

Véges és végtelen városok átszellőzésének vizsgálata numerikus áramlástan szimulációkkal

Investigation of the ventilation of finite and infinite cities using computational fluid dynamics simulations

TROLL Ildikó¹, MSc hallgató, PAPP Bálint² tanársegéd

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Áramlástan Tanszék, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3; E-mail: ildikotroll@edu.bme.hu.

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Áramlástan Tanszék, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3; E-mail: papp.balint@gpk.bme.hu.

Kivonat

Jelen kutatás egy $H/W = 0,5$ magasság-szélesség oldalarányú utcakanyonokból és $L/H = 5$ távolságban elhelyezkedő, $H/W = 1$ oldalarányú keresztutcaiból felépülő idealizált, végtelen periodikus városi geometria esetén elemzi a forgalmi eredetű szennyezőanyagok terjedését RANS CFD szimulációkon keresztül, növényzet jelenlétében. A szennyezőanyag-terjedés kétféle meghatározó esetben került vizsgálatra: egyetlen forrás esetén, és végtelen sok, periodikusan ismétlődő forrás figyelembevételével is. Az előbbi eset a szélcsatorna-mérésekben megszokott elrendezést modellezi, lehetőséget nyújtva a modell validálásra, míg az utóbbi egy „végtelenül nagy”, ismétlődő szennyezőanyag-kibocsátásokat tartalmazó várost közelít. Az eredmények alapján kimondható, hogy széliránytól függően a 15-25 utcánál nagyobb kiterjedésű városok esetén a párhuzamoshoz közeli szélirányokban (0° , 30°) a ritkán ültetett fák rendre 2,5% és 7,5%-kal csökkentik a talajközeli szennyezőanyag-koncentráció értékét.

Kulcsszavak: numerikus áramlástan szimuláció (CFD), városi átszellőzés, periodikus geometria, városi növényzet, RANS turbulenciamodell.

Abstract

This study examines the dispersion of traffic-related air pollutants in the presence of vegetation using RANS-based CFD simulations applied to an idealized, infinite periodic urban geometry consisting of street canyons with a height-to-width aspect ratio of $H/W = 0.5$ and perpendicular cross-streets with $H/W = 1$ at $L/H = 5$ distances. Two distinct cases of pollutant dispersion are considered: we investigate (1) a single emission, representing typical wind tunnel configurations, enabling model validation, and (2) an infinite number of periodically repeated pollutant sources, modeling an infinitely large city. The results show that, for cities larger than 15-25 streets, sparse tree planting reduces near-ground pollutant concentration by 2.5–7.5% for wind directions close to parallel to the main streets (0° and 30°).

Keywords: computational fluid dynamics simulation (CFD), urban ventilation, periodic geometry, urban vegetation, RANS turbulence model.

1. BEVEZETÉS

A városi levegőminőség javítása kiemelt környezeti és egészségügyi feladat, hiszen csak az EU-ban évente mintegy 400 000 haláleset köthető a légszennyezéshez [1]. Ezért elengedhetetlenül fontos, hogy átfogó ismereteket szerezzünk a városokban kialakuló áramlási és szennyezőanyag-terjedési jelenségekről.

A modern városi környezetet különböző hosszúságú és szélességű utcák jellemzik, amelyeket többemeletes épületek határolnak, ún. utcakanyonokat kialakítva. Ezek a szűk kanyonok kereszteződésekben kapcsolódnak egymáshoz, közel periodikus mintázatot alkotva. A sűrű beépítés jelentős ellenállással bír a szabad felszín fölötti áramlásokhoz képest, ami alapjaiban módosítja a légáramlási és szennyezőanyag-terjedési folyamatokat [2]. Mivel az utcakanyonok a városi geometria meghatározó elemei, és egyben gyakran a legszennyezettebb területek közé tartoznak, kiemelt kutatási jelentőséggel bírnak.

Ha mérnökként támogatni szeretnénk a levegőminőség-orientált várostervezést, akkor elengedhetetlen a zöldfelületek, különösen a fák hatásának figyelembevétele. A fák fontos szerepet játszanak a városi mikroklíma és a hőkomfort javításában [3], valamint a biodiverzitás fenntartásában [4], ugyanakkor aerodinamikai hatásuk csökkentheti az átszellőzés intenzitását, ami a szennyezőanyagok feldúsulásához vezethet. A növényzet levegőminőségre gyakorolt hatása ezért erősen függ az épülettömbök geometriai kialakításától, az áramlási viszonyoktól és a széliránytól.

A városi áramlások vizsgálatában a CFD szimulációk, különösen a Reynolds-átlagolt (RANS) turbulenciamodellek, elterjedt és költséghatékony eszköznek számítanak. Ismétlődő épületelrendezést feltételezve a periodikus peremfeltételek alkalmazása lehetővé teszi továbbá egy „végtelen” város költséghatékony modellezését, azonban a szennyezőanyag-terjedés kezelése ilyen esetben nem triviális [5]. Míg a szakirodalomban (szélcsatorna-kísérletekben és számos numerikus vizsgálatban) egyetlen forrásból származó koncentrációmezőt határoznak meg, valós városi környezetben az ismétlődő források háttérkoncentrációt hoznak létre, ami szignifikánsan módosíthatja a kialakuló anyagátadási folyamatokat.

A jelen tanulmány egy idealizált, periodikus városi geometriában elemzi a közlekedési eredetű szennyezőanyagok terjedését RANS CFD szimulációk segítségével, növényzet jelenlétében. A koncentrációmezőt periodikusan ismétlődő források esetén, négy szélirány (0° , 30° , 60° , 90°) és három különböző faelrendezés mellett határozzuk meg. Célunk a szélirány és a növényzet átszellőzésre gyakorolt hatásának vizsgálata, valamint a kváziperiodikus és a teljesen periodikus koncentrációmezők közötti kapcsolat feltárása.

2. A VIZSGÁLAT MÓDSZEREI

2.1. Geometria

A szimulációk során vizsgált modell egy nemrégiben publikált szélcsatorna-kísérlet [6] kiválasztott eseteit hivatott reprodukálni. A geometria a szélcsatorna elrendezésének megfelelően egy periodikusan ismétlődő, $H = 0,1$ m magasságú, $5H$ élhosszúságú négyzet alapú hasábokból álló épületegyüttest tartalmaz, amelyet két eltérő szélességű utcakanyon-típus tagol az 1. ábrán látható módon. Az y -irányított kanyonok magasság–szélesség aránya $H/W = 0,5$ volt, míg az x -irányú, merőleges keresztutca szűkebb, $H/W = 1$ arányú kanyonokat alkottak. A számítási tartomány felső határa a tetőszint fölött $11H$ magasságban helyezkedett el. A szennyezőanyag-kibocsátás modellezésére az y -irányú utcakanyon közepén, annak teljes hosszában egy forrászóna került elhelyezésre, továbbá a növényzet hatásának vizsgálatára 2×4 (ritka) és 2×7 (sűrű) fa került alkalmazásra a járdák mentén. Referenciaesetnek a fák nélküli elrendezést tekintettük.

A „végtelen nagy város” közelítés alkalmazhatóságának vizsgálatára, azaz annak meghatározására, hogy hány egymást követő kanyon után tekinthetők az eredmények a periodikus modell jó közelítésének két további, kváziperiodikus geometria került alkalmazásra: 90° -os szélirány feltételezésével egy x -irányban 15 egymás utáni kanyont tartalmazó, 0° -os uralkodó szélirány esetén pedig y -irányban 25 kanyonból álló modell, ahol az egyes kanyonok geometriája minden esetben megegyezett a periodikus, fa nélküli alapeometriával.

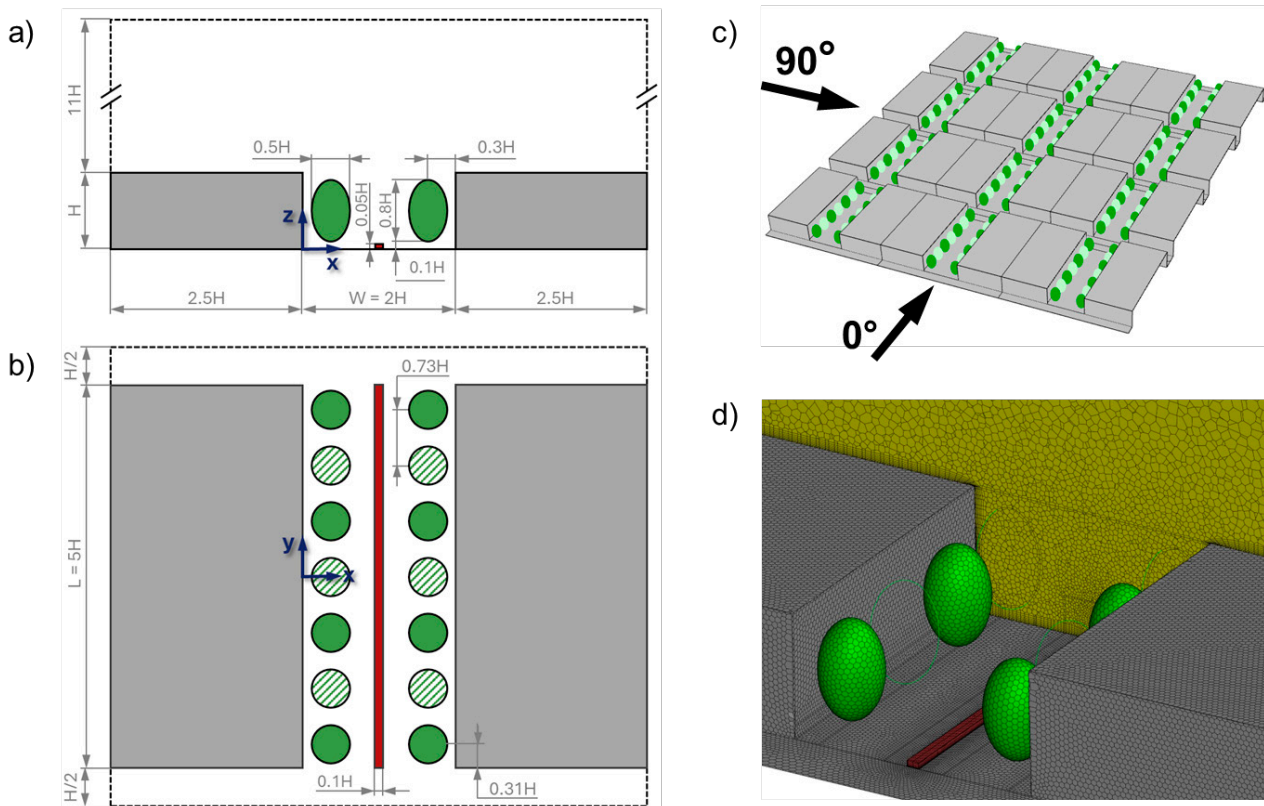
2.2. Numerikus háló

A számítási tartomány térbeli diszkretizációja Ansys Fluent Mesher (2023R1 és 2025R1) környezetben poliéder alapú hálóval valósult meg. A felületi háló az 1/d. ábrán látható. A vizsgált $H/W = 0,5$ oldalirányú utcakanyonban a jellemző cellaméret $H/22$ volt, további $H/44$ méretű cellákkal a forrászóna közelében, valamint fali határréteg-háló alkalmazásával, melynek első cellasora $H/66$ magasságú volt. A kiemelt vizsgálati területen kívül a hálófelbontás minden további szilárd felület mentén $H/10$ volt. Korábbi vizsgálataink megmutatták, hogy az ilyen térbeli felbontással kapott koncentrációeredmények nem térnek el jelentősen az 1,5-szörös ill. 2,25-szörös lineáris hálósűrítéssel kapott eredményektől [9]. A periodikus modell elemszáma 1,01 millió volt. A további kváziperiodikus geometriák (90° szélirány: 15×1 kanyon, 0° szélirány: 1×25 kanyon) esetében az eddig ismertetett elemméretek kerültek alkalmazásra, ami rendre 13,9 millió és 23,1 millió cellát eredményezett. A cellák ún. *orthogonal quality* mérőszámmal jellemzett minősége minden esetben 0,17 felett volt, amely megfelelőnek tekinthető.

2.3. Peremfeltételek

A **periodikus modellekben** az áramlási mezőt egyetlen utcakanyont tartalmazó geometria alkalmazásával határoztuk meg (1. ábra). A 0° és 90° szélirány esetén az áramlásra merőleges modellhatárokon periodikus, a másik két oldalon pedig szimmetria peremfeltételt alkalmaztunk, míg a 30° és 60° -os esetekben minden oldalsó határon periodikus peremfeltételt írtunk elő. A számítási tartomány felső határán is szimmetria került megadásra,

a felfületek (talaj, épületek) esetében pedig csúszásmentes érdes falat írtunk elő az egyenértékű homokérdesség (*equivalent sand-grain roughness*) $K_s/H = 0,1$ értékre állításával. A szél irányát a nyomásgradiens szabályozásán keresztül írtuk elő oly módon, hogy a tartomány tetején ($z/H = 12$) az áramlás irányú sebesség megegyezzen a szélcsatorna-mérésekben tapasztaltakkal ($U_\infty \approx 5,5$ [m/s]). A kialakuló sűrűdési sebesség jellemző értéke a különböző szimulációkban az $u^* = 0,29-0,34$ [m/s] tartományban volt.



1. ábra. (a) A periodikus modellben alkalmazott geometria méretei oldalnézetből. (b) A geometria további méretei felülnézetből. (c) A geometria x - és y -irányban történő ismétlésével előálló periodikus épületrendezés. (d) A numerikus szimulációkban alkalmazott háló. A sárga felület az utcakanyon közepén ($y = 0$) elhelyezett metszősík.

A szennyezőanyagok terjedését passzív skalármező alkalmazásával modelleztük. A diffúziós egyenletet a modellben kiszámolt sebességeloszlás bemenő adatként történő felhasználásával oldottuk meg. A periodikus modellben az ismétlődő források vizsgálatához az ún. periodikus csatornamodellt (PCM – *periodic channel model*, ld. [5]) kell alkalmaznunk: a város belsejében kialakuló, a széliránnyal párhuzamos, konstans nagyságú koncentrációgradienst levonjuk, és így a koncentrációeloszlást a modellben tökéletesen periodikusnak tekinthetjük (c_∞ [kg/m³]). A PCM-modell a forrászónában fix szennyezőanyag-koncentráció előírását követeli meg, míg a tartomány többi részén az áramlás irányú sebességkomponens nagyságával arányos negatív forrástagok (nyelő) beépítése volt szükséges a skalártranszport-egyenletbe. A szennyezőanyag-kibocsátás tömegárama ($q_{m,sz}$ [kg/s]) végtelen forrás esetén a PCM-modell eredményeként adódik.

A 15 ill. 25 egymás utáni utcakanyont magába foglaló kváziperiodikus modellekben a belépésnél (0° ill. 90° széliránynál rendre: $x/H = -2$ ill. $y/H = -2.5$) Dirichlet-típusú peremfeltételként írtuk elő a periodikus modellben azonos geometriai helyeken és szélirány mellett kialakuló sebességeloszlást, valamint zérus koncentrációt. A kiáramlási határon a koncentrációra és a nyomásra egyaránt Neumann-típusú feltételt alkalmaztunk, míg a számítási tartomány áramlással párhuzamos oldalain és felső határán szimmetria peremfeltételt definiáltunk. A falakat a periodikus modellel azonos módon kezeltük. A véges számú kibocsátási zónák mindegyikében azonos, térben és időben állandó tömegáramot írtunk elő ($q_{m,sz}$ [kg/s]), aminek hatására ún. kváziperiodikus koncentrációmező alakul ki, az áramlás irányában haladva növekvő értékeket mutatva.

A két módszerrel meghatározott koncentrációeloszlások egymással analóg módon kerültek dimenzióatlanításra, biztosítva a normált eredmények közvetlen összehasonlíthatóságát:

$$c_i^* = \frac{Au^*}{q_{m,sz}}(c_i - c_{i,ft}). \quad (1)$$

A fenti összefüggésben c_i és c_i^* [–] jelöli az i -edik utcakanyonban tapasztalható koncentrációt normálás (dimenziótlanság) előtt és után, A [m²] pedig a modell alapterülete. Az „ ff ” index az áramlást jellemző főtömegi koncentrációértékre (az áramlás irányú sebességgel súlyozott átlagkoncentrációra) utal. Egyetlen forrás esetén $c_{1,ft}$ értéke definíciószerűen zérus (a kanyon fölötti áramlásban a levegő tiszta), míg végtelen számú forrás esetén a főtömegi koncentráció ($c_{\infty,ft}$) értéke jelentős is lehet.

2.4. Numerikus megoldó beállításai

A numerikus szimulációk az Ansys Fluent (2023R1, 2025R1) környezetben készültek. A szimulációk során teljesen turbulens, stacioner áramlást feltételeztünk. A transzportegyenletek megoldása a *Coupled* szolverrel, a mezőváltozók térbeli diszkretizálása pedig másodrendű numerikus sémák alkalmazásával történt.

A szimulációk a városi áramlások modellezésében széles körben alkalmazott realizábilis k -turbulenciamodellel alkalmazásával készültek. A fák lombkoronájának modellezésére a releváns régiókban az áramlási és a turbulens transzportegyenleteket egyaránt forrástagokkal egészítettük ki a növényzet modellezésében bevett módszereknek [7]–[8] megfelelően. A CFD modell pontosságát befolyásoló paraméter a turbulens Schmidt-szám, értékére $Sc_t = 0,2$ került alkalmazásra az $Sc_t = 0,04$ – $1,3$ tartományban végzett paraméterérzékenység-vizsgálat alapján [9]. A szimulációk konvergenciája a reziduumok 10^{-6} alatti értéke, valamint a releváns integrálmennyiségek (sebesség, nyomásgradiens, koncentráció) stabilizálódása alapján került megállapításra, jellemzően 1200–2200 iterációt követően.

3. EREDMÉNYEK

3.1. Modellvalidáció

A vizsgálatok során alkalmazott CFD modell validációját korábbi publikációnkban mutattuk be [9]. Szélcsatorna-mérésekkel történő összevetés alapján jó egyezést tapasztaltunk az átlagsebesség, a turbulens kinetikus energia, és az egy forrásból származó szennyezőanyag-koncentráció térbeli eloszlásaiban is. Kiemelendő, hogy az utóbbi egyezését két szélirány és mindhárom faelrendezés esetén is megvizsgáltuk, összesen 696 mintavételi pontban.

3.2. A kváziperiodikus és a periodikus koncentrációmezők kapcsolata

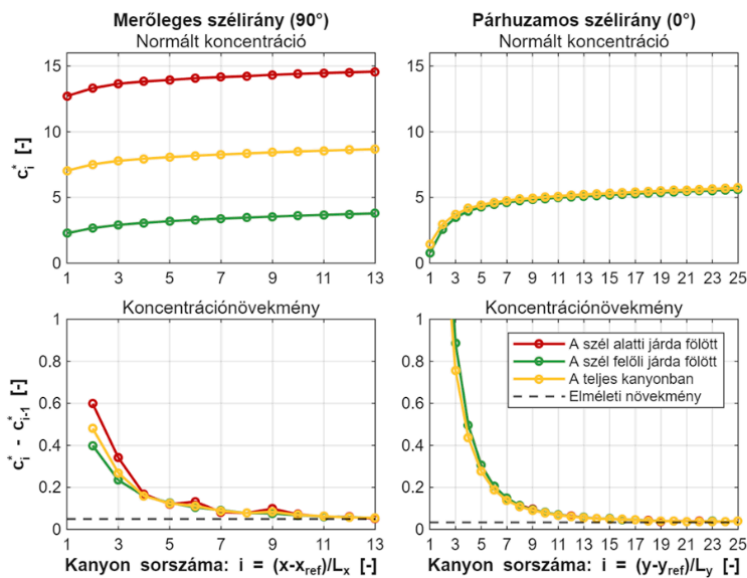
A kutatás egyik fő célja annak meghatározása, hogy mekkora számú szennyezőanyag-forrás esetén tekinthető a városban kialakuló koncentrációnövekmény lineárisnak, azaz, hogy milyen ütemben alakul ki az egymás mögötti kibocsátások következtében a PCM-moddal vizsgált periodikus koncentrációeloszlás. Ennek megválaszolására a kváziperiodikus geometriákon végzett szimulációk eredményeit kell elemeznünk.

A 2. ábrán a kváziperiodikus modelltől kinyert koncentrációértékek láthatók a forrást tartalmazó kanyonra merőleges (90°) és azzal párhuzamos (0°) áramlás esetén. A görbék három fontos érték alakulását jellemzik: a két járda fölött elhelyezkedő zónákban, illetve a teljes kanyontérfogatban tapasztalható átlagkoncentrációt. Jól látható, hogy az egymást követő utcakanyonokban a koncentrációértékek – logikus módon – monoton növekednek. Továbbá egyértelműen látszik az is, hogy az egymás utáni kanyonok közötti koncentrációnövekmények a kanyonsorszám növekedésével (az áramlás irányában előre haladva) csökkenő tendenciát mutatnak, és mindkét szélirány esetében egy-egy aszimptotikus értékhez konvergálnak.

Az elméleti koncentrációnövekmény meghatározható dimenziótlan alakban a kanyonok közötti koncentrációváltozás egyszerű keverési folyamatként történő modellezésével: az elméleti koncentrációnövekmény (Δc_{elm}^* [–]) két szomszédos utca között az egy utcában bevitt szennyezőanyag tömegáramának és a teljes modellen átáramló levegő tömegáramának a hányadosa:

$$\Delta c_{elm}^* = \frac{q_{m,sz}}{q_{m,lev}} = \frac{Au^*}{q_{V,lev}}, \quad (2)$$

ahol $q_{m,lev}$ [kg/s] és $q_{V,lev}$ [m³/s] a számítási tartományon átáramló levegő tömeg- ill. térfogatárama. A 2. egyenletből látható, hogy az elméleti koncentrációnövekmény független a forrásintenzitástól, és kizárólag az áramlási viszonyok határozzák meg. A vizsgált szélirányokban az elméleti dimenziótlan koncentrációnövekmények értéke $\Delta c_{elm,90^\circ}^* = 0,0494$, ill. $\Delta c_{elm,0^\circ}^* = 0,0333$.



2. ábra. A kváziperiodikus szimulációk eredményei merőleges (90°) és párhuzamos (0°) szélirány esetén.

Felső sor: a dimenzióatlan szennyezőanyag-koncentráció az utcaközök kiemelt térrészeiben az áramlás irányú kanyon-sorszám függvényében. **Alsó sor:** dimenzióatlan koncentrációnövekmények a kiemelt zónákban az előző kanyonhoz képest az áramlás irányú kanyon-sorszám függvényében.

Az eredmények rámutatnak, hogy 90°-os (a forrást tartalmazó kanyonra merőleges) szélirány esetén a kváziperiodikus geometriában kialakuló koncentrációnövekmény a 13. utcakanyonban 12,3%-kal tér el az elméleti növekménytől, míg 0°-os (a kanyonnal párhuzamos) áramlásnál ugyanez az eltérés 65,9%. Ez azt jelzi, hogy párhuzamos szélirány esetén a konvergencia lényegesen lassabb az aszimptotikus, reprezentatív megoldáshoz: a 25. kanyonban még 17,6% maradt az eltérés az elméleti növekményhez képest. Ugyanakkor az eltérések mértékének ismeretében kimondható, hogy 15–25 egymás utáni utcakanyon már megfelelően sok ahhoz, hogy az ott kialakuló koncentrációeloszlást a periodikus (aszimptotikus) eredményekkel modellezzük, ami a modell számításigényének jelentős csökkenését vonja magával.

3.3. A növényzet hatása a levegőminőségre egyetlen és végtelen számú forrás esetén

A növényzet jelenléte alapjaiban módosítja az utcakanyonokban kialakuló áramlási viszonyokat, méghozzá erősen szélirányfüggő módon. Az első kanyonban kialakuló kváziperiodikus koncentrációmező (c_1^*) és periodikus (c_∞^*) koncentrációmező összehasonlítása rámutat, hogy a modellben figyelembe vett források száma alapjaiban befolyásolja a növényzet hatásának megítélését.

Az egyetlen ill. végtelen számú szennyezőanyag-források esetén kapott eredmények összehasonlításánál fontos kiemelni, hogy a szennyezőanyag-terjedést modellező skalártranszport-egyenleteket ugyanazon a sebességmezőn oldottuk meg, és az eredményül kapott koncentrációeloszlásokat az 1. egyenletben látható formula szerint, teljesen analóg módon dimenzióatlanítottuk. Az eredmények különbségét tehát csak az okozhatja, hogy végtelen számú forrás esetén a főtömegi koncentrációval (azaz egyetlen skalárértékkel) jellemzett háttérkoncentráció térbeli eloszlása – az egyetlen forráshoz tartozó konstans zérus háttérkoncentráció-eloszlással szemben – nem egyenletes.

Az 1. táblázatban közölt eredmények alapján látható, hogy ha csak egyetlen szennyezőanyag-forrás lokális hatását vesszük figyelembe, akkor a fák megjelenése minden szélirány esetén szignifikánsan növeli talajközeli átlagkoncentrációt ($\Delta c_{1,tk}^* = 25,7\text{--}90,4\%$), méghozzá szigorúan monoton módon, azaz a ritka fákhoz (2×4) képest a sűrű faelrendezés (2×7) mindig nagyobb koncentrációnövekedést eredményez az üres kanyonhoz viszonyítva. Ezzel szemben a végtelen ismétlődő forrásokat reprezentáló periodikus koncentrációmezőben eltérő eredményeket látunk: 30° és 0° esetén a ritka faelrendezés akár 2,5%, illetve 7,5%-kal is csökkentheti a gyalogos fejmagasságban tapasztalható átlagkoncentrációt. Érdekes kiemelni azt is, hogy a fák hatására bekövetkező koncentrációnövekedés mértéke a merőlegeshez közeli (60°, 90°) szélirányok esetén is lényegesen kisebb ($\Delta c_{\infty,tk}^* = 4,7\%\text{--}34,5\%$), hogy ha a valós városokat jobban közelítő modell eredményeit tekintjük, mint ha a szélcsatorna-mérésekhez hasonló kváziperiodikus esetet néznénk.

A fák telepítésének hatása a levegőminőségre: változás a talajközeli átlagkoncentrációban a fák nélküli esethez képest

Szélirány	Egyetlen forrás figyelembevételével: kváziperiodikus koncentrációmező ($\Delta c_{1,tk}^*$)		Végtelen sok forrás figyelembevételével: teljesen periodikus koncentrációmező ($\Delta c_{\infty,tk}^*$)	
	Ritka fák	Sűrű fák	Ritka fák	Sűrű fák
90°	25,7%	38,2%	17,7%	31,9%
60°	42,5%	90,4%	16,6%	34,5%
30°	41,3%	56,6%	-2,5%	4,7%
0°	37,8%	56,3%	-7,5%	6,6%

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Validált CFD-eredmények alapján megmutattuk, hogy olyan városi környezetben, ahol a szennyezőanyag-források intenzitása utcáról-utára ismétlődik, a fák átszellőzésre gyakorolt hatása nem kiugróan negatív, sőt bizonyos esetekben (az uralkodó széliránnyal közel párhuzamos utcákban ritkán ültetett fák) kifejezetten kedvező lehet. Ezek az eredmények rációznak a szakirodalomban elterjedt következtetésekre. A fák utcakanyonokba történő átgondolt telepítése tehát az átszellőzés szempontjából javasolható, ami további előnyöket, például javuló hőkomfort-érzetet és hatékonyabb zajcsökkentést is biztosíthat. Mérnökként így különböző városi geometriák (H/W , L/H arányok) és növényzet elrendezések átfogó CFD vizsgálatával járulhatunk hozzá a fenntarthatóbb várostervezéshez.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Jelen kutatás a Kulturális és Innovációs Minisztérium által meghirdetett Nemzeti Tehetség Program keretében elnyert Nemzet Fiatal Tehetségeiért Ösztöndíj támogatásával valósult meg. Pályázati azonosítók: NTP-NFTÖ-25-0837, NTP-NFTÖ-25-0917. A publikáció megjelenését a Gépészmérnök-képzésért Alapítvány tette lehetővé.

SZAKIRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] European Environmental Agency. (2020). Healthy environment, healthy lives: how the environment influences health and well-being in Europe. EEA Report. ISSN 1977-8449. <https://doi.org/10.2800%2F53670>
- [2] Cárdenas Rodríguez, M., Dupont-Courtade, L., Oueslati, W. (2016). Air pollution and urban structure linkages: Evidence from European cities. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 53, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.190>
- [3] Salmond, J. A., Tadaki, M., Vardoulakis ... & Wheeler, B. W. (2016). 38 Health and climate related ecosystem services provided by street trees in the urban environment. *Environmental Health*, 15(1), Article 1. <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0103-6>
- [4] Gómez-Bagethun, E., Gren, Å., Barton, D. N., Langemeyer, ...&Kremer, P. (2013). Urban Ecosystem Services. In T. Elmqvist, M. Fragkias, & C. Wilkinson (Eds.), *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities* (pp. 175–251). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7088-1_11
- [5] Kristóf, G., & Füle, P. (2017). Optimization of urban building patterns for pollution removal efficiency by assuming periodic dispersion. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 162, 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.01.011>
- [6] Carlo, O. S., Fellini, S., Palusci, O., Marro, M., Salizzoni, P., & Buccolieri, R. (2024). Influence of obstacles on urban canyon ventilation and air pollutant concentration: An experimental assessment. *Building and Environment*, 250, 111143. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111143>
- [7] Gromke, C., & Blocken, B. (2015). Influence of avenue-trees on air quality at the urban neighborhood scale. Part I: Quality assurance studies and turbulent Schmidt number analysis for RANS CFD simulations. *Environmental Pollution*, 196, 214–223. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.10.016>
- [8] Sanz, C. (2003). A Note on $k-\epsilon$ Modelling of Vegetation Canopy Air-Flows. *Boundary-Layer Meteorology*, 108(1), 191–197. <https://doi.org/10.1023/A:1023066012766>
- [9] Papp, B., Troll, I., Kristóf, G. (2025). Assessment of RANS turbulence modelling approaches for pollutant dispersion in vegetated street canyons using periodic boundary conditions. *Proceedings of the Conference on Modelling Fluid Flow CMFF'22* (ISBN 978-615-112-002-6), 100-110. Elérhető online: https://www.cmff.hu/papers25/CMFF25_Final_Paper_PDF_16.pdf. (A letöltés dátuma: 2026. 02. 25.)