

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Légeköri szennyezőanyagok keveredése városi környezetben

DIPLOMAMUNKA



Készítette:

Molnár Anna Eszter

Meteorológus mesterszak,

Előrejelző szakirány

Témavezetők:

dr. habil. Mészáros Róbert

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Leelőssy Ádám

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2017

Tartalomjegyzék

Bevezetés	3
1. Áramlási modellek.....	4
1.1 Léggöri szennyezőanyagok modellezése.....	4
1.2 Computational Fluid Dynamics (CFD) modellek	5
1.3 Az OpenFOAM modell bemutatása	7
1.3.1 A megoldandó egyenletek	8
2. Utcakanyonban kialakuló áramlások.....	13
2.1 Áramlásmódosító hatások.....	15
2.2 Vegetáció szerepe	17
2.3 Szélcsatorna kísérletek	18
3. A modellezés első lépései.....	21
3.1 Geometria és hálógenerálás	21
3.2 Megfelelő rácsfelbontás kiválasztása	22
3.3 Kezdeti és peremfeltételek meghatározása.....	25
4. Utcakanyon szimuláció.....	29
4.1 Alapeset különböző szélirányok esetén.....	29
4.2 Épületek magasságának áramlásmódosító hatása.....	32
4.3 A szél sebességének áramlásmódosító hatása	38
4.4 Mellékutca hatása	39
Összefoglalás	43
Köszönetnyilvánítás.....	45
Irodalomjegyzék	46

Bevezetés

Napjainkban az emberiség közel fele városi környezetben él, így a városokban kialakuló levegőszennyezés az egyik legsúlyosabb környezeti probléma. A közlekedés, az energiafelhasználás, a lakossági fűtés, a fosszilis tüzelőanyagok égetése során kikerülő szennyezőanyagok jelentős mértékben kihatnak az emberi egészségre. A városi levegő minőségét befolyásolja a kibocsátott anyag mennyisége, az aktuális meteorológiai viszonyok, a földrajzi elhelyezkedés, a város népessége, a zöld területek nagysága, valamint a település szerkezete és beépítettsége.

A légkörbe kerülő szennyezőanyagok az áramló levegővel együtt mozognak, így az épületek között kialakuló áramlások vizsgálata nélkülözhetetlen. A komplex geometriájú épületek lokálisan nagymértékben képesek módosítani az áramlási mezőt, így megváltoztatják a szennyezőanyagok koncentrációjának térbeli eloszlását. Az utóbbi néhány évtizedben a számítástechnika gyors ütemű fejlődésének köszönhetően a térbeli felbontás egyre finomabbá vált, ezáltal egyre több részletet lehet figyelembe venni az áramlások elemzésekor. A bonyolult szerkezetű utcakanyonok szimulációjára az időjárás modellek helyett különböző áramlástani, úgynevezett Computational Fluid Dynamics (CFD) modelleket használnak.

Diplomamunkámban azt vizsgálom, hogy hogyan történik a közlekedésből származó szennyezőanyagok keveredése egy épületekkel határolt útszakasz mentén. Ehhez először ismertetem a meteorológiában is használatos szennyezőanyag-terjedési modelleket, majd rátérek a CFD modellekre, ezen belül is az általunk használt ingyenes, és nyílt forráskódú OpenFOAM szoftverre, részletesen leírom ennek felépítését, az alkalmazott egyenleteket és módszereket. Ezt követően áttekintem az utcakanyonban kialakuló áramlások modellezésében elért eddigi eredményeket, kifejtem a különböző áramlásmódosító hatásokat, valamint a vegetáció szerepét. A részletes szakirodalmi áttekintés után bemutatom az utcakanyon szimuláció során használt geometriát és térbeli felbontást, továbbá a modell kezdeti és peremfeltételeit, valamint ezek jelentőségét. Az utolsó fejezetben szemléltetem a szennyezőanyagok felhalmozódását az eltérő geometriájú kanyonokban a szélirány és szélesebbég módosításának függvényében, valamint egy mellékutca áramlásmódosító hatását a szélesebb főútra.

1. Áramlási modellek

1.1 Léggöri szennyezőanyagok modellezése

A légkörkémiaili folyamatok modellezése az utóbbi évtizedekben egyre fontosabbá vált, ugyanis a szennyezőanyagok kikerülve a levegőbe, az élővilágra, emberi egészségre és az épített környezetre is veszélyesek lehetnek. A légkörben lévő szennyezőanyagok diszperziója főként a szél általi advekciótól függ, azonban egyéb tényezők, mint a turbulens diffúzió, kémiai reakciók, valamint a szennyezőanyagok ülepedése is fontos szerepet játszanak a szennyezők koncentrációjának alakulásában. A modellek fejlődésének köszönhetően egyre több lehetőség nyílt a tudomány különböző területei közötti kapcsolatok vizsgálatára, komplex áramlások szemléltetésére. A léggöri szennyezőanyag-terjedési modelleknek alapvetően több típusa is létezik, mint a Gauss-, Lagrange-, illetve Euler-féle modellek.

A pontforrásokból származó szennyezőanyagok terjedésének vizsgálatára leginkább Gauss-féle modellt használnak, mely homogén áramlási mezőt és állandó forrást feltételez, a turbulens diffúzió leírására pedig Gauss-féle eloszlásprofilt alkalmaz. Jelenleg széles körben használják a levegőkémiai folyamatok modellezésére, mivel rövid számítási idő alatt elfogadható megoldást biztosít, azonban utcakanyonban végbemenő szennyezőanyag felhalmozódás leírására nem alkalmas. Mivel a Gauss modell leginkább az egyszerű geometriájú, vagy teljesen akadálymentes áramlások leírására képes, így gyakran csak a városi tetőszint feletti szennyezőanyagok diszperzióját írják le vele, és az utcakanyon áramlás vizsgálatára már más, kifejezetten erre a célra kifejlesztett modellt használnak (*Soulhac et al., 2011; Mensink and Cosemans, 2008*). Annak köszönhetően, hogy a két modell előnyeiket kombinálták, ezek jobb és pontosabb megoldást képesek biztosítani, mint amit azok külön-külön tudnának (*Fallah-Shorshani et al., 2017*).

A Lagrange-féle modelleket leginkább regionális és kontinentális skálájú léggöri transzportfolyamatok leírására használják; azon alapulnak, hogy a levegőben lévő szennyező részecskék trajektóriák mentén mozognak, amit alapvetően a szélmező, a felhajtóerő, illetve a turbulens hatások határoznak meg. Az euleri modelleket kisebb, városi és regionális skálán is alkalmazzák, céljuk, hogy egy rögzített rácshálózaton figyelembe véve a horizontális advekciót, turbulens diffúziót, különféle kémiai reakciókat, forrás és nyelő tagokat, valamint az ülepedést, kiszámolják minden egyes rácspontra a

szennyezőanyag-koncentráció időbeli megváltozását. Léteznek már olyan finom felbontású Euler-féle modellek is, melyek az egyenleteket képesek akár egy méteresnél kisebb rácsfelbontás mellett is megoldani, ezáltal figyelembe tudják venni az épületek és egyéb akadályok áramlásmódosító hatását is. Az Euler- és Lagrange-féle modellek számára a bemenő meteorológiai adatokat az időjárás-előrejelző modellek biztosítják, amik térbeli felbontása általában 1–10 km, míg az utcakanyon szimuláció során ennél jóval kisebb, néhány méteres skálán dolgozunk. A meteorológiai állapothatározók mikroskálán is képesek jelentős, akár több nagyságrendbeli eltérést mutatni, azaz ilyen kis skálán már nem lehet alkalmazni a meteorológiában használatos közelítéseket, emiatt ezek a modellek nem alkalmasak az épületek körüli szennyezőanyag-koncentráció leírására (*Lagzi et al., 2013*).

Ezen kívül léteznek statisztikán alapuló modellek, melyek a városokban történő szennyezőanyagok mérései alapján, különböző statisztikai módszereket felhasználva készítenek előrejelzéseket (*Noth et al., 2011*). Ezek a modellek sem alkalmazhatók az utcakanyonon belüli légszennyezőanyagok vizsgálatára, ugyanis egyrészt nincs annyi mérési pont egy városon belül, hogy ezt figyelembe lehessen venni, másrészt nagyon hosszú adatsorra lenne szükség a megbízható előrejelzéshez.

Mindezeket figyelembe véve a városi utcakanyonban végbemenő áramlások leírására egy olyan modellre van szükség, mely finom felbontású, képes figyelembe venni az épületek és egyéb tereptárgyak áramlásmódosító hatását, továbbá a meteorológiai állapothatározók mikroskálájú megváltozását.

1.2 Computational Fluid Dynamics (CFD) modellek

A tudomány fejlődésével egyre kisebb skálájú, finomabb felbontású áramlások modellezésére nyílt lehetőség. A hidrotermodinamikai egyenletrendszer megoldásán alapuló numerikus áramlástani modelleket nevezzük CFD-nek. Ezek a szoftverek képesek komplex struktúrák kezelésére, többféle fizikai modellel rendelkeznek, hatékony numerikus sémákat alkalmaznak, meghatározzák a folyadékok áramlását, a hő- és tömegtranszportot, figyelembe veszik a különböző kémiai reakciókat és egyéb kapcsolódó jelenségeket is, így széles körben elterjedtek. Leginkább a mérnökök alkalmazzák különféle műszaki, környezettechnikai, járműipari, energiaipari problémák megoldására, de alagutak szellőzőberendezésének kivitelezésére, füstterjedés modellezésére, épületek szélterhelő hatásának vizsgálatára is kiváló eszközt jelentenek (*Dagnew et al., 2009*;

Deckers et al., 2013). A meteorológiában is egyre nagyobb teret hódítanak ezek a modellek, mivel a finom felbontású meteorológiai modellek nem veszik figyelembe az áramlás mikrostruktúráját, így a mikrometeorológiai folyamatok tanulmányozása során használják ezeket. Gyakran CFD modellekkel végeznek számításokat a szélfarmok optimális elhelyezése érdekében, ami alapvetően függ a felszíni topográfiától és a légköri feltételektől. A szélturbinák hibás elhelyezése akár 10–20%-kal is csökkentheti az energiatermelést (*Kuo et al., 2016*). A városi hősziget okozta cirkuláció (*Wang and Li, 2016*), illetve a városi hősziget és lejtőszél együttes hatása által létrejövő áramlások tanulmányozására, így a katabatikus és anabatikus szél leírására is használnak különféle áramlástani modelleket (*Luo and Li, 2011*). Nukleáris és ipari balesetek során kikerülő légszennyezőanyagok (*Leelőssy, 2012*), valamint a városi utcakanyonban végbemenő szennyezőanyag-transzport lokális skálájú áramlásának meghatározására is ezek a modellek a legalkalmasabbak.

A CFD modellek meteorológiai célú alkalmazása számos problémát felvet. Neutrális légköri határréteg esetén felmerülhet, hogy a modellekbe beépített érdes falfüggvények és a légköri profilok együttes alkalmazása esetén a megoldás elfajul, így rossz eredményt kapunk (*Balogh, 2014; Blocken et al., 2007*). A mezoskálájú légköri folyamatokat, mint a vertikális rétegzettséget, a Coriolis erő hatását, az adiabatikus hűlést és a baroklinitást a modellek alapvetően nem veszik figyelembe, azonban transzformációs módszert alkalmazva az egyenletekre ez a probléma akár mérsékelhető, vagy kiküszöbölhető (*Kristóf et al., 2009*). Ennek segítségével pedig még több meteorológiai folyamat, mint a városi hősziget, a völgyi szél, vagy a lejtővihar is tanulmányozható (*Rácz et al., 2013*), további módosításokkal pedig akár nedvességszállítási, fázisátalakulási folyamatokat is figyelembe lehet venni (*Rácz and Kristóf, 2016*).

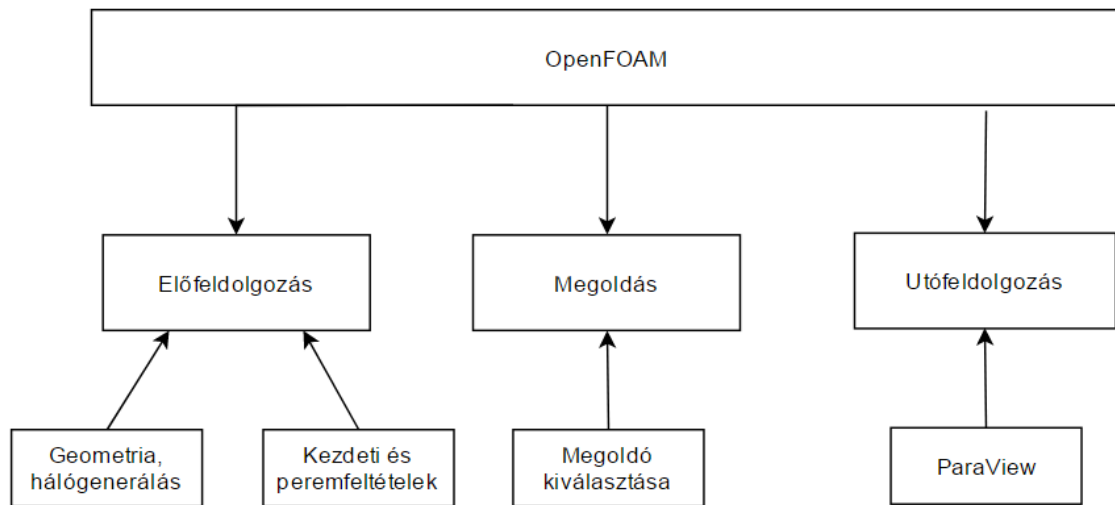
Az áramlástani modelleknek nagyon sok fajtája létezik, ezek közül legelterjedtebb az Ansys-Fluent, azonban nyílt forráskódja miatt egyre szélesebb körben használják az OpenFOAM szoftvert is. Magyarországon jelenleg a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen-en végeznek kutatómunkát Ansys-Fluent, valamint MISKAM modellekkel (*Balczó and Lajos, 2014; Rácz and Kristóf, 2016*). Előbbi alkalmazható mikro- és mezoskálájú szennyezőanyag terjedés számítására egyaránt, míg a MISKAM modellt kifejezetten városi légszennyezés meghatározására fejlesztették ki.

1.3 Az OpenFOAM modell bemutatása

Az OpenFOAM (Open Source Field Operation and Manipulation) modell egy ingyenes, nyílt forráskódú CFD szoftver, mely a műszaki és a természettudományok számos területén használható. A szoftvert 1989-ben Henry Weller fejlesztette ki azzal a céllal, hogy egy könnyen kezelhető szimulációs felületet készítsen, így a moduláris és objektum-orientált felépítése miatt a C++-t választotta programozási nyelvnek. A programot a tudomány fejlődésével folyamatosan fejlesztik (Jasak, 2009), újabb verziók jelennek meg, melynek köszönhetően egyre szélesebb körben használható. Alkalmazható szilárdságtani és elektromágneses vizsgálatok során, turbulencia és hőátadás leírására, képes figyelembe venni a kémiai reakciókat, továbbá egyre inkább kezd elterjedni a mikrometeorológiában is (Huber et al., 2006; Chen et al., 2017). Mivel nyílt forráskódú, a felhasználók szükség esetén további fejlesztéseket végezhetnek, emiatt jelentős mennyiségű megoldóval és kiegészítő alkalmazással rendelkezik.

Az OpenFOAM egy jól strukturált program, melynek szerkezeti felépítése az 1.3.1. ábrán látható. A modellezés során a legfontosabb lépés a megfelelő megoldó kiválasztása, ugyanis az elő- és utófeldolgozás is erre épül rá. Az OpenFOAM nem rendelkezik olyan általános megoldóval, ami minden esetben alkalmazható lenne, helyette több mint 80 specifikus megoldó létezik, amihez hozzáadódnak még a felhasználók által készített, vagy módosított változatok is. Ezeket különböző problémák megoldására fejlesztették, és továbbfejlesztették, így a legfontosabb feladat a legalkalmasabb megoldó kiválasztása. A vizsgált esetben ez az összenyomhatatlan, stacionárius és turbulens közegre felírt *buoyantBoussinesqSimpleFoam* megoldó, mely a SIMPLE algoritmuson alapszik (Greenshields, 2016). Az előfeldolgozás során a modellnek meg kell adni a megfelelő kezdeti- és peremfeltételeket, illetve magát a térbeli hálót. A peremfeltételek meghatározása kulcsfontosságú, ugyanis a kis modelltartomány miatt ezek igen rövid idő alatt meghatározzák az áramlást, továbbá felülírják a kezdeti feltételeket. Az időjárási modellekkel ellentétben, a mikroskálájú folyamatok leírásánál a kezdeti feltételek szerepe elhanyagolható, azonban azok minél pontosabb megadása elősegíti a megoldáshoz való gyorsabb konvergálást. A térbeli felbontás meghatározására az OpenFOAM rendelkezik saját hálógenerálóval, ahol a cellák egyszerűbb esetben a *blockMesh* paranccsal téglatest, bonyolultabb modelltartomány esetén a *snappyHexMesh* alkalmazásával tetraéder formájúak lesznek. Ezek megadásával a program lefuttatható, azonban az adatok megjelenítéséhez utófeldolgozásra van szükség, melyre legalkalmasabb a szintén nyílt

forráskódú ParaView (Ayachit, 2016). Ennek segítségével gyorsan és egyszerűen vizualizálható a rács, a geometria, illetve a kapott adatok.



1.3.1. ábra

Az OpenFOAM program felépítése

1.3.1 A megoldandó egyenletek

Az áramlás leírására a hidrotermodinamikai egyenletrendszer alkalmazzuk, néhány feltételezéssel élve. Mivel az áramlási teret jellemző sebesség független az időtől, csak a hely függvénye, emiatt stacionárius közelítést lehet alkalmazni. Annak köszönhetően, hogy az áramlási sebesség a felszín közelében nem haladja meg a hangsebességet, továbbá a sűrűség az áramlás során közel állandó, a közeg összenyomhatatlannak tekinthető. A gyakorlatban, főleg mezoskálájú meteorológiai folyamatok leírásánál gyakran elhanyagolható a súrlódás szerepe, viszont esetünkben figyelembe kell venni, mivel a határreteken belül vizsgálódunk mikroskálán, ahol meghatározó szerepe van a turbulens mozgásoknak. Ezek alapján a stacionárius, összenyomhatatlan, súrlódásos és turbulens áramlásra vonatkozó hidrotermodinamikai egyenletrendszer a következő három egyenletből áll (Lajos, 2008):

$$(\underline{v}\nabla)\underline{v} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \underline{g} + \nu\nabla^2\underline{v} + \nu_t\nabla^2\underline{v}, \quad (1)$$

$$\nabla\underline{v} = 0, \quad (2)$$

$$\underline{v}\nabla T = \kappa\nabla^2 T + S_T, \quad (3)$$

ahol \underline{v} a sebességvektor, ρ a sűrűség, p a nyomás, \underline{g} a gravitációs gyorsulás, ν a kinematikai viszkozitás, ν_t a turbulens viszkozitás, T a hőmérséklet, κ a hővezetési együttható és S_T a forrástag. Az első egyenlet a Navier-Stokes egyenlet, a második a kontinuitási egyenlet, a harmadik egyenlet pedig valamely skalármennyiség transzportját írja le az áramlási térben, jelen esetben a hőmérséklet transzportegyenletét adja meg.

A meteorológiában a sűrűségfluktuációk nem hanyagolhatók el a felhajtóerő leírásánál, emiatt Boussinesq-féle közelítést (4) alkalmazunk a gravitációs gyorsulás harmadik komponensében (*Tasnádi et al., 2013*):

$$g \frac{\rho'}{\rho} \neq 0, \quad (4)$$

ahol ρ' az adott pontban, ρ annak környezetében lévő sűrűség.

A turbulencia leírására a rácsfelbontás függvényében többféle modellezési technika létezik, ilyen a DNS (direkt numerikus szimuláció), a RANS (Reynolds átlagolt Navier-Stokes), valamint a LES (nagy örvény szimuláció).

A DNS módszer esetében az instacionárius mozgásegyenletet illetve a kontinuitási egyenletet oldjuk meg numerikusan, miközben a legkisebb skálájú örvényeket is figyelembe vesszük, emiatt nagyon finom térbeli és időbeli felbontásra van szükség, így elsősorban alacsony Reynolds-számú áramlásoknál használatos.

A RANS módszernél az egyenletekbe behelyettesítjük a komponensek időben átlagolt és fluktuált részének összegét, majd az így kapott egyenleteket időben átlagoljuk, ezáltal az áramlást stacionáriusnak tekintjük. Ennek során olyan új tagok jelennek meg az egyenletekben, melyek képesek leírni a turbulens örvények által keltett sebességfluktuációk miatt létrejövő turbulens impulzus transzport hatását, amit turbulenciamodellek segítségével közelítünk (*Lajos, 2008*). A turbulencia modellezése azért is fontos, mert a keletkező örvények különböző nagyságrendűek, így nélkülük nagy térbeli felbontásra volna szükség.

A LES módszernél a direkt numerikus és a Reynolds átlagolt Navier-Stokes szimulációnak az előnyeit ötvözték. Azon alapszik, hogy a kisebb örvények kevésbé befolyásolják az áramlás fő jellemzőit, így csak a nagy örvényeket számítják explicit módon, emiatt az eredmény pontosabb lesz. Az ezek között lévő áramlási teret, így a

kisebb skálán zajló folyamatokat turbulencia modellekkel írják le, ami miatt pedig már nem szükséges olyan finom felbontást alkalmazni, mint a DNS esetében. Több tanulmány is készült arról, hogy a LES valóságosabb eredményeket mutat az utcakanyonokban végbemenő szennyezőanyag-terjedése során, mint a többi szimuláció (*Walton and Cheng, 2002; Gousseau et al., 2011; Tominaga and Stathopoulos, 2013; van Hooff et al., 2017*). Amennyiben a légszennyezőanyagok advekcióját vizsgáljuk, megfelelő turbulencia modell választása esetén a RANS is jó eredményt biztosít, de megfigyelhető, hogy a nagy örvény szimuláció során kiszámított koncentráció eloszlása pontosabb, mint a RANS esetén kapott, mivel jobban figyelembe veszi a szennyezőanyagok horizontális és vertikális diffúzióját, míg a RANS alulbecsüli azt (*Tominaga and Stathopoulos, 2016*). Ennek ellenére, mivel jelenleg a LES-nak még túl nagy a számítási igénye, így a gyakorlatban inkább az időben átlagolt mozgásegyenleten alapuló módszert alkalmazzák.

A SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) algoritmus a CFD modelleknél egy széles körben használt numerikus eljárás, ami iterációval megoldja az (1-3) egyenleteket. Az alapgondolat Patankar és Spalding nevéhez köthető, akik az 1970-es évek elején előálltak azzal az ötlettel, hogy amennyiben a nyomási mező nem ismert, de meg tudjuk becsülni, akkor egy elsődleges közelítést kaphatunk a sebességmezőről, majd korrigálni kell a nyomási mezőt a kapott sebességmező és kontinuitási egyenlet segítségével (*Patankar and Spalding, 1971*). Ez a gyakorlatban úgy néz ki, hogy vesszük a Navier-Stokes egyenlet divergenciáját, majd felhasználva a kontinuitási egyenletet, megkapjuk a Poisson-egyenletet (*Ferziger and Peric, 2002*):

$$\nabla^2 p = -\rho \nabla \cdot (\underline{\nu} \nabla) \underline{v}, \quad (5)$$

aminek megoldásával már korrigált nyomási mezőt kapunk.

A SIMPLE algoritmus lépései (*Patankar, 1980*):

1. becslést adunk a nyomásra és a sebességmezőre (p^* , u^* , v^* , w^*);
2. p^* felhasználásával megoldjuk a Navier-Stokes egyenletet, ezáltal korrigáljuk a sebességmezőt (u , v , w);
3. megoldjuk a Poisson-egyenletet az előbb kiszámított korrigált sebességmezőre, így megkapjuk a korrigált nyomási mezőt (p);
4. felhasználva p -t újra és újra elvégezzük a 2. és 3. lépést egészen addig, míg a (2) egyenlet, azaz sebességmező divergenciamentessége nem teljesül.

A turbulenciamodelleknek több típusa is megtalálható az OpenFOAM-ban, mi ezek közül a kis számításigényű és mérnöki gyakorlatban is használt k-ε modellt választottuk, mivel a komplex testek körüli áramlások leírására a legideálisabb megoldást biztosítja. Ez a kétegyenlet-modellek csoportjába tartozik, ami annyit jelent, hogy két transzportegyenletet tartalmaz, melyek leírják az áramlás turbulens tulajdonságait. Ebben az esetben a k turbulens kinetikus energiára és ε disszipációra írjuk fel a transzportegyenleteket a következőképpen (Lajos, 2008):

$$\underline{\nu} \nabla k = \nabla \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \nu_t [G + P] - \varepsilon, \quad (6)$$

$$\underline{\nu} \nabla \varepsilon = \nabla \left[\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right] + c_1 \frac{\varepsilon}{k} [G + P] - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (7)$$

ahol

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right), \quad (8)$$

$$\varepsilon \approx \frac{k^{3/2}}{L}. \quad (9)$$

A (6)-(7) egyenlet bal oldalán a turbulens kinetikus energia, illetve disszipációjának a megváltozása szerepel, míg a jobb oldalon az első két tag a turbulens transzportot, az utolsó két tag pedig a produkciót és disszipációt fejezi ki. Az egyenletben szereplő konstansokat általában Launder and Spalding 1974-es munkája alapján meghatározott értékeknek tekintjük (1. táblázat), azonban több tanulmány is készült arról, hogy az utcakanyonokban végbemenő áramlások minél pontosabb leírására érdemes módosítani őket (Guillas et al., 2014).

1. táblázat

A transzportegyenletekben szereplő konstansok

(Forrás: Launder and Spalding, 1974)

c_μ	c_1	c_2	σ_k	σ_ε
0,09	1,44	1,92	1	1,3

A kinetikus energiát a sebességingadozásokkal (8), míg az energia disszipációt a kinetikus energia valamint az L turbulens hosszléptékkel (9) jellemezhetjük. A kinetikus

energia és disszipáció felhasználásával kiszámítható az (1) egyenletben található turbulens viszkozitás, továbbá a (3) egyenletben lévő hővezetési együttható:

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (10)$$

$$\kappa = \frac{\nu_t}{Pr_t}, \quad (11)$$

ahol Pr_t a turbulens Prandtl szám.

A szennyezőanyag-terjedésének szimulálása a *scalarTransportFoam* modullal készíthető el, ami megoldja a következő transzportegyenletet:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \underline{v} \nabla c = D_c \nabla^2 c + S_c. \quad (12)$$

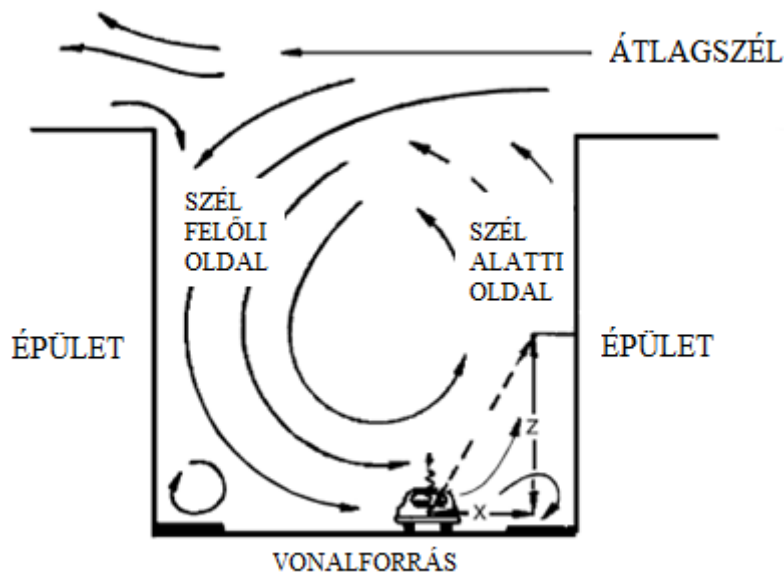
Az egyenletekben szereplő paraméterek közül c a szennyezőanyag-koncentráció, D_c a turbulens diffúziós tényező, S_c a forrástag. Kezdeti feltételként meg kell adni a modell által már kiszámított sebesség mezőt, a kezdeti szennyezőanyag-koncentrációt, továbbá bemenő paraméterként meg kell határozni a turbulens diffúzió értékét is.

2. Utcakanyonban kialakuló áramlások

Városok tervezésénél mára már nélkülözhetetlen a szennyezőanyagok viselkedésének figyelembevétele, ugyanis ezen káros anyagok jelentős negatív hatást gyakorolhatnak az emberi egészségre. Normál esetben természetes ventilláció hatására a főként közlekedésből származó szennyezőanyagok felhígulnak, azonban városi területeken az épületek körül kialakuló áramlás nagymértékben módosítja ezek terjedését, ezáltal a légszennyezés mértékét. Az utcakanyon kifejezés eredetileg csak a szűk, mind két oldalról épületekkel zárt utcára vonatkozott (*Nicholson, 1975*), mára azonban magába foglalja a szélesebb, nyitottabb utakat, melyekbe mellékutcák is torkollhatnak (*Vardoulakis et al., 2003*). Az utcakanyonokat jellemezhetjük az épületek magasságával (M), az út szélességével (Sz), valamint két jelentősebb útkereszteződés közötti úthosszal (H). A magasság és a szélesség egymáshoz viszonyított értéke alapján megkülönböztethetünk sugárutat ($M/Sz < 1$), szabályos ($M/Sz \approx 1$) és mély ($M/Sz > 1$) kanyont, míg a hosszúság és magasság aránya szerint rövid ($H/M \approx 3$), közepes ($H/M \approx 5$) valamint hosszú ($H/M \approx 7$) kanyont.

Az utcakanyonokban kialakuló lokális koncentrációkülönbségeket elsődlegesen nem a mezoskálájú folyamatok által szabályozott planetáris határréteg alakítja, hanem az épületek elhelyezkedéséből adódó mikrometeorológiai hatások (*Hunter et al., 1992*). Ennek köszönhetően az épületek tetőszintjén lévő szélirány és szélesebesség alakulása fogja legfőképpen meghatározni az utcákban kialakuló áramlási viszonyokat, ezáltal a szennyezőanyagok felhalmozódását is. Ezeket figyelembe véve megkülönböztetünk három esetet (*Vardoulakis et al., 2003*): gyenge szél, párhuzamos vagy közel párhuzamos, valamint merőleges vagy közel merőleges állapot. Gyenge szél állapotban a szélesebesség értéke nem haladja meg a 1,5 m/s-ot, így az utcában nem alakul ki jelentősebb áramlás. Amikor a szélirány közel párhuzamos az utcakanyonnal és a szélesebesség meghaladja a 1,5 m/s-ot, akkor beszélhetünk a párhuzamos vagy közel párhuzamos állapotról. Ilyen esetben az áramlás párhuzamossá válik az utca tengelyével, a szennyezőanyagot a szél magával szállítja az épületekkel határolt útszakasz mentén, a káros anyag megreked az utcában és a tengely mentén az áramlásnak megfelelő irányba felhalmozódik. Ezt a hatást más néven utcacsatorna állapotnak is nevezzük. Amennyiben az épületek elhelyezkedése nem folytonos, azaz közöttük kisebb utcák ékelődnek be, megfelelő irányú szél esetén a koncentráció csökkenhet az utcakanyonban. Merőleges vagy közel merőleges állapot esetén a szélesebesség meghaladja a 1,5 m/s-ot és a szélirány közel 90°-os szöveget zár be a vizsgált utca tengelyével. Ilyenkor kialakul egy, az úttal párhuzamos tengelyű örvény,

aminek hatására a felszín közelében a szél iránya ellentétes a tetőszinti széliránnyal, a szél felőli oldal mentén leáramlás, a szélalatti, más néven lee oldalon pedig feláramlás figyelhető meg (2.1. ábra). Ennek megfelelően az út keresztmetszete mentén a koncentráció növekedni fog a lee oldal irányába. Ezt nevezzük utcaörvény hatásnak. Bizonyos szögben érkező szélnél előfordulhat a csatorna és örvény kombinációja, ekkor a szennyezőanyag koncentrációja a szél alatti oldalon magasabb, mint a széllal szembe fordított oldalt, továbbá a koncentráció növekedni fog az utca hossza mentén (Lajos et al., 2008).



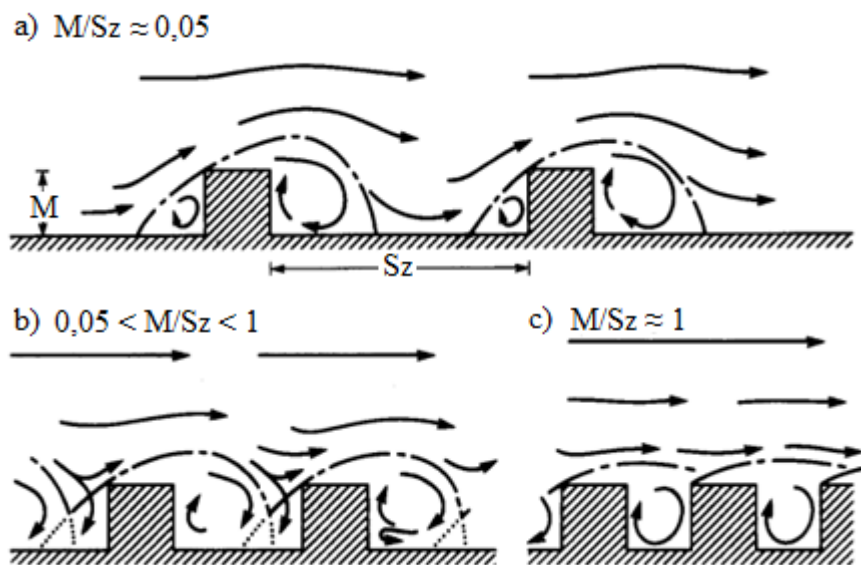
2.1. ábra

*Utcakanyonban kialakuló áramlás, az utca tengelyére merőlegesen érkező szél esetében
(Forrás: Vardoulakis et al., 2003)*

A városokban kialakuló áramlás jelentősen függ az épületek elhelyezkedésétől, az utcakanyon felépítésétől. Számos tanulmány született arról, hogy az utcakanyonok méretarányának megváltoztatásával hogyan módosul a szennyezőanyagok koncentrációja (Liu et al., 2004). Amennyiben az épületek kellő távolságra vannak egymástól ($M/Sz \approx 0,05$), a körülöttük kialakuló áramlások nem érintik egymást (2.2.a ábra). Megfigyelhető, hogy az így létrejövő áramlások szoros kapcsolatban állnak a nyomási mező alakulásával. Amennyiben csak egy épület nyomásviszonyait nézzük, a szél felőli oldalon nyomásnövekedés, a tetőn és a szél alatti oldalon pedig nyomáscsökkenés figyelhető meg. Amikor az áramló levegő megközelíti az épület oldalát, akkor a súrlódás miatt elkezd csökkenni a sebessége, melyet tovább csökkent az áramlással ellentétes irányú nyomási

gradiens. Ilyenkor a szél felőli oldalon kialakul egy torlópont, ahol a legnagyobb lesz a nyomás értéke, alatta a lassuló áramlás következtében a fal mellett visszaáramlás indul meg, mely a határrétegben áramló közeget elválasztja a faltól. Ezt a folyamatot nevezzük határréteg-leválásnak. Ennek hatására a tető mentén megjelenik a leválási tartomány, a lee oldalon pedig leválási buborék képződik, mely a fő áramlással ellentétes irányú örvény, sebessége pedig az alapáramlásnál jóval kisebb lesz.

Amennyiben az épületek közelebb helyezkednek el egymáshoz, akkor is hasonló lesz az áramlás mechanizmusa, de ilyenkor már közös áramlási rendszer alakul ki. Minél inkább szűkül az utca szélessége, annál stabilabb cirkuláció jelenik meg a kanyonban. A 2.2.b ábránál olyan másodlagos áramlások lépnek fel, amik a szél felőli oldalon tovább erősítik az örvényt. Abban az esetben, ha az épületek magasságának és szélességének aránya megközelítően egyenlő eggyel (2.2.c ábra), akkor beszélhetünk utcaörvény hatásról.



2.2. ábra

Épületek körül kialakuló áramlások az épületek egymástól vett távolsága szerint

(Forrás: Oke, 1988)

2.1 Áramlásmódosító hatások

Az utcakanyonokban végbemenő lokális áramlások kialakulásáért a szél tulajdonságain kívül egyéb hatások is felelősek. Leginkább az épületek sűrűsége illetve

struktúrája, az utca szerkezete, a termikus hatások, valamint a járművek keltette turbulencia és az ültetett növényzet.

A sűrűn beépített városi területeken a gyengébb ventiláció következtében rosszabb a levegő minősége (Yuan *et al.*, 2014). Több egymással párhuzamos épületsor esetén a tetőszint magassága jelentősen befolyásolja az utcakanyonban kialakuló áramlások vertikális irányítottságát és az örvények kialakulását. Az út tengelyére merőlegesen érkező szél esetén, amennyiben azonos magasságúak az épületek, az utcakanyonokban örvények jelennek meg, míg különböző tetőszintek esetén a magas épületek előterében leáramlás, a hátoldalán pedig feláramlás alakul ki, melynek következtében a felszín közelében megváltozik a szennyezőanyagok koncentrációja (Hang *et al.*, 2012). A tetőszint magasságán kívül szerkezeti felépítése is képes megváltoztatni az utcakanyonban kialakuló áramlást, így a felszín közeli szennyezőanyag felhalmozódása eltérő lesz különböző tetőformák esetén (Yassin, 2011; Huang *et al.*, 2009).

Mély utcakanyon esetén megfigyelhető, hogy a fő örvény alatt kialakul egy kisebb, vele ellentétes irányú másodlagos örvény, melynek hatására a felszín közelében közel homogén lesz a szennyezés, vagy inkább a szél felőli oldalon akkumulálódik (He *et al.*, 2017). Az épületlétesítmények felépítése, mint az erkélyek elhelyezkedése (Murena and Mele, 2016), árkádok (Wen *et al.*, 2017), vagy egyéb építészeti formák jelenléte is módosíthatja az áramlást (Ng and Chau, 2014). Nyitott térrész esetén például erősödik az átszellőzés, így a felhalmozódás inkább az utcakanyon közepén lesz jellemző (Yang *et al.*, 2016).

A termikus kényszereknek az épített környezetben meghatározó szerepük van az áramlások valamint a turbulens transzportok kialakításában, módosításában. A besugárzás és az épületek árnyékoló hatása miatt eltérő hőmérsékletű lesz az úttest, a fal illetve a tető, melynek hatására az utcakanyonban fellép egy hőmérsékleti és nyomási gradiens, ami a létrejövő örvény intenzitását képes befolyásolni (Nazarian and Kleissl, 2016). Az örvény erősségének megváltozásán kívül az áramlás szerkezeti képe is módosulhat a napszaktól és időjárási viszonyoktól függően. Amennyiben a lee oldalt vagy az utca felszínét süti a nap, a fellépő hőmérsékletkülönbség miatt kialakuló felhajtóerő növeli az áramlás intenzitását, ami a felszínközeli koncentráció csökkenését eredményezi. Ezzel szemben, ha a szél felőli oldalt éri a besugárzás, és a fal hőmérséklete melegebb, mint a fölötte lévő levegőé, a felfelé irányuló felhajtóerő a leáramlással szembe mutat, ami miatt két ellentétes irányú örvény jelenik meg a kanyonban. A magasban megmarad az eredeti irányítottságú cirkuláció, azonban a felszín közelében a szél a tetőszinti széllel megegyező irányba fúj,

így a szennyezőanyag inkább a szél felőli oldalon fog felhalmozódni (Xie *et al.*, 2005). Az utca szerkezeti felépítése és tájolása közvetlenül szabályozza a termikus hatásokat, ezáltal az áramlási viszonyokat, emiatt a városok tervezésénél kulcsfontosságú ezeket is figyelembe venni (Ali-Toudert and Mayer, 2006).

A járművek okozta turbulencia meghatározó tényező lehet a szennyezőanyag diszperzióban, főként alacsony szélesség esetén. Mértéke függ a közlekedési eszközök sebességétől, a forgalom nagyságától és irányától, illetve egyéb sűrűlási tényezőktől. A járműforgalom által keltett kinetikus energia nő a felszín közelében az autók számának növelésével, azonban elérve egy küszöbértéket csökkenésbe kezd. Ennek következtében nagy forgalmú utaknál kicsi lesz a turbulencia, ami csökkenti a légszennyezőanyagok átkeveredését (Kastner-Klein *et al.*, 2000; Vachon *et al.*, 2002). A mozgó közlekedési eszközökön túl érdemes figyelembe venni a parkoló autókat is, ugyanis akadályképző hatásuk van. Az utca tengelyével párhuzamosan parkoló autók jelenléte miatt párhuzamos szél állapotában az utca mindkét oldalán akár 30%-os, míg merőleges szél állapot esetén a lee oldalon hasonló, a szél felőli oldalon közel 50%-os szennyezőanyag-koncentráció javulás figyelhető meg. Merőlegesen, vagy 45°-os szögben parkoló gépkocsik következtében már nem jelentkezik ekkora mértékű javulás, sőt több esetben intenzívebbé válik a felhalmozódás mértéke (Gallagher *et al.*, 2011).

2.2 Vegetáció szerepe

Városi területeken a növényzetnek fontos szerepe van a városi hősziget és a levegőszennyezés szempontjából, viszont hozzájárulása a levegő minőségéhez igen összetett. Habár a legtöbb esetben a vegetáció csökkenti a szennyezőanyag-koncentrációt a depozíció révén – ugyanis egy sima épületfelszínhez képest egy sűrű, nagy levélfelülettel rendelkező növényzet esetén sokkal nagyobb mértékben nő az ülepedés mértéke – mégis az utcakanyonok vizsgálata során figyelembe kell venni a vegetáció áramlásmódosító hatását is (Sárkány, 2016). Egyes tanulmányokban arra a következtetésre jutottak, hogy a növények helyenként jelentős mértékben is növelhetik a járdaszinti koncentrációt (Balczó *et al.*, 2009), mivel jelenlétük miatt – főleg a talaj közelében – csökken a szélesség és a turbulens kinetikus energia nagysága, ami meggátolja az átszellőzést (Balczó and Tomor, 2016).

A tetőszinti szél iránya is befolyással bír a szennyezőanyagok koncentrációjának felhalmozódására, amikor az utca tengelyére merőlegesen fúj a szél, a szél felőli oldalon nő és a lee oldalon változatlan marad a koncentráció, míg 0, vagy 45°-os szögben érkező szél esetén mindkét oldalon nő a szennyezőanyagok mennyisége a felszín közelében (*Vranckx et al., 2015*). Az átkeveredés mértékét a növényzet elhelyezkedése is befolyásolja, ugyanis a hígulás mértéke függ attól is, hogy a fasor egy szűk utca közepén vagy egy szélesebb út két oldalán húzódik (*Buccolieri et al., 2009*). Releváns tényező még a fák sűrűsége illetve a lombkorona pórusossága, ezen belül is a legjelentősebb káros anyag feldúsulás – szél alatti és széllel szembeni oldalon egyaránt – akkor alakul ki, amikor a szél 45°-os szögben éri az utcakanyont továbbá kicsi a fák sűrűsége vagy nagy a lombkorona pórusossága (*Gromke and Ruck, 2012*).

A vizsgálatok készítésekor fontos figyelembe venni a lombhullató növényzet évszakos módosulását is, ugyanis a levélfelület megváltozása miatt a koncentráció felhalmozódás éves menete is módosul (*Vranckx et al., 2015*). A levél nélküli időszakban a koncentráció a vegetáció nélküli utcakanyonhoz hasonlóan alakul, ezzel szemben jelenléte esetén gyengíti a cirkuláció intenzitását. Ilyenkor a szél alatti oldalon a levelek csökkentik a feláramlás mértékét, emiatt a szél felőli oldalon szintén csökken a leáramlás erőssége, így a közlekedésből frissen kikerülő szennyezőanyagok a kanyon alján ragadnak, ezáltal növelik a légszennyezés mértékét a lombkoronaszint alatt (*Salmond et al., 2013*). A szennyezőanyagok utcakanyonban lévő koncentrációja függ a növényzet felépítésétől, és az emisszió mértékétől is. Megfigyelhető, hogy a légszennyezés szempontjából a legjobb, ha a vegetáció közel helyezkedik el a felszínhez és a forráshoz, valamint elég magas és pórusos ahhoz, hogy átengedje a levegőt (*Janhall, 2015*). A növényzet típusát is érdemes megvizsgálni, ugyanis más a ventiláció mértéke fasor, sövény vagy sövényfal esetén. Fasor esetén a szennyezőanyag nem képes felhígulni a felszín közelében, ami akkumulációhoz vezet. Sövény ültetésekor szintén megnő a koncentráció, azonban sövényfal esetén csökken a járda mentén a káros anyag mennyisége, mivel a folytonos sövény nem engedi át a közútról származó szennyeződést (*Vos et al., 2013*).

2.3 Szélcsatorna kísérletek

Komplex geometriájú testek körüli áramlásokat szélcsatorna kísérletekkel szoktak szimulálni, segítségével információ nyerhető a valóságban zajló folyamatokról anélkül,

hogy bonyolult modellszámításokat végeznénk. A szélcsatorna egy olyan zárt csatorna, melyben adott sebességgel áramló levegőt állítanak elő valamilyen hajtórendszer segítségével. A szélcsatornában lévő mérőtérben két típusú áramlási helyzetet lehet szimulálni. Az álló közegben mozgó test környezetében létrejövő áramlás során a valóságban egyenletes sebességgel haladó járművet modelleznek, így információ kapható a körülötte kialakuló áramlási viszonyról, mely fontos lehet az autók és repülőgépek formatervezésénél. A második esetben nyugvó testek körül kialakuló áramlás modellezhető, így az atmoszférában, ezen belül is leggyakrabban a határrétegben zajló folyamatok, az épületek körül kialakuló áramlási viszonyok, illetve a szennyezőanyag-terjedés szimulálható. Ilyenkor nélkülözhetetlen, hogy a modellezett határréteg vertikális felépítése, azaz sebességprofilja és turbulencia intenzitása valóságghú legyen, ezenkívül fontos a megfelelő méretarány használata.

A szélcsatornákat osztályozhatjuk a mérőtérben lévő áramlási sebesség, illetve a szélcsatorna elrendezése szerint. Az épületek körüli áramlások szimulációjára kis sebességű szélcsatornát használnak, ilyenkor a mérőtérben lévő levegő sebessége nem haladja meg a 0,3 Mach értéket, tehát összenyomhatatlan közeget feltételezünk. A szélcsatorna mérőtere nyitott, ami jelentősen megkönnyíti a geometriai elemek elhelyezését a rögzített síklapon. Kis sebességű szélcsatornánál a valóságban mért és a modellezett Reynolds-szám értéke megegyezik, azonban bizonyos esetekben ez nem teljesül, ilyenkor előre meghatározott feltételek figyelembe vételével megfelelő eredmények kaphatók, utcakanyon esetén kísérleti úton meghatározott Reynolds-szám alkalmazható (*Lajos, 2008*).

A szélcsatorna méréseket a gyakorlatban felhasználják a különböző CFD modellek által kiszámított értékek validációjára, így a városi környezetben végbemenő áramlások modellezésére, szennyezőanyag-koncentráció diszperziójának meghatározására (*Vranckx and Vos, 2013; Stabile et al., 2015; Yuang et al., 2016*). Már régóta végeznek utcakanyon szimulációkat szélcsatorna segítségével, kezdetben az utcák egyszerű geometriáját, a tetők felépítését, majd az autók szennyezőanyag-kibocsátását, a felszín érdességét, illetve a vegetáció szerepét is figyelembe vették. A növényzetet általában valamilyen szálas, rostos felépítésű vatta anyaggal helyettesítik, a különböző típusú fák eltérő lombkorona pórusosságát pedig ezen anyag előre meghatározott tömegével, sűrűségével érik el (*Gromke et al., 2008; Gromke, 2011*). A városokban végbemenő, közlekedésből származó szennyezőanyagok terjedésének modellezésénél általában vonalforrásokat használnak, majd különböző pontokon méréseket végeznek.

A szélcsatornában zajló áramlási folyamatok a legtöbb esetben nem láthatók, így érdemes különféle vizualizációs módszereket alkalmazni, melyeknek számos típusát alkalmazzák a gyakorlatban. A legrégebbi és legköltséghatékonyabb az úgynevezett „tuft” módszer, amikor a vizsgált testre fonalakat ragasztanak, és ezeknek a mozgásából következtetnek az áramlásra, ezt főleg járművek körül kialakuló áramlás szemléltetésére alkalmazzák (*Ocokoljic et al., 2017*). Határréteg vizsgálatok során leginkább füstöt, különféle festékeket, illetve olajködöt használnak, ezeket valamilyen generátor segítségével bejuttatják a mérőtérbe, majd a részecskéket megvilágítják fénnel vagy lézerrel a jobb láthatóság érdekében (*Tominaga and Blocken, 2016; Balczó and Tomor, 2016*). Ezen kívül egyéb módszerek is léteznek, különféle anemométerek, szondák segítségével végeznek szélsébség méréseket, vagy homokeróziós módszer által állapítják meg a helyi szélviszonyokat azáltal, hogy honnan fújta el a szél az azonos méretű homokszemcséket (*Blocken et al., 2016*).

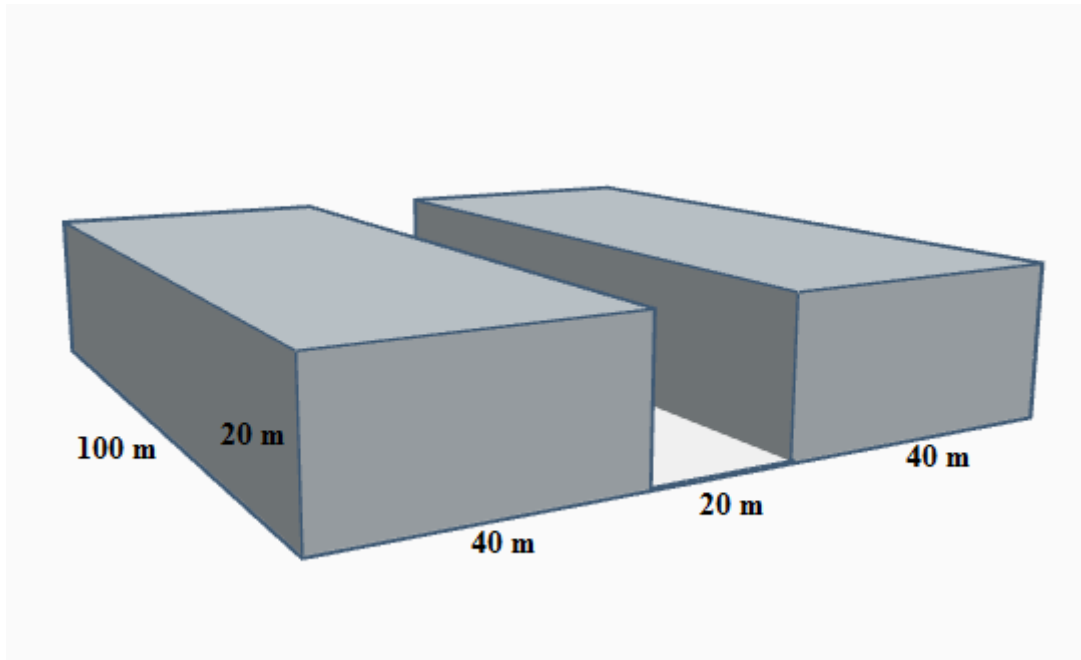
3. A modellezés első lépései

3.1 Geometria és hálógenerálás

A legelső lépés egy áramlástanai modell elkészítése során a geometria és a hozzá tartozó térbeli felbontás meghatározása. Az OpenFOAM, mint a numerikus szimulációs modellek jelentős része is véges térfogat elvén működik, ilyenkor rácson számítjuk ki az áramlást jellemző mennyiségeket úgy, hogy a teljes számítási tartományt felosztjuk tetszőleges alakú térfogatelemekre. Azért annyira elterjedt ez a módszer a CFD modellek körében, mert az áramlástan alapegyenleteit integrál és konzervatív formában oldja meg, így egy cellából kilépő és a szomszédos cellába belépő mennyiség azonos nagyságú lesz (Balogh, 2013).

A rácsháló meghatározásánál meg kell adni a számítási tartomány geometriáját, felbontását és a határfelületeket. Az OpenFOAM program kétféle hálógenerálóval is rendelkezik. A *blockMesh*-t egyszerűbb geometriáknál szokták alkalmazni, itt a rácsháló téglatest alakú cellákból áll, míg a másik lehetőség a *snappyHexMesh*, mely esetében a cellák tetraéder formájúak, így ez komplexebb formák alkalmazásakor használatos (Hefny and Ooka, 2009). A vizsgálandó területet blokkokra kell felosztani, a térbeli felbontást pedig külön-külön minden egyes blokkra meg kell határozni. Az OpenFOAM beépített moduljain kívül léteznek még egyéb, külön hálógenerálásra alkalmas programok is, mint a *gmsH*, *Salomé*, melyek rácshálóját importálható az OpenFOAM-ba.

Diplomamunkámban utcakanyon szimulációt végeztünk, így a geometria elkészítésénél célunk két épület között kialakuló áramlás modellezésére irányult. A számítási tartomány meghatározásakor figyelembe vettük, hogy a kanyonban kialakuló áramlási rendszer legfőbb mozgatórugója az épületek felett uralkodó szélirány és szélesség, így a tartomány magasságát 100 m-nek tekintettük. Mivel célunk egy átlagos utcakanyon vizsgálata volt, így kiindulásként az épület magasságát és az utca szélességét azonosan 20 m-nek, míg az utca hosszát 100 m-nek vettük (3.1.1. ábra).



3.1.1. ábra

Vizsgált kanyon geometriája

3.2 Megfelelő rácsfelbontás kiválasztása

A modellek elkészítése során az egyik legfontosabb feladat a megfelelő rácsháló kiválasztása, ugyanis a térbeli felbontás nagyon fontos az eredmény megbízhatósága szempontjából. Az utcakanyonban történő szennyezőanyag-terjedés modellezése nem egyszerű feladat, mivel a bonyolult geometriájú épületek körül kialakuló áramlások komplexek, leválási tartományok, akár többszörös örvényrendszerek jöhetnek létre. Egyes tanulmányok szerint ahhoz, hogy az áramlás szétválása jól kirajzolódjon, az épületoldalak mentén legalább 10 rácspontra van szükség (*Tominaga et al., 2008*). Ezáltal annak érdekében, hogy pontos eredményt kapjunk a közlekedésből származó szennyezőanyagok diszperziójára, a megfelelő turbulencia modell megválasztásán túl fontos a jó számítási háló kiválasztása is (*Hefny and Ooka, 2009*).

Számításunk során téglatest alakú cellákat alkalmaztunk. Annak érdekében, hogy figyelembe vegyük a rácshálóból származó hibát, azonos geometria, kezdeti és peremfeltételek mellett 13 féle rácsfelbontással vizsgáltuk meg a szélesebbég alakulását különböző pontokban. Az összehasonlíthatóság érdekében minden esetben 5000 iterációs lépést hajtottunk végre. Annak ellenére, hogy a legpontosabb eredmények a legfinomabb felbontás használatával születnek, a számítási igény csökkentésének érdekében szükséges

volt csökkenteni a cellák számát. A horizontális felbontásnál figyelembe vettük, hogy az út szélességének és hosszának aránya 2:10, így x irányban érdemesebb volt finomabb felbontást alkalmazni, mint y irányban. Mivel a kanyonban összetettebb áramlások alakulnak ki, mint a magasban, illetve az egyik fő szempontunk a közlekedésből származó szennyezőanyag felhalmozódása és annak függőleges irányú átkeveredése volt, így vertikális irányban finomabb felbontást használtunk a tetőszint alatt, mint felette.

A modelltartományt minden irányban 100 m-nek vettük. Az épületeket a tartomány két oldalán helyeztük el, közöttük a kanyon térbeli kiterjedése $20 \times 100 \times 20$ m-es volt. A horizontális felbontásnál x-re finomabb, 0,5 – 2 m-es, y-ra durvább 1 – 5 m-es felbontást használtunk, míg a vertikális felbontásnál a kanyonban szintén 0,5 – 2 m, míg felette 1 – 2 m-es felbontást alkalmaztunk. Kiindulási állapotban 5 m/s-os, a kanyonra merőlegesen érkező szelet feltételeztünk. A különböző felbontásokkal kapott eredmények a 3.2.1. táblázatban láthatók a cellák számának függvényében.

3.2.1. táblázat

A vizsgált rácsok tulajdonságai – a szürkével kiemelt felbontást alkalmaztuk.

	<i>x irányú felbontás [m]</i>	<i>y irányú felbontás [m]</i>	<i>z irányú felbontás a kanyonban [m]</i>	<i>z irányú felbontás tetőszint felett [m]</i>	<i>Cellák száma</i>
1	2	5	2	2	42 000
2	1	5	2	2	84 000
3	2	2	2	2	105 000
4	2	2	1	2	110 000
5	2	2	0,5	2	120 000
6	0,5	5	2	2	168 000
7	2	2	1	1	210 000
8	1	2	1	2	220 000
9	1	2	0,5	2	240 000
10	1	2	1	1	420 000
11	1	1	1	1	840 000
12	1	1	0,5	1	880 000
referencia	0,5	1	0,5	1	1 760 000

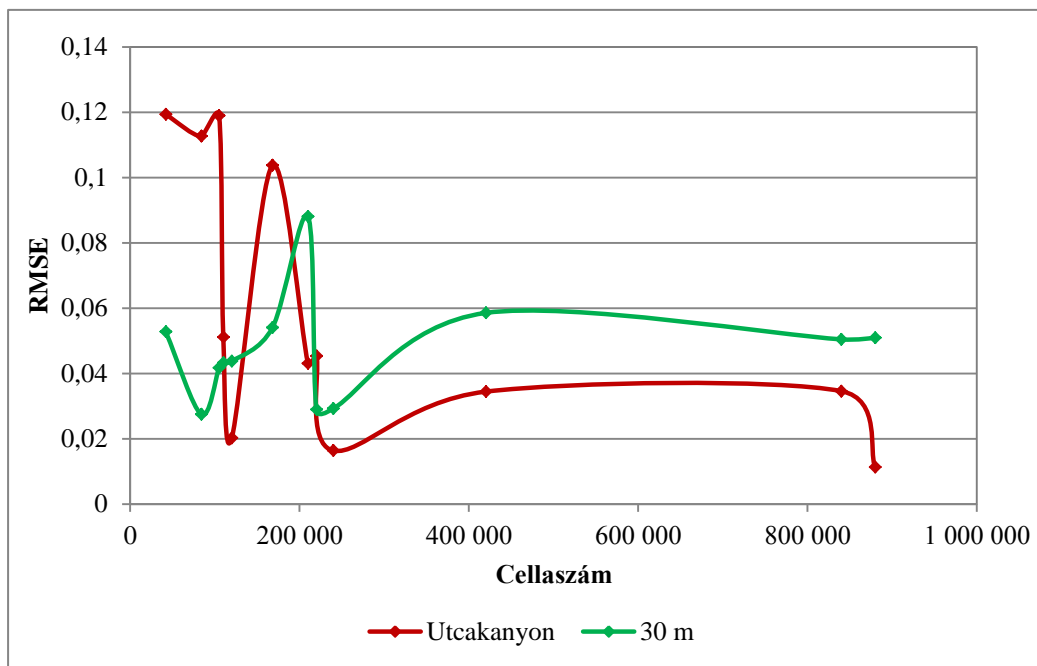
Az eltérő felbontásokból származó eredményeket megvizsgáltuk és összehasonlítottuk a referencia értékkel, melynek a legfinomabb felbontást választottuk. A vizsgálat során egy-egy ponthoz tartozó szélességet hasonlítottuk össze. Mivel a kanyonban és a

tetősínt felett jelentős különbségek állnak fenn a szél sebességében és irányában, így a pontosabb eredmények érdekében külön végeztük el a számításokat a kanyonra és külön a tetősínt feletti területre vonatkozóan. A kanyonban összesen 4 pontban, 2 és 18 m-es magasságban, míg a tetősínt felett 6 pontban, 30 m-es magasságban vizsgálódtunk (3.2.2. táblázat). Az egyes felbontások referenciától való eltérését a cellák számának függvényében a 3.2.1. ábrán szemléltetjük. Megfigyelhető, hogy az utcakanyonban a referenciától való eltérés alapvetően a vertikális felbontás függvénye, a legrosszabb eredmények 2 m-es függőleges felbontás esetén születtek, míg 30 m-es magasságban a horizontális, azon belül is az x irányú felbontás volt a meghatározó. Ez azzal magyarázható, hogy az út tengelyére merőlegesen érkező szél a magasban a horizontális, a kanyonban pedig a kialakuló örvény miatt főként függőleges irányú áramlást indukál, emiatt főleg ezekben az irányokban léphetnek fel jelentősebb eltérések különböző felbontások függvényében. Ezeket figyelembe véve a választott rácsháló összesen 220 000 cellából áll, x irányba 1 m, y irányba 2 m, vertikális irányban 20 m-ig 1 m-es, felette 2 m-es felbontást használtunk.

3.2.2. táblázat

Vizsgált pontok tulajdonságai.

	pont	x [m]	y [m]	z [m]
Utcakanyon	1	45	25	2
	2	55	25	2
	3	45	75	2
	4	55	75	2
	5	45	25	18
	6	55	25	18
	7	45	75	18
	8	55	75	18
Tetősínt felett	9	20	25	30
	10	50	25	30
	11	80	25	30
	12	20	75	30
	13	50	75	30
	14	80	75	30



3.2.1. ábra

A kiválasztott pontokban, az utcakanyonban és 30 m-es magasságban mért szélesség értékek átlagos négyzetes eltérése a referenciától.

3.3 Kezdeti és peremfeltételek meghatározása

A kezdeti feltételek meghatározása a stacionárius modellben nem befolyásolja jelentős mértékben az eredményt, csak a program futásának idejét. Ugyanakkor a peremfeltételek minél pontosabb megadása kulcsfontosságú a mikroskálájú folyamatok esetén, ugyanis ilyen kis térrészben alapvetően ez fogja meghatározni az áramlást és a különböző állapotváltozók értékeit. A paraméterek megválasztása nem minden esetben egyértelmű, ugyanis nehezen mérhetők, és erősen függenek a külső hatásoktól. A következőkben bemutatom az általam használt kezdeti és peremfeltételeket (3.3.1. táblázat).

Szélesség

A szélesség peremfeltételének megadásánál az épületek falainál, valamint az úttesten nulla szélességet feltételeztünk (*noSlip*). Azokon a felületeken, ahol a levegő beáramlik, logaritmikus szélprofil alkalmaztunk, melyet az *atmBoundaryLayerInletVelocity* peremfeltétellel vettünk figyelembe. Ehhez szükséges megadni néhány bemeneti paramétert, mint a szélesség és a magasság referenciaértékét,

a felszín érdességét, majd ezek segítségével megkapható a határrétegben jellemző sebességprofil a következő képlet alapján (*Hargreaves and Wright, 2007*):

$$u(z) = \frac{u_*}{0,41} \ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right). \quad (13)$$

Az u_* a súrlódási sebességet jelenti, melyet a modell maga számít ki a megadott referenciaértékek segítségével a (13) egyenlet alapján. A többi felületen szabadon kiáramolhat a levegő, így a Neumann-féle *zeroGradient* feltételt alkalmaztuk.

A felszín érdességét 0,3 m-nek tekintettük, ami városi környezetben egy általánosan használt érték (*Hansen F. V., 1993*), a szélmerés referencia magasságát 10 m-nek vettük, a szél sebességét pedig alapesetben 5 m/s-nak feltételeztük.

Nyomás

A nyomás meghatározásánál a beáramlási felület mentén Neumann-féle, míg a kiáramlási felületeknél Dirichlet-féle határfeltételt alkalmaztunk. A felszínen, valamint a tartomány tetején a hidrosztatikából származó nyomást vettük figyelembe.

Turbulencia

A turbulens kinetikus energiára és ennek disszipációjára hasonló peremfeltételeket alkalmaztunk. A kinetikus energiánál a rögzített falak, így az épületek és az úttest felületén falfüggvényt használtunk (*kqRWallFunction*). A beáramlási felület mentén fix értéket adunk meg, mely megegyezik a kezdeti feltételben megadott számmal. A többi felület mentén *zeroGradient* határfeltételt alkalmaztunk, ezáltal biztosítottuk a szabad kiáramlást. Ezzel megegyezően a kinetikus energia disszipációjánál is ezeket a feltételeket adtuk meg ε -ra vonatkoztatva, de a beérkező felület mentén a határrétegre vonatkozó *atmBoundaryLayerInletEpsilon* nevezetű peremfeltételt használtuk:

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{0,41(z+z_0)}, \quad (14)$$

ahol szintén szükséges volt megadni a szélesebségnél használt bemeneti paramétereket.

A turbulens kinetikus energia kezdeti értékének meghatározása fontos a kanyonban kialakuló áramlások szempontjából, azonban elég nehéz definiálni a pontos értékét, ugyanis jelentősen függ a külső környezeti hatásoktól, mint a napszaktól, vagy a légkör stabilitási viszonyaitól (*Murena et al., 2009*). Amennyiben a beáramló turbulencia intenzitását növeljük, akkor megnő a turbulens kinetikus energia és a turbulens diffúzió

értéke az utcában, továbbá intenzívebbé válik a kanyonban képződő örvény, melynek hatására a felszín közelében csökken a szennyezőanyag koncentrációja (*Kim and Baik, 2003*). Érdemesebb minél alacsonyabb értéket megadni a kiindulási állapotban annak érdekében, hogy ne ez határozza meg a kialakuló áramlást, így értékét $0,01 \text{ m}^2/\text{s}^2$ -nek vettük (*Zhang, 1996*).

A kinematikai viszkozitási tényező meghatározása utcakanyon szimuláció során nagyon fontos, ugyanis lamináris és turbulens áramlás esetén az éles felületek miatt eltérő eredmények születhetnek. Általánosan megfigyelhető, hogy a Reynolds szám növelésével nő a felszín közeli átkeveredés mértéke, ezen kívül jelentősen módosulhat az áramlás képe is. Figyelembe véve, hogy a valóságban inkább turbulens az áramlás, a kinematikai viszkozitási tényezőt $0,00001 \text{ m}^2/\text{s}$ -nak vettük.

Szennyezőanyag

Mivel célunk a közlekedésből származó szennyezőanyagok terjedésének vizsgálata volt, így az utca közepén, az úttal párhuzamos vonalforrást helyeztünk el. A kanyon szélességének függvényében módosítottuk a vonalforrások mennyiségét, és az emisszió mértékét. A háttér-koncentrációt nullának feltételeztük, a határfelületek mentén szabad kiáramlást, az épületfalak és az út mentén pedig falfüggvényeket alkalmaztunk.

A turbulens diffúziós együttható megválasztása a szennyezőanyagok átkeveredésének mértékét határozza meg, így a megfelelő érték kiválasztásához több esetet is megvizsgáltunk. Amikor $1 \text{ m}^2/\text{s}$ -nál magasabb értéket adtunk meg, az erősebb turbulencia hatására nagy területen jelentősen megnőtt a szennyezőanyag-koncentrációja, míg $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ alatt már túl gyenge volt az átkeveredés mértéke. A kapott eredmények alapján arra jutottunk, hogy utcakanyonban érdemes $0,1 - 1 \text{ m}^2/\text{s}$ közötti értékkel dolgozni.

Hőmérséklet

A légkör stabilitása szempontjából a hőmérséklet fontos szerepet játszik. Mivel jelen esetben csak a határrétegben, azon belül is csak az alsó 100 m-es rétegben vizsgálódunk, ahol a térrész alja és teteje közötti hőmérsékletkülönbség száraz adiabatikus profilt feltételezve körülbelül csak 1°C lenne, így jó közelítéssel izoterm a légkör. Az épületek falain és az úton Dirichlet-féle határfeltételt alkalmazva rögzített értéket adtunk meg, míg a többi felület mentén a *zeroGradient* peremfeltételt használtunk.

A levegő, az épületek, valamint az úttest hőmérséklete is képes módosítani az áramlást. Amennyiben megnöveljük a felszíni hőmérsékletet, a termikus turbulencia

hatására intenzívebb lesz a feláramlás mértéke. A szimulációk során izoterm légkört feltételeztünk, az épületek és az úttest felületét is 15 °C-osnak tekintettük.

3.3.1 táblázat

Az alkalmazott paraméterek kezdeti értékei

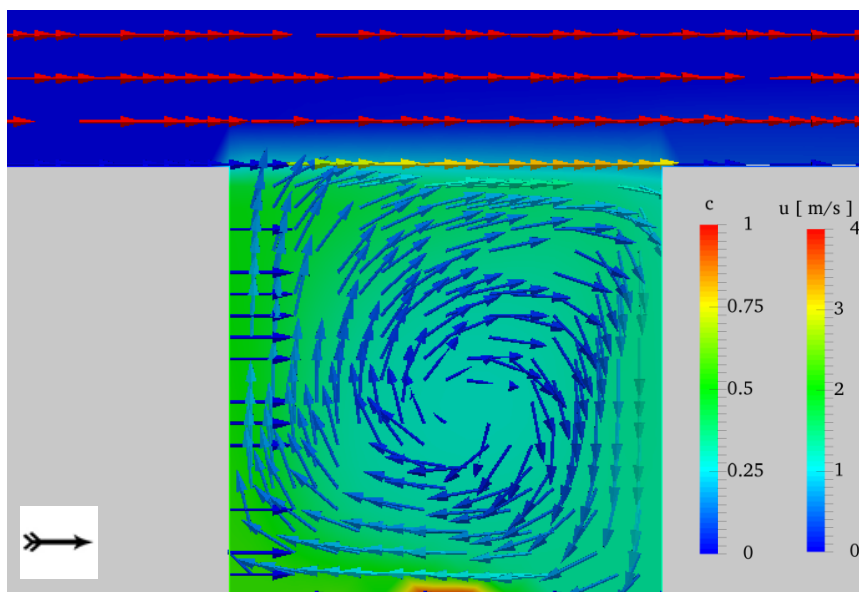
Név [mértékegység]	Érték
szélsebesség [m/s]	5
szélmérés magassága [m]	15
felszín érdessége [m]	0,3
kinematikai viszkozitás [m ² /s]	0,00001
turbulens diffúziós együttható [m ² /s]	0,1
turbulens kinetikus energia kezdeti értéke [m ² /s ²]	0,01
turbulens kinetikus energia disszipációjának kezdeti értéke [m ² /s ³]	0,01
referenciahőmérséklet [K]	288,15
térfogati hőtágulási együttható [1/K]	0,003
turbulens Prandtl szám	0,85

4. Utcakanyon szimuláció

4.1 Alapeset különböző szélirányok esetén

Az épületekkel határolt útszakasz mentén kialakuló szennyezőanyag felhalmozódása alapvetően függ a turbulens diffúziótól, valamint a tetőszint felett uralkodó széliránytól és szélesebségtől. Ennek köszönhetően fontosnak tartottuk megvizsgálni, hogy milyen áramlások jöhetnek létre akkor, ha az út tengelyére 0, 45 és 90°-os szögben érkezik az 5 m/s-os sebességű szél. Ehhez egy 20 m magas épületekkel határolt, 20 m széles és 100 m hosszú utcakanyont vettünk alapul, ahol a közlekedésből származó szennyezőanyag jellemzésére négy folytonos kibocsátású vonalforrást (2*2 sáv) helyeztünk el az utca közepén, melyből a forgalomnak megfelelően a külső két forrásnak fele annyi a kibocsátása, mint a belső kettőnek.

Amennyiben az áramlás az utca tengelyére merőlegesen érkezik, a nyomás a lee oldali épület felső sarkánál csökken, a szél felőli oldalon lévő épület sarkánál nő, a kanyonban pedig jó közelítéssel állandó marad. Ilyenkor a tetőszint fölött kialakuló áramlásnak csak kis része keveredik le utcaszintre, a kanyonban pedig egy állandó, a tetőszinti széliránnyal ellentétes irányú cirkuláció jön létre, így a szél felőli oldalon leáramlás, a szél alatti oldalon pedig feláramlás lesz jellemző (4.1.1. ábra). A kialakuló örvényben fellépő sebesség jóval kisebb az alapáramlás sebességénél, viszont ahhoz elég, hogy a szennyezőanyag felhalmozódását alapvetően meghatározza a kanyonban. A szél felőli oldalon a leáramlásnak köszönhetően nagyobb lesz az hígulás mértéke, míg a lee oldalon lévő feláramlás már nem elég intenzív ahhoz, hogy elszállítsa a szennyezőanyagokat a járdaszintről, így ott nagyobb koncentráció lesz jellemző.

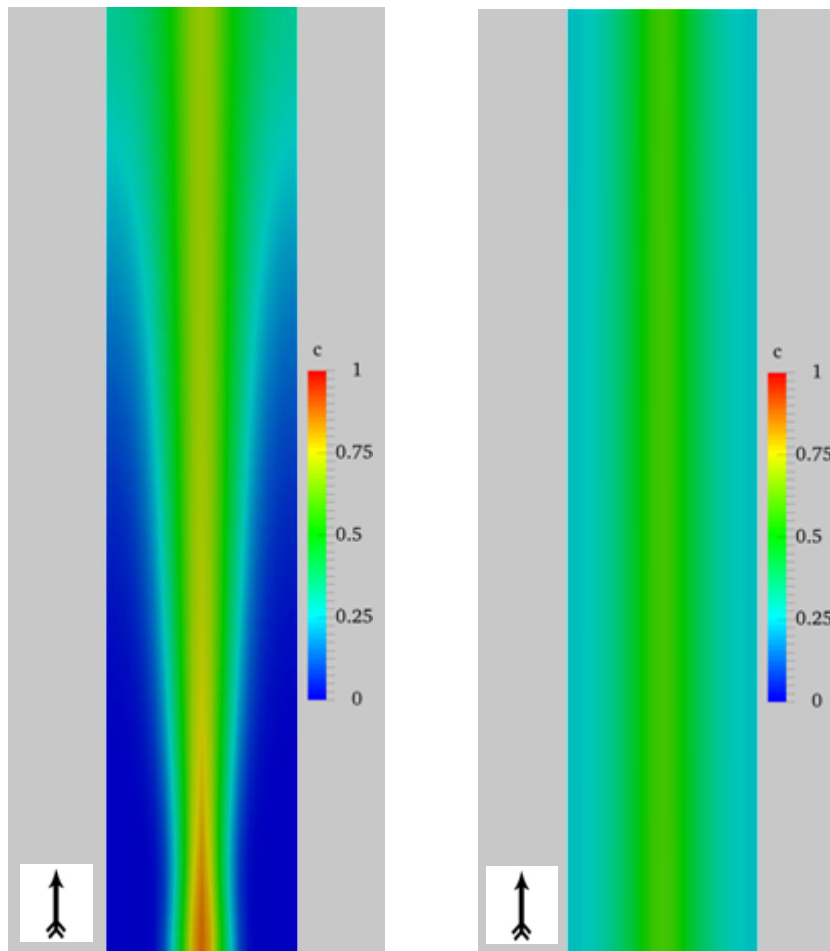


4.1.1. ábra

Az út tengelyére 90°-os szögben érkező 5 m/s-os szél esetén a 20 × 20 m-es kanyonban fellépő szélsébség, szélirány, valamint a vonalforrásokból származó szennyezőanyag-koncentráció (relatív skála) eloszlása.

Amikor a szél párhuzamosan fúj az utca tengelyével, továbbra is igaz lesz, hogy a kanyonban alacsonyabb szélsébség mérhető, mint a tetőszint felett, azonban ebben az esetben nem alakul ki az utcával párhuzamos tengelyű örvény, helyette létrejön az utcacsatorna hatás. Ilyenkor az épületek tetejénél, leginkább annak sarkai mentén nyomáscsökkenés figyelhető meg, míg a kanyonban továbbra is közel állandó marad a nyomás. Amennyiben lamináris áramlást feltételezünk, ahol a kinematikai viszkozitási tényező értéke magas, megközelítően egyenlő 1 m²/s-al, turbulencia hiányában kicsi lesz az oldalirányú átkeveredés, így a legmagasabb koncentráció a kanyon közepén figyelhető meg a vonalforrások közvetlen közelében. Ekkor az alapáramlás magával szállítja a közlekedésből származó szennyezőanyagot, ami ennek következtében az út tengelye mentén fokozatosan felhalmozódik, ezáltal a legnagyobb koncentráció a vizsgált útszakasz végén mérhető (4.1.2.a ábra). Az is megfigyelhető, hogy az utca hossza mentén egyre jobban csökken a felszín közelében a szélsébség, ennek köszönhetően a szennyezőanyag az út keresztmetszetén egyre jobban szétterjed, így annak mind két oldalán megnő a koncentráció. Ugyanakkor, ha a kinematikai viszkozitási tényezőt 10⁻⁵-es nagyságrendűnek tekintjük, továbbra is megfigyelhető, hogy a forrás közelében a legmagasabb a koncentráció, azonban oldalirányban is megnő, ugyanis a turbulens

átkeveredés révén már a kanyon elején is sokkal homogénebb mezőt kapunk, mint az előző esetben (4.1.2.b ábra).

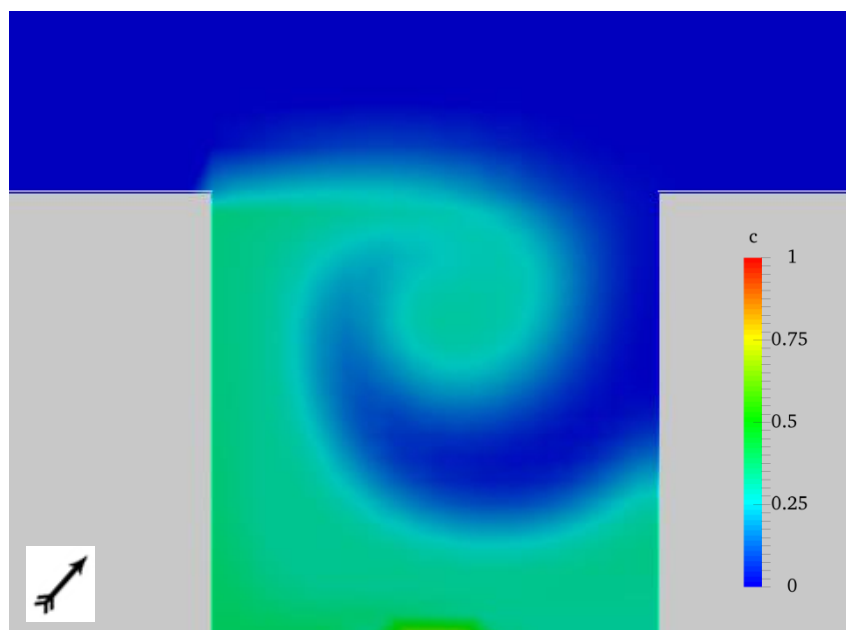


4.1.2 ábra

Az út tengelyére 0° -os szögben érkező 5 m/s -os szél esetén a $20 \times 20 \text{ m}$ -es kanyonban fellépő vonalforrásokból származó szennyezőanyag-koncentráció (relatív skála) eloszlásának 2 m -es magasságon vett x - y irányú metszete, amennyiben a kinematikai viszkozitási tényező a) 1 vagy b) $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Ha a szél az utca tengelyével 45° -os szöget zár be, akkor a kanyonban kialakuló áramlás az utcaörvény és utcacsatorna állapotoknak a kombinációja lesz. Ebben az esetben a nyomási mezőben a legnagyobb emelkedés a szél felőli oldal mentén lévő éles sarkok mentén figyelhető meg, míg a lee oldal menti sarkoknál továbbra is nyomáscsökkenés lesz a jellemző. Amikor alacsony turbulenciát feltételezünk, a 0° -s szögben érkező szélhez hasonlóan az úttal közel párhuzamos irányú áramlás alakul ki, viszont a szél a szennyezőanyagot inkább a lee oldal irányába szállítja, így az főleg ott fog akumulálódni.

Ezen kívül a kanyonban kialakuló áramlás a szennyezőanyagok egy részét tovább szállítja az út hossza mentén, így összességében a legmagasabb koncentráció az utca végén és a kanyon szél alatti oldalán figyelhető meg. Megnövelve a Reynolds számot a koncentráció felhalmozódása a felszín közelében hasonlóan alakul, de az erősen turbulens közegben az előzőtől teljesen eltérő áramlás alakul ki, ugyanis ilyenkor létrejön egy az út tengelyével közel párhuzamos örvény (4.1.3. ábra). Ez a szél felőli oldalra érkező szél hatására képződik az épület felső sarkánál, majd a kanyon hossza mentén fokozatosan nő a kiterjedése, így egyre alacsonyabb szinteken is módosítja az áramlást. Ennek hatására inkább a szél alatti oldalon akumulálódik a szennyezőanyag, viszont figyelembe kell venni, hogy a szél iránya miatt az áramlás a szennyezőanyagok egy részét tovább szállítja az út hossza mentén. Ilyenkor az örvény hatására a magasba is felkeveredik a szennyezőanyag, így az áramlási kép erős turbulencia esetén jobban hasonlít a kanyonra merőlegesen érkező szélhez.



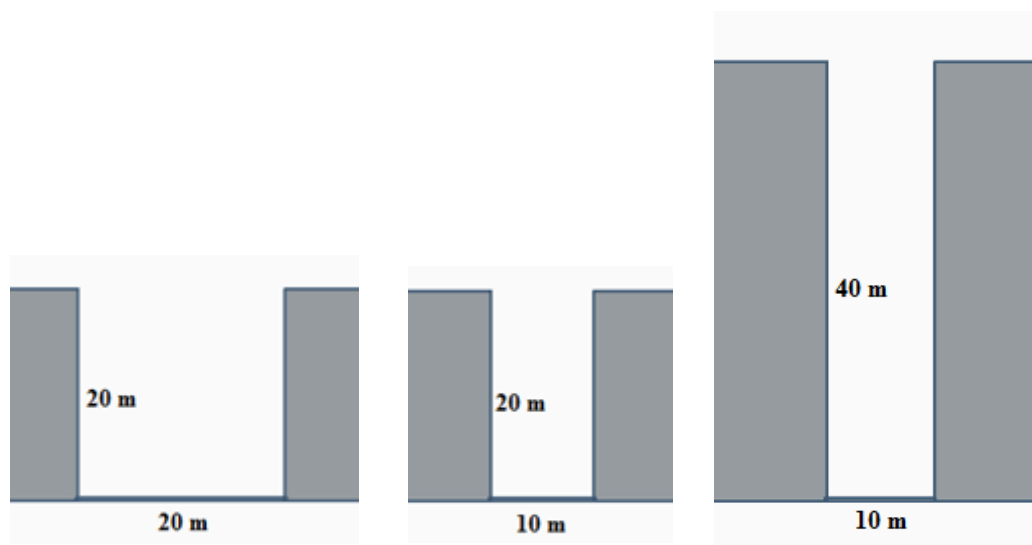
4.1.3. ábra

Az út tengelyére 45°-os szögben érkező 5 m/s-os szél esetén a 20 × 20 m-es kanyonban, annak közepén fellépő vonalforrásokból származó szennyezőanyag-koncentráció eloszlása.

4.2 Épületek magasságának áramlasmódosító hatása

Az utcakanyonban kialakuló áramlást jelentős mértékben befolyásolja a kanyon geometriája. Az előzőekben az épületek magasságát és az utca szélességét azonos

nagyságúnak tekintettük, de megvizsgáltuk a szennyezőanyag felhalmozódását különböző magasságú épületek esetén is. A 20×20 m-es utcakanyonon kívül 10×20 és 10×40 m-es kanyonokra is elvégeztük a számításokat mind a három szélirány esetén (4.2.1. ábra). A 100 m hosszú út közepén, a kanyon teljes keresztmetszetén vizsgáltuk különböző magasságokban a szennyezőanyag-koncentrációját. A kisebb keresztmetszetű utaknál a valóságnak megfelelően a négy helyett csak egy folytonos kibocsátású vonalforrást helyeztünk el. Az így kapott eredmények azt mutatták, hogy a szennyezőanyagok akkumulációjában minden esetben fellép különbség, de minél jobban növeljük az épületek magasságát, annál kisebb eltérés jelentkezik a két oldal között.

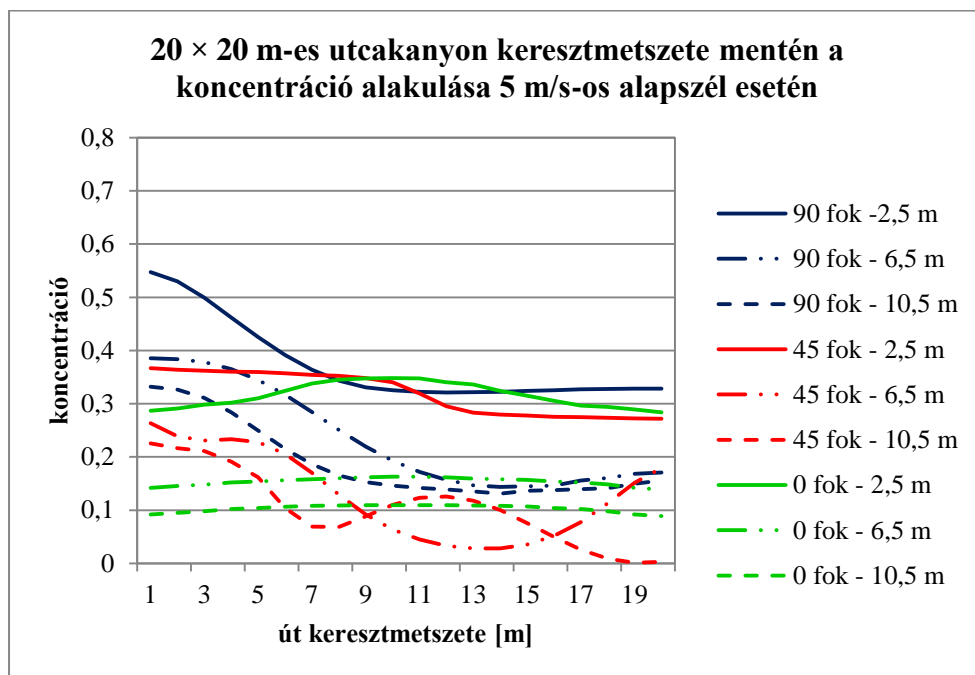


4.2.1. ábra

Az általunk modellezett különböző geometriájú utcakanyonok

Szabályos kanyon esetében figyelhetők meg a legalacsonyabb koncentrációk, ugyanis ekkor lesz a legintenzívebb az átkeveredés (4.2.2. ábra). Merőlegesen érkező szél hatására kialakuló örvény következtében a lee oldalon halmozódik fel leginkább a szennyezőanyag a kanyon teljes magasságában, legnagyobb mértékben a felszín közelében. A magassággal csökken a koncentráció mennyisége, illetve a két oldal között fellépő különbség is, egyrészt mert a felszíntől távolodva egyre jobban távolodunk a forrástól, másrészt a szél felőli oldalon kialakult leáramlásnak köszönhetően a magasból visszakeveredik a szennyezőanyag. Ezzel szemben, ha az úttal párhuzamosan fúj a szél, akkor minden vizsgált magasságban az út tengelyére közel szimmetrikus görbét kaptunk, ahol a magassággal egyre homogénebbé váló mező következtében a felszíntől távolodva az adott keresztmetszeten vett koncentráció közel állandó. 45° -os szögben érkező szélnél

talajszinten a szél hatására a lee oldalon kicsit intenzívebb az akkumuláció, azonban ilyenkor a kanyon felső részében – hasonlóan a merőlegesen érkező áramláshoz – visszakeveredik a szennyezőanyag. Ebben az esetben az örvény középpontja a kanyon közepétől feljebb húzódik, így a szél alatti oldalon kialakuló visszaáramlás nem éri el a felszínt. Ennek következtében 6,5 m-es magasságban a kanyon közepén, míg 10,5 m-en már két helyen figyelhető meg jelentősebb koncentráció csökkenés.

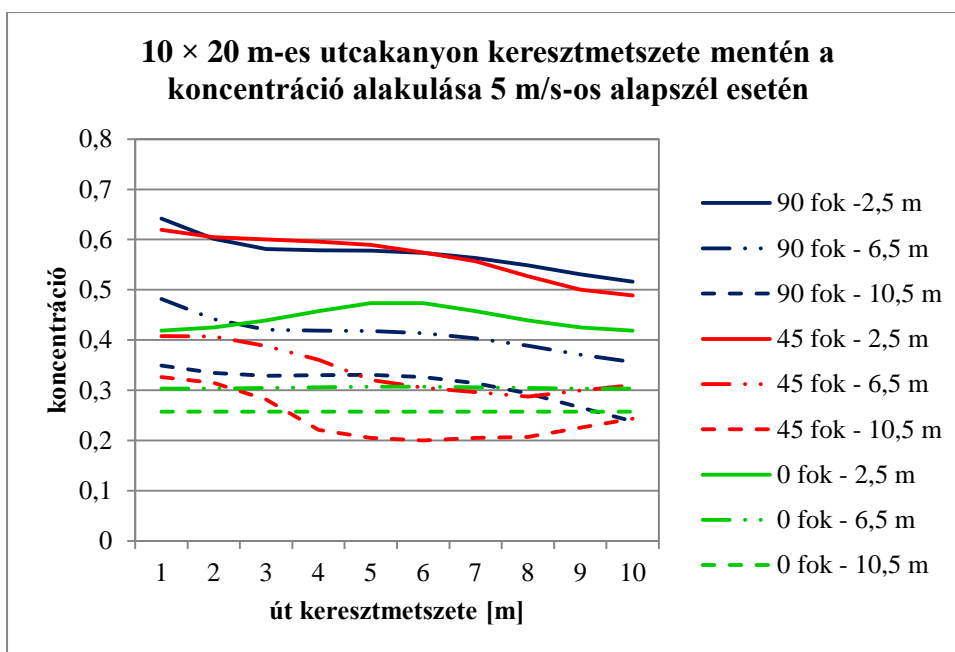


4.2.2. ábra

20 × 20 m-es utcakanyon keresztmetszetén, 2,5, 6,5 és 10,5 m-es magasságban vett koncentráció (relatív skála), az út tengelyére 0, 45 és 90°-os szögben érkező 5 m/s-os sebességű szél esetén.

Az út szélességét csökkentve alapvetően megnő a szennyezőanyagok koncentrációja, ugyanis csökken az áramlás intenzitása (4.2.3. ábra). Amikor az út tengelyére 90°-os szögben érkezik a szél, és a kanyon magassága kétszer akkora, mint a szélessége, a talajhoz közeledve fokozatosan gyengülő szélesebbég hatására a felszín közelében csökken az átkeveredés mértéke. A szennyezőanyag nagy része lent ragad az alsó rétegben, így bár továbbra is a szél alatti oldalon lesz magasabb a koncentráció, kisebb lesz a különbség a két oldal között. Az út tengelyével párhuzamosan fújó szélnél a szabályos kanyonhoz hasonlóan alakul a felhalmozódás, azzal a különbséggel, hogy itt magasabb lesz a szennyezőanyag koncentrációja, mivel az a szűkebb keresztmetszet miatt kevésbé

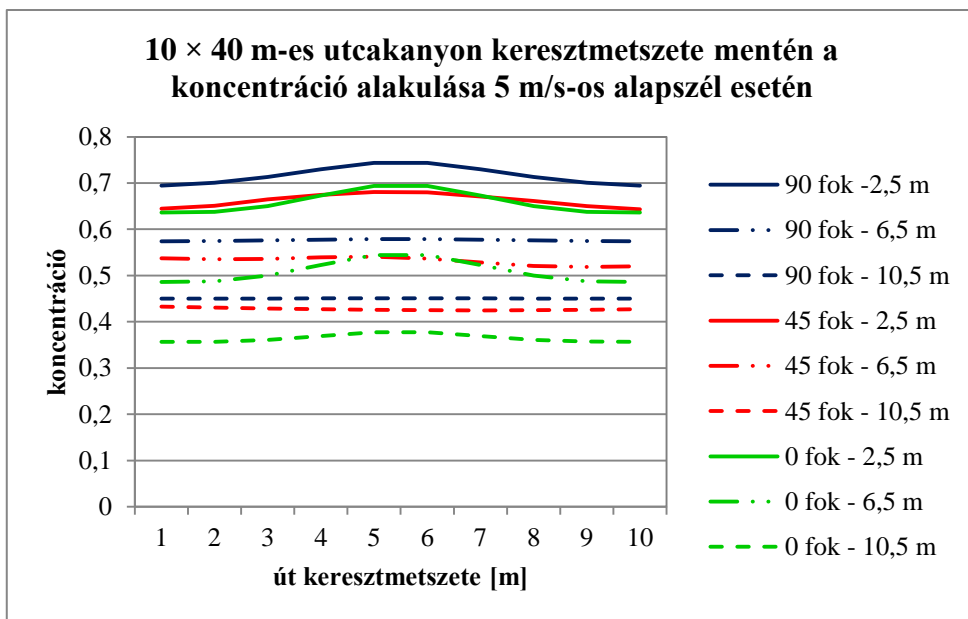
tud oldalirányban szétterjedni. A kanyon tengelyével 45°-os szöget bezáró szélnél az előbbi esethez képest homogénebb mezőt kaptunk, mivel az örvény még kevésbé képes kifejteni hatását a kanyon alsó felére, de továbbra is a szél alatti oldalon mérhető magasabb koncentráció.



4.2.3. ábra

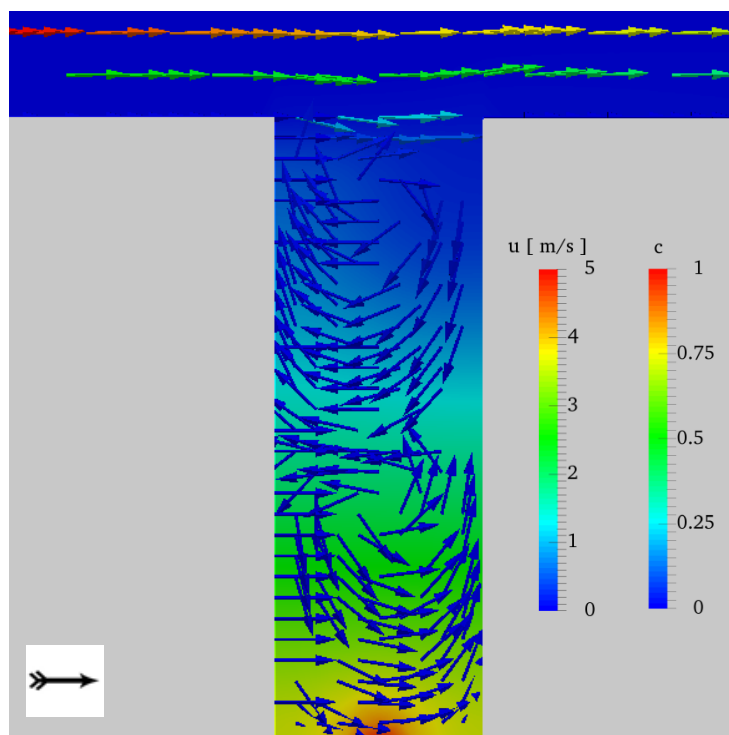
10 × 20 m-es utcakanyon keresztmetszetén, 2,5, 6,5 és 10,5 m-es magasságban vett koncentráció (relatív skála), az út tengelyére 0, 45 és 90°-os szögben érkező 5 m/s-os sebességű szél esetén.

Amennyiben tovább növeljük az épületek magasságát, a szűkebb és magasabb épületekkel határolt kanyonban a gyengébb átkeverő hatás miatt rosszabb lesz a levegő minősége (4.2.4. ábra). Bizonyos épületmagasságot elérve az út tengelyére merőlegesen érkező szél hatására kialakulhat egy másodlagos, az előzővel ellenétes irányú örvény a kanyon alsó részében, így a 10 × 40 m-es, sőt már a 10 × 30 m-es utcakanyon esetében is megfigyelhető ez a másodlagos örvény (4.2.5. ábra). A kanyon alján elhelyezkedő örvényben fellépő szélesebbég túl gyenge ahhoz, hogy nagymértékben elszállítsa a szennyezőanyagot a szélfelőli oldalra, így a koncentráció eloszlását inkább a turbulens átkeveredés határozza meg, hatására a két oldalt hasonló lesz a felhalmozódás mértéke. A 0 és 45°-os szögben érkező szélnél szintén megnő a szennyezőanyagok mennyisége a kanyon alsó részében.



4.2.4. ábra

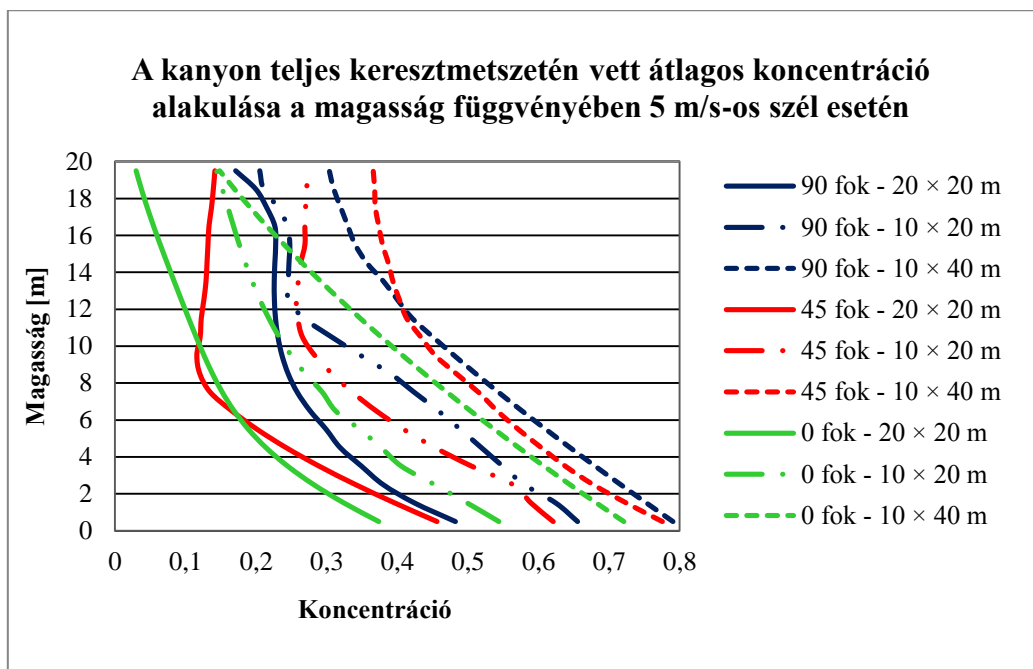
10 × 40 m-es utcakanyon keresztmetszetén, 2,5, 6,5 és 10,5 m-es magasságban vett koncentráció (relatív skála), az út tengelyére 0, 45 és 90°-os szögben érkező 5 m/s-os sebességű szél esetén.



4.2.5. ábra

10 × 30 m-es kanyon tengelyére 90°-os szögben érkező 5 m/s-os szél esetén a kanyonban fellépő szélesség, szélirány, valamint a vonalforrásokból származó szennyezőanyag-koncentráció (relatív skála) eloszlása.

Ezen kívül fontosnak tartottuk megvizsgálni a különböző geometriájú utcakanyonok teljes keresztmetszetén vett átlagos szennyezőanyag-koncentrációját az út tengelyére 0, 45 és 90°-os szögben érkező szélirány esetén (4.2.6. ábra). A magassággal a felszíni értékhez képest alapvetően minden esetben csökken a koncentráció, azonban ennek mértéke változó, bizonyos esetekben pedig a tetőszinthez közeledve ismételt emelkedik a szennyezőanyag mennyisége. Ez leginkább akkor fordul elő, amikor a kanyonban megjelenik az örvény, ugyanis ilyen esetben a lee oldalon feláramló szennyezőanyag átkeveredik a magasban a szél felőli oldalra, ezáltal megnő az adott keresztmetszethez tartozó átlagos koncentráció mennyisége. Megfigyelhető, hogy a legmagasabb átlagértékek merőlegesen érkező szél esetén fordulnak elő, mely annak köszönhető, hogy ilyenkor gyenge az úttal párhuzamos irányú szélkomponens, így a szennyezőanyag jobban megreked az épületek között. Ezen kívül látszódik, hogy minden esetben a legmélyebb, 10 × 40 m-es kanyon esetében a legrosszabb a levegő minősége az alsó 20 m-es tartományban, ugyanis az alapáramlás ilyenkor kevésbé hat ki a kanyon aljára.



4.2.6. ábra

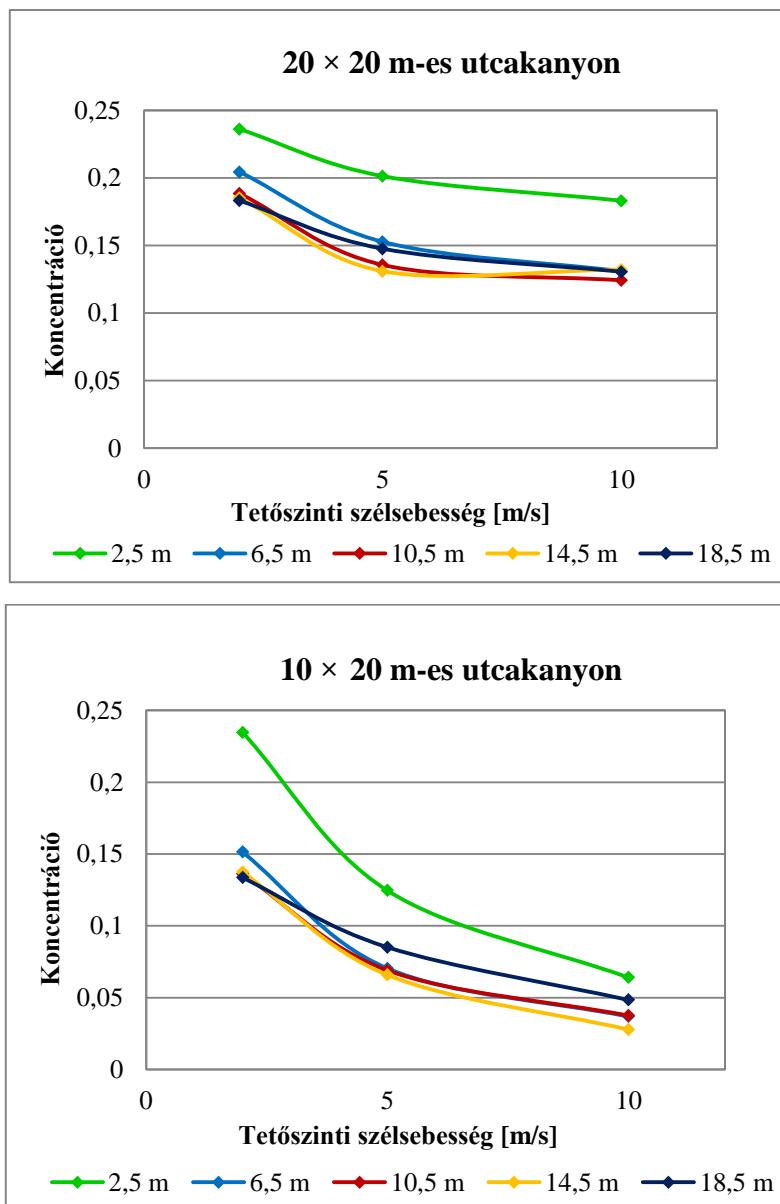
Az utcakanyon teljes keresztmetszetén vett átlagos szennyezőanyag-koncentráció (relatív skála), az út tengelyére 0, 45 és 90°-os szögben érkező 5 m/s-os sebességű szél, valamint 20 × 20, 10 × 20, illetve 10 × 40 m-es utcakanyon esetén.

4.3 A szél sebességének áramlásmódosító hatása

A szél irányának áramlásmódosító hatásán kívül azt is megvizsgáltuk, hogy különböző szélesebségek esetén hogyan alakul a felhalmozódás az utcakanyonban, azon belül is annak két oldala között. Így elemeztük a szél alatti és a szél felőli oldalon mért koncentrációk különbségét különböző magasságokban – amennyiben a kapott érték pozitív, a lee oldalon mérhető magasabb szennyezőanyag-koncentráció. Az adatokat mind a három utcakanyon esetében a 100 m hosszú út közepéről, az épületek falaitól 1,5 m-es távolságra vettük, továbbá 2, 5 és 10 m/s-os szélesebséget feltételeztünk. Mivel az előző fejezetben láttuk, hogy az út két oldala mentén 0°-os szélirány esetén a koncentráció közel azonos, és 45°-os szél esetében hasonló eredményeket kaptunk, mint 90° során, így csak az út tengelyére merőlegesen érkező szelet mutatjuk be.

Szabályos kanyonnál (4.3.1.a ábra), az út tengelyére merőlegesen érkező szél miatt kialakuló örvény hatására a lee oldalon minden szinten magasabb a koncentráció, szélesebségtől függetlenül a magassággal fokozatosan csökken a két oldal közti eltérés, csak erősebb szél esetén figyelhető meg kisebb növekedés. Ez annak köszönhető, hogy míg gyengébb szélnél a kialakuló örvény intenzitása kisebb, ezért a szél alatti oldal alsó szintjeiben halmozódik fel leginkább a szennyezőanyag, addig erősebb szél esetén az a szél felőli oldalra is folyamatosan átszállítódik, így 10 m/s-os szélesebségnél már kisebb lesz a koncentrációkülönbség.

Mély kanyonnál (4.3.1.b ábra) a gyengébb átkeverés miatt a két oldal között fellépő koncentrációkülönbség a legtöbb esetben kisebb, de hasonló jellegű a szabályos kanyonhoz képest. Az út tengelyére merőlegesen áramló levegő esetén a szűkebb keresztmetszet hatására a két oldal közötti eltérés majdnem minden esetben csökken a szélesebség növelésével, valamint a magassággal. Amennyiben tovább növeljük az épületek magasságát, a tetőszinti szél egyre kevésbé befolyásolja a kanyonban kialakuló áramlást 90°-os szélnél, így a gyenge átkeveredés miatt mind a három szélesebség esetében nagyon csekély a két oldal közötti eltérés.



4.3.1. ábra

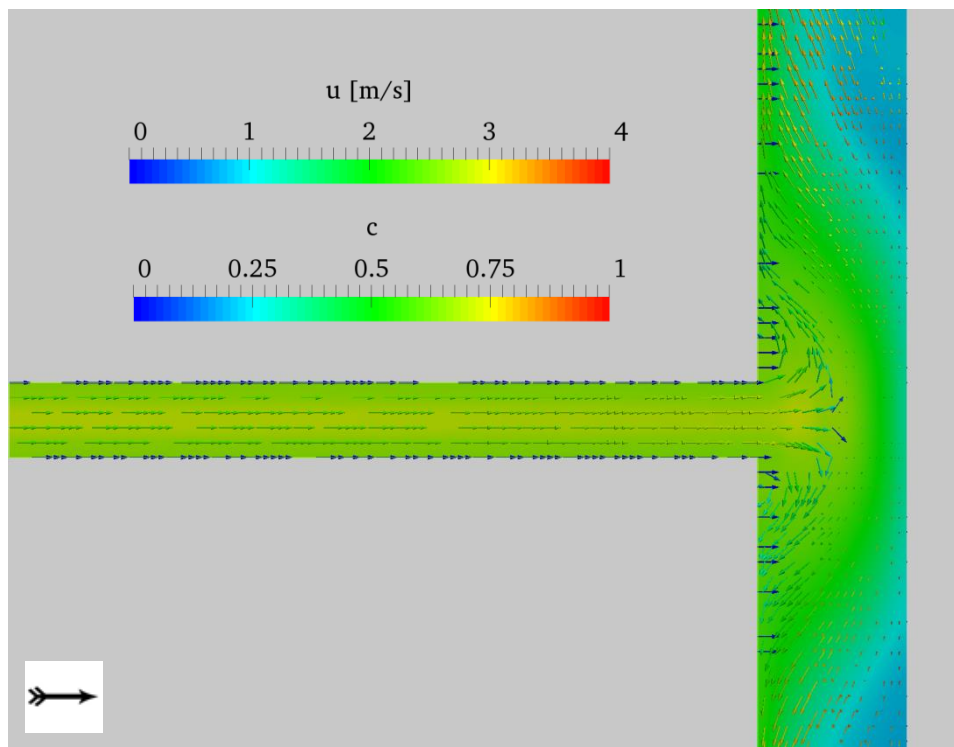
A a) 20 × 20 és b) 10 × 20 m-es utcakanyon tengelyére 90°-os szögben érkező 2, 5 és 10 m/s-os sebességű szél esetén 2,5, 6,5, 10,5, 14,5 és 18,5 m-es magasságban, a szél alatti és a szél felőli oldalon mért szennyezőanyag-koncentrációjának (relatív skála) különbsége.

4.4 Mellékutca hatása

A szélesebb utcakanyonokat gyakran keresztezik szűkebb mellékutcák, így fontosnak tartottuk megvizsgálni, hogy ilyen esetben hogyan módosul a szennyezőanyagok felhalmozódása különböző szélirányok esetén. Ehhez vettünk egy 20 × 20 m-es szabályos kanyont, valamint rá merőlegesen elhelyeztünk az útra nyíló 10 × 20 m-es mély

utcakanyont, melyek hosszát mind két esetben 100–100 m-nek tekintettük, így egy $160 \times 100 \times 100$ m-es területen végeztük el a modellezést, a korábban is alkalmazott rácsfelbontással, kezdeti és peremfeltételekkel. A fő utcában négy, a mellékutcában egy folytonos kibocsátású vonalforrást helyeztünk el, melyek közül a szélesebb kanyonban a két szélső csökkentett emissziójú.

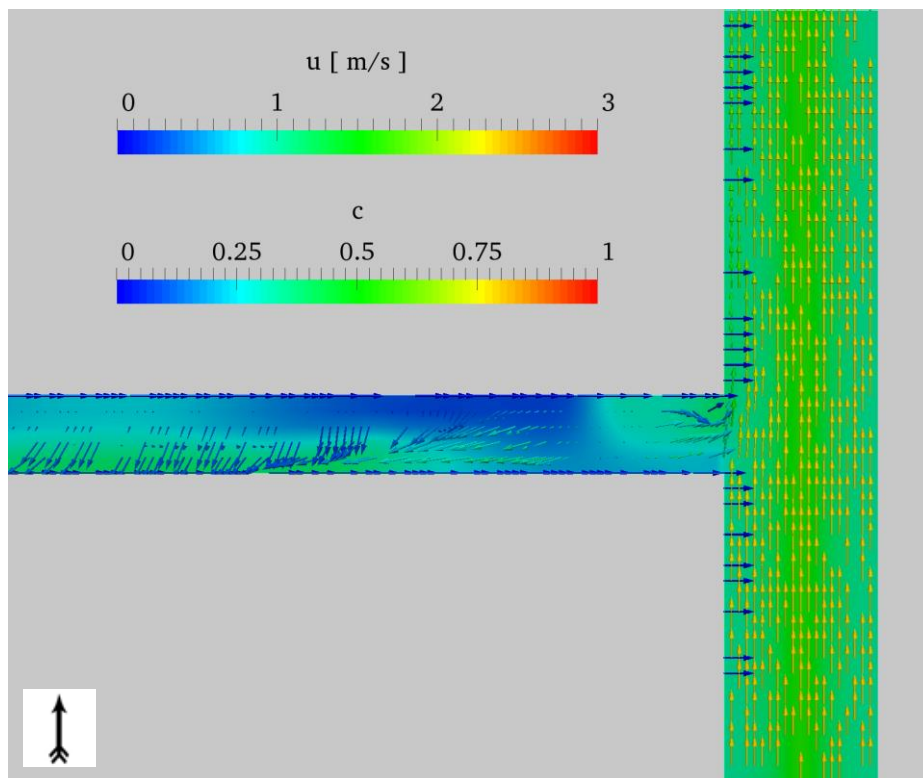
Amennyiben a szél a szabályos kanyonra merőlegesen érkezik, ott továbbra is kialakul az utcaörvény hatás, míg a mély kanyonban utcacsatorna hatás fog érvényesülni (4.4.1. ábra). Ilyenkor a szűkebb keresztmetszetű utcában erőteljesebb szél alakul ki, ami a szennyezőanyagot a főút irányába szállítja. A szabályos kanyonban az örvény hatására gyengébb lesz a szélesebbség, így a mellékutcáról a szennyezőanyag folyamatosan a főút felé sodródik, melynek következtében ott egyre jobban romlik a levegő minősége. A szabályos kanyon mellékutcától távolabbi pontjain inkább még az örvény hatására kialakuló feláramlás következtében a lee oldalon, míg a kereszteződéshez közeledve egyre szétterjedtebb sávban halmozódik fel a légszennyező anyag a kanyon teljes magasságában, ugyanis fokozatosan nő a mellékutcáról érkező áramlás szerepe.



4.4.1. ábra

90°-os szögben érkező 5 m/s-os szél esetén az épületek között fellépő szélesebbség, szélirány, valamint a vonalforrásokból származó szennyezőanyag-koncentráció (relatív skála) eloszlásának 2 m-es magasságon vett x-y irányú metszete.

A főút tengelyével párhuzamosan fújó szél esetén az előzővel ellentétes helyzet alakul ki, a szabályos kanyonban utcacsatorna, míg a mellékutcában alapvetően utcaörvény hatás jön létre. Ebben az esetben a főút mentén nagyjából konstans marad a koncentráció, a mellékutca emissziója nem növeli meg a szennyezőanyag mennyiségét, sőt átszellőzés révén a kereszteződés közelében inkább csökkenti azt, ugyanis a szabályos kanyonban kialakuló erősebb áramlás létrehoz egy kisebb, vertikális tengelyű örvényt a kereszteződésnél a mellékutcában. A szűkebb kanyonban kialakuló áramlást egyrészt a magasban lévő áramlás, másrészt a főútról befújó szél határozza meg. A tetőszint felett a rá merőlegesen érkező szél egy örvényt indukál, viszont ennek irányítottsága, ahogy az a 4.4.2. ábrán is látható, a főúttól kissé kifelé mutat, így elszállítódik a kibocsátott anyag egy része, ezáltal csökkenti a mellékutca szennyezettségét.

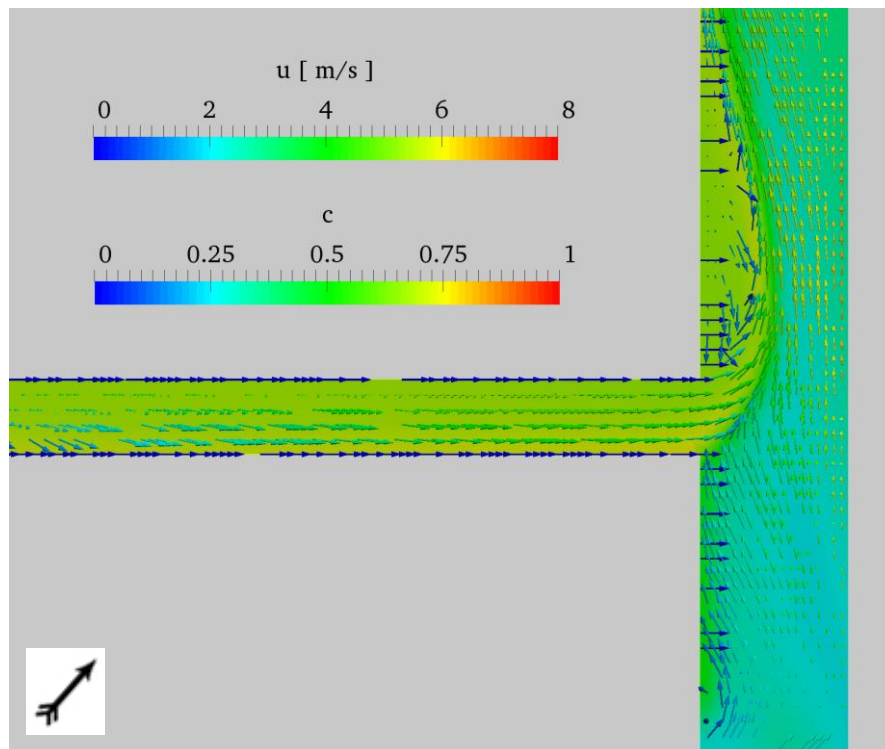


4.4.2. ábra

0°-os szögben érkező 5 m/s-os szél esetén az épületek között fellépő szélesebbég, szélirány, valamint a vonalforrásokból származó szennyezőanyag-koncentráció (relatív skála) eloszlásának 2m-es magasságon vett x-y irányú metszete.

A legvégén megvizsgáltuk, hogyan alakul a szennyezőanyagok felhalmozódása 45°-ban érkező szél hatására (4.4.3. ábra). Ekkor a mellékutcában kialakul az örvény, de ennek

intenzitása a főúthoz közeledve egyre jobban csökken, és az áramlás egyre inkább párhuzamossá válik az úttal. A szabályos kanyonban ehhez hasonlóan létrejön az örvény, de mivel az alapáramlás tartalmaz y irányú sebességkomponenst, így a mellékutca és a főút találkozásánál az áramlásnak megfelelő irányban létrejön egy konvergencia zóna, ahol erőteljes feláramlás indul meg a kanyon hossza mentén, melynek hatására a főúton összeszűkül az áramlás, így a szél felőli oldalon megnő a szélesebesség. Ezeket figyelembe véve elmondható, hogy a mellékutcából a szennyezőanyag egy része kiáramlik a főútra, ahol az ott kialakult áramlással találkozáva a szél irányának megfelelően elszállítódik és a lee oldalon felhalmozódik, ezáltal tovább rontja a levegő minőségét a szabályos kanyonban.



4.4.3. ábra

45°-os szögben érkező 5 m/s-os szél esetén az épületek között fellépő szélesebesség, szélirány, valamint a vonalforrásokból származó szennyezőanyag-koncentráció (relatív skála) eloszlásának 2 m-es magasságon vett x-y irányú metszete.

Összefoglalás

Diplomamunkám célja az utcakanyonban kialakuló áramlási viszonyok, és a közlekedésből származó szennyezőanyagok diszperziójának meghatározása volt. Ehhez a mérnöki gyakorlatban is használt áramlástani modellt, az OpenFOAM-ot alkalmaztuk, ahol a stacionárius, összenyomhatatlan, sűrűdésos és turbulens áramlásra vonatkozó hidrotermodinamikai egyenletrendszer a SIMPLE algoritmus segítségével oldottuk meg iterációs módszerrel. A turbulencia modellezésére a RANS $k-\epsilon$ modellt választottuk. A szennyezőanyag-terjedését az áramlási mezőt felhasználva a *scalarTransportFoam* modullal szimuláltuk.

A vizsgált tér egy $100 \times 100 \times 100$ m-es tartomány, ahol a kanyont alapesetben $20 \times 100 \times 20$ m-esnek feltételeztük. Számításunk során téglatest alakú cellákat használtunk, a hálógenerálást a *blockMesh* programmal hajtottuk végre. A közlekedésből származó szennyezőanyag figyelembevételéhez különböző emissziójú vonalforrásokat használtunk, melyeket az út közepén helyeztünk el. A megfelelő rácsfelbontás kiválasztásához azonos geometria, kezdeti és peremfeltételek mellett 13 féle rácsfelbontással megvizsgáltuk a szélesebbég alakulását különböző pontokban.

Legelőször ismertettem és ábrákkal illusztráltam egy szabályos utcakanyonban kialakuló áramlást, valamint a szennyezőanyag felhalmozódását különböző szélirányok esetén. Megfigyelhető, hogy a szél irányának módosítása jelentősen befolyásolja a koncentráció viselkedését a kanyonban. Az út tengelyére párhuzamosan érkező áramlás hatására a szennyezőanyag erős turbulencia esetén szétterjed az út teljes keresztmetszetén, valamint egy része a széllel elszállítódik. Az utcakanyonra 45° , vagy 90° -os szögben érkező szél esetén kialakul egy örvény, mely a szennyezőanyag-koncentrációt inkább a szél alatti oldalon növeli meg.

A felhalmozódás mértékét ezen kívül meghatározza még az épületek magassága és a kanyon szélessége, így háromféle kanyonméretre is elvégeztük a szimulációt. Összességében megfigyelhető, hogy minél keskenyebb az út és minél magasabbak az épületek, annál jelentősebb az akkumuláció mértéke a felszín közelében. A legrosszabb levegőminőség a legmagasabb épületekkel határolt kanyonnál figyelhető meg, amikor a szél 90° -ban érkezik.

A szél sebességének megváltozása szintén módosítja a koncentráció térbeli eloszlását. Amennyiben erősebben fúj a szél, intenzívebb lesz az átkeverő hatás, így talajszinten alapvetően csökken a szennyezőanyag-koncentráció, ezzel szemben gyengébb áramlás

esetén kevesebb tud elszállítódni. Minél magasabbak az épületek, annál kevésbé van hatással a tetőszinti szél a felszíni koncentráció alakulására.

Végezetül megvizsgáltuk, hogy a főútra merőlegesen elhelyezkedő mellékutca milyen hatást fejt ki a szélesebb út szennyezőanyag koncentrációjának felhalmozódásában. Eredményül azt kaptuk, hogy a szabályos kanyonnal 90 és 45°-os szöget bezáró szél esetén jelentősen romlik a főút mentén a levegő minősége, míg vele párhuzamosan fújó szél hatására nem figyelhető meg nagyobb változás.

Ezek alapján elmondható, hogy várostervezés során nélkülözhetetlen az épületek körül kialakuló áramlások figyelembevétele. Az utcakanyonban létrejövő ventilláció intenzitása nagymértékben függ az épületek elhelyezkedésétől és méretétől, az út szélességétől illetve a szél tulajdonságaitól, emiatt a jobb levegőminőség érdekében szükséges volna mindezek figyelembevétele.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom témavezetőimnek, Mészáros Róbertnek és Leelőssy Ádámnak a diplomamunkám megírása során nyújtott segítségért, hasznos tanácsaikért és támogatásukért.

Irodalomjegyzék

Ali-Toudert F., Mayer H., 2006: Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*, 41, 94–108.

Ayachit U., 2016: *The ParaView Guide, Community Edition*. Kitware Inc. 237p.

Balczó M., Gromke C., Ruck B., 2009: Numerical modeling of flow and pollutant dispersion in street canyons with tree planting. *Meteorologische Zeitschrift* 18, 197–206.

Balczó M., Lajos T., 2014: A városi terek szélviszonyai és légszennyezettsége. *Léggör*, 59, 121–126.

Balczó M., Tomor A., 2016: Wind tunnel and computational fluid dynamics study of wind conditions in an urban square. *Időjárás*, 120, 199–229.

Balogh M., 2013: Általános célú áramlástanai megoldók alkalmazása a mérnöki meteorológiában és a meteorológiai feladatok megoldásában, az OpenFoam szoftvercsomag. In: *Alkalmazott számszerű előrejelzés numerikus időjárás és csatolt modellek a gyakorlatban*. ELTE, Budapest, 135–153.

Balogh M., 2014: Numerical simulation of atmospheric flows using general purpose CFD solvers. Budapest University of Technology and Economics, Budapest. 103p.

Blocken B., Stathopoulos T., Carmeliet J., 2007: CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. *Atmospheric Environment* 41, 238–252.

Blocken B., Stathopoulos T., van Beeck J.P.A.J., 2016: Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment. *Building and Environment*, 100, 50–81.

Buccolieri R., Gromke C., Di Sabatino S., Ruck B., 2009: Aerodynamic effects of trees on pollutant concentration in street canyons. *Science of the Total Environment*, 407, 5247–5256.

Chen L., Yang X., Li G., Li X., Snape C., 2017: Prediction of bubble fluidisation during chemical looping combustion using CFD simulation. *Computers and Chemical Engineering*, 99, 82–95.

Dagnew A. K., Bitsuamalk G. T., Merrick R., 2009: Computational evaluation of wind pressures on tall buildings. 11th Americas Conference in WInd Engineering, San Juan, Puerto Rico, 17p.

Deckers X., Haga S., Tilley N., Merci B., 2013: Smoke control in case of fire in a large car park: CFD simulations of full-scale configurations. *Fire Safety Journal*, 57, 22–34.

Fallah-Shorshani M., Shekarizfard M., Hatzopoulou M., 2017: Integrating a street-canyon model with a regional Gaussian dispersion model for improved characterisation of near-road air pollution. *Atmospheric Environment*, 153, 21–31.

- Ferziger J. H., Peric M., 2002: Computational Methods for Fluid Dynamics. 431p.*
- Gallagher J., Gill L.W., McNabola A., 2011: Optimizing the use of on-street car parking system as a passive control of air pollution exposure in street canyons by large eddy simulation. Atmospheric Environment 45, 1684–1694.*
- Gousseau P., Blocken B., Stathopoulos T., van Heijst G.J.F., 2011: CFD simulation of near-field pollutant dispersion on a high-resolution grid: A case study by LES and RANS for a building group in downtown Montreal. Atmospheric Environment, 45, 428–438.*
- Greenshields C. J., 2016: OpenFOAM User Guide. 228p.*
- Gromke C., 2011: A vegetation modeling concept for Building and Environmental Aerodynamics wind tunnel tests and its application in pollutant dispersion studies. Environmental Pollution, 159, 2094–2099.*
- Gromke C., Buccolieri R., Di Sabatino S., Ruck B., 2008: Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations – Evaluation of CFD data with experimental data. Atmospheric Environment, 42, 8640–8650.*
- Gromke C., Ruck B., 2012: Pollutant Concentrations in Street Canyons of Different Aspect Ratio with Avenues of Trees for Various Wind Directions. Boundary-Layer Meteorol, 144, 41–64.*
- Guillas S., Glover N., Malki-Epshtein L., 2014: Bayesian calibration of the constants of the k- ϵ turbulence model for a CFD model of street canyon flow. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 279, 536–553.*
- Hang J., Li Y., Sandberg M., Buccolieri R., Di Sabatino S., 2012: The influence of building height variability on pollutant dispersion and pedestrian ventilation in idealized high-rise urban areas. Building and Environment, 56, 346–360.*
- Hansen F. V., 1993: Surface roughness lengths. Army Research Laboratory. 45p.*
- Hargreaves D.M., Wright N.G., 2007: On the use of the k- ϵ model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 95, 355–369.*
- He L., Hang J., Wang X., Lin B., Li X., Lan G., 2017: Numerical investigations of flow and passive pollutant exposure in high-rise deep street canyons with various street aspect ratios and viaduct settings. Science of the Total Environment 584–585, 189–206.*
- Hefny M. M., Ooka R., 2009: CFD analysis of pollutant dispersion around buildings: Effect of cell geometry. Building and Environment, 44, 1699–1706.*
- Huang Y., Hu X., Zeng N., 2009: Impact of wedge-shaped roofs on airflow and pollutant dispersion inside urban street canyons. Building and Environment, 44, 2335–2347.*

- Huang Y., Zeng N., Liu Z., Ye Song Y., Xu X., 2016: Wind tunnel simulation of pollutant dispersion inside street canyons with galleries and multi-level flat roofs. *Journal of Hydrodynamics*, 28, 801–810.
- Huber A., Freeman M., Spencer R., Tang W., Schwarz W., Bell B., Kuehlert K., 2006: Developments and Applications of CFD Simulations of Micrometeorology and Pollution Transport in Support of Air Quality Modeling. *The Fourth International Symposium on Computational Wind Engineering*, Yokohama, 821–824.
- Hunter L. J., Johnson G. T., Watson I. D., 1992: An investigation of three-dimensional characteristics of flow regimes within the urban canyon. *Atmospheric Environment* 26B, 425–432.
- Janhall S., 2015: Review on urban vegetation and particle air pollution e Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment*, 105, 130–137.
- Jasak H., 2009: OpenFOAM: Open source CFD in research and industry. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 1, 89–94.
- Kastner-Klein P., Berkowicz R., Plate E. J., 2000: Modelling of Vehicle Induced Turbulence in Air Pollution Studies for Streets. *International Journal of Environment and Pollution*, 14, 496–507.
- Kim J.-J., Baik J.-J., 2003: Effects of inflow turbulence intensity on flow an pollutant dispersion in an urban street canyon. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91, 309–329.
- Kristóf G., Rácz N., Balogh M., 2009: Adaptation of Pressure Based CFD Solvers for Mesoscale Atmospheric Problems. *Boundary-Layer Meteorol*, 131, 85–103.
- Kuo Y. J., Romero D. A., Christopher Beck J. C., Amon C. H., 2016: Wind farm layout optimization on complex terrains – Integrating a CFD wake model with mixed-integer programming. *Applied Energy*, 178, 404–414.
- Lagzi I., Mészáros R., Gelybó Gy., Leelőssy Á., 2013: *Atmospheric chemistry*. Eötvös Loránd University, Budapest. 201 p.
- Lajos, T., 2008: *Az áramlástan alapjai*. Műegyetemi Kiadó, Budapest. 662p.
- Launder B. E., Spalding D., B., 1974: The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3, 269–289.
- Leelőssy Á., 2012: *Baleseti kibocsátásból származó szennyezőanyagok lokális skálájú terjedésének modellezése*. Diplomamunka, ELTE, Budapest. 56p.
- Liu C. H., Barth M. C., Leung D.Y.C., 2004: Large-eddy simulation of flow and pollutant transport in street canyons of different building height-height-ro-street-width ratios, *Journal of Applied Meteorology*, 43, 1410–1424.

- Luo Z., Li Y., 2011: Passive urban ventilation by combined buoyancy-driven slope flow and wall flow: Parametric CFD studies on idealized city models. *Atmospheric Environment*, 45, 5946–5956.
- Mensink C., Cosemans G., 2008: From traffic flow simulations to pollutant concentrations in street canyons and backyards. *Environmental Modelling & Software*, 23, 288–295.
- Murena F., Favale G., Vardoulakis S., Solazzo E., 2009: Modelling dispersion of traffic pollution in a deep street canyon: Application of CFD and operational models. *Atmospheric Environment*, 43, 2303–2311.
- Murena F., Mele B., 2016: Effect of balconies on air quality in deep street canyons. *Atmospheric Pollution Research*, 7, 1004–1012.
- Nazarian N., Kleissl J., 2016: Realistic solar heating in urban areas: Air exchange and street-canyon ventilation. *Building and Environment*, 95, 75–93.
- Ng W.-Y., Chau C.-K., 2014: A modeling investigation of the impact of street and building configurations on personal air pollutant exposure in isolated deep urban canyons. *Science of the Total Environment*, 468–469, 429–448.
- Nicholson S. E., 1975: A pollution model for street-level air. *Atmospheric Environment* 9, 19–31.
- Noth E. M., Hammond S. K., Biging G. S., Tager I. B., 2011: A spatial-temporal regression model to predict daily outdoor residential PAH concentrations in an epidemiologic study in Fresno, CA. *Atmospheric Environment*, 45, 2394–2403.
- Ocokoljic G., Rašuo B., Kozic M., 2017: Supporting system interference on aerodynamic characteristics of an aircraft model in a low-speed wind tunnel. *Aerospace Science and Technology*, 64, 133–146.
- Oke T. R., 1988: *Street Design and Urban Canopy Layer Climate*. *Energy and Buildings*, 11, 103–113.
- Patankar S. V., 1980: *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. McGraw-Hill Book Company, New York, 197p.
- Patankar S. V., Spalding D. B., 1971: A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *Pergamon Press* 15, 1787–1806.
- Rácz N., Kristóf G., 2016: Implementation and validation of a bulk microphysical model of moisture transport in a pressure based CFD solver. *Időjárás*, 120, 231–254.
- Rácz N., Kristóf G., Weidinger T., 2013: Evaluation and validation of a CFD solver adapted to atmospheric flows: Simulation of topography-induced waves. *Időjárás*, 117, 239–275.
- Salmond J.A., Williams D.E., Laing G., Kingham S., Dirks K., Longley I., Henshaw G.S., 2013: The influence of vegetation on the horizontal and vertical distribution of pollutants in a street canyon. *Science of the Total Environment*, 443, 287–298.

- Sárkány J.*, 2016: A növényzet szerepe a városi levegőminőség alakításában. Szakdolgozat, ELTE, Budapest. 36p.
- Soulhac L., Salizzoni P., Cierco F.-X., Perkins R.*, 2011: The model SIRANE for atmospheric urban pollutant dispersion; part I, presentation of the model. *Atmospheric Environment*, 45, 7379–7395.
- Stabile L., Arpino F., Buonanno G., Russi A., Frattolillo A.*, 2015: A simplified benchmark of ultrafine particle dispersion in idealized urban street canyons: A wind tunnel study. *Building and Environment*, 93, 186–198.
- Tasnádi P., Bordás Á., Weidinger T.*, 2013: Klasszikus dinamikus meteorológiai feladatgyűjtemény II. A légköri turbulencia, VII. fejezet. Budapest, 120–133p.
- Tominaga Y., Blocken B.*, 2016: Wind tunnel analysis of flow and dispersion in cross-ventilated isolated buildings: Impact of opening positions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 155, 74–88.
- Tominaga Y., Mochida A., Yoshie R., Kataoka H., Nozu T., Yoshikawa M., Shirasawa T.*, 2008: AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 1749–1761.
- Tominaga Y., Stathopoulos T.*, 2013: CFD simulation of near-field pollutant dispersion in the urban environment: A review of current modeling techniques. *Atmospheric Environment* 79, 716–730.
- Tominaga Y., Stathopoulos T.*, 2016: Ten questions concerning modeling of near-field pollutant dispersion in the built environment. *Building and Environment*, 105, 390–402.
- Vachon G., Louka P., Rosant J.-M.*, 2002: Measurements of Traffic-Induced Turbulence within a Street Canyon during the Nantes'99 Experiment. *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, 2, 127–140.
- van Hooff T., Blocken B., Tominaga Y.*, 2017: On the accuracy of CFD simulations of cross-ventilation flows for a generic isolated building: Comparison of RANS, LES and experiments. *Building and Environment*, 114, 148–165.
- Vardoulakis S., Fisher B.E.A., Pericleous K., Gonzalez-Fleescac N.*, 2003: Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment* 37, 155–182.
- Vos P., Maiheu B., Vankerkom J., Janssen S.*, 2013: Improving local air quality in cities: To tree or not to tree? *Environmental Pollution* 183, 113–122.
- Vranckx S., Vos P.*, 2013 : Final report, OpenFOAM CFD simulation of pollutant dispersion in street canyons: Validation and annual impact of trees. *Atmosys*, 31p.

- Vranckx S., Vos P., Maiheu B., Janssen S., 2015: Impact of trees on pollutant dispersion in street canyons: A numerical study of the annual average effects in Antwerp, Belgium. Science of the Total Environment, 532, 474–483.*
- Walton A., Cheng A.Y.S., 2002: Large-eddy simulation of pollution dispersion in an urban street canyon - Part II: idealised canyon simulation. Atmospheric Environment 36, 3615–3627.*
- Wang X., Li Y., 2016: Predicting urban heat island circulation using CFD. Building and Environment, 99, 82–97.*
- Wen C.-Y., Juan Y.-H., Yang A.-S., 2017: Enhancement of city breathability with half open spaces in ideal urban street canyons. Building and Environment, 112, 322–336.*
- Xie X., Huang Z., Wang J., Xie Z., 2005: The impact of solar radiation and street layout on pollutant dispersion in street canyon. Building and Environment, 40, 201–212.*
- Yang F., Gao Y., Zhong K., Kang Y., 2016: Impacts of cross-ventilation on the air quality in street canyons with different building arrangements. Building and Environment, 104, 1–12.*
- Yassin F. M., 2011: Impact of height and shape of building roof on air quality in urban street canyons. Atmospheric Environment, 45, 5220–5229.*
- Yuan C., Ng E., Norford L. K., 2014: Improving air quality in high-density cities by understanding the relationship between air pollutant dispersion and urban morphologies. Building and Environment, 71, 245–258.*
- Zhang Y. Q., 1996: A comparison of numerical and physical modeling of stable atmospheric flow and dispersion around a cubical building. Atmospheric Environment, 30, 1327–1345.*