

Szabványos homlokzati tűzterjedés vizsgálatok eredményeinek elemzése és modellezése

Analysis and Modeling of Results of Standard Façade Fire Propagation Tests

OLÁH Krisztián doktorandus, Dr. TAKÁCS Lajos Gábor egyetemi docens

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építészmérnöki Kar
Épületszerkeztetani Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3. Tel.: +36 1 463-1111,
Központi e-mail cím: info@bme.hu

Abstract

Full-scale façade fire spread experiments, due to their limited reproducibility and high resource demand, are not suitable for the detailed analysis of leap-frog fire spread phenomena, while calibrated numerical modeling offers an effective alternative to overcome these limitations. Based on tests conducted according to MSZ 14800-6:2009 and 2020, a characteristic façade flame plume was identified, which can be consistently observed between the 15th and 45th minutes of the experiments; the FDS plume model developed on this basis enables a more precise investigation of the phenomenon. Both experimental and numerical results indicate that the characteristic plume reattaches only at the lintel of the upper opening and, in the absence of external influencing factors, is unlikely to result in fire spread into the upper opening.

Keywords: façade fire propagation, leap-frog fire spread, MSZ 14800-6, FDS, characteristic plume

Kivonat

A valós léptékű homlokzati tűzterjedési vizsgálatok korlátozott reprodukálhatóságuk és magas erőforrásigényük miatt nem alkalmasak a lángátcsapás részletes elemzésére, míg a kalibrált numerikus modellezés hatékony alternatívát kínál ennek kiküszöbölésére. Az MSZ 14800-6:2009 és 2020 szerinti vizsgálatok alapján meghatározásra került egy karakterisztikus homlokzati lángcsóva, amely a vizsgálatok 15–45. perce között stabilan azonosítható, az ez alapján kidolgozott FDS csóvamodell pedig lehetővé teszi a jelenség pontosabb vizsgálatát. A valós és numerikus eredmények alapján az látható, hogy a karakterisztikus csóva csak a felső nyílás szemöldökénél csap vissza, és önmagában – külső befolyásoló tényezők nélkül – nem valószínű, hogy tűzterjedést eredményez az emeleti nyílásban.

Kulcsszavak: homlokzati tűzterjedés, lángátcsapás, MSZ 14800-6, FDS, karakterisztikus csóva

1. BEVEZETŐ

1.1. A homlokzati tűzterjedési gátak célja és hatékonysága

Amennyiben egy mai épületben tűz üt ki és az az épület ablakain keresztül kitor annak homlokzatára, a homlokzati tűzterjedésnek több különböző módja játszódik le párhuzamosan. Ezek közül a legalapvetőbb a szomszédos nyílások közötti lángátcsapás útján történő, közvetlen homlokzati tűzterjedés. A lángátcsapás meggátlására, a nyílások között védőtávolságot kell tartani, melynek nagyságát Magyarországon az 1970-es években határozták meg. Szakirodalom-kutatás alapján a korszerű életviteli és építési szokások mellett, az eredeti elképzeléstől eltérően, ez a védőtávolság ma már inkább csak késleltetni képes a homlokzati tűzterjedésnek ezen módját, mintsem meggátolni azt. A tűz egyik nyílásból a föltte lévő nyílásba történő átterjedéséhez szükséges időtartam a tűzkeletkezéstől számítva – a tűzfejlődéshez szükséges időtartammal együtt – 15 és 45 perc közé tehető [11]. Ezen időtartamon belül a védőtávolság által biztosított tűzátterjedési késleltetés időtartama vagy másképp annak hatékonysága nem ismert, amely több szempontból kritikus.

Egyrészt a tűzterjedéshez szükséges időtartam pontatlan ismerete szabályozási következtetlenségekhez vezethet, ezáltal pedig életvédelmi kockázattal jár, amelynek feltárása kiemelt jelentőségű. Másrészt a kortárs építészeti igényekkel egyre nehezebben összeegyeztethető védőtávolság betartása komoly, sokszor szinte megoldhatatlan kihívás elé állítja a tervezőket a mindennapokban, ezért védőtávolság precízebb méretezhetőségére széles körben mutatkozik igény.

1.2. A valós léptékű tűzterjedés vizsgálatok korlátai és annak lehetséges feloldása

Ezen tűzterjedési mód vizsgálatára eddig kizárólag a valós léptékű homlokzati tűzterjedés vizsgálatok voltak alkalmasak, amelyek azonban olyan nehezen reprodukálhatók és olyannyira erőforrásigényesek, hogy az elmúlt 50 évben nem tették lehetővé, hogy védőtávolság hatékonyságát ettől pontosabban határozzák meg [11]. Habár a homlokzati tűzterjedés vizsgálatok elengedhetetlen eszközei a hazai és nemzetközi építészeti tűzvédelemnek, a valós léptékű vizsgálatok eredményei csak nagyon korlátozottan használhatók fel az épülettervezés során, mivel az összeállított vizsgálati konfiguráció bármely elemének megváltoztatása kiszámíthatatlanul befolyásolja a kapott eredményt. A korszerű számítógépes tűzdinamikai vizsgálatok ezzel szemben a valós vizsgálatoknál nemcsak, hogy jobban reprodukálhatók, de kifejezetten alkalmasak is arra, hogy akár nehezebben felismerhető tényezők hatását megállapítsuk vele és forrásigényük is jóval kedvezőbb. Ezen numerikus módszerek a valós vizsgálatok teljes értékű kiváltására egyelőre még nem alkalmasak, azonban inert nyílásos homlokzatokon a lángátcsapás jelenségének felülvizsgálatára a valós vizsgálatokra alapozott kiterjesztésével igen, melynek tapasztalatai alapján a homlokzatok tűzvédelmi koncepciója következetesebbé, ezáltal pedig biztonságosabbá tehető.

1.3. A kutatás célkitűzései

Jelen kutatás célja éppen ezért a magyar MSZ 14800-6 szabvány szerint elvégzett vizsgálatok alapján meghatározni, majd Fire Dynamic Simulator CFD szoftverrel modellezni egy a tűz csúcsteljesítményének ideje alatt kialakuló, mértékadó homlokzati csóvát, majd a létrehozott csóvamodell segítségével vizsgálni azt, hogy ezen mértékadónak tekinthető tűzterjedési szituációban, a nyílások közötti – a Magyarországi előírásoknak megfelelő nagyságú – tömör falszakasszal történő elválasztás milyen mértékben korlátozza, hogy tűztérből kilépő csóva segítségével a tűz az afölött elhelyezkedő nyílásba átterjedjen. A kutatás program célja többérté, hiszen az nemcsak konkrét mérési eredményeket szolgáltat, hanem tovább használható vizsgálati módszert is előkészít. A vizsgálatok közvetlen eredményeként a mérések alapján objektívebben megítélhető lenne a védőtávolság szerepe a lángátcsapás korlátozásában. A lángátcsapás okozta tűzterjedéshez szükséges időtartam ugyanis jelenleg összemosódik az azt megelőző zárttéri tűzfejlődés időtartamával, illetve a valós vizsgálati tapasztalatok alapján az eredményeket jelentős mértékben befolyásolják az esetleges mérési hibák is, melyek eddig szubjektívnek adtak teret. A pontosabban megállapított hatékonyság alapján felülvizsgálható és következetesebbé tehető lenne az épületek homlokzati tűzterjedési gátaival összefüggésben kialakított tűzvédelmi koncepciója is, amely jelenleg mind a kiürítési stratégia mind pedig a homlokzati építményszerkezetek elvárt tűzállósági teljesítményét tekintve arra alapozott, hogy a jelenlegi távolság a tűzáttérjedést a nyílások közötti falszerkezetek tűzállósági teljesítményével megegyező ideig meg tudja gátolni. A kutatás közvetett eredményeként pedig egy olyan mérési módszer kerül megalapozásra, amellyel a jelenlegi szabályok és vizsgálati eredmények nem csak felülvizsgálhatók, de esetlegesen kiterjeszthetők is lesznek a vizsgálati eredmények szűkössége miatt eddig erősen korlátozott geometriai előírások.

2. A KUTATÁS MÓDSZERTANA

2.1. A kutatás elméleti háttere

Szabványosított homlokzati tűzterjedés vizsgálatok kutatási célú, numerikus reprodukálására nemzetközi viszonylatban több eklatáns példát is találhatunk már [1,2,3,4,5,7,10], azonban a modellezett vizsgálati módszerek többségében mind a csóva, mind a védendő nyílás tekintetében olyan egyszerűsítéseket alkalmaznak, amelyek a lángátcsapással kapcsolatos képet torzíthatják. Ezzel szemben az MSZ 14800-6 Tűzállósági vizsgálatok. 6. rész: Tűzterjedés vizsgálata épülethomlokzaton egyike azon kevés szabványosított homlokzati tűzterjedés vizsgálati módszernek, amely jellegéből adódóan alkalmas a lángátcsapás hatásának vizsgálatára is, hiszen a módszer teljes egészében modellezi és több síkbeli és térbeli hőelem hálón keresztül elemzi, ahogy a három szintes vizsgálóépület földszinti helyiségének tüze a homlokzatra kilép, majd visszacsap az afölött lévő helyiség nyílásába [9]. Mindemellert a homlokzat előtti

térbeli és az emeleti nyílás síkbeli hőelem hálójára alapján a kilépő csóva nagysága és teljesítménye nagy pontossággal megbecsülhető a tűzfejlődés különböző szakaszaiban, amely alapján a numerikus modell jól kalibrálható. A vizsgálati épület és a mértékadó csóva így létrehozott numerikus modelljével ezt követően már vizsgálható, hogy nyílások közötti védőtávolság a szabványosított körülmények között mennyiben korlátozza azt hogy az emeleti nyílásban elhelyezett éghető anyagok elérjék gyulladási hőmérsékletüket.

2.2. A kutatás lépései

Első lépéseként az MSZ 14800-6 szabvány szerint végzett homlokzati tűzterjedési vizsgálatok eredményeinek részletes feldolgozása történt meg. Ennek során a mért hőmérsékleti adatok alapján meghatároztunk egy zárttéri tűz csúcsteljesítményéhez köthető karakterisztikus homlokzati lángcsóvát. Ezt követően egy kiválasztott, a legjellemzőbb, valós vizsgálat alapján a csóva vázlatos numerikus modellezését végeztük el, amelyet kiegészítettünk a szükséges hálózékonysági vizsgálatokkal a megfelelő számítási pontosság biztosítása érdekében. A kialakított modellt ezt követően iteratív módon, próba-futtatások segítségével hangoltuk, amíg a hőmérsékleti adatokban a valós vizsgálatban mért értékekhez képest az eltérések átlaga 10% alá nem csökkent. Az így kalibrált modell alkalmazásával pedig már elvégezhető a tervezett szimulációs vizsgálatok, amelyek eredményeinek részletes kiértékelése és feldolgozása biztosítja a megbízható következtetések levonását. A kutatás záró lépéseként ezen eredmények szintetizálását végezzük majd el, különös tekintettel azok tűzvédelmi előírásokra és szabványokra gyakorolt hatására, elősegítve a szabályozási környezet megalapozott továbbfejlesztését.

3. A KARAKTERISZTIKUS LÁNGCSÓVA MEGHATÁROZÁSA ÉS A VALÓS MÉRÉSI EREDMÉNYEK TANULSÁGAI

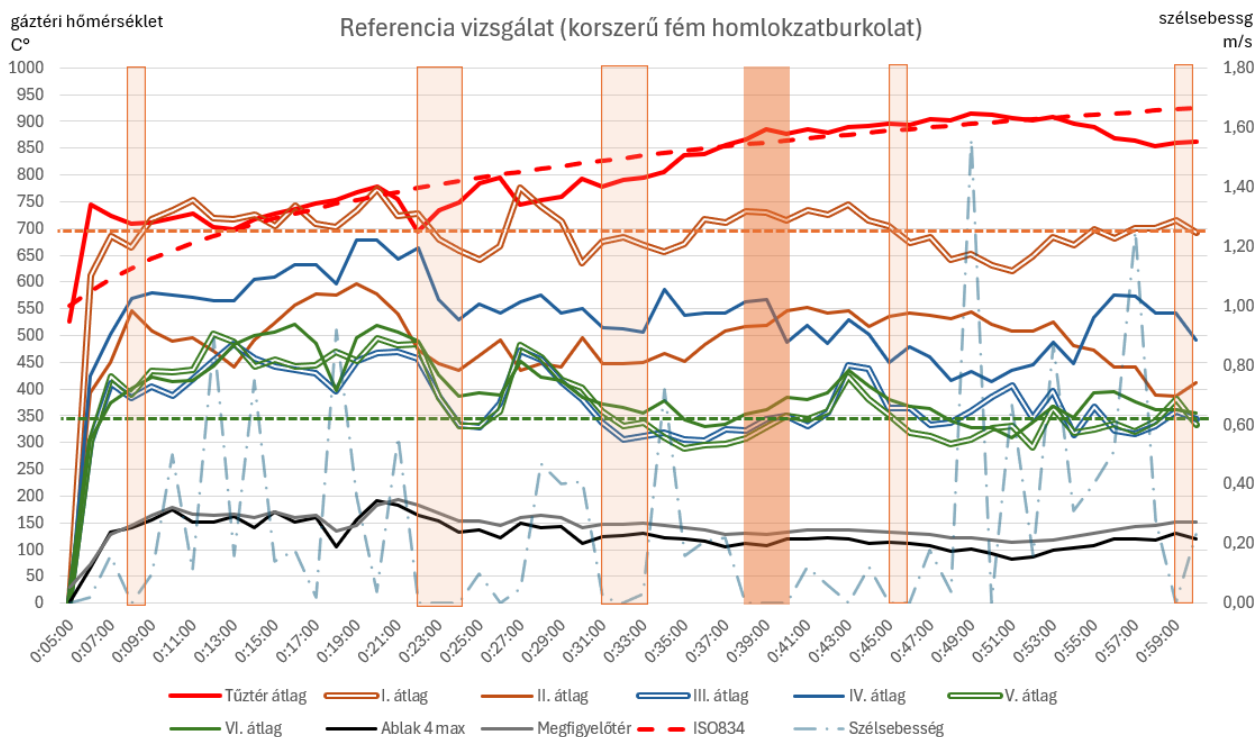
3.1. A szabványos vizsgálatra jellemző karakterisztikus csóva meghatározása

Hat, az MSZ 14800-6:2009 és 2020 szerinti szabványos homlokzati tűzterjedési vizsgálat került elemzésre, egy az azokra általánosan jellemző karakterisztikus lángkép meghatározása érdekében. A feladat többszörösen összetett volt, hiszen az adatok komplexitása miatt elsőre úgy tűnhet, hogy a vizsgálati csóva alakja nagyságrendileg 5-10 perces ciklusokban változik a közel egy órás vizsgálatok során, amely változásnak több oka is lehet. A kilépő csóva a tüztérben oxigén hiány miatt ott elégni nem tudó felhalmozódó égésgázok újragyulladására révén alakul ki, ezért annak teljesítménye első sorban attól függ és annak köszönhetően változik, hogy a mekkora különbség van vizsgálati máglya adott pillanathoz tartozó elméleti csúcsteljesítménye [8] – amely feltételezhetően az égés során folyamatosan változik – és a rögzített méretű homlokzati nyílászáró által lekorlátozott tüzteljesítmény között. Mindamelllett szabadtéren végzett vizsgálatról lévén szó, a lángképet a közvetlenül és közvetve is befolyásolja a szél is, valamint természetesen a vizsgálat tárgyát képező homlokzatburkolatok geometriája és esetleges égést tápláló anyagként történő viselkedése is. Annak ellenére, hogy az elemzett hat vizsgálatban a homlokzatok kis mértékben eltérő geometriával és anyaghasználattal rendelkeztek, a vizsgálatok mindegyikében felfedezhetőek voltak közel azonos szakaszok, amelyeket jellemzőnek tekintettünk. A közel azonos szakaszok közül egy olyan szakasz került kiválasztásra, amelyet sem a szél, sem pedig a homlokzatburkolat nem befolyásolt, így a numerikus vizsgálatokhoz ez került megmodellezésre.

3.2. A rendelkezésre álló eredmények elemzése alapján levonható következtetések

Mivel a vizsgálati eredmények ilyen jellegű összevetésére és elemzésére korábban a magyarországi homlokzati tűzterjedési vizsgálat esetén nem került sor, és nemzetközi tekintetben is ritkaság valós léptékű tüztesztek esetén, így már önmagában ez az elemző munka számos tanulsággal szolgál. Mivel a közel azonosnak tekinthető 5 perces szakaszok a vizsgálatok 10 és 45 perce között bárhol megjelenhettek, megállapítható, hogy – a feltételezettől eltérően – a máglya elméleti csúcsteljesítménye ezen időtartam alatt közel azonos. Abból következően pedig, hogy mind a máglya teljesítménye, mind pedig a tüztér szellőzési viszonyai kvázi állandók ebben az idő intervallumban, a csóva alakjának gyakori változásai az egyéb peremfeltételeknek köszönhetőek. A vizsgálatok elején, a tüztéri ablak nyitást követően mindösszesen két-három perc szükséges ahhoz, hogy a vizsgálatban használt homlokzat előtt és emeleti vizsgálati nyílásban elhelyezett termoelemek lekövessék a felépülő csóva hőmérsékletét. A homlokzat előtti elméleti stacioner állapot gyors kialakulása után pedig látszólag késleltetés nélkül követik a csóva változásait, amely arra enged következtetni, hogy a szerkezeti elemek lassú felmelegedése a vizsgálati pontokban mért gáztéri hőmérsékletet nem befolyásolják kimutatható módon. Az emeleti, vizsgálati szintű nyílásban elhelyezett

hőelemeken jellemzően 120 és 150 C° közötti gáztéri hőmérséklet alakul ki, amennyiben azt sem a homlokzatra helyezett éghető homlokzatburkolati vagy vakolt hőszigetelő rendszer komponensei, sem pedig a szél nem befolyásolják. Ez a hőmérséklet nem éri el még a jellemzően itt elhelyezett függönyök gyulladási hőmérsékletét sem, azonban fontos megjegyeznünk, hogy a vizsgálatban alkalmazott K-termoelemek a sugárzásos hőátadásra csak korlátozottan reagálnak, ami az eredményeket torzíthatja. A numerikus vizsgálatok éppen ezért felületi hőmérséklet méréssel is ki lettek egészítve, amely ezt a hiányosságot volt hivatott kompenzálni.



1. ábra. A karakterisztikus csóvát megalapozó mérés hőmérsékleti regisztrátumai és a szél sebessége a vizsgálat alatt
(halvány kiemeléssel a jellegzetes szakaszok, sötétebb kiemeléssel a karakterisztikus szakasz)

4. A VIZSGÁLAT NUMERIKUS MODELLEZÉSE ÉS AZ AHHOZ KÖTHETŐ ELSŐ EREDMÉNYEK

4.1. A kidolgozott numerikus modell koncepciója

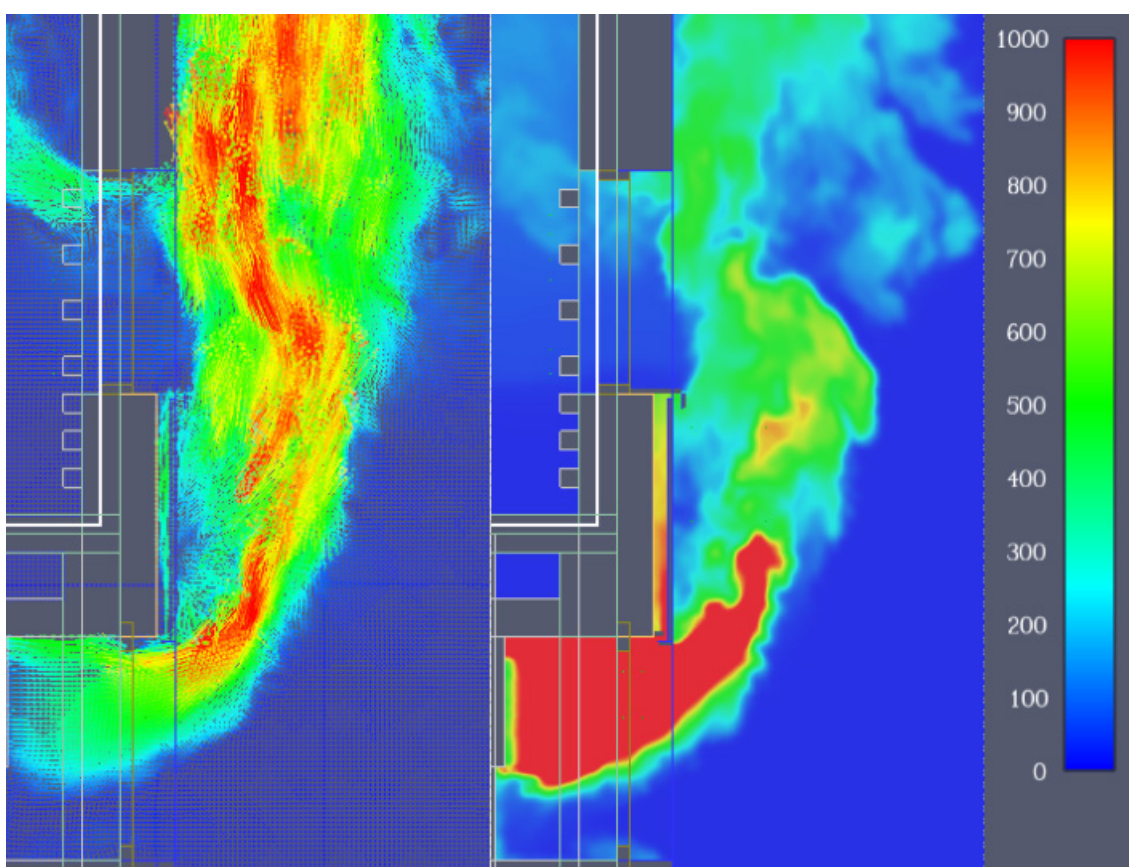
A zárt térben lezajló, oxigénvezérelt égési folyamat során az égés tökéletlensége – és ennek következtében az éghető gázok mennyisége és kiáramlási sebessége, amelyek a vizsgálat szempontjából kulcsfontosságúak – kémiai reakciók szintjén dőlnek el. Ugyanakkor ezen reakciók léptéke és összetettsége miatt az oxigénkontrollált égési folyamat jelenleg nem modellezhető kellő pontossággal a jelenlegi kutatáshoz használt Fire Dynamic Simulator szoftverrel, amelyet elsősorban áramlástan vizsgálatokra dolgoztak ki [6]. A modell ilyen jellegű hiányosságát kiküszöbölendő, jelen kutatásunkban – amely kizárólag a homlokzat előtti lángterjedés vizsgálatára fókuszál – a kilépő csóva az épületen belüli tűzfejlődéstől függetlenül került modellezésre, így az eredetileg a tüztéri helyiségből kiáramló égésgázokat a modellünkben egy, a tüztéri ablak belső síkjára helyezett befűvás juttatja a homlokzat előtti modellterbe. A kidolgozott modellünkben a kilépő gázok sebessége és a kilépő éghető gázok mennyisége nagyon precízen kontrollálható, amellyel a modellezett csóva fő áramvonala is nagyon finoman pozicionálható a homlokzat előtt. A kiválasztott csóva kellő pontosságú reprodukálásához közel 70 kalibrációs futtatás volt szükséges, amelyek azonban nagyban segítettek a vizsgált folyamat mélyebb megértését is.

4.2. A numerikus modell kidolgozásához és első vizsgálataihoz köthető tapasztalatok

A kalibrációs futtatások eredményei rámutattak, hogy a szabványos vizsgálatban alkalmazott hőelem háló eredményei alapján a csóva fő áramvonalának pozíciója sokkal pontosabban meghatározható, mint

ahogyan arra előzetesen számítani lehetett, ami alapján a homlokzat előtti hőelem hálón mért hőmérsékletek validációra történő alkalmazhatóságát nagyban erősíti. Az elvégzett érzékenységvizsgálatokból kiderült, hogy a széles körben elfogadott és javasolt hálófinomságnál jóval finomabb cellahálóra van szükség ahhoz, hogy a kilépő csóva Coanda hatás miatti homlokzatra történő visszatapadását a modell képes legyen reprodukálni.

Az első vizsgálati eredményekből kiderül, hogy a szabványos vizsgálati csóva a parapet zóna magasságában elválik a homlokzattól és ahhoz csak az emeleti nyílás szemöldökénél csap vissza, melyet jól szemléltetnek a nyílásban mért hőmérsékletek és szoftver segítségével megjeleníthető áramvonalak is. A vizsgálószinti nyílásban mért hőmérsékletekből kiderül, hogy az ott mérhető hőmérsékleteket a helyiségbe visszaáramló füst, illetve az ott kialakuló füsttel telt levegőréteg határozza meg, nem pedig közvetlenül a beáramló csóva. A modellben elhelyezett felületi hőmérséklet érzékelő elemek a várhatónak megfelelően a gáztéri hőmérsékletnél 30-40 C° magasabb (180-190 C°) értékeket regisztrálnak. Ez a különbség megerősíti az effajta mérőelemek alkalmazását a szabványos vizsgálatban, ugyanakkor a tűzterjedési gátnak megfelelő geometria mellett a vizsgálatok során karakterisztikusnak nevezhető csóva vélhetően továbbra sem eredményezné az ott elhelyezkedő éghető anyag pl.: függöny meggyulladását, ezáltal a homlokzati tűzterjedés bekövetkeztét.



2. ábra. A homlokzati csóva fő áramvonalai a sebességvektorok által megjelenítve (bal) és a hőmérséklet mező a csóva tengelyében (jobb)

5. A KUTATÁS EDDIGI EREDMÉNYEINEK ÖSSZEFOGLALÁSA

Az előzménykutatások [11] rámutatnak arra, hogy a valós léptékű homlokzati tűzterjedési kísérletek ugyan nélkülözhetetlenek a homlokzati tűzterjedés kutatásához, azonban azok korlátozott reprodukálhatósága és magas erőforrásigénye miatt nem alkalmasak a lángátcsapás jelenségének részletes, paraméterérzékeny elemzésére. Ezzel szemben a numerikus tűzmodellezés – megfelelő kalibráció mellett – hatékony eszközt kínál az effajta tűzterjedési folyamatok mélyebb megértésére.

A bemutatott kutatás egyik kulcsfontosságú eredménye, hogy a szabványos vizsgálatok elemzése alapján meghatároztuk egy, az MSZ 14800-6:2009 és 2020-ra jellemző karakterisztikus homlokzati lángcsóva modelljét, amely további vizsgálatok alapját képezheti. Az elemzés alapján kimutatható volt, hogy

bár a lángkép időben jelentős ingadozást mutat – jellemzően a homlokzati szerkezetek és a szél befolyásoló hatásai miatt –, azokat kiszűrve léteznek stabil, karakterisztikusnak tekinthető szakaszok a vizsgálatok 15-45. perce között.

A kidolgozott numerikus modellünk egyik fontos módszertani újítása, hogy a homlokzat előtti lángcsóvát az épületen belüli égési folyamattól függetlenül kezeli, így kiküszöböli a jelenlegi modellezési eszközök korlátait. A modell kalibrációja során igazolást nyert, hogy a szabványos mérési elrendezésből származó hőmérsékleti adatok alkalmasak a csóva geometriájának és áramlási viszonyainak pontos meghatározására, ugyanakkor a jelenség megfelelő reprodukálásához a szokásosnál finomabb numerikus háló alkalmazása szükséges.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a karakterisztikus lángcsóva a parapet zónában eltávolodik a homlokzattól és csak a felső nyílás szemöldökénél tér vissza. Ennek következtében a felső nyílásban mért hőmérsékleteket kritikus hőmérsékleteket elsősorban a visszaáramló füst és a kialakuló füstgázréteg határozza meg, nem pedig a közvetlen lánghatás. Mindezeket összegezve pedig a mért és számított hőmérsékletek alapján – még a sugárzás felületi hőmérséklet mérésének figyelembevételével is – valószínűsíthető, hogy a vizsgált geometriai kialakítás mellett a szabványos vizsgálat jellemző homlokzati csóvája önmagában nem eredményezi az ott elhelyezett éghető anyagok meggyulladását amennyiben azt homlokzatra helyezett éghető burkolati, bevonati vagy vakolt hőszigetelő rendszer anyagok vagy a szél nem befolyásolja.

A bemutatott kutatás jól szemlélteti, hogy a valós léptékű tűzvizsgálatok szimulációs kiterjesztése hogyan segítheti a realisztikusabb szabványok és gyakorlatiasabb szabályozások kidolgozását, mindemellett azok legfontosabb hosszú távú társadalmi eredménye a kapcsolódó életvédelmi intézkedések bemutatott hiányosságainak feltárása és következetesebbé tétele a mérési eredmények alapján.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Anderson J., McNamee R. *Façade fire tests - Measurements and modeling*, MATEC Web of Conferences, 2013, 9, 02003
- [2] Anderson J., Boström, L., McNamee R., Milovanović B. *FIRE DYNAMICS IN FAÇADE FIRE TESTS, Measurement, modeling and repeatability*, Applications of Structural Fire Engineering. 2015, 10.14311/asfe.2015.059
- [3] Anderson J., Boström L., Jansson McNamee R., Milovanović B. *Modeling of fire exposure in façade fire testing*, Fire and Materials, 2018, 42.5., 475-483.
- [4] Dréan V., Schillinger R, Auguin G. *Fire exposed façades: Numerical modelling of the LEPiR2 testing facility*, In: MATEC Web of Conferences, 2016, 46, 03001
- [5] Drean V., Girardin B., Guillaume E., Fateh T. *Numerical investigation of the thermal exposure of Façade during BS 8414 test series: influence of wind and fire source*, Fire Technology, 2023, 59.1, 217-246.
- [6] Gissi E., Muite B., Rios O., Węgrzyński W., *Wikibooks, Fire Simulation for Engineers/FDS/Limitations*, https://en.wikibooks.org/wiki/Fire_Simulation_for_Engineers/FDS/Limitations# (Utolsó letöltés: 2026.05.02)
- [7] Hostikka S., Bytskov G. *Numerical simulations of the ISO 13785-2 façade fire tests*, MATEC Web of Conferences 2016, 46. 03003
- [8] Karlsson B., Quintiere J., *Enclosure Fire Dynamic*, CRC Press, Boca Raton, 2002
- [9] *MSZ14800-6: 2020 Tűzállósági vizsgálatok 6. rész: Tűzterjedési vizsgálat épülethomlokzaton*. Magyar szabványügyi hivatal, 2020
- [10] Nilsson M, Husted B, Mossberg A, Anderson J, McNamee R.J. *A numerical comparison of protective measures against external fire spread*, Fire and Materials, 2018, 42.5, 493–507.
- [11] Oláh K.S., Takács L.G., *Façade Fire Separation Distances: A Critical Overview and Further Investigations*. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2025, 69(3), 976–990.