

# Légtechnikai rendszerek modellezési technikái, a szimulációs modellezésben rejlő lehetőségek

Péter Norbert<sup>1</sup>, Dr. Kristóf Gergely<sup>2</sup>

## Summary

**This paper introduces the main modeling techniques in the area of building services engineering. The most widely accepted analysis methodology is the CFD (computational fluid dynamics) technique. Using this computer aided modeling technique, we can obtain reliable data about the flow field, most importantly the temperature and velocity distributions in the investigated room. Based on these calculations we can optimize the HVAC equipment in order to guarantee better comfort conditions and reduce energy demand. Two application examples are presented on the CFD analysis of human comfort conditions: an office building and a large shopping center.**

Nagy terek, csarnokok légtechnikai rendszereinek tervezése – elsősorban az áramlási jelenségek komplexitása miatt – igen összetett feladatok elé állítja a mérnököket. A tervezési folyamat során adott levegőminőségi paraméterek biztosításán túlmenően figyelembe kell venniük a beépítési környezet adta kényszereket, a megfelelő szabályozási lehetőségek biztosítását és az energiahatékony üzemeltetést. A szimulációs módszerek alkalmazásával a tervezői célok megvalósulása átfogó módon ellenőrizhető, számos tervezési hiba elkerülhető, összehasonlítható a különböző műszaki megoldások hatásossága és lehetővé válik a bonyolult épületgépészeti megoldások kritikus pontokra vonatkozó ellenőrzése. Hatékony légtechnikai rendszerek tervezéséhez a mérnököknek ismerniük kell a nagy terekben kialakuló viszonyokat: az áramlási sebesség, a páratartalom, a hőmérséklet és esetenként szennyező koncentráció térbeli eloszlását. Ezeknek a birtokában a rendszer működéséről átfogó képet kaphatnak és a légbevezetési pontok elhelyezésének, valamint a befűvőkenti térfogatáramok és hőmérsékletek beállításával egyidejűleg javíthatják a komfortparamétereket, és jelentősen csökkenthetik az üzemeltetés költségeit.

Az áramlási sebesség, a páratartalom és a hőmérséklet eloszlásainak becslésére, meghatározására több modellezési eljárás is található a szakirodalomban [1], [2], amelyek a különböző esetekben eltérő pontossággal alkalmazhatók:

1. Analitikus modell
2. Empirikus modell
3. Kisminta modell
4. Nagyminta modell
5. Multizone hálózat modell
6. Zonális modell
7. CFD modell

A gyakorlatban az analitikus, empirikus, kis- és nagyminta modellek használata terjedt el. A szabványokban lévő előírások és ajánlások ezeken a modelleken alapulnak. Az épületgépészeti számításokban azonban kevésbé ismertek a multizone [3], zonális [4], [5] és az áramlás numerikus szimulációján alapuló CFD (computational fluid dynamics) modellek [6] és az alkalmazásuk által biztosított előnyeik.

Átriumos kialakítású magas épületeknél vagy épp számos kisebb irodahelyiséget tartalmazó épületeknél a helyiségek közötti légforgalom meghatározását és a szélterhelések belsőre gyakorolt hatását gyakran az ún. multizone modellezési eljárással vizsgálják [3]. Ez a modellezési módszer hidraulikai hálózatot alkalmaz, amelyben a helyiségek ideális keveredéssel jellemezhető zónák, a különböző nyílások (ajtók, ablakok) pedig ezeket és a környezetet összekötő ellenállások. A módszer a helyiségeken belül a tömeg- és energiamegmaradási egyenleteket megoldva számítja ki a helyiségek közötti áramlást. A módszer jelentős hátránya, hogy az impulzusegyenletet nem oldja meg, ezáltal csak kis áramlási sebességek esetén alkalmazható, továbbá a modell nem alkalmas az egyes helyiségeken belüli áramképek meghatározására. Ugyanakkor az eljárás használatának eredményeként a tervezők képet kapnak a helyiségek, valamint a helyiségek és a környezet közötti várható légforgalomról.

A gyakorlati méretezéshez azonban alapvetően szükséges a hőmérséklet térbeli eloszlásának meghatározása egy helyiségen belül. A zonális modellek [4], [5] a helyiség légtérét több kisebb térfogatra bontják fel, és ezekben határozzák meg a hőmérséklet értékeket. Ehhez kiinduláskor mérésből származó légsebesség adatokat használnak fel, vagy a tömeg és az energia-megmaradási egyenletet oldják meg a rész-térfogatok között. A módszer nem terjedt el, mivel az impulzusegyenletet ez a modell sem oldja meg, így például intenzív levegősugarak, vagy erőteljes természetes konvekció modellezésére nem alkalmazható. Mivel ezeknek a hatásoknak a leírása elengedhetetlen, különböző specifikus egyenletek megoldásával egészítették ki az eljárást. Ez sok esetben számítási instabilitáshoz vezetett, és a modellezett helyiségről jelentős mennyiségű adat előzetes ismeretét tette szükségessé. Emiatt igen körülményes a modell alkalmazása. Az eljárást egyszerűbb esetekben jelenleg is alkalmazzák, helyét azonban egyre inkább a CFD modellek váltják fel.

A CFD modellek [6] a zonális modellekhez hasonlóan a helyiségeken belüli áramlási teret több részterfogatra bontják fel. Amíg a zonális modellek pár száz elemmel számolnak, addig a CFD modellek akár több millió cellát alkalmaznak, ezáltal a helyiség geometriája nagy pontossággal modellezhető.

A multizone és a zonális modellekkel szemben a CFD modellek az impulzus megmaradási egyenletet is megoldják, ezáltal a terekben ki-

<sup>1</sup> CFD szakértő, CFD.HU Áramlástechnikai Kft.

<sup>2</sup> Egyetemi docens, BME, Áramlástan Tanszék  
Lektorálta: Prof. Lajos Tamás egyetemi tanár,  
BME Áramlástan Tanszék

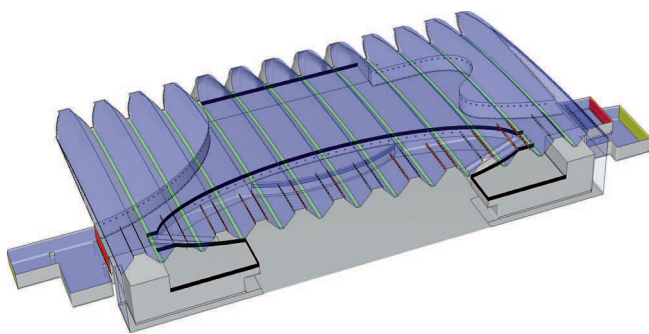


alakuló áramlás szerkezetéről, a turbulencia modellezésével a keveredési viszonyokról is pontos képet kaphatunk. A CFD modellezés az ismertett előnyök miatt jelenleg igen dinamikus fejlődik, és világszerte alkalmazzák tervezésnél, hibaelhárításnál, épületgépészeti rendszerek optimalizálásánál. A mérésekkel sokszor igazolt numerikus szimulációs CFD modellezés lehetővé teszi, hogy a gyakorlat számára megfelelő pontosságú számítási eredmények birtokában megismerjük és értékeljük az egyébként igen komplex kapcsolt hő- és áramlástechnikai folyamatokat berendezéseinkben vagy épületek belső tereiben. Ezáltal a tervezési hibák korai felderítése révén az utólagos épületszerkezeti módosítások elkerülhetővé válnak.

A továbbiakban a CFD modellezés épületgépészeti gyakorlatban való egyes alkalmazásainak előnyeit mutatjuk be egy üzletközpont és egy tipizált irodahelyiség légtechnikai vizsgálatán keresztül.

### Üzletközpont CFD vizsgálata

Korszerű numerikus szimulációs módszerrel vizsgált kétszintes üzletközpont geometriai modellje az **1. ábrán** látható. A vizsgált 110 m x 70 m alapterületű és 78 000 légméteres épületrész adottságaihoz igazodva az épületgépész tervezők 120 db sugaras légbefúvó elemet alkalmaztak, ezekkel biztosítva a megfelelő mennyiségű frisslevegő bevezetését és a komfortos légállapotot. A numerikus modellben az anomsztátok egyedileg szabályozhatók voltak, így a számítások során a légbefúvás irányát, a bevezetett levegő mennyiségét és hőmérsékletét is változtathattuk. A légszűrő elszívási pontokat a 19,5 m magas üveghomlokzat tetejéhez közel alakították ki (az 1. ábrán piros felületek), a tető mentén. A kiszolgáló helyiségek és kisebb boltok kiegyenlített szellőztetésűek, ezért ezeket a tereket nem modelleztük, mivel a vizsgált térben lévő áramlásra való hatásuk elhanyagolható volt.

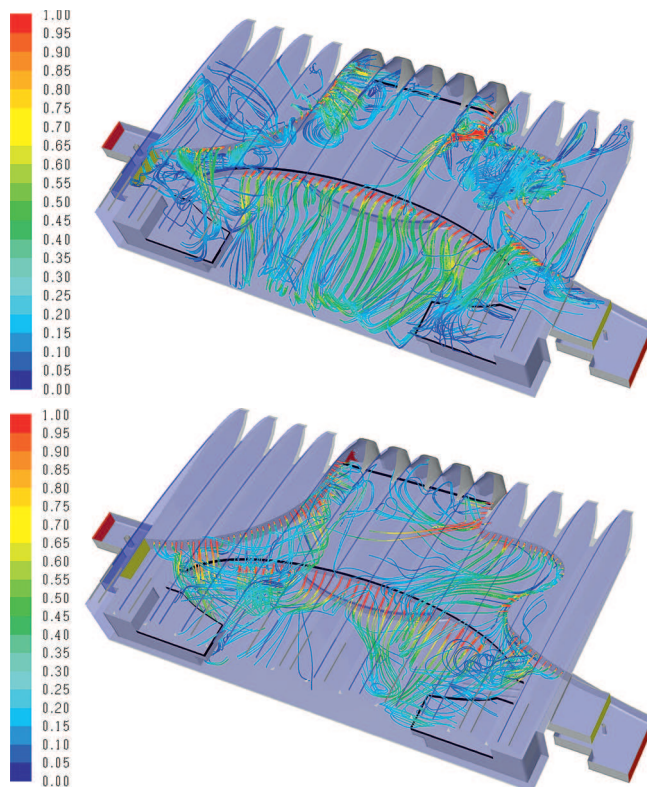


**1. ábra.** Üzletközpont modellezett tere

Az emberek és a lámpatestek, valamint az épület határoló szerkezetei és a kültér között kialakuló konvektív és sugárzásos hőtranszportot a szimulációban tervezői hőtechnikai adatokra támaszkodva pontosan modelleztük. Az energetikailag hatékony és komfortos üzemeltetéshez tartozó légtechnikai beállításokat a szélsőséges téli és nyári üzemi állapotokra határoztuk meg.

A **2. ábrán** az alapkonstrukciós adatok alapján végzett számítás eredményei láthatók: a befűjt levegő áramvonalainak ábrázolásával nyári és téli viszonyok között. Az eredmé-

nyek jól mutatják, hogy komplex légtechnikai rendszerek és geometriai kialakítások esetén összetett áramlások alakulhatnak ki, amelyeket az egyszerűsített geometriát, idealizált áramlási viszonyokat feltételező, széles körben alkalmazott általános tervezői módszerek nem írnak le szükséges pontossággal.



**2. ábra.** Áramvonalak a befűvőktől indítva, áramlási sebesség [m/s] szerint színezve. Felül a nyári, alul a téli üzemi állapot látható

A 2. ábra felső képén látható, hogy nyári üzemi állapotban a felfelé irányított befűvőkon bevezetett hideg levegő esetén leáramlik a padló szintjére, majd azon egyenesen végighaladva lehűti a tartózkodási zónát. A tervező által választott megoldás helyességét a numerikus szimuláció igazolta. Ugyanakkor megfigyelhető, hogy egyes helyeken a hideg levegő kis sebességgel jellemezhető zónákba áramlik, ahol felmelegedve felszáll, és emiatt a tartózkodási zóna egyes részein nem elégséges a friss levegő pótlása. A modellezett tér egyes részein erőteljes feláramlások figyelhetők meg, amelyek a befűjt sugarakat eltérítik és a bevezetett levegőt feláramlásra kényszerítik. Ezek a jelenségek a hűtési hatékonyságot ronthatják, mert a bevezetett levegő egy része nem a tartózkodási zónát hűti. Ezáltal a légtérben jelentős hőfokkülönbségek lépnek fel, amelyek miatt a vásárlók komfortérzete az üzletközpontban változik. A CFD elemzésekből így jól láthatóvá válik, hogy azonos kezdeti paraméterekkel rendelkező levegősugarak a helyi épületgeometria és az áramlási viszonyok függvényében jelentős áramlásbeli eltérést is mutathatnak.

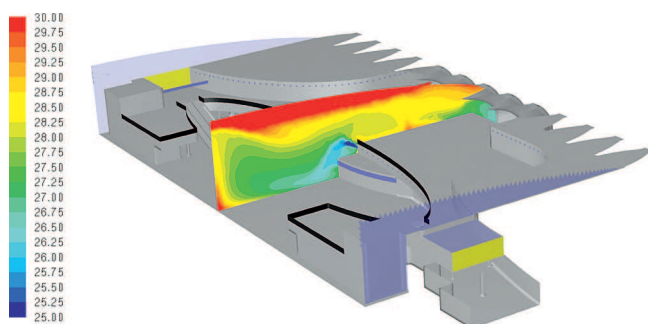
A numerikus számítások eredményei és a tervezők fejlesztési ötletei alapján több kialakítást is megvizsgáltunk. Az elemzésekből láthatóvá vált a belső tér áramlási viszonyok, amelyek a

amelyekből kiválasztva a jelen kor által támasztott szigorú energiafelhasználási és üzemeltetési feltételeknek megfelelő állapotot, hatékony légvezetési rendszert sikerült létrehozni.

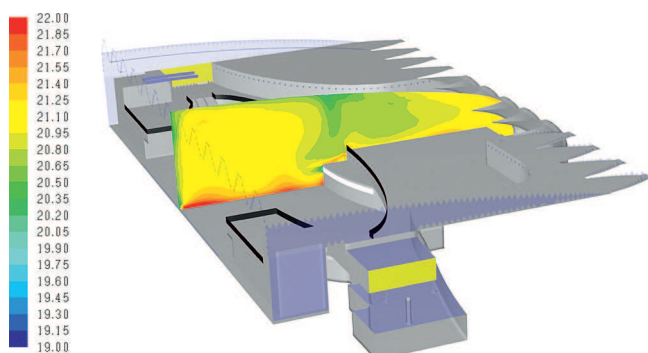
A tér különböző részeinek hatékony átszellőztetése érdekében kombinált, azaz a gépi és a természetes szellőztetés egyesített használata terjedt el. Ezeknél a megoldásoknál a kültéri szélviszonyoknak a belső térben kialakuló áramlásra gyakorolt hatása igen jelentős és összetett lehet, amelynek elemzése a CFD modellezés eszközével ugyancsak lehetővé válik.

Magas üveghomlokzattal rendelkező épületek hőtechnikai tervezése során számolnunk kell az ún. *cold drop* hatással, azaz az ablakfelületek mentén lehülő levegő intenzív leáramlásával, ami a padlószinten olyan huzatot is kelthet, amely már nem engedhető meg. Szegélyfűtés és padlókonvektorok beépítésével meleg levegő feláramlást hozhatunk létre, amely csökkenti a leáramló levegő sebességét és növeli a hőmérsékletét. A másik megoldás, hogy sugárzó mennyezeti fűtés alkalmazásával megnöveljük a teljes ablakfelület hőmérsékletét, aminek hatására csökken a levegő lehülésének a mértéke.

Az üzletközpontban nyári és téli üzemállapotban kialakuló hőmérséklet-rétegződés jól látható a 3. és 4. ábrán. Utóbbin megfigyelhető a *cold drop* mértéke és kiinduló adatok olvashatók le a tervek módosításához.



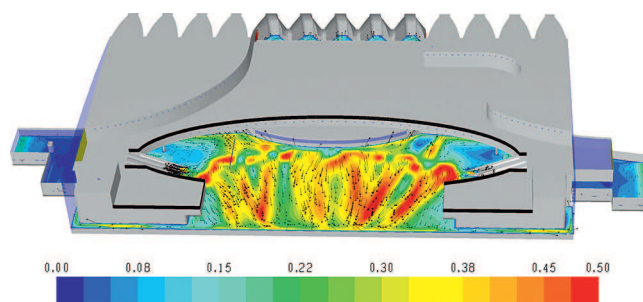
3. ábra. Hőmérsékleti rétegződés alakulása nyári üzem esetén [°C]



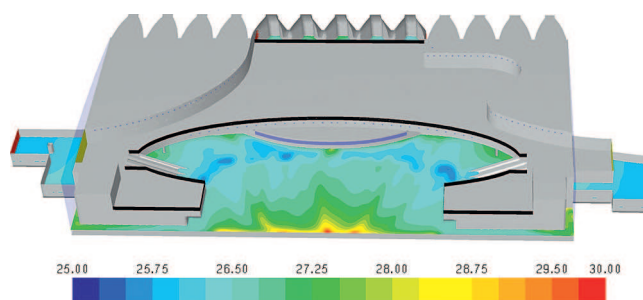
4. ábra. Hőmérsékleti rétegződés alakulása téli üzem esetén [°C]

A CFD programokkal meghatározott adatok alapján kiszámolható pl. a hőkomfortérzeti (PMV, PPD), vagy a huzatérzeti mutatószámok (PD) térbeli eloszlása. Az 5. és 6. ábrán nyári üzemállapotban láthatjuk a földszinti padló felett 1,6 m-es magasságban a levegősebesség és a -hőmérséklet eloszlását. Ezek ismeretében meghatározható a PD huzathatási mutatószám eloszlása (7. ábra), amely a huzat miatt elégedetlen

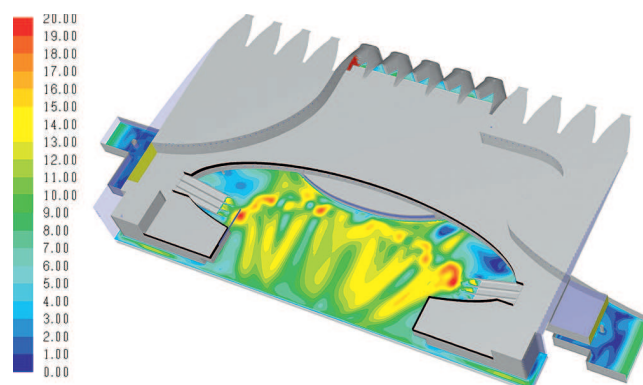
vásárlók százalékos arányát adja meg. A 7. ábrán látható nyári esetben a PD értéke a tartózkodási zónában 5 – 15% közötti, ami igen kedvezőnek mondható.



5. ábra. A levegősebesség eloszlása a földszinti padló felett 1,6 m magasságban [m/s] (nyári állapot)



6. ábra. Hőmérséklet-eloszlás a földszinti padló felett 1,6 m magasságban [°C] (nyári állapot)



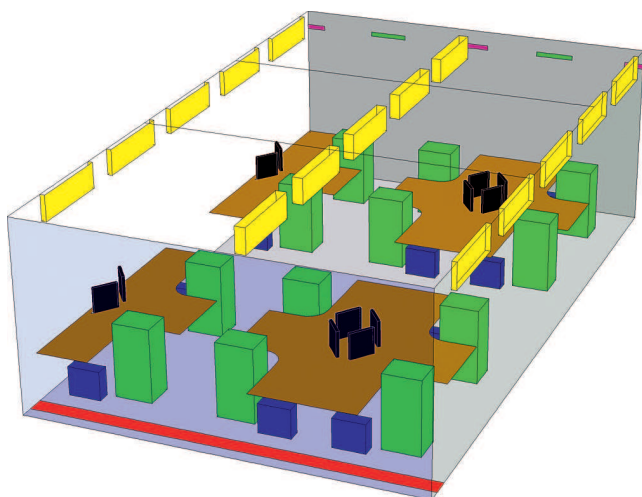
7. ábra. A PD értékek eloszlása a földszinti tartózkodási zónában (nyári üzemállapot)

### Tipizált irodahelyiség CFD elemzése

A numerikus szimuláció a bemutatott eredményeken kívül további lehetőségeket biztosít komplex hőtechnikai folyamatok részletes modellezéséhez. Manapság egyre gyakrabban épülnek nagy üvegfelülettel rendelkező irodahelyiségek a kül- és beltéri esztétikai előnyök miatt. Télen az ablak hőmérséklete jelentősen lehülhet és ezáltal az ablakhoz közel ülő dolgozók komfortérzete jelentősen romolhat. A CFD eszközök használatával a sugárzások hőtranszportját is számítható – így mivel ennek ebben az esetben jelentős a szerepe, elvégezhető a pontos komfortelemzések: a PMV hőkomfortérzeti mutatószám, valamint a kellemetlen hőérzet miatt elégedetlen emberek százalékos arányát megadó PPD érték számítása.

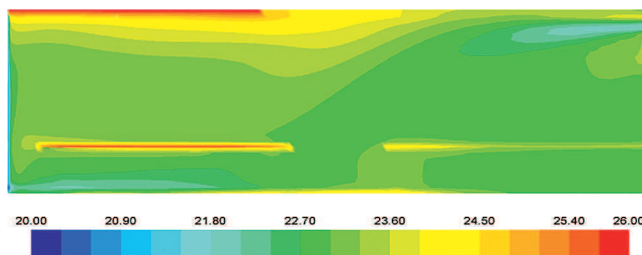
A hőtranszport folyamatok pontos modellezéséhez elengedhetetlen az épület határoló szerkezetének megfelelő hőtechnikai leírása. Az irodahelyiség modellezésénél az ablakok, a falak és a födémek rétegrendjeit és hőtechnikai paramétereit, valamint a külső tér hőmérsékletét és a szél sebességét figyelembe véve alkalmazzuk az egydimenziós hővezetési egyenletet. Ennek megoldását kombináljuk a belső térben lévő áramlás és hőtranszport numerikus szimulációjával és így megkapjuk a belső tér áramlási és hőtechnikai jellemzőit: a levegőhőmérséklet, valamint az üveg- és falfelületek hőmérsékletének megoszlását. A legtöbb épületgépészeti alkalmazás esetén ez a módszer jó közelítés. Azonban ha pl. hőhidaknál szeretnénk a hő terjedését meghatározni, akkor a szerkezeteket a valós geometriájukkal kell modellezni, valamint háromdimenziós hőterjedési modellt kell alkalmazni.

A 8. ábrán egy irodahelyiség ismétlődő részének a geometriája látható. A numerikus szimulációs modellben figyelembe vettük a belső térben lévő összes hőforrást (emberek, monitorok, számítógépek és lámpatestek). A vizsgálat során elemeztük, hogy a mennyezeti sugárzó fűtés milyen hatékonysággal lenne képes a légtér fűtésére és milyen mértékben képes növelni az ablak belső felületének hőmérsékletét, ezáltal csökkentve az ablak mellett ülők hidegérzetét. Referenciaként megvizsgáltuk az ablak előtt általánosan alkalmazott padlókonvektoros kialakítás (a 8. ábrán piros sáv) hatását is.

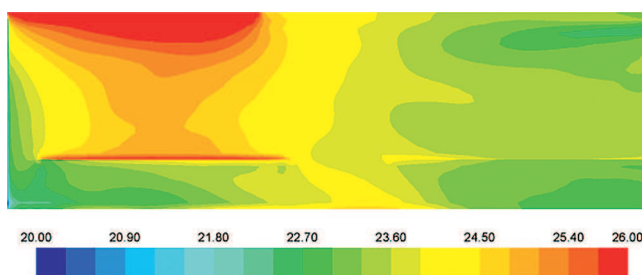


8. ábra. Az irodahelyiség geometriai kialakítása

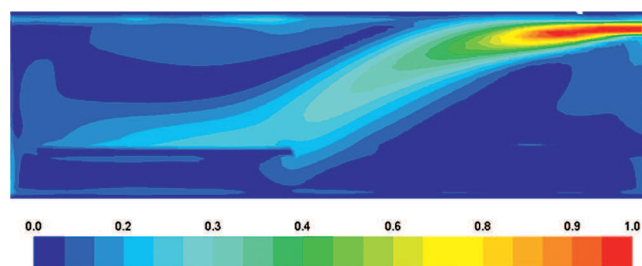
A légtechnikai rendszerhez tartozó befűvőket és elszívőket a tervezőknek az építészeti adottságok miatt az ablakkal szemközti falon kellett elhelyezniük. A 8. ábrán látható, hogy a légbefűvő és elszívó nyílások (rózsaszín és zöld felületek a szemközti falon) közötti távolság kicsi, így a komfortelemzések túlmenően a hidraulikai rövidzár kialakulásának lehetőségét és hatásait is elemeztük. A modellezés során a mennyezeten kialakított három hőszugárzó modulban (a 8. ábrán a mennyezeten vonalakkal elválasztva) szabályoztuk a fűtés intenzitását. A numerikus szimuláció eredményei egy kiemelt esetre a 9-12. ábrákon láthatók: a léghőmérséklet ( $t_1$ ), az eredő hőmérséklet, amely a léghőmérséklet és a sugárzási hőmérséklet kombinációja ( $t_R = 0,5 t_1 + 0,5 t_{ks}$ ), az áramlási sebesség és a PMV eloszlásai a lámpatestek közötti függőleges síkban.



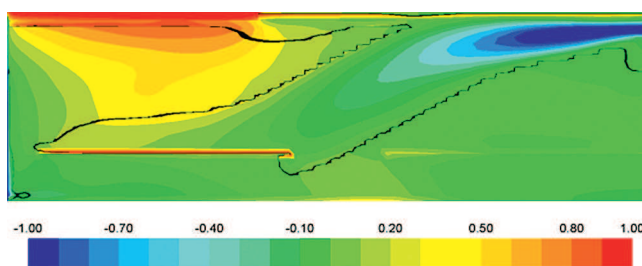
9. ábra. Léghőmérséklet-eloszlás [°C] ( $t_1$ )



10. ábra. Eredő hőmérséklet-eloszlás [°C] ( $t_R = 0,5 t_1 + 0,5 t_{ks}$ )



11. ábra. Áramlási sebesség-eloszlás [m/s]



12. ábra. PMV-eloszlás

A szimulációs vizsgálat sorozat részeként elemeztük, hogy a mennyezeti hőszugárzó modulokat milyen kiosztás esetén milyen intenzitással kell üzemeltetni a megfelelő hőkomfort megvalósítása érdekében. A számítások eredményei alapján megállapítottuk, hogy a mennyezeti hőszugárzó modulok megfelelő beállításával a padlókonvektoros kialakítással megegyező komforthatás érhető el. A CFD modellben az átmeneti időszakok elemzésével a teljes üzemeltetési tartományról pontos képet kaphatunk, ezáltal a beltéri viszonyokhoz leginkább alkalmazkodó fűtési és légtechnikai rendszerek tervezhetőek meg nagy biztonsággal. Az üzemeltetési beállításokon túlmenően a várható költségekről is képet kapunk, így az energiahatékonysági elemzések is lehetővé válnak.

A CFD programok új generációi lehetőséget adnak az automatikus optimalizációra is. Ezáltal a tervezőnek elegendő az elérendő cél és a változtatható paraméterek meg-

adása, amelyek függvényében a CFD program kiszámolja az optimális üzemeltetéshez tartozó beállításokat. A numerikus szimuláció alkalmazása a bemutatott példákon felül további lehetőséget ad a tervezőknek: az anyagtranszport egyenletek numerikus szimulációval történő megoldásával megbízhatóan meghatározható tetszőleges szennyező anyag terjedése. Ezért a CFD-t kiterjedten alkalmazzák havária modellezésére: a füst és a kiszabaduló káros anyag terjedésének számítására. A numerikus szimuláció lehetővé teszi a szabványok, előírások által támasztott követelmények teljesülésének megfelelő megbízhatósággal történő prognosztizálását. A bemutatott előnyök miatt napjainkban egyre több cég alkalmazza a numerikus szimulációt műszaki fejlesztésre, jelentősen csökkentve annak időtartamát és költségét.

#### Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönik a KÉSZ Építő és Szerelő Zrt. és a WAVIN Hungary Kft. támogatását és az eredmények publikációjához való hozzájárulását. A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

#### Referenciák

- [1] Chen Q. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. *Building and Environment* 2009; 44: 848-858.
- [2] Chen et al. Ventilation performance prediction for buildings: Modell assessment. *Building and Environment* 2010; 45: 295-303.
- [3] Chen Q., Wang L. Evaluation of some assumption used in multizone airflow network models. *Building and Environment* 2008; 43: 1671-1677.
- [4] Haghighat F., Li Y., Megri A. C. Development and validation of a zonal model – POMA. *Building and Environment* 2001; 36: 1039-1047.
- [5] Musy et al. Automatically generated zonal models for building air flow simulation: principles and applications. *Building and Environment* 2002; 37: 873-881.
- [6] Rundle et al. Validation of computational fluid dynamics simulations for atria geometries. *Building and Environment* 2011; 46: 1343-1353.