

A légsebesség-változás hatása a várható hőérzetre, az állandó és impulzusszerű befúvás összehasonlítása

The Effect of Air Velocity Changes on Perceived Temperature, Comparison Of Continuous and Pulsed Airflow

LENKOVICS László¹, CAKÓ Balázs²

Pécsi Tudományegyetem, Műszaki és Informatikai Kar, Épületgépész- és Létesítménymérnöki Tanszék,
Hőkomfort Kutatócsoport
H-7624 Pécs, Boszorkány street 2., Hungary

¹ e-mail: lenkovics.laszlo@mik.pte.hu

² e-mail: cako.balazs@mik.pte.hu

Abstract

The character of indoor air movement — particularly the comparison between steady, laminar air supply and time-varying, pulsating jet techniques — has emerged as a key question in HVAC comfort research. Based on a systematic review of the relevant international literature, this paper investigates how the fluctuation characteristics, turbulence intensity, and pulsation frequency of air velocity influence occupants' thermal sensation, the draught rate (DR) characterising draught discomfort, and overall thermal comfort as defined by the PMV–PPD indices. The analysis demonstrates that pulsating air supply modes and those simulating natural air movements deliver more favourable comfort outcomes than steady air velocity under a wide range of conditions, while also offering opportunities to reduce energy consumption.

Keywords: thermal comfort, PMV, draught rate (DR), turbulence intensity, pulsating air supply, simulated natural air movement, dynamic air velocity

Kivonat

A beltéri légmozgás jellege – különösen az állandó, lamináris befúvás és az időben változó, impulzusszerű légsugár-technikák összehasonlítása – az épületgépészeti komfortkutatás egyik kiemelkedő kérdésévé vált. A jelen szakcikk a vonatkozó nemzetközi szakirodalom szisztematikus feldolgozása alapján vizsgálja, hogy a légsebesség fluktuációs karakterisztikája, turbulenciaintenzitása és impulzusgyakorisága hogyan befolyásolja az emberek termikus érzetét, a huzathatást jellemző DR-értéket, valamint a PMV–PPD indexszel meghatározott általános hőkomfortot. Az elemzés rámutat arra, hogy az impulzusszerű és természetes légmozgást imitáló befúvási módok számos körülmény között kedvezőbb komforteredményeket produkálnak, mint az állandó légsebesség, miközben az energiafelhasználás csökkentésére is lehetőséget adnak.

Kulcsszavak: hőkomfort, PMV, huzathatás (DR), turbulenciaintenzitás, impulzusszerű befúvás, szimulált természetes légmozgás, dinamikus légsebesség

1. BEVEZETÉS

A cikk célja a légsebesség változás hatása a várható hőérzetre: befúvás milyenségének változtatása. Állandó, lamináris befúvás valamint a természetes befúvást jobban imitáló, impulzus szerű befúvás összehasonlítása és annak a kutatásnak az előkészítése, hogy mely légsebesség tartomány tekinthető ideálisnak a hőkomfortra gyakorolt hatásának szempontjából, ideértve a szellemi teljesítőképesség szempontjából optimális hőérzet (PMV<0) kialakulásához szükséges légsebességet.

A beltéri hőkomfort biztosítása az épületgépészet egyik alapvető feladatköre. A PMV (*Predicted Mean Vote*, várható hőérzeti szavazat) és a PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*, elégedetlenek várható aránya) indexek – amelyeket P. O. Fanger dolgozott ki és az ISO 7730 szabvány rögzít [1] – a globális termikus komfort értékelésének máig legelterjedtebb eszközei. E modellek hat változó – léghőmérséklet, közepes sugárzási hőmérséklet, relatív páratartalom, légsebesség, anyagcsere-szint és ruházat hőszigetelési értéke – együttes figyelembevételével becsülik az emberek várható hőérzetét.

A légsebesség a PMV-összefüggésbe az emberi bőr konvektív hőleadásán keresztül lép be: magasabb légsebesség fokozza a konvektív hővesztést, ezáltal csökkenti a PMV értékét meleg környezetben, de hűvös körülmények között huzatérzést – azaz helyi diszkomfortot – okozhat. Hagyományos szellőzési rendszerekben a légbefúvás jellemzően állandó sebességű, lamináris jellegű áramot kelt a tartózkodási zónában. Ugyanakkor a természetes légmozgás nem állandó, hanem karakterisztikus, rendszertelen ingadozású (1/f típusú), teljesítménysűrűség-spektrumú fluktuációkat mutat, amelyek hatása a bőr termoreceptoraira lényegesen eltér a lamináris légmozgásától.

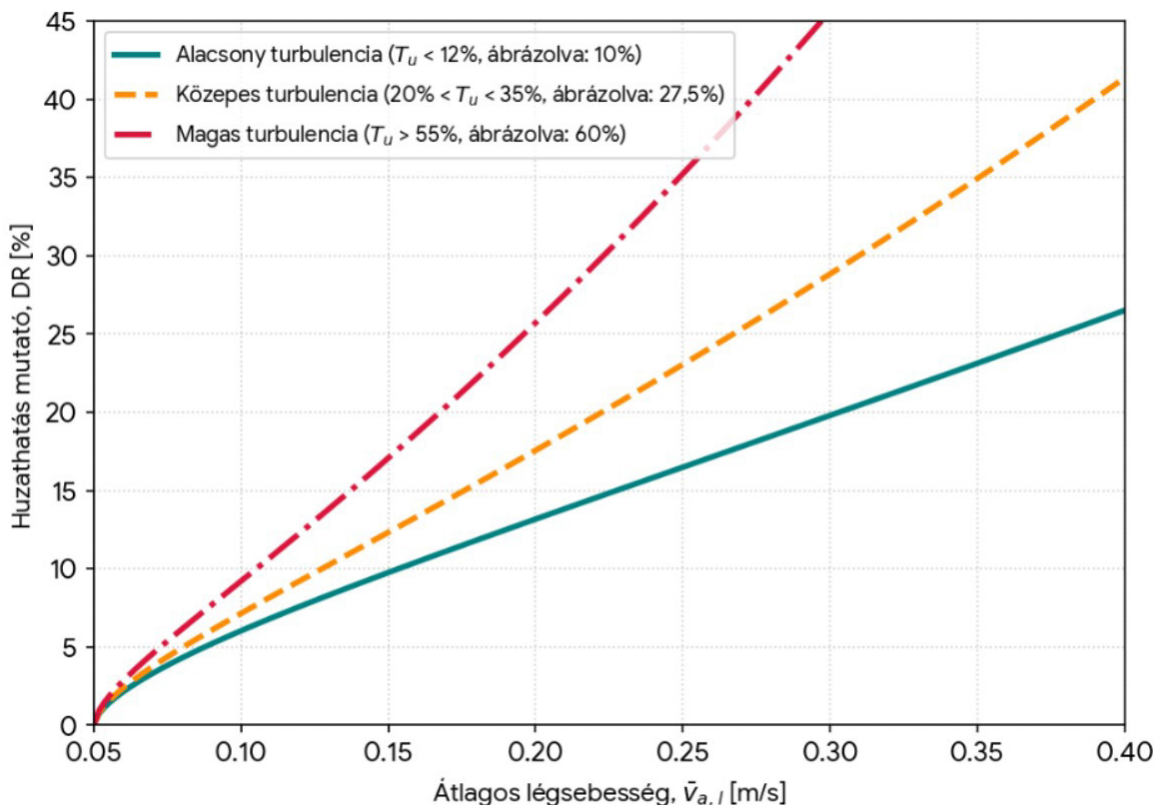
Az elmúlt két évtizedben számos kutatócsoport vizsgálta, hogy az időben változó, impulzusszerű befúvás – amely a természetes légmozgás dinamikáját kívánja reprodukálni – javítja-e a termikus komfortot az állandó légellátáshoz képest. A kérdés mind elméleti, mind alkalmazott szempontból releváns: ha az impulzusszerű befúvás azonos időátlagos légsebességen kedvezőbb hőérzetet kelt, akkor a szellőzőrendszer-tervezésben és szabályozásban komoly energiagazdaságossági és komfortjavítási potenciál rejlik.

A jelen szócikk a legfontosabb nemzetközi folyóiratokban megjelent tanulmányok áttekintése alapján elemzi a légsebesség-fluktuáció jellemzőinek – köztük a turbulenciaintenzitásnak, a fluktuációs frekvenciának és az impulzusszerűség mértékének – hatását a termikus komfortra. Az összehasonlítás különös hangsúlyt fektet az állandó és a természetes légmozgást szimuláló befúvási módok komfortelőnyeire, a huzathatással kapcsolatos összefüggésekre, valamint a szabványos PMV-PPD modell érvényességének korlátaira dinamikus légtérben.

2. A HŐKOMFORT ÉRTÉKELÉSÉNEK MÓDSZERTANA

2.1. A PMV-PPD modell és a légsebesség szerepe

Az ISO 7730:2005 szabvány [1] a Fanger-féle PMV-modellt egységes rendszerbe gyűjti, amelynek alapja az emberi test hőmérlegének egyensúlyi egyenlete. A modell szerint $PMV=0$ esetén az emberek csoportja várhatóan semlegesnek ítéli meg a hőkörnyezetet; az elfogadható tartomány $-0,5 \leq PMV \leq +0,5$ ($PPD < 10\%$). A légsebesség a konvektív hőátadáson keresztül határozza meg a ruházaton keresztüli és a bőrön közvetlen érzékelt hőcserét. A szabvány 0,15 m/s-tól 1,5 m/s-ig érvényes, ülő, könnyű irodai tevékenység esetén tipikusan 0,10–0,20 m/s légsebességet ír elő [1].



1. ábra. A huzathatás (DR) miatti elégedetlenek aránya

A helyi huzatdiszkomfort értékelésére a DR (*Draught Rate*, huzatarány) mutatót alkalmazzák, amelyet Fanger és munkatársai vezettek be 1988-ban [2]. A DR az elégedetlen személyek várható százalékos arányát fejezi ki a huzatérzet alapján, és a következő összefüggéssel számítható:

$$DR = (34 - t_{a,l}) \cdot (\bar{v}_{a,l} - 0,05)^{0,62} \cdot (0,37 \cdot \bar{v}_{a,l} \cdot Tu + 3,14)$$

ahol $t_{a,l}$ a helyi léghőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$], $\bar{v}_{a,l}$ a helyi átlagos légsebesség [m/s], Tu a turbulenciaintenzitás [%].

A modell eredeti kísérlete ötven alannyal zajlott $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os szobahőmérsékleten, ahol az alanyok légáramot érzékeltek $0,05\text{--}0,40\text{ m/s}$ sebességtartományban, három különböző turbulenciaintenzitás mellett ($Tu < 12\%$, $20\% < Tu < 35\%$, $Tu > 55\%$) [2]. A kísérlet egyik legfontosabb tanulsága, hogy azonos átlagos légsebesség és hőmérséklet mellett a magas turbulenciaintenzitású áramlás szignifikánsan több huzatpanaszt okozott.

Készítettünk egy diagramot a megadott $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os szobahőmérsékletre $0,05\text{--}0,40\text{ m/s}$ sebességtartományban (1. ábra). A megadott turbulenciaintenzitások tartományokat jelölnek, a görbék kiszámításához az ISO 7730 szabványnak megfelelő reprezentatív középértékeket használtuk. A diagramból leolvasható, ha egy irodában a megengedett maximális DR érték 20% (B kategória), akkor magas turbulenciánál a légsebesség nem lépheti át a $0,22\text{ m/s}$ -ot, míg DR 10% esetében akár a $0,32\text{ m/s}$ -os légsebesség is elfogadható ugyanezen a hőmérsékleten.

2.2. Turbulenciaintenzitás és az egyenértékű frekvencia

A turbulenciaintenzitás (Tu) az átlagos légsebesség körüli véletlenszerű fluktuációk mértékét jellemzi. Fanger és munkatársai [2] kimutatta, hogy az alacsony turbulenciájú ($Tu < 12\%$) áramlás jóval kisebb huzatérzetet vált ki, mint a közepes ($20\text{--}35\%$) vagy magas ($> 55\%$) turbulenciájú áramlás ugyanolyan átlagos sebesség és hőmérséklet esetén. Ez az összefüggés beépül a DR-modellbe, ahol a turbulenciaintenzitás lineárisan növeli a huzatarány értékét.

Zhou és Melikov [3] bevezette az egyenértékű frekvencia fogalmát, amely a turbulens áramlások frekvenciakarakterisztikáját egyetlen paraméterrel jellemzi. A szinuszos sebességfluktuáció azon frekvenciájának felel meg, amely esetén a gyorsulás szórásának a sebességszórásához viszonyított aránya megegyezik a vizsgált véletlenszerű fluktuációéval. Kísérleti eredményeik szerint a $0,2\text{--}0,6\text{ Hz}$ közötti frekvenciatartomány a leghuzatosabb, mivel e frekvenciatartományban a bőr termoreceptorainak ingerlési sebessége maximális. E megállapítást megerősíti Fanger és Pedersen korábbi kísérlete, amelynek értelmében a $0,3\text{--}0,5\text{ Hz}$ -es fluktuáció okozza a legnagyobb kellemetlen érzetet [4].

Huang és munkatársai [4] szisztematikus klímakamra-kísérletsorozatban vizsgálta a perceptibilis fluktuációs frekvenciák tartományát $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletű szobában szinuszosan változó légáramoltatással. Eredményeik szerint az emberek által érzékelhetőnek ítélt frekvenciatartomány $0,2$ és $1,5\text{ Hz}$ között van; az $0,05\text{ Hz}$ alatti és a $2,2\text{ Hz}$ feletti frekvenciájú fluktuáció nem érzékelt ingadozásnak minősül. A $0,5\text{ Hz}$ -es és $1,0\text{ Hz}$ -es szinuszos áramlások szignifikánsan erősebb hűtőérzetet váltottak ki, ami arra utal, hogy a frekvencia optimalizálásával a légsebesség hőérzeti hatása fokozható.

3. ÁLLANDÓ BEFÚVÁS JELLEMZŐI ÉS KORLÁTAI

A hagyományos fűvókás, lapátrácsozású légbefűvők és a fan-coilos rendszerek jellemzően állandó, vagy csak lassan változó sebességű légáramot juttatnak a tartózkodási zónába. E rendszerek turbulenciaintenzitása alacsony ($Tu < 20\%$), a sebességprofil közel stacioner, és a teljesítménysűrűség-spektrum meredeken csökkenő lefolyású, azaz a β paraméter a kettős logaritmusos teljesítménysűrűség-görbén alacsony ($\beta \approx 0,3$) [5]. Ennek következtében az ilyen befűvás dinamikus bőrreceptor-ingerlési hatása elmarad a természetes légmozgástól.

Az állandó légellátás egyik ismert hátránya, hogy adott átlagos sebességen a tartós, monoton légáramoltatás ún. termikus unalmat (*thermal boredom*) és termikus fáradtságérzetet okozhat, különösen melegebb beltéri hőmérsékleteken, ahol a hűtési igény fokozódik [6]. A tartózkodási zóna kielégítő hűtéséhez szükséges légsebesség sok esetben meghaladja az ISO 7730 huzatkorlátait ($DR < 20\%$), ami ellentmondást teremt a hőkomfort és a helyi diszkomfort-elvárások között.

Lestinen és munkatársai [7] kísérletileg kimutatta, hogy a szimmetrikusan elhelyezett termikus csóvák és diffúz mennyezeti légbefűvő kölcsönhatásakor a tartózkodási zónában a turbulenciaintenzitás és a fluktuációs energia szignifikánsan megnövekszik, különösen magasabb hőterhelés esetén. Ez azt jelenti, hogy még a névlegesen állandó mennyezeti befűvás is inhomogén, dinamikus sebességmezőt hozhat létre a tartózkodási zónában, ha termikus csóvák jelenlétével kell számolni – ez ugyanakkor kiszámíthatatlan és nem optimalizált fluktuációmintát eredményez.

Különböző nemek és egyéni preferenciák szempontjából is eltérések mutatkoznak az állandó légáramoltatás fogadtatásában. Kawakubo és munkatársai [8] japán irodákban végzett helyszíni vizsgálatában feltárta, hogy a férfiak kedvező PMV-értéket találnak enyhén hűvös légáramlás mellett ($PMV = -0,61$), míg a nők termelékenységüket semleges körüli vagy enyhén meleg hőérzetnél ($PMV = +0,23$) optimalizálják. Ez az egyéni változékonyság megkérdőjelezi az egységes, állandó légáramoltatáson alapuló stratégiák általános érvényességét.

4. IMPULZUSSZERŰ ÉS A TERMÉSZETES SZELET SZIMULÁLÓ BEFÚVÁSI TECHNIKÁK

4.1. A természetes légmozgás spektrális jellemzői

A természetes légmozgás sebességfluktuációja nem véletlenszerű fehér zajként, hanem úgynevezett $1/f$ típusú, ún. rózsaszín zajként írható le, ahol a teljesítménysűrűség-spektrum $\beta \approx 1,0-1,7$ értékű negatív meredekségű kétlogaritmikus összefüggést követ [5]. Ez azt jelenti, hogy alacsonyabb frekvenciákon a sebességfluktuáció amplitúdója lényegesen nagyobb, mint magasabb frekvenciákon. Gao és munkatársai [5] megállapította, hogy a természetes légmozgás β értéke és irányvariabilitása szignifikánsan nagyobb, mint a szokásos mechanikus légbefúvóké, ami alapvető különbséget teremt a két típus bőrreceptor-ingerlési hatásában.

Cui és munkatársai [9] alapvető kísérlete három légáramlástípus – állandó mechanikus légmozgás, szimulált természetes ($1/f$ spektrum) és szinuszos légmozgás – összehasonlításával megállapította, hogy a dinamikus légáramlás erősebb hidegérzetet vált ki, mint az azonos sebességátlagú állandó légáram. Az összes dinamikus típus közül a természetes légmozgást szimuláló $1/f$ fluktuáció bizonyult a legelfogadhatóbbnak meleg (30 °C) hőkörnyezetben, míg semleges-hűvös (26 °C) hőmérsékleten e különbség kevésbé mutatkozott. A kísérlet eredménye szerint a természetes légmozgás szimulálásának közvetlen alkalmazási lehetősége van beltéri dinamikus légelosztóterminálokban.

4.2. Szinuszos és impulzusszerű befúvás hatása a komfortra

Huang és munkatársai [4] vizsgálatában a szinuszosan változó légáramlás $0,5\text{ Hz}$ -es frekvencián szignifikánsan erősebb hűtőérzetet keltett, mint az állandó azonos átlagos sebességű légáram 28 °C -os hőmérsékletű szobában. A szerzők értelmezése szerint a $0,5\text{ Hz}$ -es frekvencián a bőrtermoreceptorok adaptációs küszöbének megfelelő ingergyakorosság valósul meg, maximalizálva a dinamikus hőérzékelési reakciót.

Cao és munkatársai [10] szinuszos légáramlásokat szimulált emeleti ventilátor-motor frekvenciaváltoztatásával, amellyel $10, 30, 60$ és 100 másodperces periódusú légáramokat állított elő. A kísérletben 20 alany 30 °C -os és 70% -os relatív páratartalom melletti körülmények között volt kitéve a hat különböző légáramlástípusnak. Az eredmények szerint, bár a termikus érzeti szavazatok (TSV) a hat kondíció között nem különböztek szignifikánsan, a szinuszos légáramlások esetén szignifikánsan kevesebb diszkomforttünet (pl. szaruhártyaszárazság, fej- és hátfájás) jelentkezett, mint az állandó mechanikus befúvás esetén. A szinuszos légáramlások turbulenciaintenzitása $32-37\%$ közé esett, ami jelzi, hogy a kiváltott hatás elsősorban a fluktuáló sebességprofil, nem az átlagos sebesség hatásának tudható be.

Xie és munkatársai [11] többventilátor-alapú szimulált természetes légmozgás (SNW) és állandó mechanikus légmozgás (CMW) összehasonlításakor 28 °C és 30 °C körülmények között megállapította, hogy a szimulált természetes légmozgás mind a termikus érzeti szavazat (TSV), mind a termikus komfort szavazat (TCV) tekintetében szignifikánsan kedvezőbb eredményt nyújtott. Az alanyok 91% -a preferálta a szimulált természetes légmozgás a statikus gépi légáramlással szemben. A kísérletben az SNW olyan irányvariabilitással bírt, amely közelítette a valódi természetes légmozgást, ezzel tovább javítva az elfogadhatósági értékeket az egyirányú szimulált természeteshez képest.

4.3. Impulzusszerű befúvás és a sávós szellőzés

Ma és munkatársai [12] az ún. sávós (stréta) szellőzés (*stratum ventilation*) alkalmazásával kombinált impulzusszerű légelosztást vizsgálta, ahol a levegő periodikus, négyzetjel-szerű profilban kerül befúvásra. 25 alany bevonásával végzett klímakamra-kísérletben megállapítást nyert, hogy az impulzusszerű befúvás az állandó befúváshoz képest a huzat miatt elégedetlen személyek arányát 34% -ról 8% -ra csökkentette, az általános termikus diszkomfort arányát 16% -ról 4% -ra mérsékelte, miközben az alanyok 87% -a termikusan kényelmesnek értékelte a körülményeket (ISO 7730 A-kategóriás elvárásnak megfelelően). Az időátlagos

PMV és PPD értékek a dinamikus hőkörnyezetben is alkalmazhatónak bizonyultak a tényleges hőérzeti szavazatok előrejelzésére.

Yu és munkatársai [13] dinamikus vezérelt elektromos ventilátorokkal állított elő természetközeli fluktuáló légáramlást, ahol a ventilátor-forgásszám időfüggvénye úgy van modulálva, hogy a keletkező légsebesség β értéke és teljesítménysűrűség-spektruma a valódi természetes szélhez közelít. A kísérletben az alanyok 91%-a preferálta a szimulált természetes szelet az állandó gépi légáramoltatással szemben, és a termikus komfortszavazatok szignifikánsan magasabbak voltak. A szerzők megállapították, hogy a szimulált természetes légáram alkalmas a beltéri beállítási hőmérséklet 1–2 °C-kal való megemelésére az elfogadható komfortszint megtartása mellett, ami az épületenergetikai megtakarítás szempontjából jelentős.

5. DINAMIKUS LÉGÁRAMLÁS ÉS A PMV–PPD MODELL KORLÁTAI

A hagyományos PMV–PPD modellt stacionárius hőkörnyezetre dolgozták ki. Dinamikus – impulzusszerű vagy fluktuáló – légáramlás esetén a modell alkalmazhatóságát számos kutatás megkérdőjelezte. Az ISO 7730:2005 [1] ajánlása szerint átmeneti körülmények esetén, ahol csak egy vagy néhány paraméter mutat kisebb fluktuációt, az időátlagolt azonnali PMV (TAPMV) és PPD (TAPPD) értékek alkalmazhatók. Ugyanakkor nagyobb amplitúdójú vagy komplex dinamikus feltételek esetén ez a megközelítés pontatlan lehet.

Cao és munkatársai [6] összefoglaló tanulmányában rámutat, hogy a dinamikus hőkomfort értékelésére kifejlesztett speciális mutatók – mint az MTSV (módosított termikus érzeti szavazat) – jobban tükrözik az alanyok tényleges szubjektív értékelését, mint a statikus PMV. Különösen a természetes légáramot szimuláló légáramlások esetén a PMV–PPD modell jellemzően alulbecsüli a tényleges hűtőérzetet. Cao és munkatársai [14] fuzzy komprehenszív értékelési módszerrel megállapította, hogy a szimulált természetes légáram jelenlétében az optimális beltéri hőmérséklet 28 °C-ra emelhető, míg az elégedetlenek aránya 10% alatt tartható, ha a turbulenciaintenzitás 0,68 értéken van beállítva és az impulzuslégfűvás időtartama 5 perc.

Li és munkatársai [15] szisztematikus áttekintésükben összefoglalta, hogy dinamikus légáramlás hatására a konvektív bőrfelszíni hőátadási tényező (hc) 10 W/(m²·K) értékű növekedése várhatóan kb. 0,5 °C-os közepes bőrfelszín-hőmérséklet-csökkenést és 1 skálaegységnyi TSV-javulást eredményez ülő személyek esetén 26–32 °C-os léghőmérséklettartományban. Ugyanakkor a szerzők rámutatnak, hogy a jelenlegi komfortmodellek – köztük a PMV – nem veszik kellőképpen figyelembe a dinamikus légáramlások konvektív hűtési hatását, mivel a konvektív hőátadási tényező meghatározásában kizárólag az átlagos légsebesség szerepel a turbulenciaintenzitás és a hosszskála helyett.

Különböző szellőzési rendszerek összehasonlításáról Liu és munkatársai [16] áttekintése megállapítja, hogy az impulzusszerű szellőztetés (*pulsating ventilation*, PUV) a stacionárius szellőztetéshez képest az elégedetlen személyek arányát (PPD) 12–32,3%-kal képes csökkenteni. A szakaszos szellőztetés (*intermittent ventilation*, IV) ezzel szemben akár 37,8%-os PPD-csökkenést eredményez. E két módszer közötti különbséget a befűvési sebesség időbeli lefolyása magyarázza: a szakaszos szellőztetés a befűvési ciklusok között teljes szüneteket alkalmaz, míg az impulzusszerű szellőztetés folyamatos, de modulált sebességű légsugarat juttat a helyiségbe.

6. ÉPÜLETGÉPÉSZETI VONATKOZÁSOK ÉS TERVEZÉSI KÖVETKEZTETÉSEK

A bemutatott kutatási eredmények számos releváns következtetés levonására adnak lehetőséget az épületgépészeti tervezés és üzemeltetés szempontjából. Az egyenértékű frekvencia és a fluktuáló légsebesség komfortra gyakorolt hatásának figyelembevételével a szellőztető rendszerek befűvési sebességprofilja optimalizálható.

Elsőként megállapítható, hogy azonos átlagos légsebesség mellett az impulzusszerű befűvés kedvezőbb hőérzeti környezetet teremthet, mint az állandó légáram. Ez különösen a 26–30 °C-os, enyhén meleg irodai és oktatási épületi körülmények között releváns, ahol a konvektív hűtés fokozásával a klímaberendezés beállítási hőmérséklete 1–2 °C-kal megemelhető az elfogadható komfortszint fenntartásával. A természetes légáramlást szimuláló légbefűvás spektrális paramétereinek helyes megválasztása – amelynek alapja a $\beta \approx 1,0$ –1,4 értékű teljesítménysűrűség-spektrum – megakadályozza a termikus unalom és a monoton fáradtság kialakulását.

Másodszor, a befúvási frekvencia szabályozása szempontjából kerülendő a 0,3–0,5 Hz-es tartomány alkalmazása a tartózkodási zónában, mivel ez a frekvenciatartomány kísérleti eredmények szerint [2, 3, 4] maximális huzatérzetet okoz. Ezzel szemben a nagyon alacsony (< 0,05 Hz) frekvenciájú – azaz lassan változó – vagy nagyon magas (> 2 Hz) frekvenciájú fluktuáció az alanyok által nem érzékelt ingadozásnak minősül, és ezért nem járul hozzá a dinamikus hűtőhatáshoz sem.

Harmadszor, a stréta szellőztetés és az impulzusszerű légeosztás kombinálása Ma és munkatársai [12] eredményei szerint az egyik legjobb kompromisszumot nyújtja a huzatdiszkomfort csökkentése és a hőkomfort javítása között. A huzatarány drasztikus csökkentése (34%-ról 8%-ra) ISO 7730 A kategóriás komfortszint elérése mellett azt jelzi, hogy a befúvási mód helyes megválasztása érzékelhetően javíthatja a tartózkodói elégedettséget anélkül, hogy a légsebesség-limitet meg kellene lépni.

Negyedszer, az egyénileg vezérelt légmozgás (*personally controlled air movement*) lehetősége az irodai munkaállomásokon szintén figyelmet érdemel. Helyszíni vizsgálatok szerint az egyénileg vezérelt ventilátor lehetővé teszi, hogy a szobahőmérséklet 26–27 °C-ra emelkedjen anélkül, hogy az alanyok termikus komfortja és kognitív teljesítménye csökkenne a szokásos 23 °C-os setpointhoz képest [8]. Ez az energiagazdaságossági szempontból kiemelkedő eredmény a dinamikus légmozgás komfortjavító hatásán alapul.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A jelen szakcikk a légsebesség-fluktuáció karakterisztikájának hőérzetre gyakorolt hatásával foglalkozó nemzetközi szakirodalom összefoglalása alapján a következő fő megállapításokat teszi.

A huzatveszélyt jellemző DR-modell – amelyet Fanger és Melikov [2] dolgoztak ki – egyértelműen kimutatja, hogy a turbulenciaintenzitás önálló komfortparaméter: azonos átlagos légsebesség és hőmérséklet esetén a magas turbulenciaintenzitású áramlás szignifikánsan több huzatpanaszt vált ki. Ezért az állandó, alacsony turbulenciájú befúvás nem feltétlenül a legkedvezőbb megközelítés: a fluktuáló, de megfelelő frekvenciakarakterisztikával rendelkező légáram egyszerre hozhat kedvezőbb általános hőkomfortot és alacsonyabb huzatérzetet.

A természetes szelet szimuláló, 1/f spektrumú impulzusszerű befúvás mind szubjektív kísérletekben [9, 13], mind klímakamra-vizsgálatokban [11, 12] szignifikánsan kedvezőbb hőérzeti szavazatokat és magasabb elfogadottságot eredményez az állandó mechanikus befúváshoz képest azonos átlagos légsebesség és hőmérséklet mellett. Az optimális fluktuációs frekvencia közelítőleg 0,5 Hz, miközben a 0,3–0,5 Hz-es tartomány kerülendő a huzatérzet maximalizáló hatása miatt.

A hagyományos PMV–PPD modell dinamikus légáramoltatás esetén alulbecsüli a tényleges hűtőhatást [15], mivel a konvektív hőátadási tényező meghatározásában az átlagos légsebesség mellett a turbulenciaintenzitást, a turbulencia hosszskáláját és a fluktuációs spektrum jellemzőit nem veszi figyelembe. A jövőbeni épületgépészeti tervezési és komfortértékelési módszerek fejlesztésénél indokolt ezeket a dinamikus paramétereket expliciten számításba venni.

A szimulált természetes légáram alkalmazása az épületek szellőzési és léghűtési rendszereiben kettős energiagazdaságossági előnnyel jár, egyrészt lehetővé teszi a beállítási hőmérséklet emelését az elfogadható komfortszint fenntartása mellett, másrészt impulzusszerű üzemeltetéssel a befúvó ventilátorteljesítmény akár 50%-kal is csökkenthető [16]. E két hatás kombinálása komoly épületenergetikai megtakarítási potenciált képvisel, amelynek kibontakoztatása a kutatás és a szabványfejlesztés szempontjából egyaránt indokolt.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] ISO 7730:2005, Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. International Organization for Standardization, Geneva, 2005.
- [2] P. O. Fanger, A. K. Melikov, H. Hanzawa és J. Ring, "Air turbulence and sensation of draught," *Energy and Buildings*, vol. 12, pp. 21-39, 1988. doi: 10.1016/0378-7788(88)90053-9.
- [3] G. Zhou és A. K. Melikov, "Equivalent frequency - a new parameter for description of frequency characteristics of airflow fluctuations," in *Roomvent 2002: Proc. 8th Int. Conf. on Air Distribution in Rooms*, Copenhagen, 2002, pp. 297-300.
- [4] L. Huang, Q. Ouyang és Y. Zhu, "Perceptible airflow fluctuation frequency and human thermal response" *Building and Environment*, vol. 54, pp. 14-19, 2012. doi: 10.1016/j.buildenv.2012.01.009.
- [5] R. Gao, W. Zhang, Y. Zhang et al., "Statistical characteristics and frequency spectrum analysis of fan induced airflow compared with natural winds," *International Journal of Ventilation*, vol. 14, pp. 255-263, 2015. doi: 10.1080/14733315.2015.11684120.

- [6] S. Cao, X. Li, B. Yang és F. Li, "A review of research on dynamic thermal comfort," *Building Services Engineering Research and Technology*, vol. 42, pp. 435-448, 2021. doi: 10.1177/01436244211003028.
- [7] S. Lestinen, S. Kilpelainen, R. Kosonen, J. Jokisalo, H. Koskela és A. Melikov, "Flow characteristics in occupied zone - An experimental study with symmetrically located thermal plumes and low-momentum diffuse ceiling air distribution," *Building and Environment*, vol. 120, pp. 96-109, 2017. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.05.027.
- [8] S. Kawakubo, M. Sugiuchi és S. Arata, "Office thermal environment that maximizes workers' thermal comfort and productivity," *Building and Environment*, vol. 233, p. 110092, 2023. doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110092.
- [9] W. Cui, G. Cao, J. H. Park, Q. Ouyang és Y. Zhu, "Impact of dynamic airflow on human thermal response," *Indoor Air*, vol. 16, no. 5, pp. 382-390, 2006. doi: 10.1111/j.1600-0668.2006.00439.x.
- [10] S. Cao, P. Ming és X. Zhao, "Characteristics and comfort evaluation of sinusoidal airflows by regulating motor rotating frequency of a floor fan," *Building Simulation*, vol. 15, pp. 433-446, 2022. doi: 10.1007/s12273-021-0843-2.
- [11] Z. Xie, Y. Zhu és B. Cao, "Multi-fanning based simulated natural wind environment and its comfort performance under warm-to-hot conditions," *Building and Environment*, vol. 262, p. 111792, 2024. doi: 10.1016/j.buildenv.2024.111792.
- [12] Z. Ma, W. Chen, Z. Liu és Q. Chen, "Experimental investigation of thermal comfort with stratum ventilation using a pulsating air supply," *Building and Environment*, vol. 162, p. 106274, 2019. doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106274.
- [13] W. Yu, Y. Zhou, B. Li, L. Ruan, Y. Zhang és C. Du, "An innovative method of simulating close-to-nature-dynamic air movement through dynamically controlling electric fans," *Journal of Building Engineering*, vol. 45, p. 103410, 2022. doi: 10.1016/j.jobe.2021.103410.
- [14] S. Cao, P. Ming és X. Zhao, "Fuzzy comprehensive evaluation of human thermal comfort in simulating natural wind environment," *Building and Environment*, vol. 188, p. 107447, 2021. doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107447.
- [15] J. Li, S. Zhou, Y. Yu és J. Niu, "Effects of dynamic airflows on convective cooling of human bodies - Advances in thermal comfort assessment and engineering design," *Energy and Buildings*, vol. 324, p. 114924, 2024. doi: 10.1016/j.enbuild.2024.114924.
- [16] J. Liu, Y. Zhao, J. Zhang et al., "A review of different ventilation modes on thermal comfort, air quality and virus spread control," *Building and Environment*, vol. 212, p. 108831, 2022. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108831.