belüli mikroklima változásainak dinamikáját és hatását a maghőmérsékletre, és ezáltal a folyadékvesztésre. A vizsgálat alapkérdése volt, hogy kialakulhatnak-e hőterhelést előidéző mikroklimatikus tényezők a védőruházatban a beavatkozások kezdeti szakaszában a tényleges tűzoltást megelőzően. Hogyan változik a maghőmérséklet és bőrhőmérséklet, milyen ütemben alakul ki a kompenzálatlan hőterhelés? Van-e lényeges különbség azonos munkavégzés és külső környezeti feltételek mellett védőruházatot viselve és sportruházatban végrehajtott terhelés élettani mutatóiban?

Anyag és módszer

A kutatás során hivatásos tűzoltókat vizsgáltam ($n = 10$). Adataik a 1. táblázatban találhatók.

1. táblázat: A résztvevők adatai

Résztvevők ($n = 10$)	Átlag $\pm$ szórás	Terjedelem
Életkor (év)	40,9 $\pm$ 7,88	[28–53]
Testmagasság (m)	173,4 $\pm$ 6,58	[163–182]
Testtömeg (kg)	69,6 $\pm$ 8,04	[58–81]
Testfelszín (m ²) ¹⁹	1,82 $\pm$ 0,11	[1,62–1,95]
Testtömegindex (BMI)	23,21 $\pm$ 3,07	[19,48–29,04]

Forrás: a szerző szerkesztése

A résztvevők a vizsgálatra megfelelő hidratáltsági állapotban érkeztek, a vizsgálat előtt 24 órával kerültek az alkoholfogyasztást, a 25 °C feletti tartós hőhatást és a kimerítő testmozgást; valamint a vizsgálat előtt 2 órával nem fogyasztottak kávé, teát vagy csokoládét. A résztvevők közül senki sem járt rendszeresen szaunába, és egyikük sem volt kitéve hőhatásnak (> 25 °C) a teszt előtti 24 órában.

¹⁸ HANCOCK–VASMATZIDIS 2003.

¹⁹ MOSTELLER 1987.

A vizsgálati eljárás

A mérések zárt, klimatizált helyiségben történtek a külső környezeti hatások csökkentése érdekében. (hőmérséklet: $22 \pm 1,6$ °C páratartalom: $46 \pm 12\%$) A védőruha felvételét megelőzően helyeztem fel a Polar H10 pulzus (Polar Electro Oy, Finland) Core maghőmérséklet (Core, Switzerland) és a belső hőmérséklet és páratartalom szenzort (Ruuvi Innovations, Finland) a rendszeresített 10M gyakorlópóló alá. A póló felvételét követően még egy Kestrel D2 hőmérséklet és páratartalom adatrögzítő szenzort (Kestrel Instruments, USA) is elhelyeztem a védőruházat alá. A védőruházat kabátból, nadrágból és csizmából állt. Légzőkészüléket, sisakot, kámszát, védőkesztyűt a résztvevők nem viseltek. A mérések folyamán egy esetben a védőruha és egy esetben a kontrollmérések során a légzési gázok analízise Calibre (Calibre Biometrics, USA) műszerrel történt. A terheléses teszt elliptikus tréneren (Horizon Elite 4000) történt 1-es nehézségi fokozaton 70 ± 5 W terhelés mellett a gyors tempójú járásnak megfelelő 60 ± 5 lépés/perc frekvenciával. A méréseket megelőző tájékoztatás során felhívtam a résztvevők figyelmét az egyenletes tempó tartására. Az észlelt erőfeszítés mértékét (RPE) 20 fokozatú Borg-skálán²⁰ a következő numerikus-verbális módon értékelték: 6 „minimális terhelés”; 7–8 „nagyon könnyű”; 9 „komfortos”; 10–11 „komfortos, kis erőfeszítés”; 12 „komfortos, közepes erőfeszítés”; 13 „kicsit fárasztó”; 14–15 „megterhelő”; 16–17 „nagyon megterhelő”; 18–19 „extrém terhelés”; 20 „maximális terhelés”. Az érzékelt hőérzetet a következő numerikus-verbális horgonyok felhasználásával értékelték: „nagyon hideg”; „hideg”; „hűvös”; „kissé hűvös”; „semleges”; „enyhén meleg”; „meleg”; „nagyon meleg”; „elviselhetetlenül meleg”. Az izzadás érzékelt mértékét és izzadás érzését a következő numerikus-verbális horgonyok segítségével értékelték: „nem érzem”; „enyhén izzadok”; „izzadok”; „közepesen izzadok”; „erősen izzadok”.

A teszt a védőruházat felvételét követően öt perces ülő helyzetű nyugalmi szakasszal kezdődött a vonulás közbeni terhelés szimulálására. Az öt perc elteltét követően kezdődött a 30 perces egyenletes ellenállással és lehetőleg egyenletes lépésfrekvenciával végrehajtott mérés. A résztvevők minden ötödik perc elteltével közölték az érzékelt erőfeszítés, hőérzet és izzadás értékét. A kontrollcsoport által végzett tesztben megismételtük az előző mérési protokollt, de ezúttal hosszú ujjú és hosszúszerű egyrétegű sportruházatban. A szenzorok közül a külső hőmérséklet és páratartalom szenzor helyett környezeti adatrögzítőt használtam.

A mérések terhelését a szakirodalomban található, az egyes tűzoltást megelőző szerelési feladatok energiaigényét metabolikus egyenértékben (*metabolic equivalent of task*, MET)²¹ meghatározó tanulmányok²² alapján, valamint a hazai tűzoltók fizikai alkalmasságvizsgálatát validáló tanulmány eredményeinek felhasználásával határoztam meg.²³ Egy metabolikus egyenérték (MET) a pihenő helyzetben, ülve felhasznált oxigénmennyiségként definiálható, és 3,5 ml percenkénti és testtömegkilogrammonkénti (ml O₂/kg/min) oxigénfelhasználásnak felel meg. A MET koncepciója egyszerű: a fizikai tevékenységek energiaigényét a nyugalmi anyagcseréérték többszörösével

²⁰ BORG 1982.

²¹ JETTÉ–SYDNEY–BLÜMCHEN 1990.

²² DOS SANTOS et al. 2025.

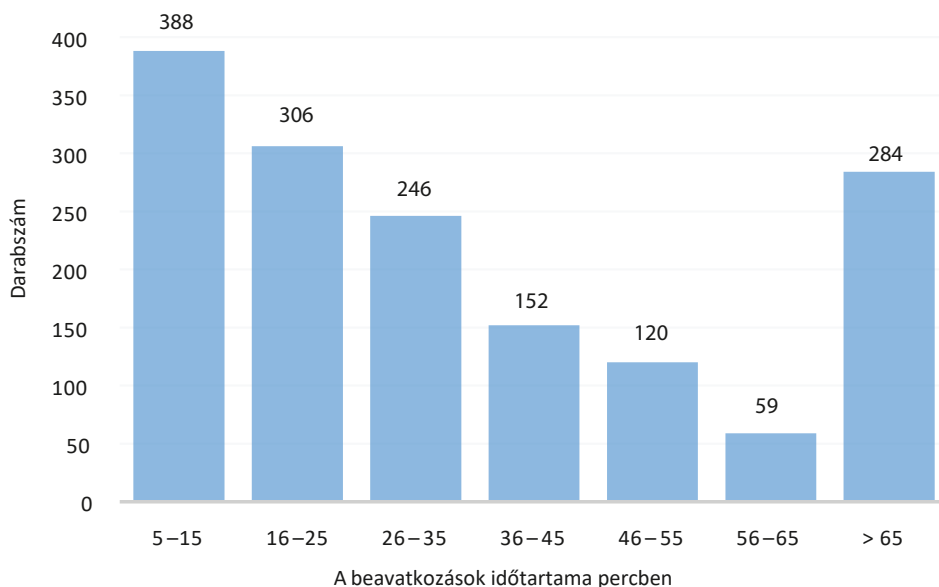
²³ KANYÓ – VÁSÁRHELYI-NAGY 2021.

fejezi ki. A releváns szakirodalom szerint a tűzoltó szerelési feladatok energiaigénye 7–10 MET, a hazai tűzoltók fizikai alkalmasságvizsgálatának elvégzéséhez szükséges átlagos érték 13,3 MET. A vizsgálat során a védőruházatban végrehajtott feladatnál az ellipszistréneren mért oxigénfelvételtől számítva a teszt energiaigénye átlagosan 9 ± 1 MET egység volt, ami megfelel a szerelési munkák átlagos terhelésének (2. táblázat). Érdekes, hogy az Egyesült Államokban szabványként alkalmazott NFPA 1582²⁴ ajánlás által megszabott tűzoltói alkalmassági minimumérték a 12 MET, ami 42 ml maximális oxigénfelvevő képességnek felel meg.

2. táblázat: A tűzoltói feladatok energiaigénye MET-egységben kifejezve

Tevékenység	Energiaigény metabolikus egységben meghatározva (MET)	Relatív oxigénfelvétel (ml O ₂ /kg/min)
Lépcsőzés (teher nélkül és terheléssel)	8,1–10,7	28,3–37,4
Létramászás	9,7–11,4	33,9–39,9
Lépcsőzés légzőkészülékkel és külső teherrel	11,1–13,0	38,5–45,5
Tömlőgurítás, fektetés	7,1–9,8	24,8–34,3
Tűzoltás-szimuláció tömlővel	10,1–13,4	35,3–46,9

Forrás: a szerző szerkesztése DOS SANTOS et al. 2025 alapján



2. ábra: A tüzesetek felszámolásáig eltelt idő eloszlása

Forrás: a szerző szerkesztése

²⁴ NFPA 1582 2022.

A mérések időtartamát a fővárosban 2024-ben végrehajtott beavatkozások adataiból készült statisztikák alapján határoztam meg. A beavatkozások elemzésénél jelen tanulmány számára a fővárosi tüzesetek statisztikái szolgáltak alapul. Az események adatai közül kizárólag a beavatkozást igénylő tüzesetek kerültek be a vizsgálatba, a műszaki mentéseket kizártam. A tüzeseti beavatkozások adatai közül a statisztikai torzítás kiküszöbölésére eltávolítottam az elhúzódó (3 óránál hosszabb) és az öt percnél rövidebb eseteket. Az így nyert adatok azt mutatják, hogy az átlagos beavatkozási időtartam, ami a kiérkezéstől a felszámolásig tart, 39 perc, a medián időtartam 29 perc. Az adatokból következik, hogy a tüzesetknél a vonulás megkezdésétől a felszámolásig védőruhában töltött idő az esetek többségében meghaladja a jelen vizsgálatban alkalmazott 30+5 percet. A beavatkozások időbeni eloszlása jól látható a 2. ábrán.

Eredmények

A statisztikai számításokat JMP 18 szoftverrel végeztem. A bevetési ruhában (BEV) és a sportruházatban végzett kontrollcsoportok (KON) közötti eredmények összehasonlítása kétmintás t-próbával történt a statisztikai szignifikancia szintje $p < 0,05$ volt. A tesztek végén mért maghőmérsékletek (T_c) összehasonlítása kétmintás t-próbával történt. A teszt eredménye, hogy a BEV-csoportban (átlag $[M] = 38,36$; szórás $[SD] = 0,116$) és a KON-csoportban ($M = 37,99$; $SD = 0,055$) a T_c szignifikáns ($p = 0,010$) különbséget mutatott. A 35. percben mért maximális bőrhőmérsékletek (T_s) BEV- ($M = 35,6$; $SD = 0,565$) és a KON-csoportban ($M = 31,78$ $SD = 1,051$) a T_s szignifikánsan ($p = 0,00134$) eltérnek. A teszt végén detektált pulzusszámok (HR) esetében a BEV- ($M = 163,4$; $SD = 8,414$) és KON- ($M = 133$; $SD = 9,848$) csoportok között a statisztikai elemzés jelentős különbséget mutatott ki ($p = 0,0127$). A BEV-csoportban a maghőmérséklet és a ruha-test közötti légrésben mért hőmérséklet (T_{gap}) kapcsolatát Pearson-féle korrelációval vizsgáltam. Az eredmény ($r = 0,7587$) alapján a két változó között erős pozitív kapcsolat fedezhető fel. A mért bőrhőmérséklet és a ruházat alatti légrés hőmérséklete között végzett korrelációs elemzés nagyon gyenge kapcsolatot ($r = 0,2823$) mutatott ki. Az ötperces adatokon alapuló maghőmérséklet-görbék töréspontjának kiszámítása matematikai úton függvények analízisével történt.

Megbeszélés

A test hőegyensúlya a hőtermelő és hőleadási folyamatok kiegyenlítésének eredménye. Az egyensúly szempontjából fontos tényezők a metabolikus hőtermelés mértéke, a ruházat hővezetési tulajdonságai és a környezeti viszonyok. A bevezetőben kiemeltük azt a tényt, hogy a védőruházat célja a környezetistressz-tényezők hatásának kiküszöbölése vagy csökkentése. A fizikai és kémiai hatások elleni védelem a legtöbb esetben speciális szövetek és azok különböző kezeléseinek alkalmazását jelenti, amelyek a vízpára számára korlátozottan átjárhatóak. A megfelelő védelem ezért gyakran csak a test hőegyensúlyának jelentős befolyásolásával érhető el.

A hőáramlást a ruházaton keresztül két tulajdonság határozza meg, a hőszigetelés és a párolgási ellenállás. A hőszigetelés a ruházat hőáramlás, hőszigetelés és hővezetés útján történő hőátadásnak való ellenállása, míg a párolgási ellenállás a ruha vízpára-áteresztő képességének mérőszáma. A hőszigetelést a ruha anyagának tulajdonságai, a szövet szerkezete, valamint a szövetrétegek közti levegőréteg határozza meg. Ezek közül a legfontosabb tényező a légrétegek vastagsága. A párolgási ellenállás a vízpára-áteresztésének ellenállása, mivel az átvitt hő a bőr felületén elpárolgó és a környezetbe átvitt nedvességhez kötődik. Ennek megfelelően a nedvességátvitelhez kapcsolódó tulajdonságok meghatározóak a párolgási hőcserében. A szövet legfontosabb tulajdonsága a pórusok mérete és a légrétegek vastagsága. Minél kisebbek a pórusok, és minél vastagabbak a légrétegek, annál kisebb lesz az átvitt vízgőz mennyisége, és annál kisebb lesz a hővesztés.²⁵

A tűzoltó védőruházat vízszigetelését a középső rétegben elhelyezkedő mikropórusos membrán végzi. A membránokon kialakuló vízkondenzáció eltömítheti a pórusokat, csökkentheti a gőzáteresztő képességet és ronthatja a porózus membránok teljesítményét. Bebizonyosodott, hogy a porózus membránon lévő folyadék „szennyeződése” csökkenti a membránon keresztüli nedvességdifúzió sebességét, mivel eltömíti a pórusokat, és ezáltal csökken a nyitott terület.²⁶ Az elméletet igazolja, hogy a mérések során az átlagos relatív páratartalom a teszt végére meghaladta a 80%-ot (80,64%; SD = 8,59), ami már jelentős kondenzációt váltott ki mind a bevetési ruhán, mind a testen. A ruházat alatti mikroklima közvetlenül befolyásolja a bőr felületén zajló hőcserét, és jelentősen meghatározza a fiziológiai és pszichológiai reakciókat. A mért adatok szerint az átlagos hőmérséklet a védőruha alatti légrétegben a munkavégzés 10. percében már meghaladja a 30 °C-ot és a 65%-os páratartalmat. A két érték az idő múlásával párhuzamosan gyors ütemben növekszik, amit a statisztikai vizsgálat is igazolt.

3. táblázat: Mikroklimatikus viszonyok a védőruházaton belül

Eltelt idő (min)		5	10	15	20	25	30	35
Hőmérséklet (°C)	Átlag	30,87	31,90	32,71	33,21	33,57	33,75	33,85
	SD	2,17	1,52	1,18	1,08	1,04	1,07	1,03
Páratartalom (RH %)	Átlag	63,05	67,17	71,70	74,07	76,9	78,45	80,95
	SD	7,63	8,79	8,50	9,19	8,49	9,71	9,89

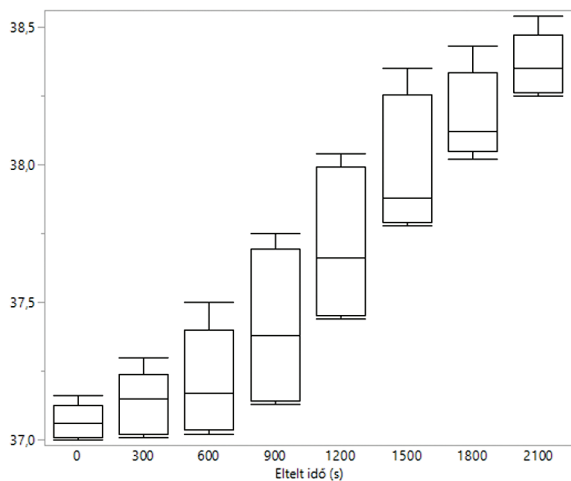
Forrás: a szerző szerkesztése

A mikroklima levegőjének hőmérséklete és vízgőznyomása szoros összefüggésben áll a viselt ruházat hőmérséklet-visszatartó tulajdonságaival. A félig áteresztő képességű szövetek esetén a vízgőznyomás fokozatosan emelkedik, és ha a beavatkozás elég

²⁵ HOLMÉR 2006.

²⁶ KHAKPOUR–GIBBONS–CHANDRA 2021.

hosszú ideig tart, elérheti a telítettségi nyomást (100% relatív páratartalom). A párolgás gátlása miatt bekövetkező csökkent hőcsere miatt a ruházat alatti mikroklima léghőmérséklete és a bőr hőmérséklete is jelentősen emelkedhet (3. táblázat). Amikor a bőrhőmérséklet megemelkedik, és eléri vagy meghaladja a külső környezet hőmérsékletét, a hőleadás legfontosabb csatornája a párolgás. A szervezet válasza a meleg környezetben a hőegyensúly megtartása érdekében az izzadási ráta megemelése. Mivel a párával részben telített környezet az izzadás további párolgását megakadályozza, a hűtés elégtelenné válik, és a maghőmérséklet emelkedni kezd. A 3. ábrán látható, hogy a résztvevők maghőmérséklete a teszt kezdetekor viszonylag egységesen a 37–37,3 °C sávban mozgott. A terhelés megkezdésével az egyes résztvevőknél eltérő ütemben kezdődött meg a maghőmérséklet emelkedése, de az ábrán a 12. perctől ugrásszerű növekedés figyelhető meg. A 10–25 perc közötti intervallumban tapasztalt maghőmérséklet-emelkedések nagyobb szórását az egyes résztvevők egyéni reakciója, edzettsége, esetleges hőaklimatizációs státusza befolyásolta. A teszt végső fázisában mért maghőmérsékletek egyre kisebb szórással 38,3–38,5 °C között alakultak.



3. ábra: A védőruházatban mért maghőmérséklet változása

Forrás: a szerző szerkesztése

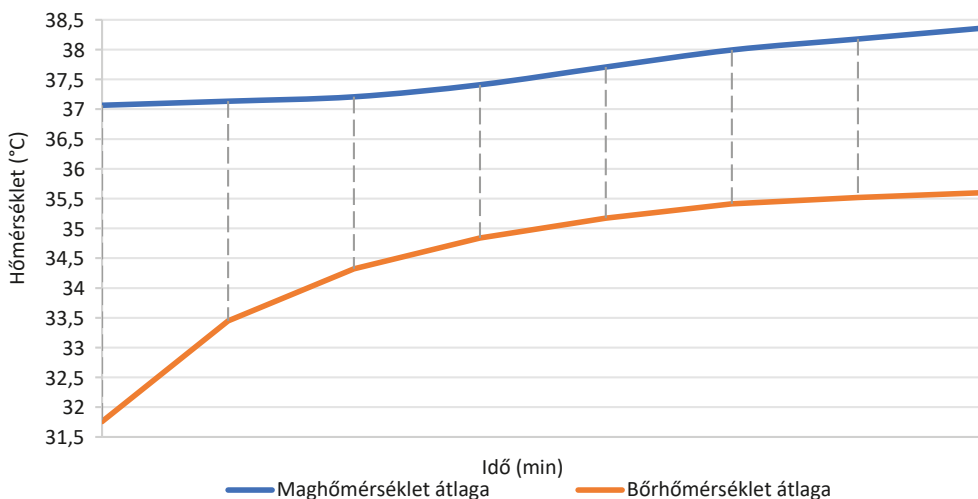
Kompenzálatlan hőterhelés akkor következik be, amikor a test felületéről a hőt az izzadás nem képes olyan sebességgel elvezetni, amilyen ütemben azt termeli. Ilyen esetekben a fokozott izzadás ellenére a hőleadás hatékonysága visszaesik, és nem képes a folyamatos testhőemelkedést megakadályozni. A kompenzálatlan hőterhelést több módon is detektálhatjuk. A legegyszerűbb módszer a maghőmérséklet növekedésének ütemét vizsgálva megállapítani, mikor éri el és haladja meg a 0,03 °C percenkénti emelkedést. A kísérletben részt vevőknél ez átlagosan 15 perc elteltével, de 20 percet nem elérve következett be, míg a kontrollcsoport eredményei ezt a jelenséget nem igazolták. A 4. táblázatban látható eredmények rávilágítanak arra, hogy az átmenet a két állapot között a maghőmérséklet ugrásszerű emelkedésével jár együtt.

4. táblázat: A maghőmérséklet növekedésének üteme a védőruhás csoportnál

Eltelt idő (s)	300	600	900	1200	1500	1800	2100
Maghőmérséklet változása (°C/5 perc)	0,068	0,074	0,202	0,298	0,286	0,184	0,184
A maghőmérséklet percenkénti változása $\Delta T(^{\circ}\text{C}/\text{perc})$	0,0136	0,0148	0,0404	0,0596	0,0572	0,0368	0,0368

Forrás: a szerző szerkesztése

A kompenzálatlan hőterhelésre következtethetünk a maghőmérsékleti görbék töréspontjából is. Az egyes maghőmérsékleti grafikonokon az állapotváltozást jelző töréspontot egy eset kivételével valamennyi görbén sikerült kimutatni a görbék matematikai elemzésével. A számítások kimutatták a második derivált előjelváltását, tehát sz inflexiós pont létezését. Ez a matematikai töréspont erős korrelációt mutatott ($r = 0,8695$) a $0,03^{\circ}\text{C}/\text{perc}$ hőmérséklet-emelkedést jelző adatokkal. Annál a résztvevőnél, ahol a töréspont matematikailag nem volt kimutatható, feltételezhetően a meglévő hőakklimatizáció miatt, a szervezet nem lépett át a kompenzálatlan hőterhelési szakaszba. További kutatást igényel az, hogy a maghőmérsékletet és a bőrhőmérsékletet ábrázoló görbék közötti távolság (4. ábra) változásából kimutatható-e a hőkompenzációs átmenet.



4. ábra: A maghőmérséklet és a bőrhőmérséklet összefüggései

Forrás: a szerző szerkesztése

Összegzés

A fenti elemzések alapján megerősíthető az a feltevés, miszerint a tűzoltók hőterhelését jelző kompenzációs pontot a közvetlen tűzoltási feladatokat megelőzően az előkészítő szerelési munkák alatt is átlépheti a szervezet. Az eredmények tükrében igazolható a feltételezés is, hogy már a beavatkozások kezdeti szakaszában olyan mikroklimatikus viszonyok alakulhatnak ki a védőruházatban, amelyek kompenzálatlan hőterhelés kialakulásához vezethetnek. Az adatok azt mutatták, hogy a védőruházaton belül a teszt végén az átlagos légréghőmérséklet 33,58 °C, (SD 1,03) és a relatív páratartalom 80,95% (SD 9,89) volt.

Kutatási kérdés volt az is, hogy közepes intenzitású fizikai munkavégzés során tűzoltó bevetési védőruházatban milyen időtartam alatt éri el a szervezet a kompenzálatlan hőterhelés zónáját. A mérési eredmények tükrében látható, hogy a bevetési védőruhát viselő személyeknél a kompenzálatlan hőterhelést jelző markerek jellemzően a 15. és 18. perc között jelentek meg. A statisztikai elemzés adataiból kiderül, hogy azonos külső terhelés mellett a kontrollcsoportban sem a maghőmérséklet, sem a bőrhőmérséklet, sem a terhelés mértékét jelző pulzusszám nem éri el a bevetési ruhás értékeket. A bevetési ruhában (BEV) és a sportruházatban végzett (kontroll, KON) 35 perc időtartamú 9 ± 1 MET-egységben megszabott terheléses vizsgálaton a csoportok közötti eredmények alapján a két csoport maghőmérséklet (T_c) értékei között jelentős eltérés mutatkozott. BEV-csoportban (átlag $[M] = 38,36$; szórás $[SD] = 0,116$) és a KON-csoportban ($M = 37,99$; $SD = 0,055$) a T_c -értékek szignifikáns ($p = 0,010$) különbséget mutattak. A teszt végén detektált pulzusszámok (HR) esetében a BEV- ($M = 163,4$; $SD = 8,414$) és KON- ($M = 133$; $SD = 9,848$) csoportok között a statisztikai elemzés szintén jelentős különbséget mutatott ki ($p = 0,0127$).

A vizsgálat eredményei támpontot adhatnak a további kutatásokhoz, amelyek arra irányulnak, hogy a test maghőmérsékletének emelkedése milyen mértékű folyadékvesztéssel jár, és ez milyen hatással van a tűzoltók fizikai és kognitív teljesítményére.

A kutatás korlátai

A vizsgálat limitációja, hogy a minta mérete és ezzel a rendelkezésre álló adatok mennyisége nem elegendő a minőségi statisztikai adatelemzéshez és az eredmények széles körű alkalmazásához. Továbbá a minta összetétele nem reprezentálja teljeskörűen a tűzoltók demográfiai eloszlását. A kutatás későbbi szakaszaiban szükséges a minta méretének növelése és a résztvevők véletlenszerű kiválasztása.

Felhasznált irodalom

BORG, Gunnar A. (1982): Psychophysical Bases of Perceived Exertion. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 14(5), 377–381. Online: <https://doi.org/10.1249/00005768-198205000-00012>

- CARLTON, Andrew – ORR, Robin Marc (2015): The Effects of Fluid Loss on Physical Performance: A Critical Review. *Journal of Sport and Health Science*, 4(4), 357–363. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2014.09.004>
- CHEUNG, Stephen S. – LEE, Jason K.W. – OKSA, Juha (2016): Thermal Stress, Human Performance, and Physical Employment Standards. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 41(2), 148–164. Online: <https://doi.org/10.1139/apnm-2015-0518>
- CHEUNG, Stephen S. et al. (2000): The Thermophysiology of Uncompensable Heat Stress. Physiological Manipulations and Individual Characteristics. *Sports Medicine*, 29(5), 329–359. Online: <https://doi.org/10.2165/00007256-200029050-00004>
- DICKHUTH, Hans-Hermann (2005): Táplálkozás, hő-, víz-, elektrolit-háztartás és a testi aktivitás. In *Sportélettan, sportorvostan*. Budapest: Dialóg Campus.
- DOS SANTOS, Lopes Marcel et al. (2025): The Metabolic Demand of Firefighting: A Systematic Review. *Physiologia*, 5(2), 12. Online: <https://doi.org/10.3390/physiologia5020012>
- HANCOCK, P. A. – VASMATZIDIS, I. (2003): Effects of Heat Stress on Cognitive Performance: The Current State of Knowledge. *International Journal of Hyperthermia*, 19(3), 355–372. Online: <https://doi.org/10.1080/0265673021000054630>
- HOLMÉR, Ingvar (2006): Protective Clothing in Hot Environments. *Industrial Health*, 44(3), 404–413. Online: <https://doi.org/10.2486/indhealth.44.404>
- HORVÁTH Lilla (2023): A tűzoltó egyéni védőeszközök fejlesztési lehetőségei ergonómiai szempontok alapján. In PADÁNYI József – GÖCZE István (szerk.): *Hűsz év a katonai műszaki tudományok szolgálatában*. Budapest: Ludovika, 71–79.
- JETTÉ, M. – SYDNEY, K. – BLÜMCHEN, G. (1990): Metabolic Equivalents (METS) in Exercise Testing, Exercise Prescription, and Evaluation of Functional Capacity. *Clinical Cardiology*, 13(8), 555–565. Online: <https://doi.org/10.1002/clc.4960130809>
- JUDELSON, Daniel A. et al. (2007): Hydration and Muscular Performance: Does Fluid Balance Affect Strength, Power and High-Intensity Endurance? *Sports Medicine*, 37, 907–921. Online: <https://doi.org/10.2165/00007256-200737100-00006>
- KANYÓ Ferenc – VÁSÁRHELYI-NAGY Ildikó (2021): A beavatkozó tűzoltói állomány kompetencia alapú fizikai állapotfelmérése. *Védelem Tudomány*, 6(1), 204–217. Online: <https://ojs.mtak.hu/index.php/vedelemtudomany/article/view/13455>
- KHAKPOUR, Ariana – GIBBONS, Michael – CHANDRA, Sanjeev (2021): Effect of Moisture Condensation on Vapour Transmission Through Porous Membranes. *Journal of Industrial Textiles*, 51(2_suppl), 1931–1951. Online: <https://doi.org/10.1177/15280837211014239>
- KUTASI Csaba (2025): A tűzoltó-védőruházatok főbb jellemzői. *Magyar Textiltechnika*, 73(2), 16–22. Online: https://tmte.hu/wp-content/uploads/2025/05/MTT2025_2_16_Tuzolto.pdf
- MOSTELLER, Randhawa D (1987): Simplified Calculation of Body Surface Area. *New England Journal of Medicine*, 317(17), 1098. Online: <https://doi.org/10.1056/nejm198710223171717>
- NFPA 1582 Standard on Comprehensive Occupational Medical Program for Fire Departments (2022). NFPA. Online: www.nfpa.org/codes-and-standards/nfpa-1582-standard-development/1582

- PÁNTYA Péter (2018): A Katasztrófavédelem beavatkozó hatékonyságának fejlesztése a tűzoltósági területen. *Hadmérnök*, 13(Különszám), 109–144. Online: www.hadmernok.hu/180kofofop_07_pantya.pdf
- PAVLIK Gábor (2019): *Élettan-sportélettan*. Budapest: Medicina.
- RAVANELLI, Nicolas – BONGERS, Coen – JAY, Ollie (2019). The Biophysics of Human Heat Exchange. In PÉRIARD, Julien – RACINAIS, Sébastien (szerk.) *Heat Stress in Sport and Exercise*. Cham: Springer, 29–43. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-319-93515-7_2
- SCHMIT, Cyril et al. (2017): Cognitive Functioning and Heat Strain: Performance Responses and Protective Strategies. *Sports Medicine*, 47, 1289–1302. Online: <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0657-z>
- SMITH, Denise L. – MANNING, T. – PETRUZZELLO, S. (2001): Effect of Strenuous Live-Fire Drills on Cardiovascular and Psychological Responses of Recruit Firefighters. *Ergonomics*, 44(3), 244–254. Online: <https://doi.org/10.1080/00140130121115>
- SMITH, Denise L. et al. (2008): *Firefighter Fatalities and Injuries: The Role of Heat Stress and PPE*. Champaign, IL: Firefighter Life Safety Research Center, Illinois Fire Service Institute, University of Illinois at Urbana-Champaign. Online: www.fsi.illinois.edu/documents/research/FFLSRC_FinalReport.pdf
- THOMPSON, Catherine et al. (2023): Do Extreme Temperatures Affect Cognition? A Short Review of the Impact of Acute Heat Stress on Cognitive Performance of Firefighters. *Frontiers in Psychology*, 14. Online: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1270898>
- VITRAI József (2021): Cikkismertetés: A magas hőmérséklet egészségkockázata. *Egészségfejlesztés*, 62(4), 86–91. Online: <https://doi.org/10.24365/ef.v62i4.7242>