

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Meteorológiai Tanszék

Biológiai, vegyi, illetve nukleáris szennyezőanyag-terjedés

CFD szimulációjának módszertana



KÉSZÍTETTE: Oláh Péter

Témavezető: Dr. Lajos Tamás

BME Áramlástan Tanszék

Tanszéki konzulens: Dr. Weidinger Tamás

ELTE Meteorológiai Tanszék

Külső konzulens: Balogh Miklós

BME Áramlástan Tanszék

Budapest, 2009.

Tartalom

BEVEZETÉS	4
1. CÉLKITŰZÉSEK	6
2. AZ ALKALMAZOTT MÓDSZEREK BEMUTATÁSA	7
2.1 A CFD ELEMZÉS LÉPÉSEI	7
2.2 AZ ANSYS FLUENT CFD MEGOLDÓ	7
2.3 AZ FLUENT RENDSZER NUMERIKUS MÓDSZEREI	8
2.4 A FLUENT RENDSZER EGYENLETEINEK ÁLTALÁNOS ALAKJA	9
2.4.1 <i>Kontinuitási egyenlet</i>	10
2.4.2 <i>Az impulzus megmaradást leíró Navier-Stokes egyenlet</i>	10
2.4.3 <i>Energia-megmaradási egyenlet</i>	10
2.5 TURBULENCIA MODELLEZÉSE	11
2.5.1 <i>RANS és URANS</i>	11
2.5.2 <i>LES és DES</i>	12
2.5.3 <i>DNS</i>	12
2.5.4 <i>A FLUENT-ben lévő turbulencia modellek</i>	13
3. MÓDSZERTAN	15
3.1 ELŐFELDOLGOZÁS	15
3.1.1 <i>Geometriai modellezés</i>	15
3.1.2 <i>Kezdeti és peremfeltételek</i>	18
3.2 SZIMULÁCIÓ	19
3.2.1 <i>Légköri rétegződés modellezése</i>	19
3.2.2 <i>Geometriai modell módosítása növényállománnyal</i>	22
3.2.2.1 <i>Szélprofil meghatározása növényállomány belsejében és fölötté</i>	22
3.2.2.2 <i>Levélfelületi sűrűség (LAD) eloszlás modellezése</i>	24
3.4 MODELLEREDMÉNYEK	25
3.4.1 <i>Szélirány scénáriók</i>	25
3.4.2 <i>Szennyezőanyag-terjedés</i>	26

3.5 KIÉRTÉKELÉS	52
4. ÖSSZEFOGLALÁS	54
IRODALOMJEGYZÉK	56
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	59
MELLÉKLET	60

Bevezetés

A mérnöki gyakorlat számos területén alkalmazzák az áramlások numerikus szimulációját (Computational Fluid Dynamics), az épületgépészettől a járművek aerodinamikai tervezésén át, az olyan nehezen megközelíthető helyeken kialakuló áramlások leírására is, mint az erőművek kazánjának égéstere. Mindezek mellett egyre nagyobb szerepet kap a légköri áramlások modellezésében, szennyezőanyagok terjedési vizsgálatában, valamint városi hősziget jelenség szimulációja során. Az áramlástan problémák vizsgálatához két fő módszert alkalmazhatunk: szélcsatorna méréseket, illetve numerikus szimulációkat. A hagyományos, szélcsatorna mérésekkel szemben a CFD szimulációnak számos előnyös tulajdonságát kiemelhetjük. Míg a szélcsatorna méréseknél meg kell építeni a fizikai modellt, addig a CFD-nél elég a vizsgált test 3D-s virtuális modelljét megalkotni. Másik nagy előnye, hogy a szélcsatornás méréseknél csak azokban a pontokban jutunk információhoz, amelyekben a mérőműszereinket elhelyeztük, ezzel szemben a numerikus szimuláció során a tartomány tetszőleges pontjában, illetve síkjában megjeleníthetjük az eredményeket. A CFD modellezés harmadik fontos tulajdonsága, hogy a kivitelezhetőség nem függ a méretektől, tetszőlegesen bonyolult geometriájú problémákat modellezhetünk, akár egy turbinalapát felületét, akár egy erdős terület áramlásra gyakorolt hatását a valós méretek figyelembevételével.

Diplomamunkám elkészítése során az ANSYS FLUENT nevű CFD megoldót alkalmaztam mikroskálájú légköri szennyezőanyag terjedés modellezésére a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Áramlástan Tanszékén folyó kutatások keretein belül. A mindennapi meteorológiai gyakorlatban a módszer alkalmazása költséges, mert igen nagy számítógépes kapacitást igényel. Ezt figyelembe véve a módszer elsősorban katonai célokra, illetve baleseti forrásokból származó szennyezőanyagok transzportjának számítására alkalmas, mert viszonylag kis területre, de nagy felbontással futattuk a szimulációkat.

A dolgozat első fejezetében ismertetem az általunk kitűzött célokat, valamint kitérek a Magyar Honvédségnél jelenleg alkalmazott terjedés-számításokra.

A második fejezetben összefoglalom az alkalmazott CFD megoldó felépítését, ismertetem a hidrodinamikai és termodinamikai folyamatokat leíró differenciál-egyenleteket. Külön

kitérek a turbulencia modellezésére, mely fontos eleme az áramlástan feladatok megoldásának, főleg a terjedési számítások során.

A harmadik fejezetben első lépésként egy egyszerű, idealizált geometrián bemutatom az előfeldolgozás, a modellezés, valamint az utófeldolgozás folyamatát. A további szimulációk során ugyanezt a geometriát alkalmazva növényállománnyal egészítettük ki. Leírom a növényzet áramlást módosító hatását, figyelembe véve az ilyen állományok turbulenciára gyakorolt hatását.

Az utolsó fejezetben összefoglalom az elért eredményeket, a várható előnyöket, a további fejlesztési, és felhasználási területeket.

1. Célkitűzések

Az elmúlt évek kutatásainak köszönhetően, az eddig műszaki problémák megoldására használt ANSYS FLUENT numerikus áramlástan szoftverrel már mikro- és mezoskálájú légköri áramlásokat is modellezhetünk (*Kristóf et al., 2009; Blocken et al., 2007*), az atmoszférikus határrétegben lejátszódó turbulens folyamatokat is figyelembe véve (*Mellor és Yamada, 1974*). Ezt kihasználva, munkánk célja az volt, hogy a Magyar Honvédségnél jelenleg rendszerben álló terjedés-számításnál (*1. sz. melléklet*) pontosabb előrejelzést tehessünk lehetővé (*Kovács, 2008*). A jelenlegi eszköz egy diagnosztikus modell, melynek nagy előnye az alacsony számítási kapacitás, és az egyszerű használat. Hátránya a pontatlanság, pedig a csapatmozgások, illetve az evakuálási folyamat megtervezésénél a szennyezőanyag lehetséges terjedési irányának minél pontosabb ismerete szükséges az emberi életek és anyagi javak megóvásában, így adott esetben szükségtelenül nagy területeket kell kiüríteni. Az általunk használt módszer dinamikai alapú. A szennyezőanyag terjedését, a koncentráció időbeli változását az aktuális meteorológiai paraméterek ismeretében, a szennyezőanyag forrás jellemzőinek (intenzitás, típus, pozíció) megadásával számítjuk. Megfelelő számítógépes teljesítmény esetén a szimuláció lényegesen gyorsabb, mint a valós terjedés, így előrejelezhetőek a szennyezés következményei, amelyek létfontosságúak lehetnek a megfelelő intézkedések foganatosításához, a csapást közvetlenül kapott körzet, illetve a veszélyeztetett körzet meghatározásához. A módszer hátránya, hogy a nagy hardver- és szoftverigény miatt költséges, ezért is kerülhet előtérbe a katonai alkalmazás, mert ott megfelelő számítási kapacitás állhat rendelkezésre.

Munkánk célja az volt, hogy egy olyan módszert dolgozzunk ki mikroskálájú szennyezőanyag-terjedésre – kihasználva a CFD szimuláció előnyeit –, amely különböző felszínborítottság esetén, a szélirány gyakoriságok ismeretében real-time számítást, és előrejelzést tesz lehetővé. Ez az eljárás lehet az alapja egy olyan vészhelyzet elemző, grafikus utófeldolgozó rendszernek, mellyel a csapást, illetve balesetet követően az érintett területek kijelölhetőek és kategorizálhatóak, és a szükséges intézkedések elrendelhetőek.

2. Az alkalmazott módszerek bemutatása

2.1 A CFD elemzés lépései

- **Feladat meghatározása**
 - A modellezés céljának meghatározása, lehetséges közelítések mérlegelése.
 - A számítási tartomány geometriájának megszerkesztése, CAD import esetén a geometria egyszerűsítése.
 - Hálógenerálás – a térbeli diszkretizáció alapjául szolgáló háló, más néven rács elkészítése.
- **A megoldó alkalmazása**
 - A fizikai modell felállítása.
 - A numerikus megoldó paramétereinek és sémáinak megválasztása.
 - A megoldás futtatása, a konvergencia ellenőrzése.
- **Utófeldolgozás**
 - Ellenőrző vizsgálatok.
 - Az eredmények kiértékelése, számszerű és grafikus formában történő megjelenítése.
 - A modell finomítása.

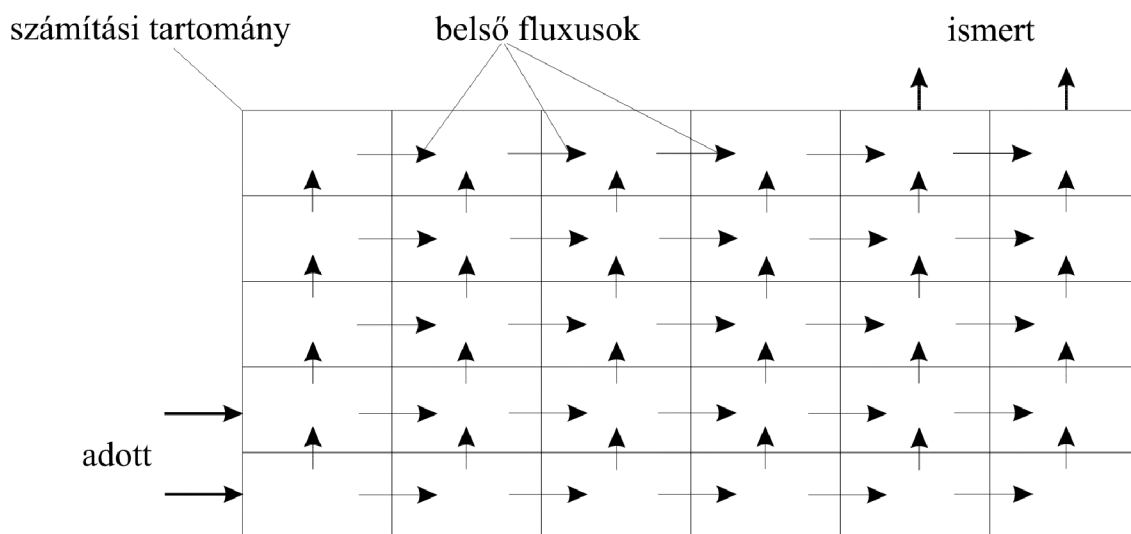
2.2 Az ANSYS FLUENT CFD megoldó

A számításainkhoz használt szoftver széleskörű alkalmazásokra ad lehetőséget. Segítségével számolható az összenyomható és összenyomhatatlan közegek stacioner, instacioner, lamináris és turbulens áramlása. A szoftver a turbulencia modellek széles választékát tartalmazza, melyek közül az adott problémára legjobban alkalmazható modellt választhatjuk ki. Az áramlás számításakor figyelembe vehető a hő-, valamint a szilárd és gáz halmazállapotú anyagok transzportja és a kémiai reakciók is. Ezekre felül további fizikai folyamatokat építhetünk be a FLUENT rendszerbe úgynevezett UDF-ekkel (User Defined Function), azaz a felhasználó által C nyelven programozott algoritmusokkal

(Kristóf et al., 2002). A modellszámításokat a FLUENT szoftver saját grafikus utófeldolgozójával, akár a futtatás megszakításával, vagy futtatás közben is lehet értékelni.

2.3 Az FLUENT rendszer numerikus módszerei

Az áramlásokat parciális differenciálegyenletekkel írjuk le, melyeket egy diszkretizációs módszerrel a számítógép számára megoldható algebrai egyenletrendszerre kell alakítanunk. Az általunk használt programban az úgynevezett véges térfogatok módszerét alkalmaztuk. Ennél a numerikus módszernél a modelltartomány tetszőleges alakú és méretű cellákra bontható a térbeli diszkretizációhoz néhány megkötés figyelembevételével – a falhoz közeli cellák mérete, alak torzulása, egymás melletti cellák méretének aránya – amely lehetővé teszi bonyolult geometriájú modellek vizsgálatát is. Az ANSYS FLUENT rendszer a mezőváltozókat a cellák középpontjában tárolja, más, tetszőleges pontokban a mezőváltozók értékeit a szomszédos cellák mezőváltozóiból interpolálja. A véges térfogatok módszerének lényege, hogy a megmaradási egyenletek integrálását minden cellára (térfogatra és/vagy felszínre) elvégezzük, ezzel olyan egyenletrendszerhez jutunk, ami kapcsolatot teremt az egyes cellákba zárt megmaradó jellemzők időbeli deriváltja valamint a határfelületeken értelmezett fluxusok és térfogati források között. Állandósult áramlás esetén, ha térfogati források nincsenek, a mezőváltozók eloszlását csak a belső fluxusok eloszlása határozza meg. (1. ábra)



1. ábra. Véges térfogatok módszerének sematikus ábrája.

A véges térfogatok módszerének fontos alapelve a „konzervativitás”. A numerikus differenciálás pontatlanságai csak a belső fluxusok értékében okozhatnak hibát. A megmaradó mennyiségek áramait egyik szomszédos cellából a másikba konzekvens módon számítja a módszer, a határoló falra integrált fluxusok alapján, így a teljes számítási tartományra értelmezett megmaradási egyenletek teljesülnek, csak a megmaradó mennyiségek belső megoszlásaiban lehet pontatlanság, tehát a numerikus közelítések hibái nem működhetnek a megmaradó fizikai mennyiségek forrásaiként.

A kezdeti- és peremfeltételek megadása után a szoftver Gauss-Seidel iterációval, multigrid módszerrel oldja meg a diszkretizált egyenletrendszert. Az iterációt addig folytatjuk, amíg a lépések közötti különbség az előírt határ alá csökken. A multigrid módszer lényege, hogy az iterációt kisebb felbontású hálón kezdjük, majd fokozatosan haladunk az általunk elkészített háló felbontásáig, a durvább hálón kapott eredmények interpolációjával. Erre azért van szükség, mert a cellák számának növekedése a konvergencia lassulását vonja maga után, de ezzel a módszerrel csökkenthető ez a hatás (Ferziger és Peric, 2002).

2.4 A FLUENT rendszer egyenleteinek általános alakja

Egy áramlás leírásához meg kell adnunk a tömeg, az energia, és az impulzus megmaradási tételeket. A megmaradó mennyiségekre transzportegyenleteket írhatunk föl, melyek Einstein-konvenciók általános alakja:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\phi u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial\phi}{\partial x_j} \right) + S, \quad (1)$$

ahol ϕ megmaradó mennyiség, ρ a sűrűség, D a diffúziós együttható. A bal oldal első tagja ϕ lokális megváltozását, a második a konvektív transzportot fejezi ki, ezért konvektív tagnak is nevezzük. A jobb oldal első tagja az inhomogenitásból eredő áramlást írja le, mely arányos a D diffúziós együtthatóval, az S pedig különböző forrás, illetve nyelő tagokat foglalhat magába. Ennek megfelelően az egyenletek alakja a következő:

2.4.1 Kontinuitási egyenlet

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = S_m, \quad (2)$$

ahol ρ a sűrűség, v a sebesség vektor, S_m pedig különböző forrástagokat jelölhet.

2.4.2 Az impulzus megmaradást leíró Navier-Stokes egyenlet

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla(\rho v v) = -\nabla p + \nabla(\bar{\tau}) + \rho g + \bar{F}, \quad (3)$$

ahol p a statikus nyomás, $\bar{\tau}$ a feszültség tenzor, ρg a nehézségi erő, és \bar{F} a külső erők eredője, amely tartalmazza az S_f forrástagokat. A $\bar{\tau}$ feszültség tenzor a következőképpen adható meg:

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla v + \nabla v^T) - \frac{2}{3} \nabla v I \right], \quad (4)$$

ahol μ a molekuláris viszkozitás, I pedig az egységtenzor.

2.4.3 Energia-megmaradási egyenlet

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(v(\rho E + p)) = -\nabla \left(\sum_j h_j J_j \right) + S_h, \quad (5)$$

ahol $\left(\sum_j h_j J_j \right)$ az entalpia, S_h pedig a különböző energiaforrásokat és nyelőket foglalja magába.

2.5 Turbulencia modellezése

Turbulens áramlásban az áramlást leíró jellemzők térben és időben sztochasztikusan változnak, ezért Reynolds statisztikus megközelítést alkalmazott az ilyen folyamatok leírására, mely szerint a valószínűségi változók felbonthatóak egy átlagos és egy fluktuációs rész összegére. Ez alapján a sebességre és nyomásra vonatkozó felbontás:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i, \quad (6)$$

$$p = \bar{p} + p'. \quad (7)$$

Ha a Navier-Stokes egyenletbe a sebességeket és a nyomást átlagértékek és ingadozó komponensek összegeként írjuk és átlagoljuk (*Götz és Rákóczi, 1981*), akkor a következő alakot kapjuk:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right) \right] + \frac{\partial(-\rho \overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j}. \quad (9)$$

Ezt az egyenletet nevezzük Reynolds átlagolt Navier-Stokes–egyenletnek. Az utolsó tag feszültség dimenziójú, és elemei szimmetrikus tenzort alkotnak, ezért látszólagos, vagy Reynolds-feszültségi tenzornak nevezzük. A (9) egyenletben megjelenő, a turbulens sebesség ingadozás hatását kifejező tagok megjelenésével megnőtt az ismeretlenek száma is, de az egyenletek száma nem változott, ezért új egyenletek felírására van szükség. Ezt a problémát hívják lezárási problémának (*Götz és Rákóczi, 1981*). A turbulencia modellek feladata, hogy minél egyszerűbben, és pontosabban modellezzék a megjelenő magasabb rendű momentumokat, és ezáltal lezárják az egyenletrendszer.

2.5.1 RANS és URANS

A Navier-Stokes egyenletben fellépő elsőrendű momentumokat teljes egészében modellezzük. Stacionárius számítások esetében RANS-nak (Reynolds átlagolt Navier-Stokes egyenlet), az időfüggő esetekben pedig URANS-nak nevezzük (Időfüggő Reynolds átlagolt Navier-Stokes egyenlet). Erre 1, 2 illetve többegyenletes modelleket használunk,

ahol a sebesség deriváltak és azok kombinációjának segítségével modellezzük a turbulenciát.

2.5.2 LES és DES

A Large eddy szimuláció (LES) lényege, hogy a turbulens spektrum kb. 80%-át direkt módszerekkel írjuk le, csak a maradék 20 %-ot modellezzük. A nagy skálájú örvényeket írjuk le pontosan, mert ezek hordozzák az energia nagy részét, míg a kis skálájú turbulenciát egyszerű modellekkel adjuk meg. A módszer előnye, hogy az elsőrendű momentumokban nagy pontosságot érhetünk el, viszont hátrányt jelent az igen nagy számítási idő. Időfüggő, 3-dimenziós struktúrákat is modellezhetünk, de nehézséget okoz az időfüggő belépő peremfeltételek megadása is.

A Detached eddy szimuláció (DES) egy kombinált modell, melyben a falak melletti térrészeket – ahol nagy hálófelbontás szükséges a turbulencia leírásához – RANS-al modellezzük, míg a faltól távolabb eső részeken LES-el írjuk le a turbulenciát. Ebben az esetben a modellek összekapcsolása jelent komoly nehézséget.

2.5.3 DNS

Ha a térbeli diszkretizációhoz létrehozott numerikus háló elegendően sűrű ahhoz, hogy felbontsa a turbulens áramlásban jelentkező legkisebb méretű örvényeket, akkor időfüggő háromdimenziós számítással leírhatók a kialakuló struktúrák. Ehhez a Kolmogorov-féle hosszléptéknél kisebb cellaméret szükséges, és ezt a szimulációs technikát direkt numerikus szimulációnak nevezzük (Direct Numerical Simulation, DNS). A sebesség növelésével csökken a legkisebb örvények mérete, ezért egyre nagyobb sűrűségű háló szükséges. Ez a módszer a gyakorlatban előforduló turbulens áramlások legnagyobb részénél a jelenleg rendelkezésre álló számítógépek teljesítményénél több nagyságrenddel nagyobb memóriát és számítási kapacitást igényel.

2.5.4 A FLUENT-ben lévő turbulencia modellek

A FLUENT-ben használható turbulencia közelítéseket az alábbi felsorolás tartalmazza:

- Lamináris modellek
- RANS illetve URANS modellek
 - Spalart-Allmaras modell,
 - k-ε modellek,
 - Standard k-ε modell,
 - RNG k-ε modell,
 - Realizable k-ε modell.
 - k-ω modellek,
 - Standard k-ω modell,
 - Shear-stress transport (SST) k-ω modell.
 - v²-f modell.
 - Reynolds-stress modellek (RSM),
 - Linear pressure strain modell,
 - Quadratic pressure-strain modell,
 - Low-Re stress-omega modell.
- Detached eddy simulation (DES) modellek
 - Spalart-Allmaras RANS modell,
 - Realizable k-ε RANS modell,
 - SST k-ω RANS modell.
- Large eddy simulation (LES) modellek
 - Smagorinsky-Lilly subgrid-scale modell,
 - WALE subgrid-scale modell,
 - Kinetic-energy transport subgrid-scale modell.

Izotróp turbulencia feltételezése esetén a Boussinesq-féle közelítést alkalmazzuk. Itt a Reynolds-feszültségek a lamináris áramlás feszültségeihez hasonló mechanizmus során keletkeznek. Ez alapján a látszólagos húzó, és csúsztató feszültségek:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}, \quad (10)$$

alakban írhatók, ahol a μ_t a turbulens viszkozitás, k a turbulens kinetikus energia.

A FLUENT-ben lévő turbulencia modellek közül az úgynevezett realizábilis k-ε modellt (Shih et al., 1995) használtuk a szimulációk során, mivel a FLUENT-ben implementált modellek közül legtöbb esetben ez tekinthető a leghatékonyabbnak atmoszférikus áramlások leírásánál (Hargreaves és Wright, 2007). Ez a modell a két transzportegyenletes modellek családjába tartozik (Lajos, 2004), azaz a turbulens viszkozitást két mennyiség segítségével – a k turbulens kinetikus energia, és az ε turbulens disszipáció – modellezzük. Ez a modell a standard k-ε turbulencia modelltől eltérő formulát tartalmaz a turbulens viszkozitás számítására, valamint eltérőek a modell konstansok, és a transzport egyenletek is különböznek kissé. A turbulens kinetikus energia transzportegyenlete a következő alakban írható föl:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k. \quad (11)$$

Transzportegyenlet a turbulens disszipációra:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon, \quad (12)$$

ahol

$$C_1 = \max \left[0,43 \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}.$$

Ezekben az egyenletekben G_k reprezentálja az átlagsebességből, G_b pedig a felhajtóerőből származó turbulens kinetikus energiát. Y_m jelöli az összenyomható áramlásokban igen nagy sebességeknél fellépő hatásokat, ezt a tagot számításaink során elhanyagoljuk. $C_2=1,9$; $C_{1\varepsilon}= 1.44$; $\sigma_k=1$; $\sigma_\varepsilon=1,2$ konstansok, S_k és S_ε pedig tetszőleges forrástagok. Turbulens viszkozitás a következő alakban fejezzük ki:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (13)$$

$C_\mu= 0,09$ a standard k-ε turbulencia modellben, míg a realizábilis k-ε turbulencia modellben a nyírási és csavarási erőktől függ az értéke.

3. Módszertan

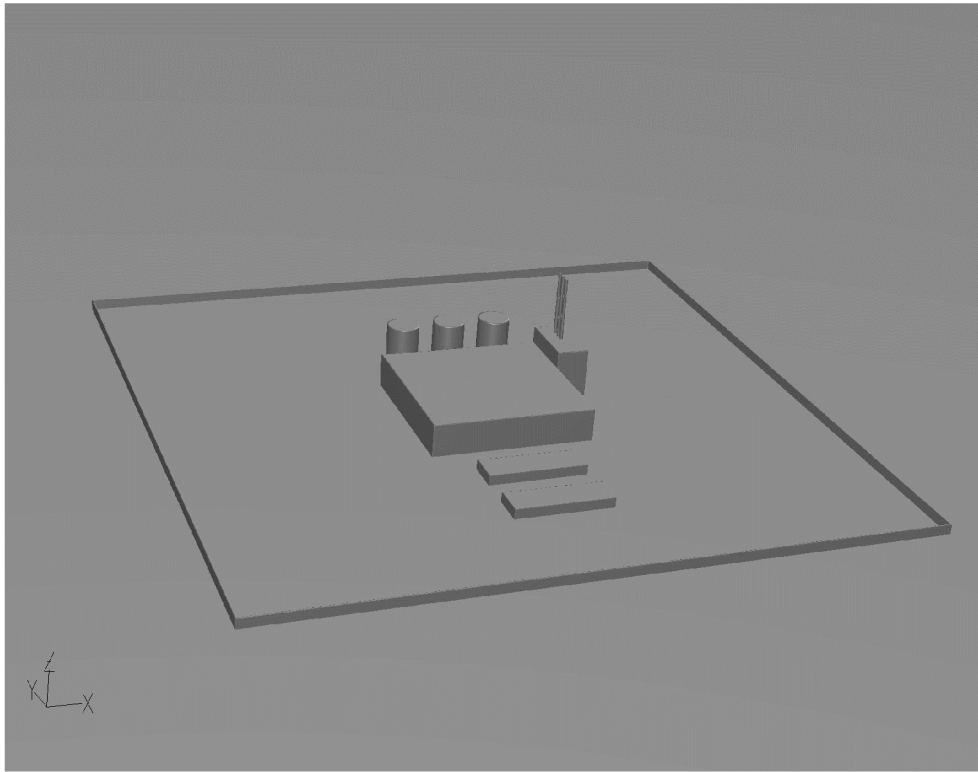
A következőkben egy esettanulmányon keresztül, lépésenként bemutatom a CFD elemzés folyamatát. Elkészítettük egy fiktív vegyi üzem 3-dimenziós modelljét (2. ábra), valamint kiegészítettük a környezetét tölgy és fenyő állománnyal. Ennek a területnek vizsgáltuk az áramlási viszonyait különböző szélirányokra egy esetleges baleset, vagy támadás esetén.

3.1 Előfeldolgozás

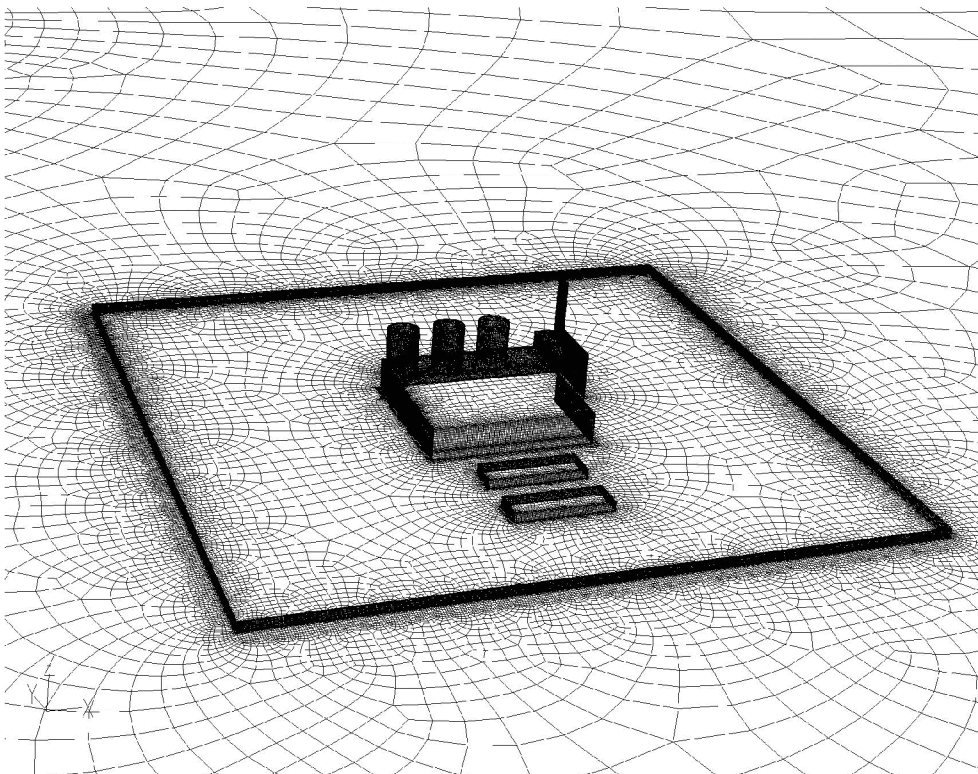
3.1.1 Geometriai modellezés

A térbeli diszkretizáció során létrehozott részterfogatok, úgynevezett cellák rendszere alkotja a numerikus hálót, amelyen számíthatók az áramlást leíró jellemzők. Ahhoz, hogy a számítási tartományon belül helyesen írjuk le a külső kényszerek hatását, a tartomány kiterjesztésére van szükségünk, amit relaxációs zónának nevezünk. Ez a terület a peremfeltételek hatásait fokozatosan vezeti át a vizsgált tartományba, ezért csillapítja a külső kényszerek hatásait. A geometriát és a hálót (3–6. ábra) a GAMBIT nevű előfeldolgozóval állítottuk elő. Az elkészített háló a falak, épületek mentén nagyobb felbontással rendelkezik, a többi területen fokozatosan ritkul. A hálóstruktúra a következő jellemzőkkel bír:

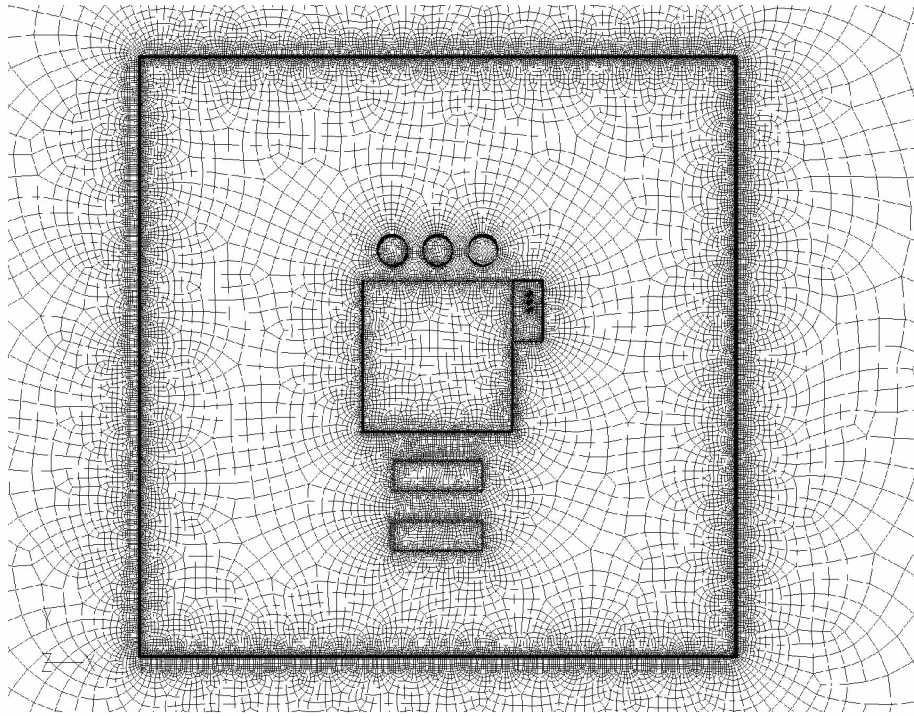
- cellaszám: ~ 5 200 000;
- cella típusa: négyzög alapú hasáb;
- cellaméret horizontálisan: 0,5–50 m;
- cellaméret vertikálisan: 0,1–10 m;
- cellanövekedési arány: 1,2;
- vizsgált tartomány: 4000 x 4000 x 500 m;
- függőleges szintek száma: 101;
- felszínközeli cellák mérete: ~ 0,1 m.



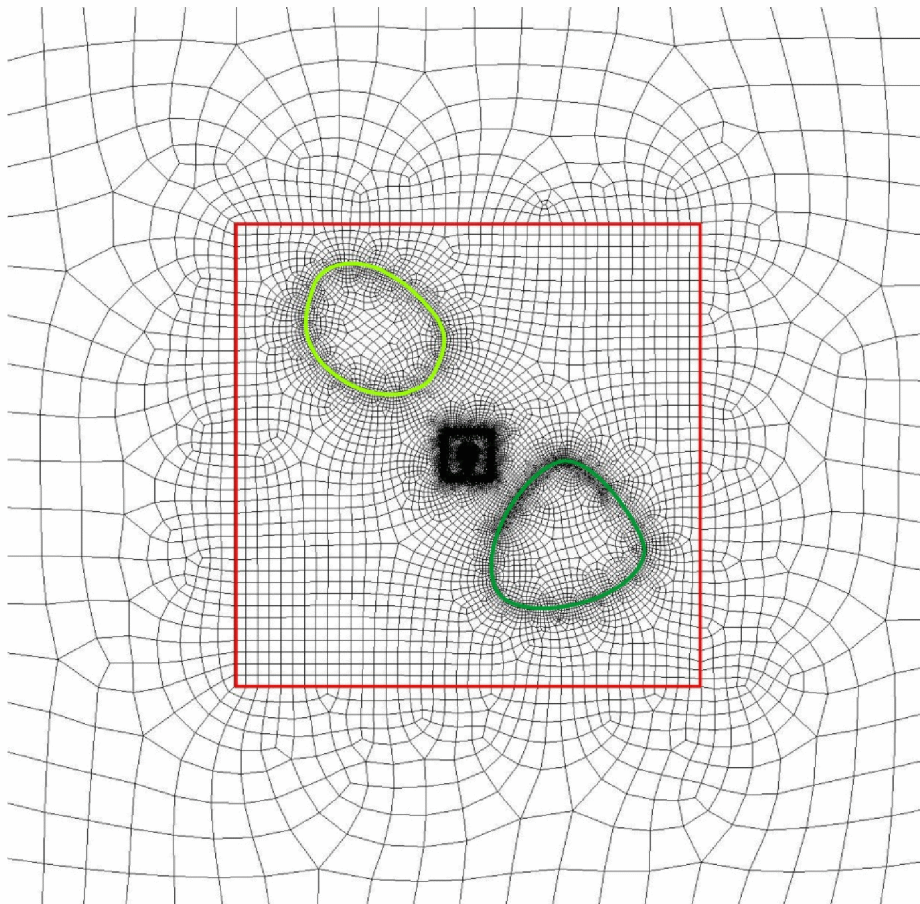
2. ábra. A szimuláció során használt 3-dimenziós geometria.



3. ábra. A modell hálóstruktúrája.



4. ábra. A numerikus háló szerkezete, és a falak melletti hálósűrítés a tartomány felszínén.



5. ábra. Erdőállománnyal kiegészített numerikus háló.

Az 5-ös ábrán a pirossal keretezett rész jelöli a számítási tartományt. Körülötte látható a relaxációs zóna, melyben a számítási tartománytól távolodva egyre csökken a hálósűrűség, ezzel némiképp csökkentve a számítási időt. A világoszölddel határolt terület a tölgyerdőt, a sötétzölddel határolt terület a fenyőerdőt jelöli.

3.1.2 Kezdeti és peremfeltételek

Az egyenletek megoldásához szükségünk van kezdeti és peremfeltételek megadására. A sebesség komponensek és a turbulencia paraméterek a felszíntől vett távolság függvényei, de időben állandók. A sebességet logaritmusos szélprofilal, a turbulencia paramétereket pedig egy 1-dimenziós, stacionárius, realizábilis k - ε turbulencia modellel adtuk meg. Így a turbulens kinetikus energiára és a turbulens disszipációra vonatkozó egyenletek, valamint a turbulens viszkozitás a következő alakban írhatóak fel:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 - \rho \varepsilon = 0, \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_{1\varepsilon} \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} = 0. \quad (15)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (16)$$

ahol $\sigma_k = 1,0$; $C_{1\varepsilon} = 1,44$; $C_{2\varepsilon} = 1,9$; C_μ nyírási és csavarási erőktől függő paraméter;

$\kappa = 0,41$; $\sigma_3 = \frac{\kappa^2}{(C_{2\varepsilon} - C_{1\varepsilon}) \sqrt{C_\mu}}$; konstansok.

Kezdeti feltételként sík felszínre vonatkozó logaritmusos szélprofil, a turbulens kinetikus energiát (k), valamint a turbulens disszipációt (ε) adtuk meg:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right), \quad (17)$$

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}}, \quad (18)$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa(z + z_0)}. \quad (19)$$

Peremfeltételek a falon:

$$u = 0, \quad k = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = v \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial z} \right)^2,$$

ahol v a molekuláris kinematikai viszkozitás, z_0 az érdességi magasság. Zavartalan áramlásban a sebesség értéke egyenlő a kezdeti feltétellel, míg a (14) és (15) egyenleteket numerikusan, Gauss-Seidel iterációval oldjuk meg.

3.2 Szimuláció

3.2.1 Légköri rétegződés modellezése

A légköri rétegződés modellezéséhez módosítanunk kell a megoldandó egyenleteket. Első lépésként a sűrűséget, sebességet, a nyomást és a hőmérsékletet helyettesítenünk kell megfelelően transzformált mezőváltozókkal ($\rho, v, p, T \rightarrow \tilde{\rho}, \tilde{v}, \tilde{p}, \tilde{T}$). Második lépésként geometriai transzformációt alkalmazunk a vertikális koordinátára ($z \rightarrow \tilde{z}$). A megoldó ebben a transzformált térben oldja meg az egyenleteket. A transzformált változók bevezetése miatt új forrástagok jelennek meg. Utolsó lépésként kiszámoljuk ezeket a térfogati forrásokat, és meghatározzuk a korrekciós erő nagyságát, mely a Coriolis-erő hatását vezeti be a transzformált rendszerbe. A teljes levezetés *Kristóf et al. (2009)* munkájában található.

Az ICAO-International Civil Aviation Organization (Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet) által meghatározott konstansokat használtuk a számításokhoz, melyek: $\gamma = 0,0065 \text{ K m}^{-1}$; $T_0 = 288,15 \text{ K}$; $p_0 = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$; $\rho_0 = 1,225 \text{ kg m}^{-3}$; $R = 287,05 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$; $g/(R\gamma) = 5,2553$.

Adott magasságokban a következőképpen számíthatjuk a változókat:

$$\bar{T} = T_0 - \gamma z, \quad (20)$$

$$\bar{p} = p_0 \left(\frac{T_0 - \gamma z}{T_0} \right)^{\frac{g}{R\gamma}}, \quad (21)$$

$$\bar{\rho} = \rho_0 e^{-\zeta z}. \quad (22)$$

A (22)-ben levő ζ sűrűség paraméter:

$$\zeta = - \left(\frac{g - R\gamma}{zR\gamma} \right) \ln \left(1 - \frac{\gamma z}{T_0} \right). \quad (23)$$

Az eredeti mennyiségek, és a transzformált mennyiségek között lévő kapcsolatot a következő összefüggések írják le:

$$T = \tilde{T} - T_0 + \bar{T}, \quad (24)$$

$$p = \frac{\bar{p}}{\rho_0} \tilde{p} + \bar{p} = e^{-\zeta z} \tilde{p} + \bar{p}, \quad (25)$$

$$\rho = \tilde{\rho} - \rho_0 + \bar{\rho}, \quad (26)$$

$$z = - \frac{1}{\zeta} \ln(1 - \zeta \tilde{z}), \quad (27)$$

$$\omega = \frac{\rho_0}{\bar{\rho}} \tilde{\omega} = \tilde{\omega} e^{\zeta z}. \quad (28)$$

A (27), (28) egyenletek, valamint a (25) egyenlet exponenciális tagja az összenyomhatóságból fakadó hatásokat fejezi ki. A forrástagok, és a Coriolis-erő alakja a transzformált rendszerben:

$$S_u = \rho_0 f v - \rho_0 l \tilde{\omega} J, \quad (29)$$

$$S_v = -\rho_0 f u, \quad (30)$$

$$S_w = \rho_0 (J^2 - 1) (l u J^{-1} + \beta (\tilde{T} - T_0) \mathbf{g}) + \rho_0 l u J^{-1} + \zeta J (\tilde{p} - \rho_0 \tilde{\omega}^2), \quad (31)$$

ahol

$$J = \frac{dz}{\tilde{z}} = (1 - \zeta \tilde{z})^{-1}, \quad (32)$$

és $f = 2\Omega \sin \varphi$, és $l = 2\Omega \cos \varphi$, melyekben φ a földrajzi szélesség, Ω pedig a Föld szögsebesség vektora. Az energia egyenletre vonatkozó forrástagot következőképpen írhatjuk:

$$S_T = JS_\Theta - \rho_0 c_p \tilde{\omega} (\Gamma - \gamma), \quad (33)$$

ahol $\Gamma = 0,00976 \text{ K m}^{-1}$ a száraz adiabatikus hőmérsékleti gradiens, S_Θ értéke ebben az esetben nulla, száraz adiabatikus folyamatokra. A turbulens kinetikus energia, valamint a turbulens disszipáció forrástagja:

$$S_k = -\beta g \frac{\mu_t}{Pr_t} (\Gamma - \gamma), \quad (34)$$

ahol $Pr_t = 0,85$ Prandtl-szám, β a levegő hőtágulási együtthatója.

$$S_\varepsilon = -C_{1\varepsilon} C_{3\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \beta g \frac{\mu_t}{Pr_t} (\Gamma - \gamma). \quad (35)$$

3.2.2 Geometriai modell módosítása növényállománnyal

Az előzőekben bemutatott geometriájú modellt a növényzet hatásának parametrizálásával egészítettük ki, amit porózus közeg modellezésével írtunk le. C nyelven írt felhasználói függvénnyel (User Defined Function-UDF) építettük be a szélprofil, és a porózus zóna megváltoztatott tulajdonságait a FLUENT modellbe. Ebben az esetben is eltekintünk a látens és szenzibilis hőáramok turbulenciára gyakorolt hatásától. A felszíni energiamérleg parametrizációja a modellfejlesztés következő állomása lesz.

3.2.2.1 Szélprofil meghatározása növényállomány belsejében és fölött

Az első esetben használt kezdeti feltétel helyett egyenletes, homogén növényállományra modellezett szélprofilal számoltunk, neutrális légrétegződés esetén. Számos kutatást végeztek ebben a témakörben (*Lalic et al., 2003; Finnigan és Belcher 2004; Jiao-Jun et al., 2004; Hui és Crockford, 2006; Wang és Cionco, 2007; etc.*), melyek közül *Finnigan és Belcher 2004-es* munkáját vettük alapul. A légrétegek közötti csúsztatófeszültség a határreteg talajközeli részében (a felszínközeli rétegben) független a magasságtól:

$$\tau = \rho u_*^2, \quad (35)$$

ahol ρ a levegő sűrűsége, u_* pedig a súrlódási sebesség. Az állomány fölött (z_g-H) magasságban a Prandtl-törvény értelmében a sebességprofil logaritmikus formában adható meg:

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z_g - d}{z_0}\right), \quad (36)$$

ahol H az állomány átlagos magassága, dolgozatomban tölgyerdőre 7 métert, fenyőerdőre 16 métert adtunk meg. z_g a felszín feletti magasság, d a kiszorítási réteg vastagsága, z_0 az érdességi magasság, ahol az elmélet szerint a sebesség nullává válik, $\kappa = 0,41$ Kármán-féle állandó, U az átlagsebesség. A csúsztatófeszültséget a felszíntől távolodva a keveredési úthossz függvényében is felírhatjuk:

$$\tau = \rho l_m^2 \left(\frac{dU}{dz} \right)^2, \quad (37)$$

ahol l_m az átlagos keveredési úthossz: az a vertikális távolság, ahonnan a turbulens örvény indult, s ahol hőmérséklete, nedvességtartalma, illetve szennyezőanyag koncentrációja megegyezett a környezet átlagértékével (Götz és Rákóczi, 1981). Az állomány fölött az $l_m = \kappa (z_g - d)$ alakban írható föl. Az állomány belsejében a szélprofil exponenciális alakot vesz fel:

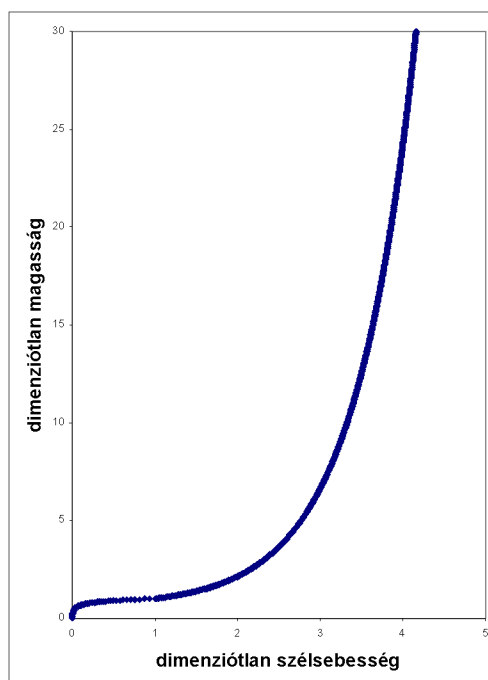
$$U_B(z) = U_H e^{\beta(z_g - H)/l}, \quad (38)$$

ahol

$$l = 2\beta^3 \frac{1}{C \cdot a}. \quad (39)$$

Az U_H a szélsébség a növényállomány tetején az ideális logaritmusos profil alapján, U_B az állomány belsejében a felszín feletti z_g magasságban, számított elméleti átlagos szélsébség, $\beta = 0,3$; $C = 0,25$; $a = 0,1$ állandók. A kiszorítási réteg vastagságát és az érdességi magasságot a következő összefüggésekkel adjuk meg (Finnigan és Belcher, 2004):

$$d = \frac{1}{\kappa}; \quad z_0 = \frac{1}{\kappa} e^{-\kappa/\beta}.$$



6. ábra. Analitikus szélprofil. (Finnigan és Belcher, 2004)

A növényállomány áramlásra, illetve turbulenciára gyakorolt hatásait – a lombkorona ellenállásából adódó szélesebbesség csökkenést, a turbulencia intenzitás növekedését – a FLUENT rendszerben forrástagok és porozitás megadásával modelleztük (Sanz, 2003; Katul et al., 2004; Liang et al., 2006; Sanz és Katul, 2007). A turbulens kinetikus energiára, valamint a turbulens disszipációra vonatkozó forrástagok:

$$S_k = C_D \hat{A} \left(\beta_0 |\bar{u}|^3 - \beta_1 |\bar{u}| k \right), \quad (41)$$

$$S_\varepsilon = C_D \hat{A} \left(\beta_0 C_{4\varepsilon} |\bar{u}|^3 \frac{\varepsilon}{k} - \beta_1 C_{5\varepsilon} |\bar{u}| \varepsilon \right), \quad (42)$$

ahol $\hat{A} = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$. A horizontális sebesség komponensekre vonatkozó forrástag:

$$S_{u_i} = C_D A_i |\bar{u}| u_i, \quad (43)$$

ahol C_D ellenállás tényező, A_i az áramlás irányába eső felület ($i = x, y, z$), amit a 3.2.4-es fejezetben leírtak alapján határozhatunk meg tölgy, illetve fenyőerdő esetén.

3.2.2.2 Levélfelületi sűrűség (LAD) eloszlás modellezése

Ahhoz, hogy a növényzet áramlásra gyakorolt hatását minél pontosabban leírjuk, ismernünk kell a levélfelületi sűrűség eloszlását (Ross et al., 2000). Ez az érték fejezi ki az összes levélfelület vertikális eloszlását, amit integrálva tudunk használni a növényzet modellezéséhez. A következő empirikus leírást Lalic és Mihailovic 2003-as munkája nyomán alkalmaztuk. A számításokhoz ismernünk kell a z_m koronamagasságot, mely egy fontos paraméter az adott erdőállományra vonatkozóan. Az állomány átlagos magasságát H -val jelöljük, így z_m értéke tölgy esetén $0,2 H$, juharfa állományra: $0,2 H < z_m < 0,4 H$, és fenyőerdőre: $0,4 H$. A levélfelületi sűrűség magasság szerinti változását a következőképpen írhatjuk le:

$$L(z) = L_m \left(\frac{H - z_m}{H - z} \right)^n \exp \left[n \left(1 - \frac{H - z_m}{H - z} \right) \right], \quad (44)$$

ahol

$$n = \begin{cases} 6 & 0 \leq z \leq z_m \\ \frac{1}{2} & z_m \leq z \leq H \end{cases}$$

A (44) egyenlet beírható a következő összefüggésbe:

$$LAI = \int_0^h L(z) dz, \quad (45)$$

ahol LAI a levélfelületi index, amit szakirodalmi adatok alapján adhatunk meg.

$$LAI = L_m \int_0^h \left(\frac{H - z_m}{H - z} \right)^n \exp \left[n \left(1 - \frac{H - z_m}{H - z} \right) \right], \quad (46)$$

értéke vizsgálatunkban tölgyerdőre 3, fenyőre 4. Ebből az alakból kifejezhető L_m :

$$L_m = \frac{LAI}{\int_0^h \left(\frac{H - z_m}{H - z} \right)^n \exp \left[n \left(1 - \frac{H - z_m}{H - z} \right) \right]}. \quad (47)$$

Az egyes fajtákra jellemző L_m értékét numerikus integrálással, jelen esetben Simpson 3/8-os szabállyal számítjuk ki, majd ennek ismeretében határozzuk meg $L(z)$ -t.

3.4 Modelleredmények

3.4.1 Szélirány szcenáriók

Szennyezőanyag terjedés szempontjából nagyon fontos egy adott terület szélviszonyainak ismerete. Ezért a már meglévő numerikus hálón meg kell határoznunk a nyolc fő szélirány megadása mellett kialakuló stacionárius szélmezőket. A későbbi

felhasználás során csapás, vagy baleset esetén az éppen aktuális széliránynak megfelelő stacionárius szélmezőt adjuk meg kezdeti feltételként, valamint a meteorológiai paraméterek ismeretében, a szennyezőanyag forrás jellemzőinek (intenzitás, típus, pozíció) megadásával, időfüggő számítást alkalmazva számítható a terjedés.

3.4.2 Szennyezőanyag-terjedés

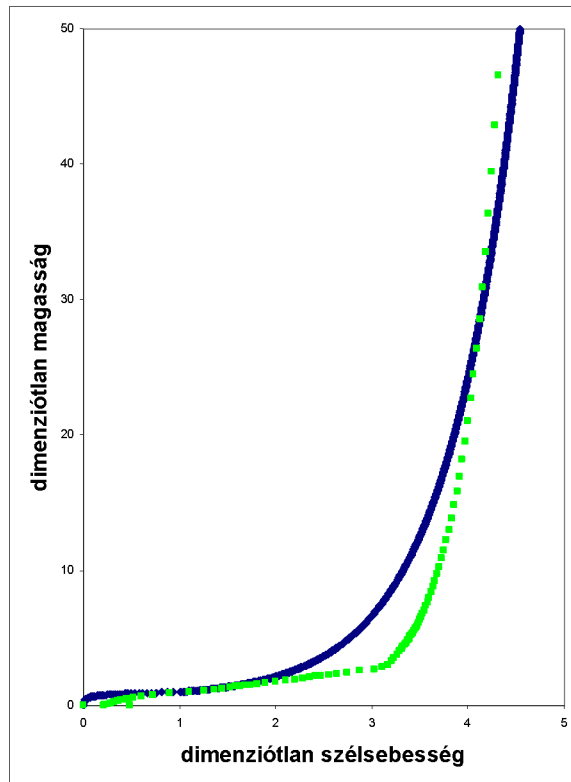
A módszer használhatóságát egy példán keresztül mutatom be. A terjedés számítást a Budapesti Műszaki Egyetem Áramlástan Tanszékének klaszterén futtattuk, egyes esetekben 24 processzort is igénybe véve. A futtatásokat a 3.1.1-es fejezetben ismertetett geometrián végeztük. A modellezett esetben – feltételezett baleset esetén – az épületek mellett lévő középső tartály teteje sérül meg 15 méteres magasságban, innen áramlik ki a szennyezőanyag. A szimulációk során nem egy konkrét szennyezőanyaggal számoltunk, hanem dimenziótlan koncentráció eloszlást ábrázoltunk, amit úgy kaptunk meg, hogy a számolt koncentráció értékeket elosztottuk a kiáramlás helyénél lévő maximális értékkel. Ennek értelmében az ábrákon 0 és 1 közötti értékek szerepelnek, 1-es érték a kiáramlás helyénél, a szennyezés mértékének megfelelően. Ez a modell használhatósága szempontjából rendkívül kedvező, mert így bármilyen szennyezőre elvégezhetjük a szimulációkat. Ennek az ábrázolásmódnak az alapján, és a szennyezőanyag fajtájának ismeretében ki lehet jelölni azokat a területeket, ahol már az egészségre ártalmas mértékű, illetve halálos a koncentráció, és el lehet rendelni a megfelelő óvintézkedéseket.

A stacionárius esetben az áramlást leíró egyenletekben (2), (3), (11), (12), csak a konvektív tagok szerepelnek a bal oldalon, a lokális megváltozások nullák. Első lépésként kiszámoltunk egy stacionárius szélmezőt, majd ebben a szélmezőben indítottuk el a szennyezőanyag transzportot. A további időlépésekben csak a transzportot számítjuk, a áramlást leíró paramétereket nem. A növényállományokat kivettük a modellből, a különböző szélirányokra az első lépésben kiszámolt stacionárius sebesség eloszlást, és a dimenziótlan turbulencia intenzitást, valamint a szennyezőanyag terjedést 800 másodperccel a tartály sérülését követően a 9–16-os ábrákon ábrázoltuk. A dimenziótlan turbulencia intenzitást a számolt turbulens kinetikus energia és a referencia turbulens kinetikus energia hányadosaként állítottunk elő. Elvégeztük a szimulációt 1 m/s, 2 m/s, illetve 3 m/s-os szélsősebességre is. Ezeket az értékeket a felszíntől számított 10 m-es

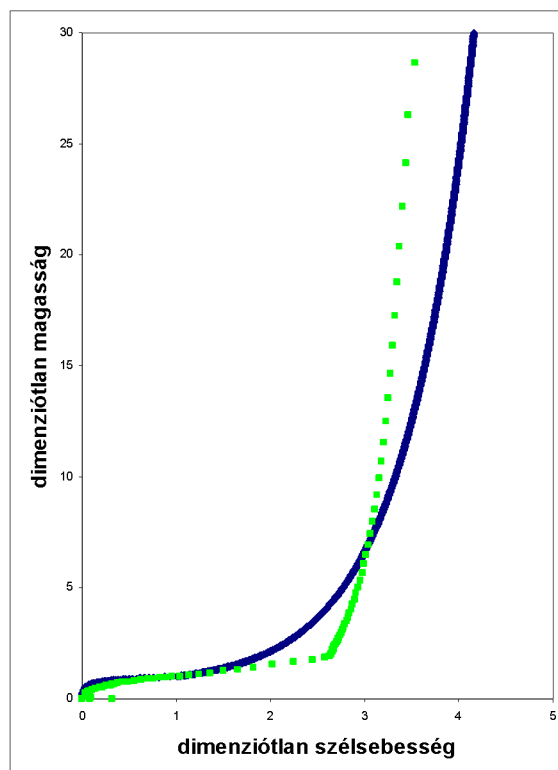
magasságban adtuk meg, de csak az 1 m/s-os futtatások kerültek bele jelen dolgozatba, hogy össze tudjuk hasonlítani az időfüggő szimulációval.

A növényállománnyal kiegészített geometriával stacionárius esetben végzett szimulációkat 3 szélirányra végeztük el (északkelet, délkelet és északnyugat). Ezekben az esetekben kapott sebesség eloszlásokat és turbulencia intenzitást a 17–19-es ábrákon mutatom be, melyeken a vegyi üzemtől északnyugat felé eső állomány a tölgyerdő, a délkelet felé eső a fenyőerdő (*lásd 5. ábra*). A tölgyerdő átlagos magasságát 7 méterben, a fenyőerdő átlagos magasságát 16 méterben határoztuk meg.

Az időfüggő szimuláció esetében a (2), (3), (11), (12) egyenletek bal oldalán a lokális tag nem nulla, ezeket minden időlépésben újraszámolja a modell. Az áramlást leíró paraméterek mellett a szennyezőanyag transzportját is időlépésenként számítjuk. Emiatt időfüggő esetben mindössze 150 másodpercet tudunk modellezni, de a futtatás így is több napot vett igénybe. A szimuláció eredményei a 20/a–20/h ábrán láthatóak. Ábrázoltuk a sebesség eloszlást, a dimenziótlan koncentrációt, valamint a dimenziótlan turbulencia intenzitást. Ezeket a paramétereket két szintben jelenítettük meg, 4 és 15 méteren. Az erdőállományokban az időfüggő szimuláció során 150 másodperc elteltével kialakult szélprofilok a 7, 8-as ábrán láthatóak a 3.2.2.1-es fejezetben leírt elméleti szélprofillal együtt.

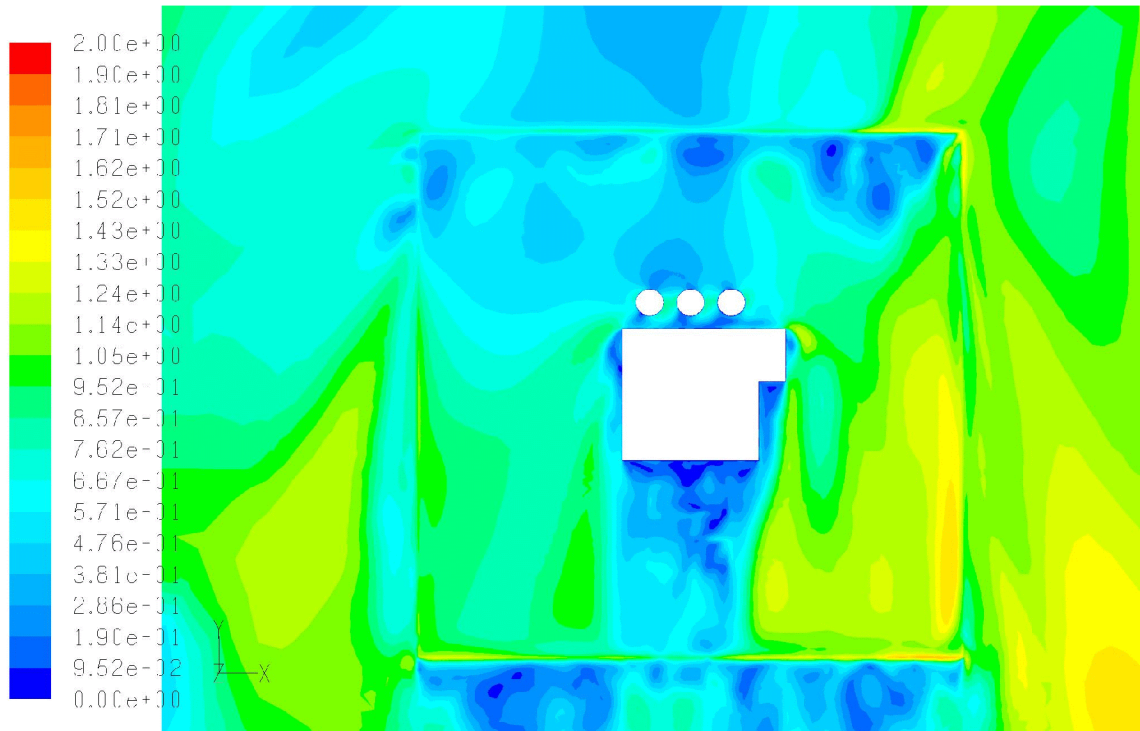


7. ábra. Elméleti (kék) és a modellel számolt (zöld) szélprofil tölgyerdő esetén időfüggő esetben.

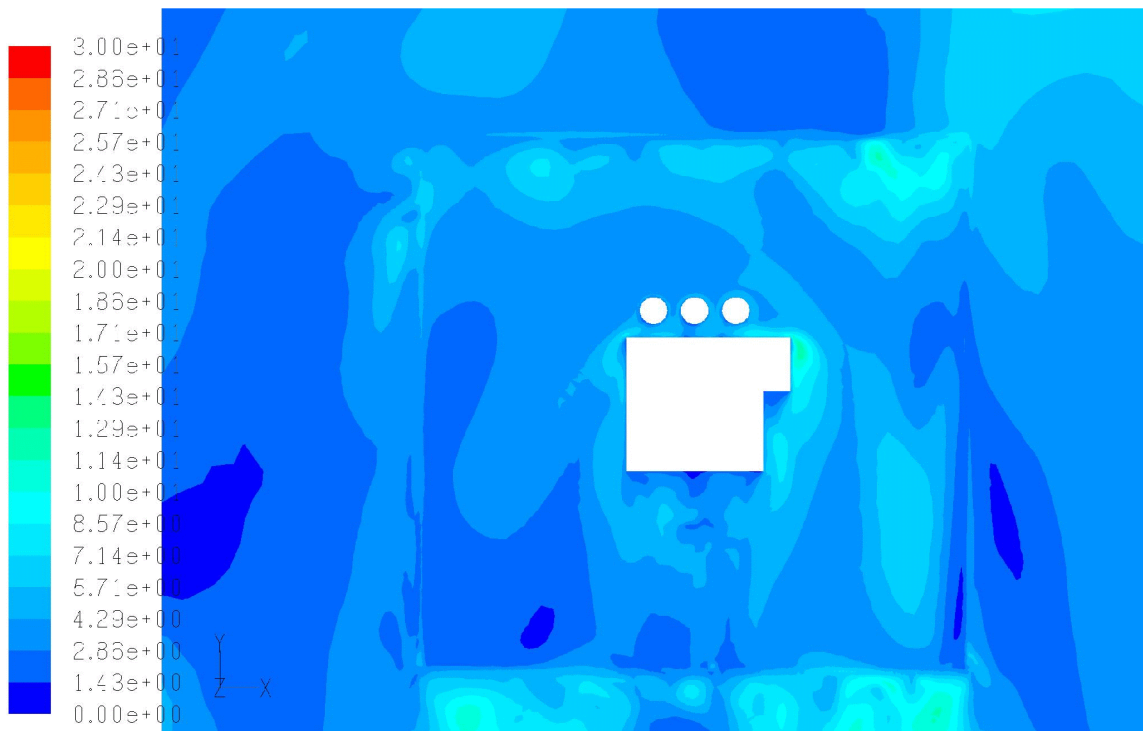


8. ábra. Elméleti (kék) és a modellel számolt (zöld) szélprofil fenyőerdő esetén időfüggő esetben.

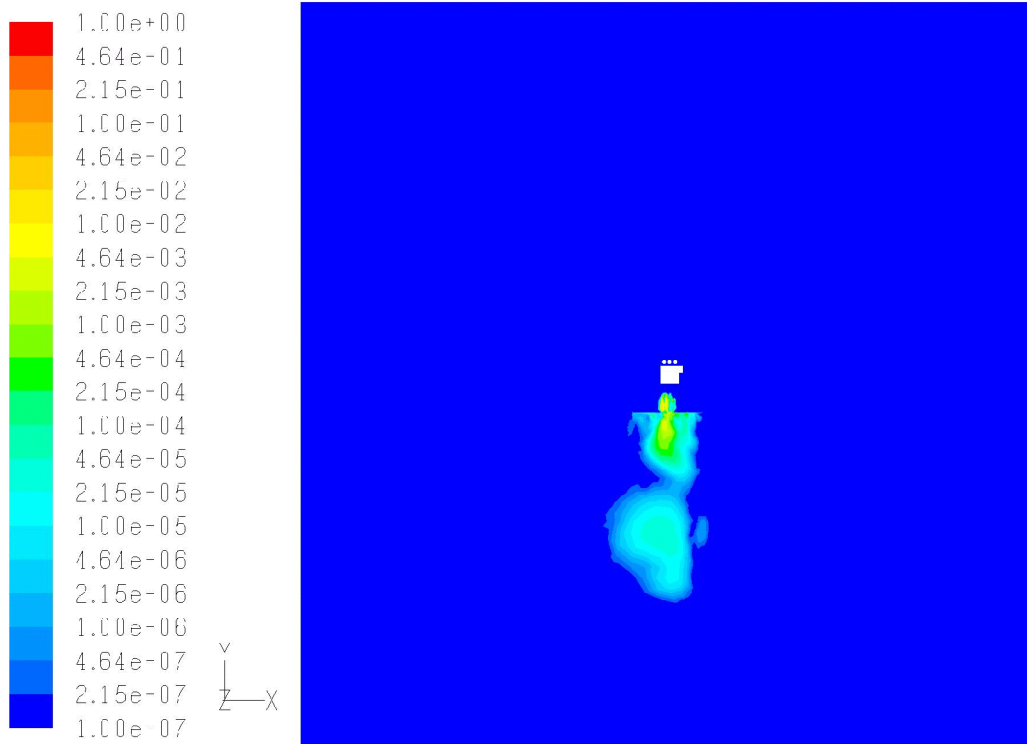
A stationárius áramlás jellemzői és a szennyezőanyag-terjedés északi szél esetén



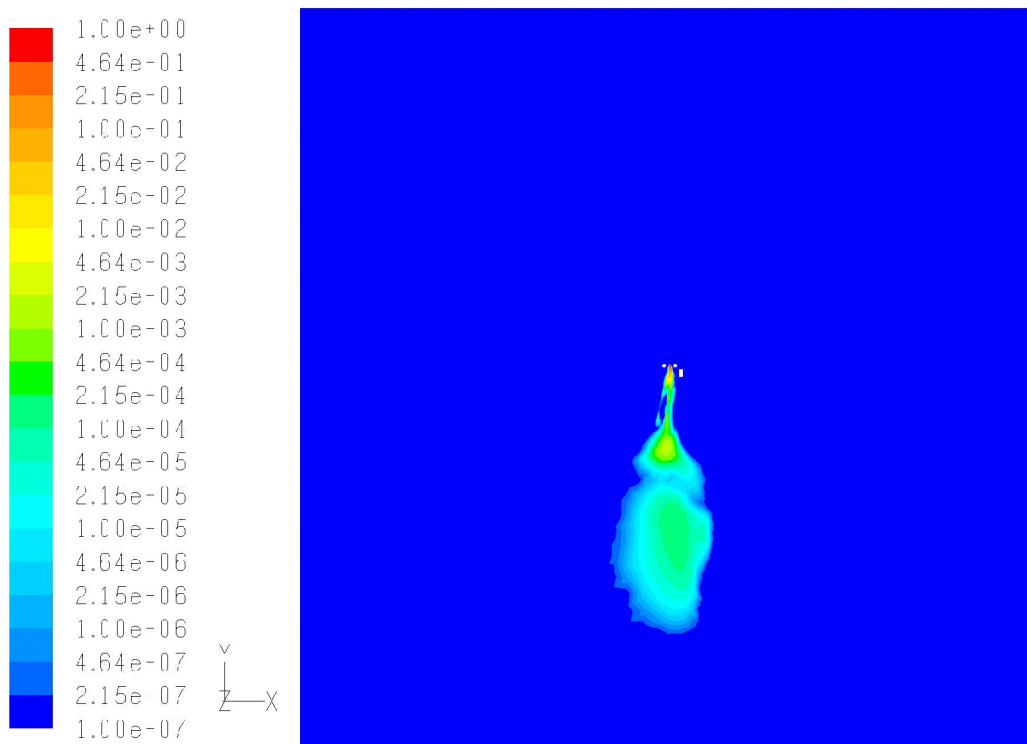
9/a ábra. A sebességeloszlás 4 méteres magasságban az épületek közelében, északi szél esetén.



9/b ábra. A dimenziótlan turbulencia intenzitás 4 méteres magasságban az épületek közelében, északi szél esetén.

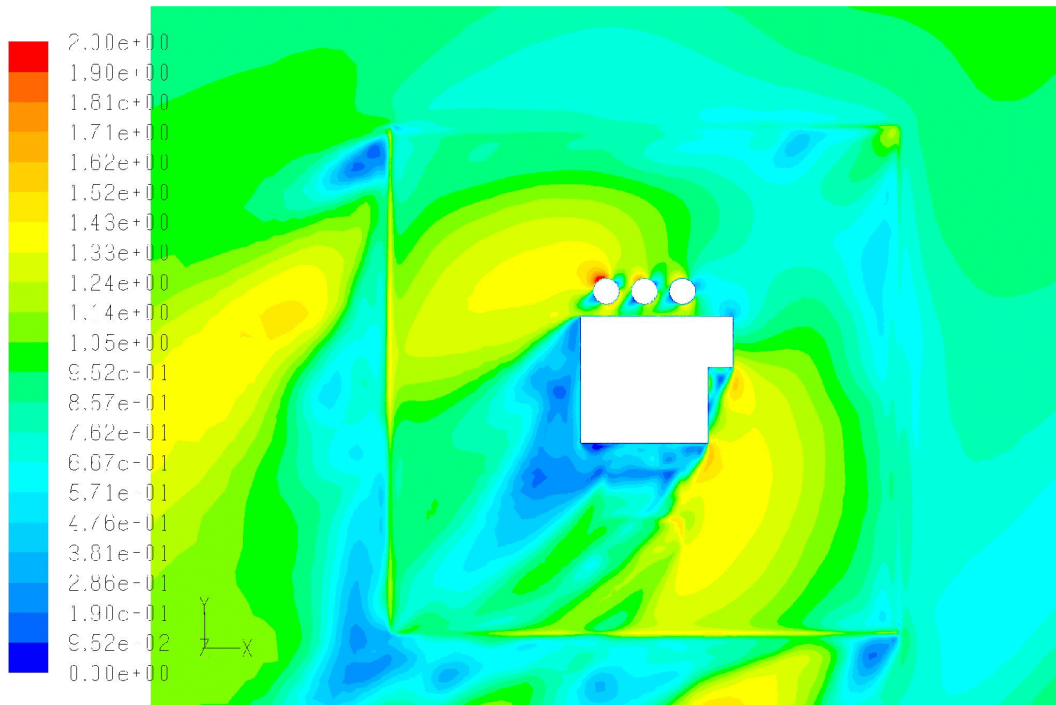


9/c ábra. A dimenziótlan koncentráció eloszlás 4 méteres magasságban, északi szél esetén.

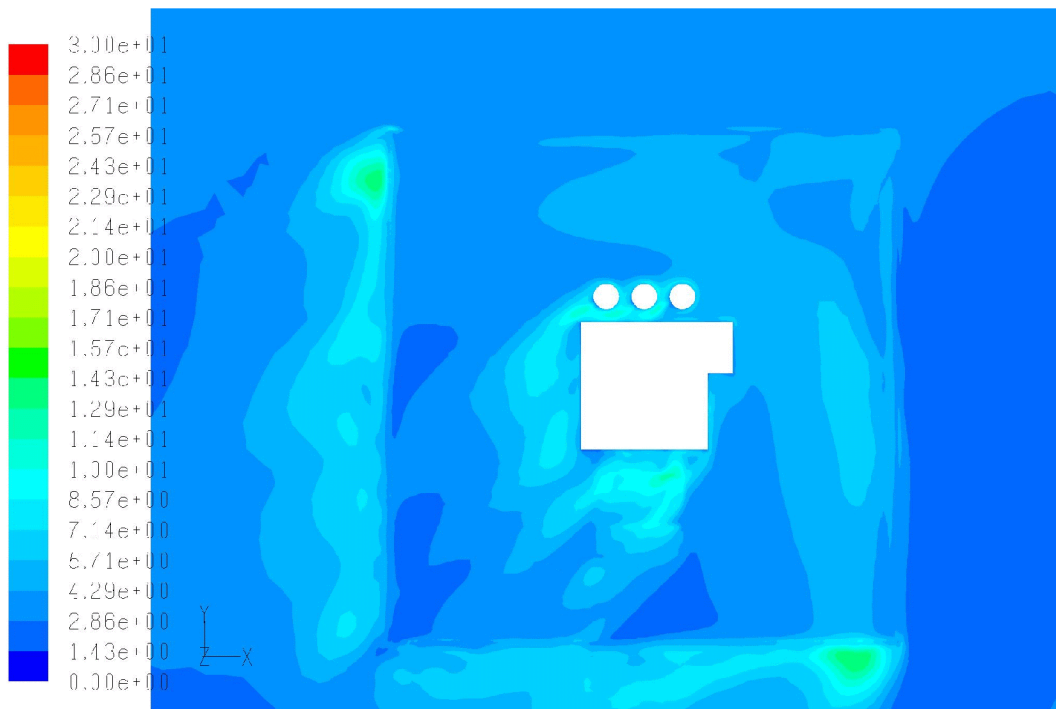


9/d ábra. A dimenziótlan koncentráció eloszlás 15 méteres magasságban, északi szél esetén.

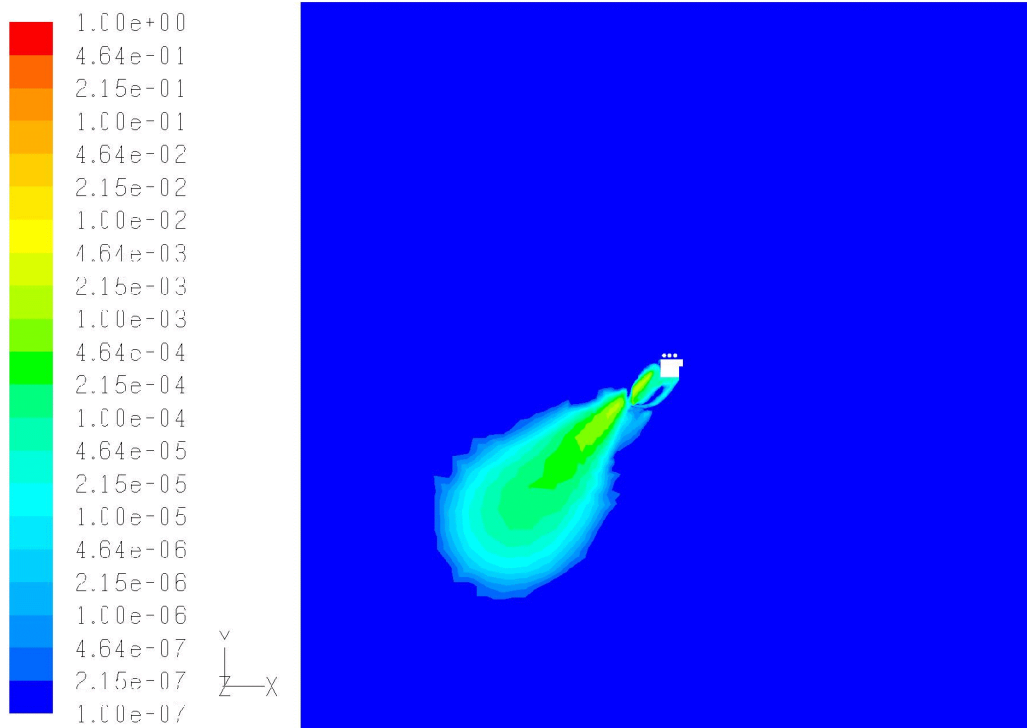
A stationárius áramlás jellemzői és a szennyezőanyag-terjedés északkeleti szél esetén



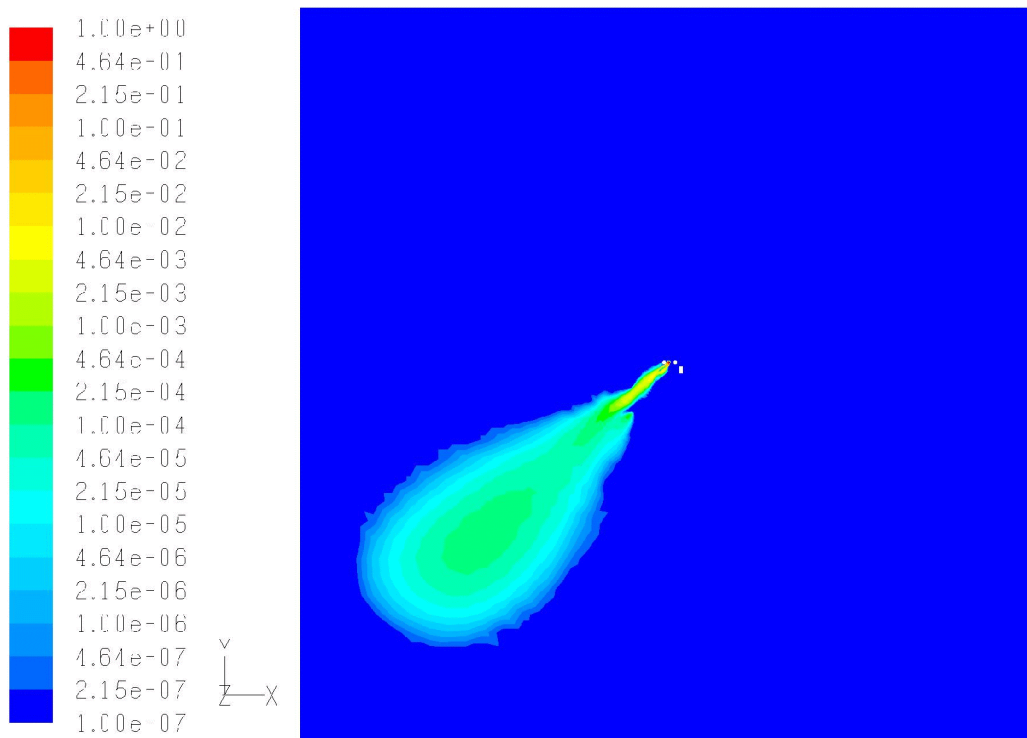
10/a ábra. A sebességeloszlás 4 méteres magasságban az épületek közelében, északkeleti szél esetén.



10/b ábra. A dimenziótlan turbulencia intenzitás 4 méteres magasságban az épületek közelében, északkeleti szél esetén.

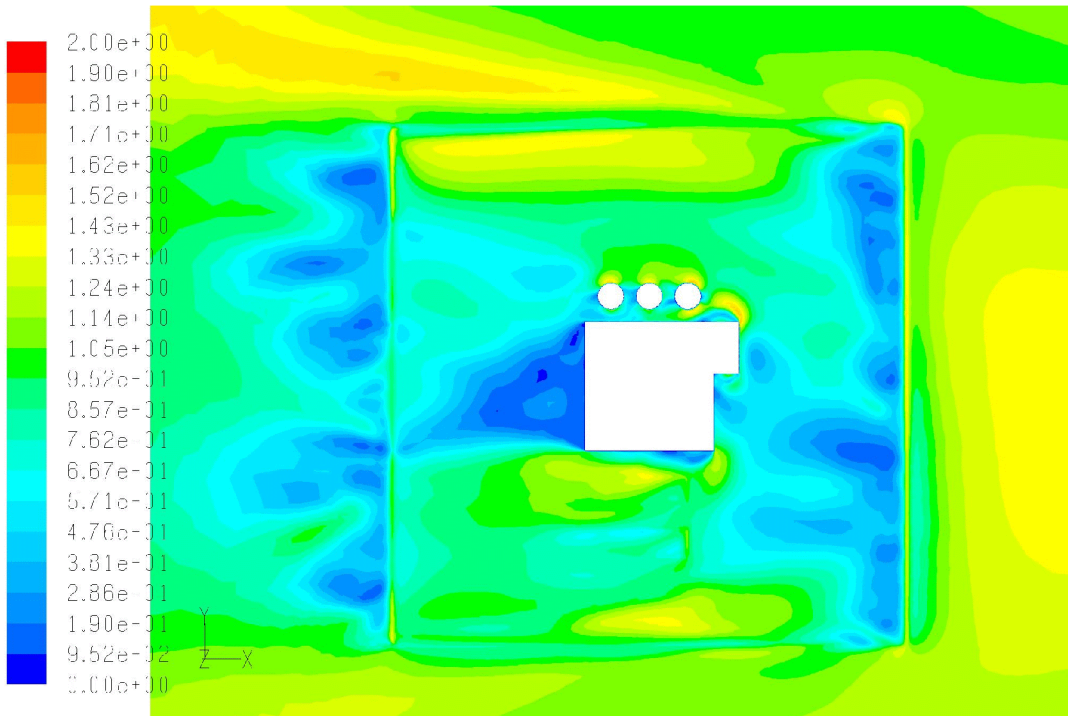


10/c ábra. A dimenziótlan koncentráció eloszlás 4 méteres magasságban, északkeleti szél esetén.

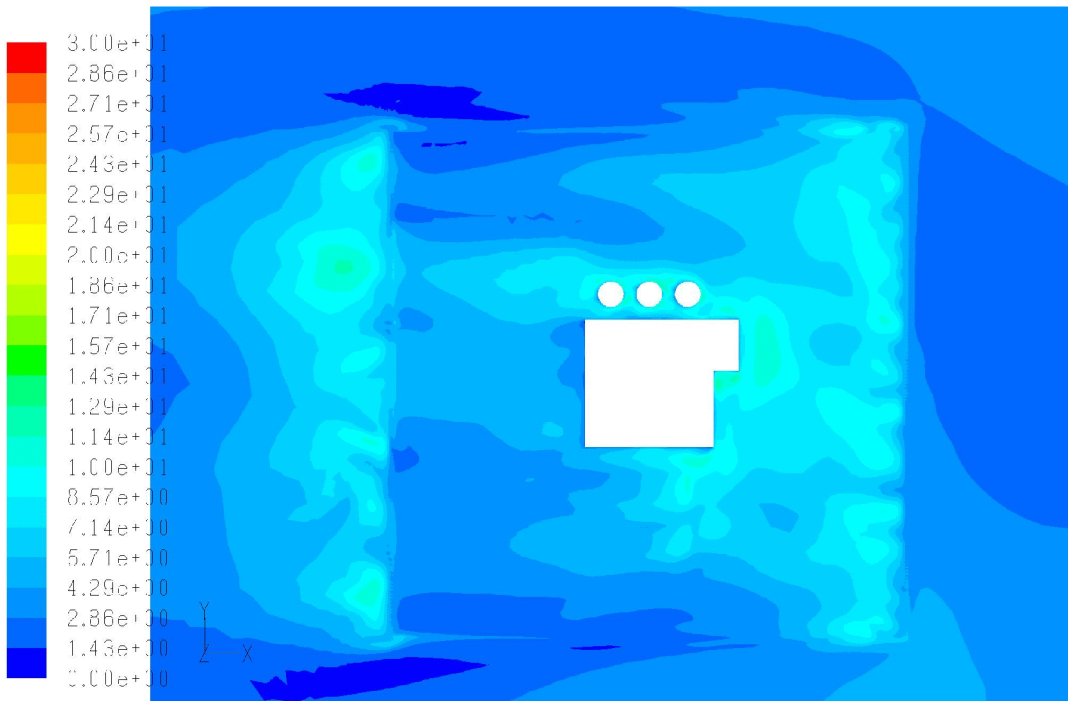


10/d ábra. A dimenziótlan koncentráció eloszlás 15 méteres magasságban, északkeleti szél esetén.

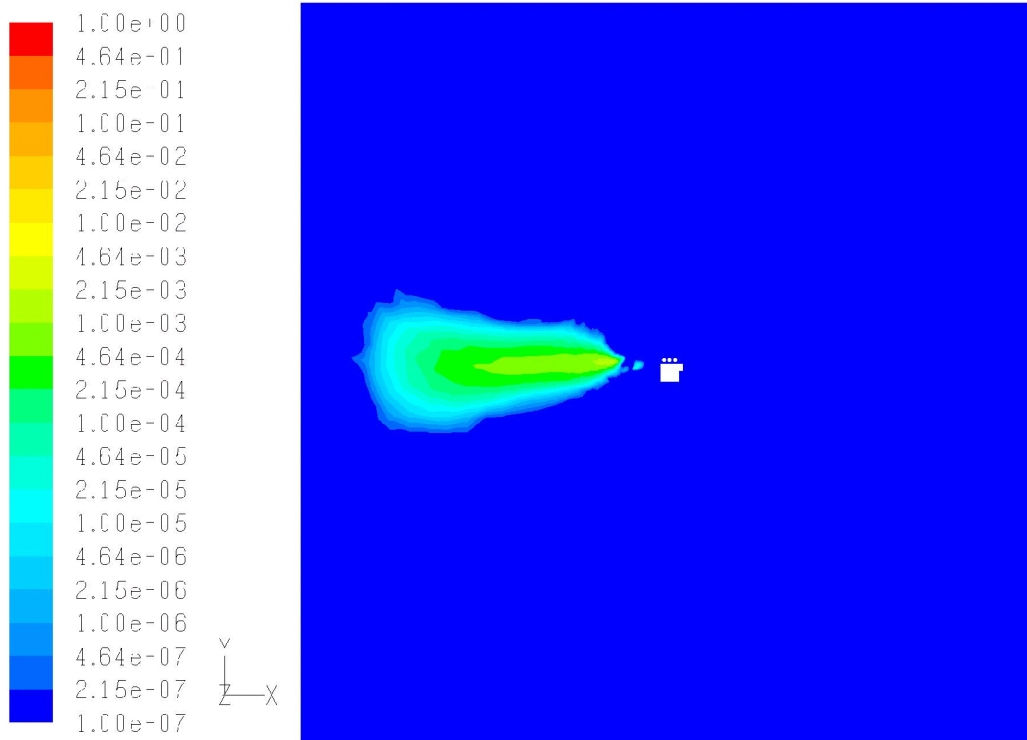
**A stationárius áramlás jellemzői és a szennyezőanyag-terjedés
keleti szél esetén**



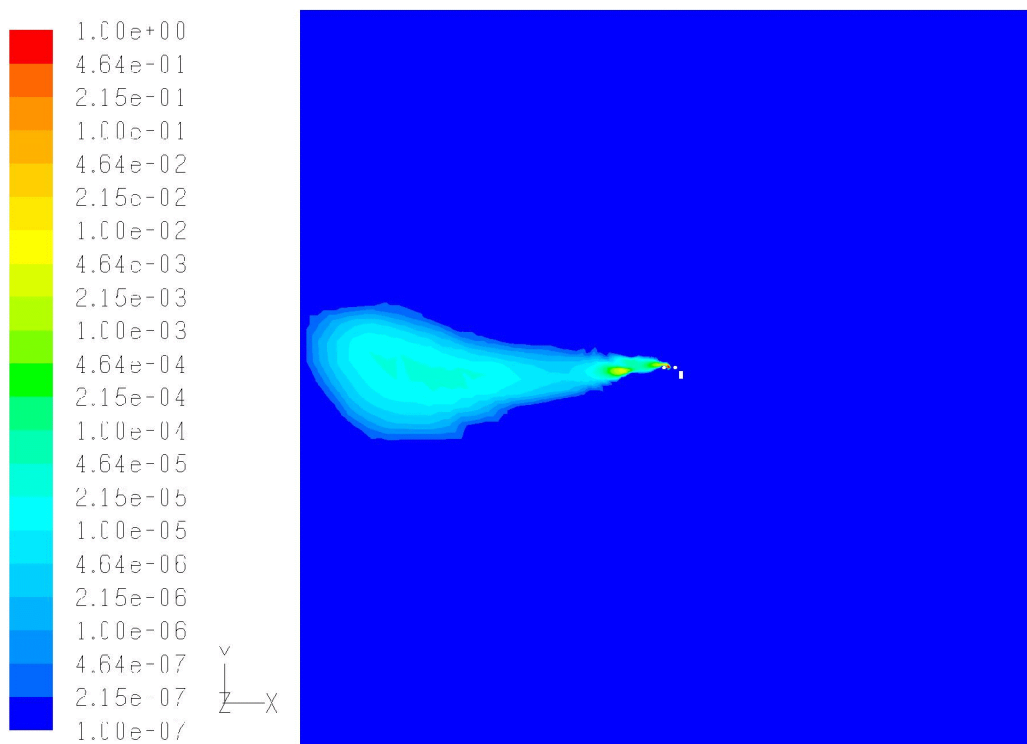
**11/a ábra. A sebességeloszlás 4 méteres magasságban az épületek közelében,
keleti szél esetén.**



**11/b ábra. A dimenziótlan turbulencia intenzitás 4 méteres magasságban az épületek
közelében, keleti szél esetén.**

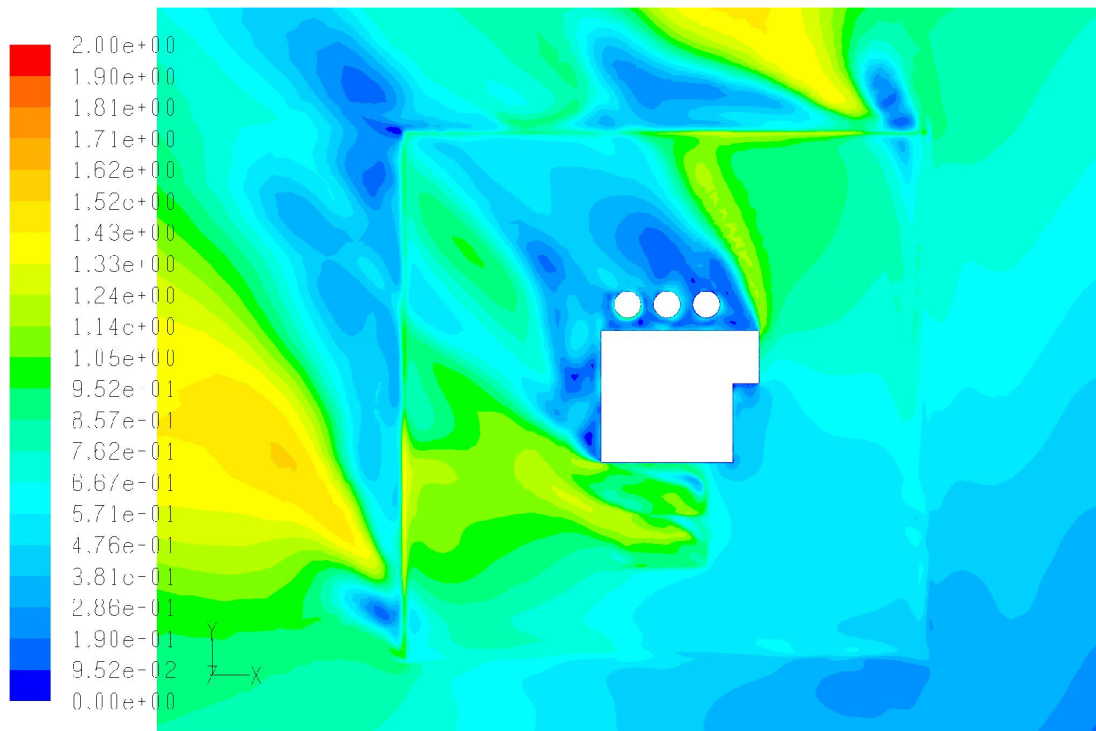


11/c ábra. A dimenziótlan koncentráció eloszlás 4 méteres magasságban, keleti szél esetén.



11/d ábra. A dimenziótlan koncentráció eloszlás 15 méteres magasságban, keleti szél esetén.

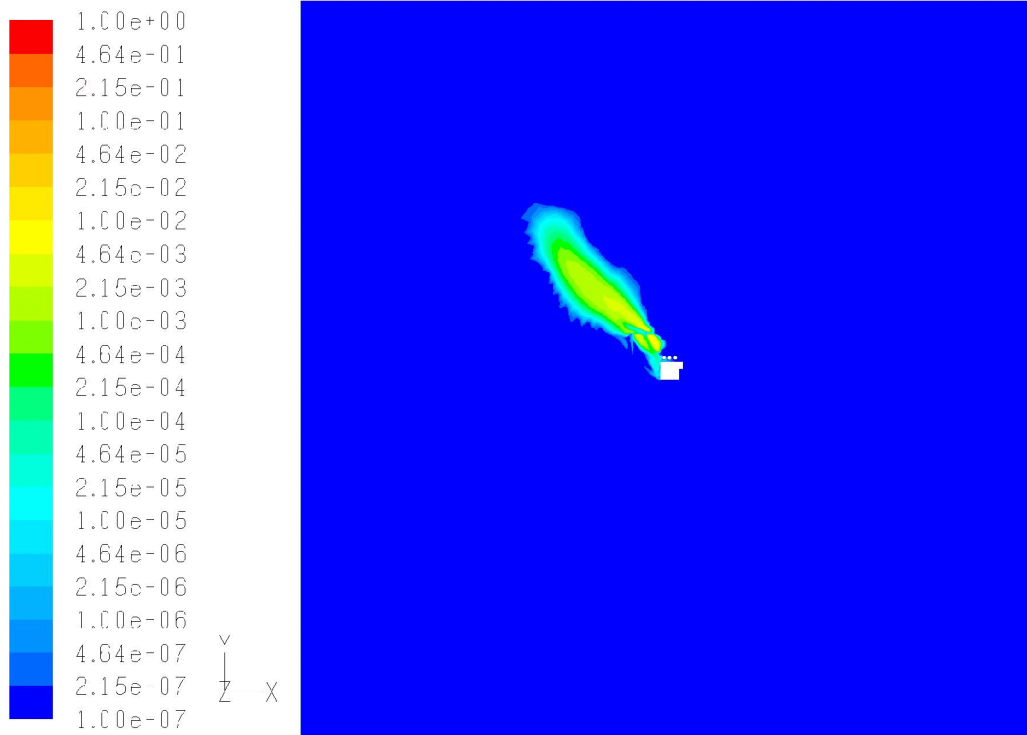
A stacionárius áramlás jellemzői és a szennyezőanyag-terjedés délkeleti szél esetén



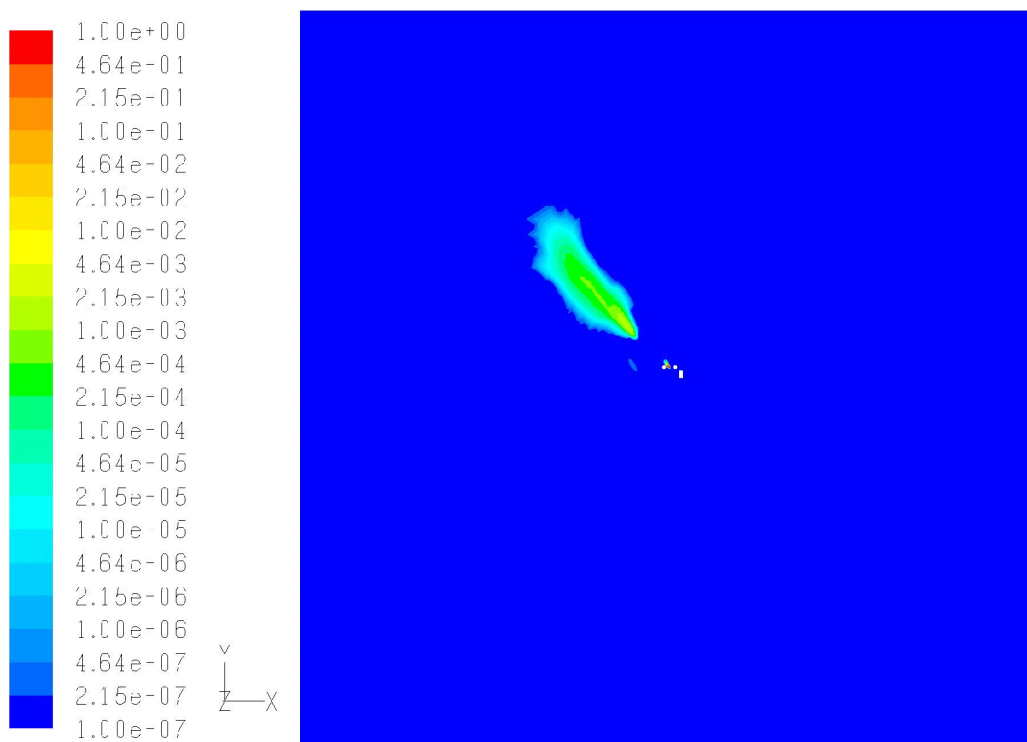
12/a ábra. A sebességeloszlás 4 méteres magasságban az épületek közelében, délkeleti szél esetén.



12/b ábra. A dimenziótlan turbulencia intenzitás 4 méteres magasságban az épületek közelében, délkeleti szél esetén.

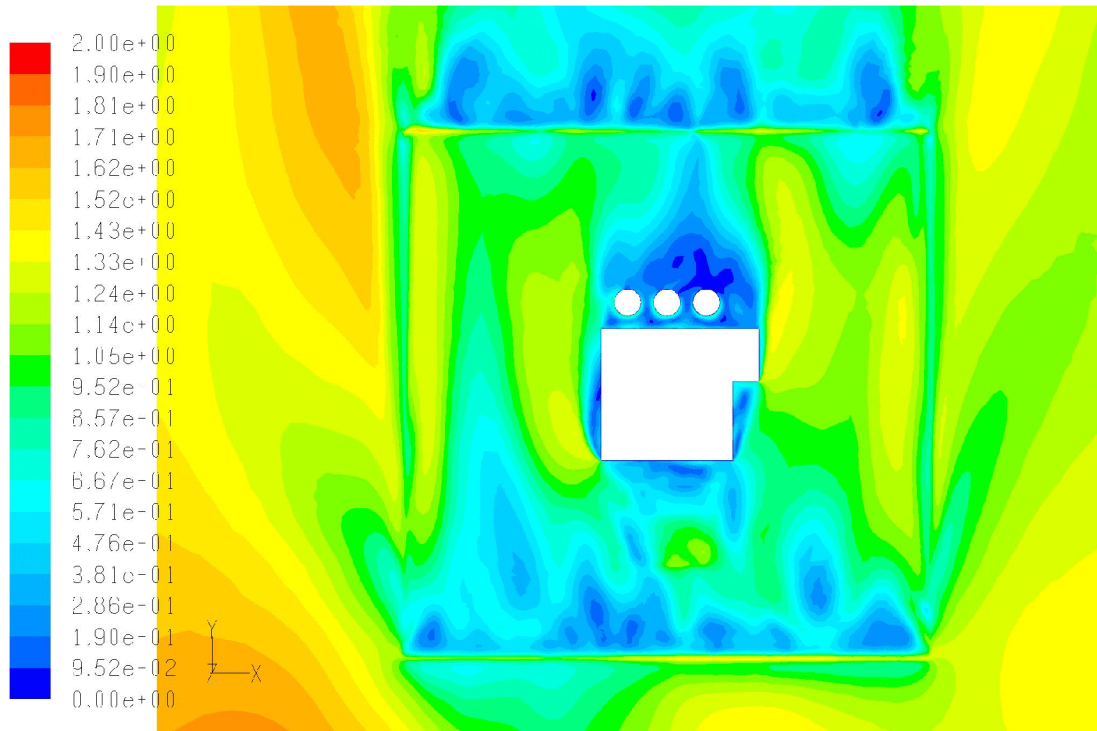


12/c ábra. A dimenziótlan koncentráció eloszlás 4 méteres magasságban, délkeleti szél esetén.

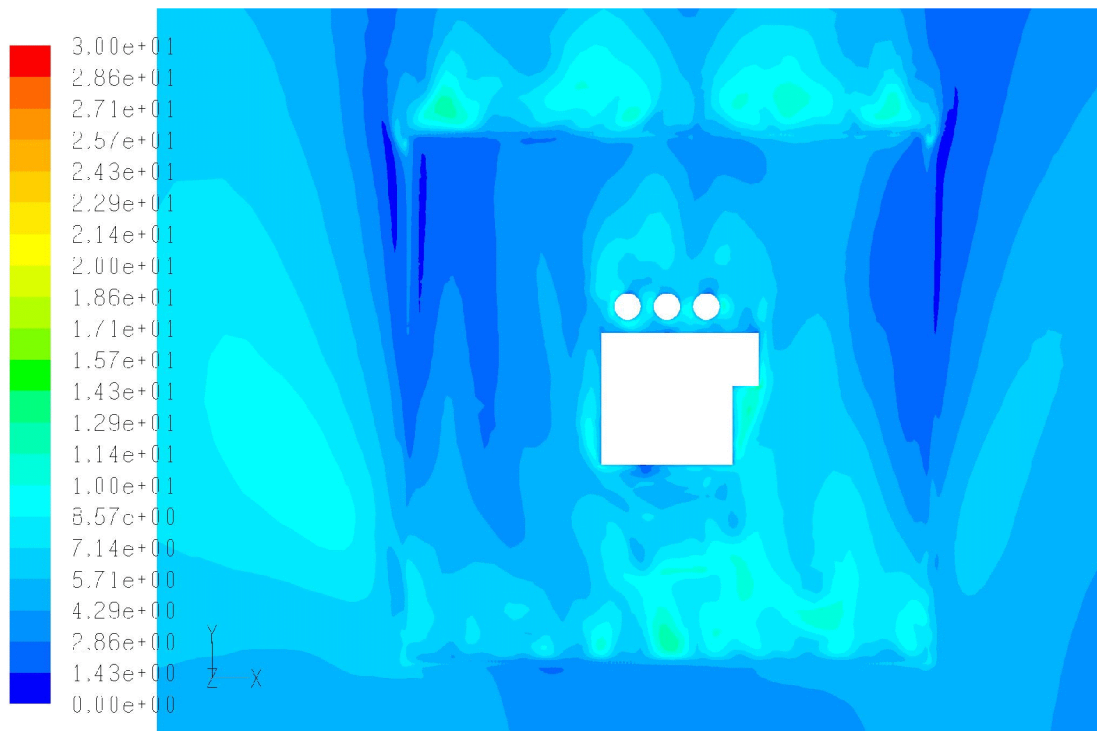


12/d ábra. A dimenziótlan koncentráció eloszlás 15 méteres magasságban, délkeleti szél esetén.

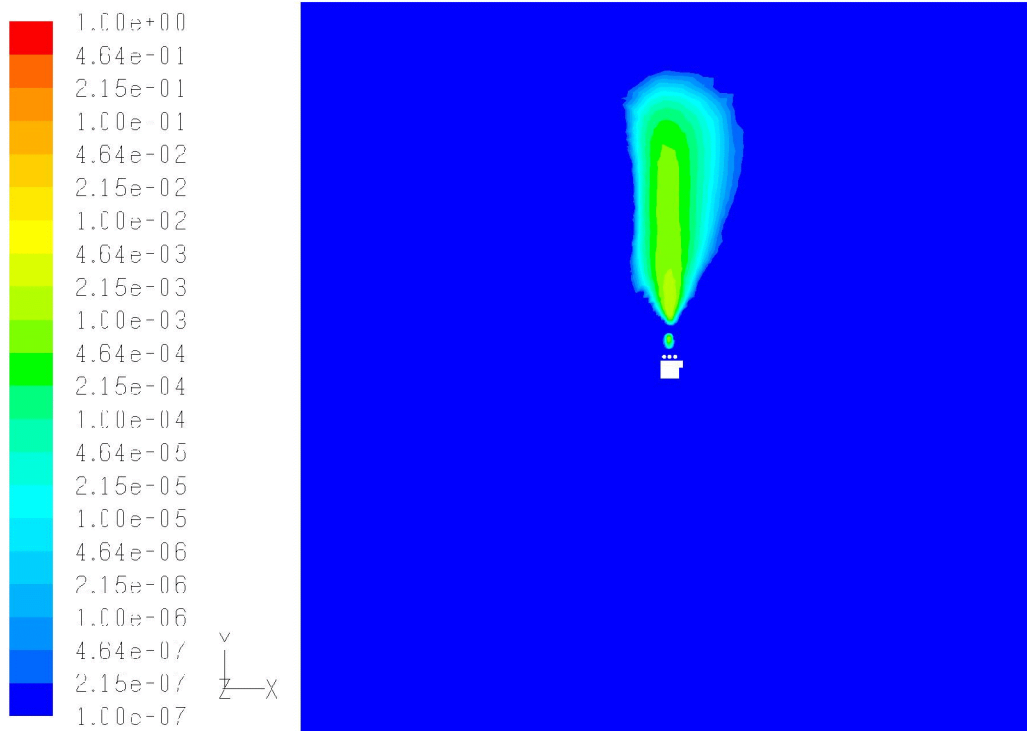
**A stationárius áramlás jellemzői és a szennyezőanyag-terjedés
déli szél esetén**



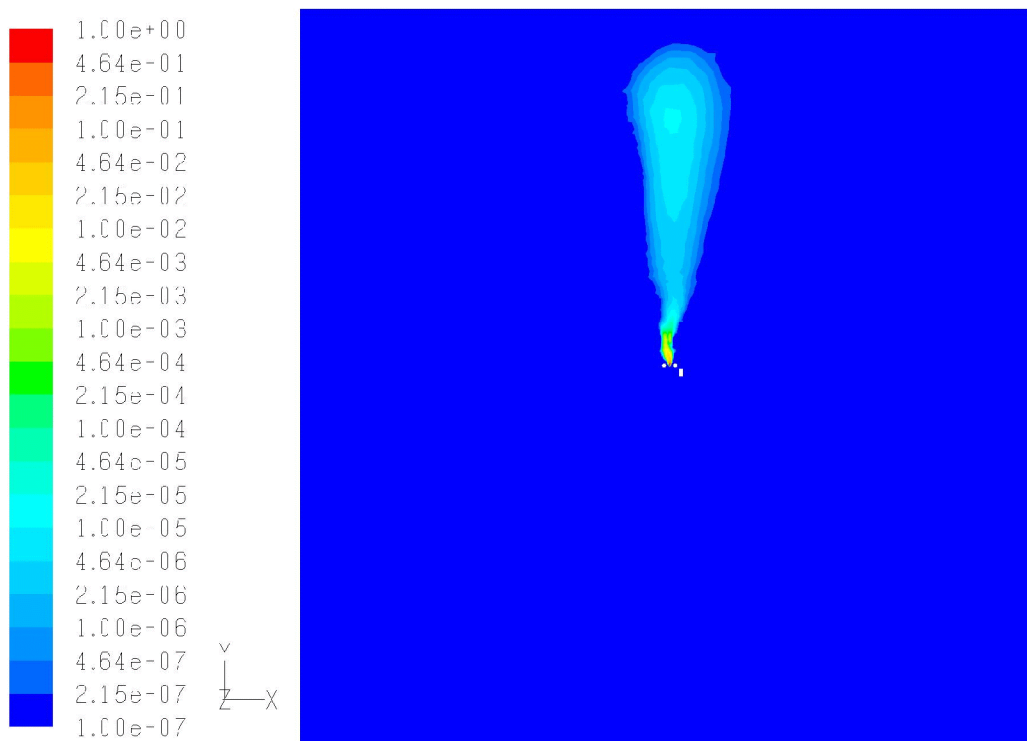
**13/a ábra. A sebességeloszlás 4 méteres magasságban az épületek közelében,
déli szél esetén.**



**13/b ábra. A dimenziótlan turbulencia intenzitás 4 méteres magasságban az épületek
közelében, északi szél esetén.**

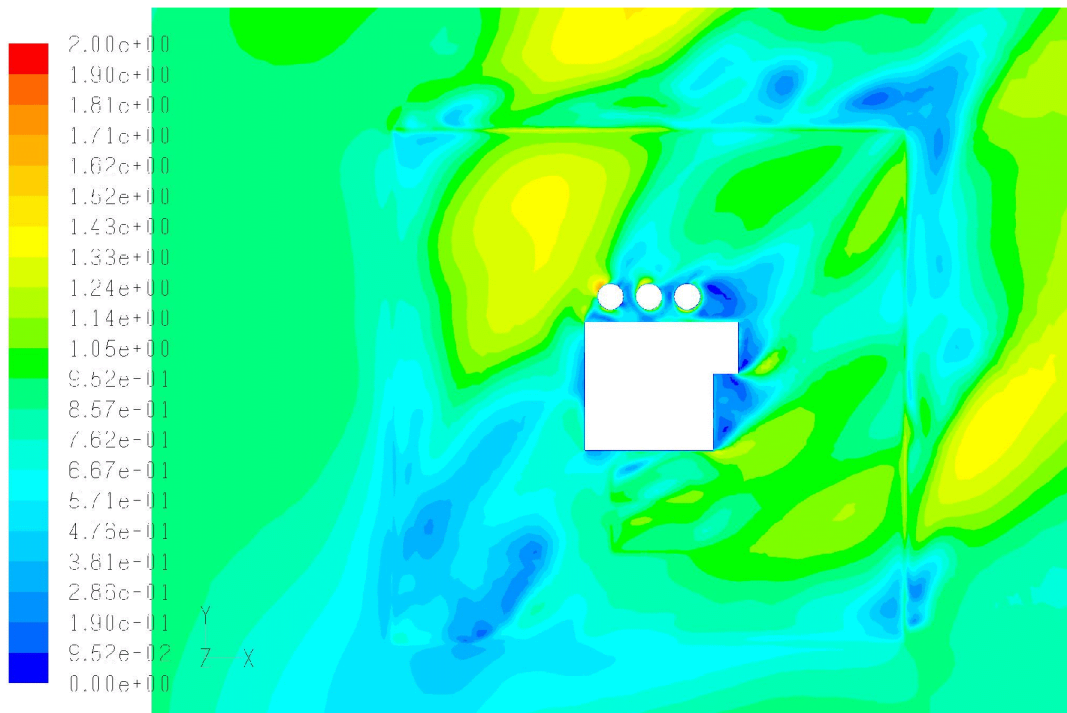


13/c ábra. A dimenziótlan koncentráció eloszlás 4 méteres magasságban, déli szél esetén.

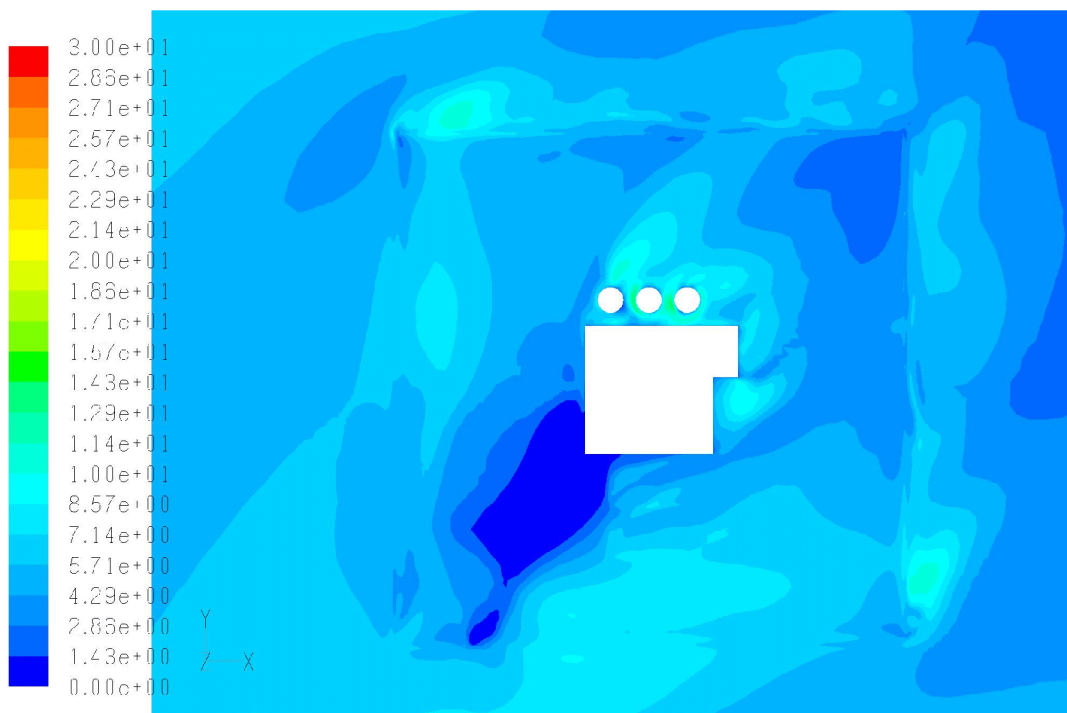


13/d ábra. A dimenziótlan koncentráció eloszlás 15 méteres magasságban, déli szél esetén.

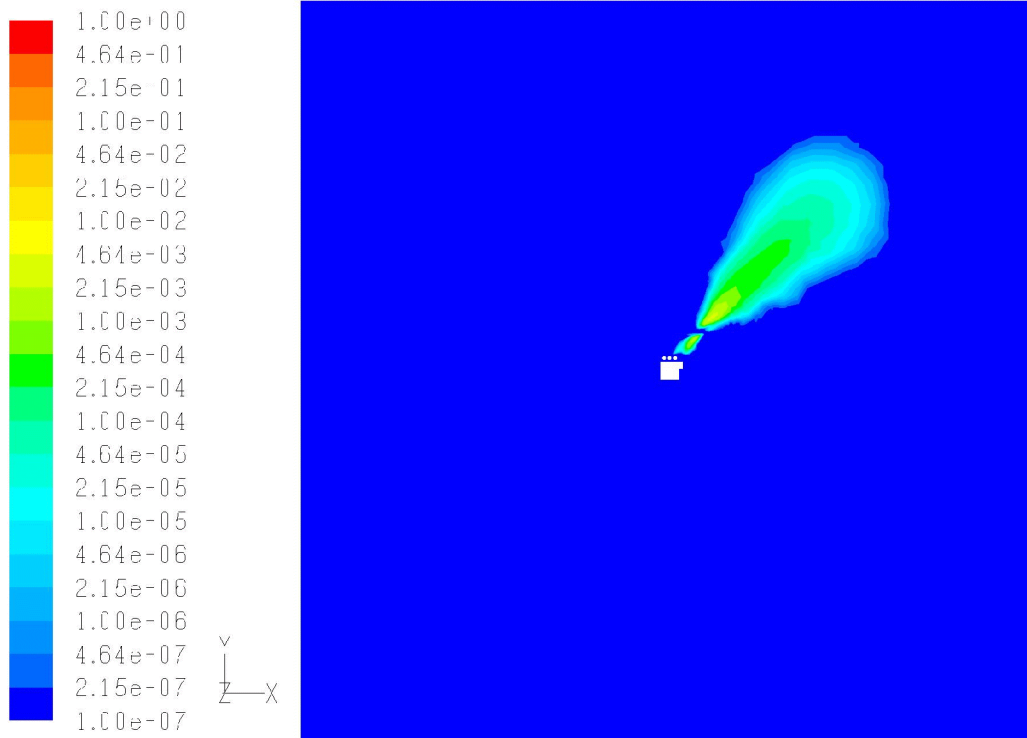
A stacionárius áramlás jellemzői és a szennyezőanyag-terjedés délnyugati szél esetén



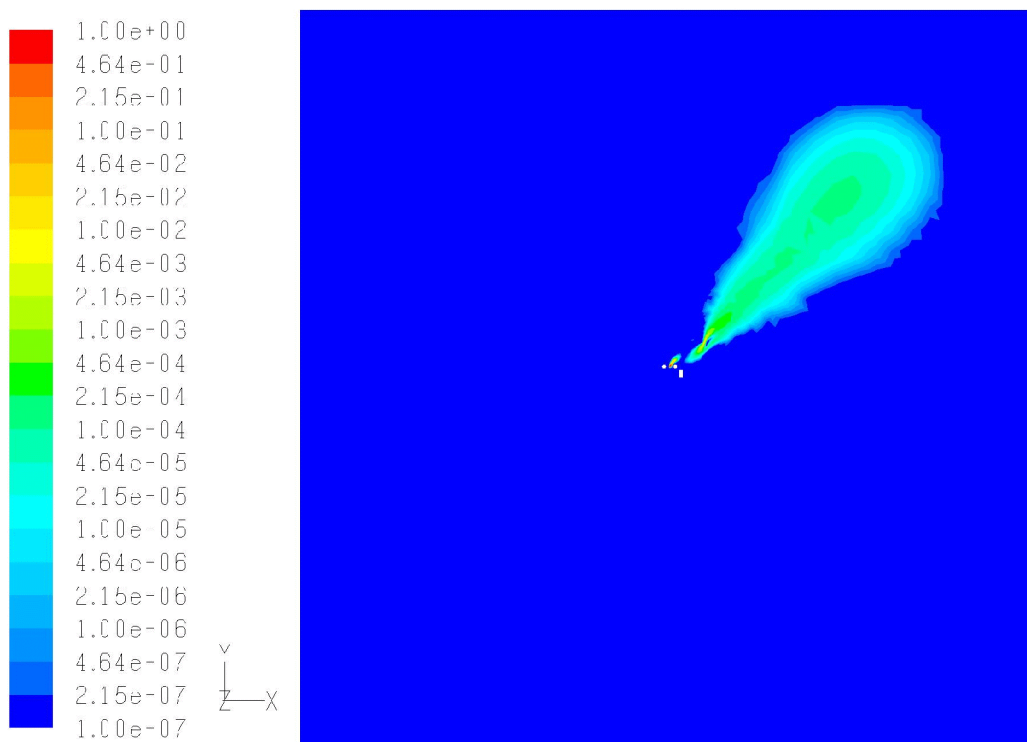
14/a ábra. A sebességeloszlás 4 méteres magasságban az épületek közelében, délnyugati szél esetén.



14/b ábra. A dimenziótlan turbulencia intenzitás 4 méteres magasságban az épületek közelében, délnyugati szél esetén.

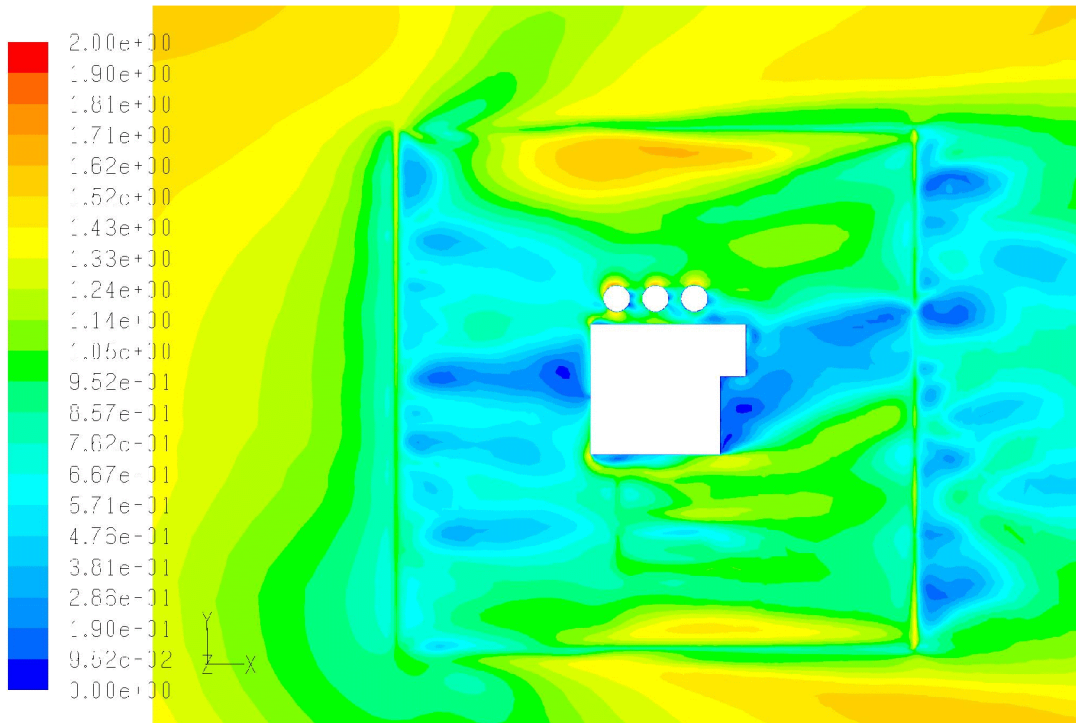


14/c ábra. A dimenziótlan koncentráció eloszlás 4 méteres magasságban, délnyugati szél esetén.

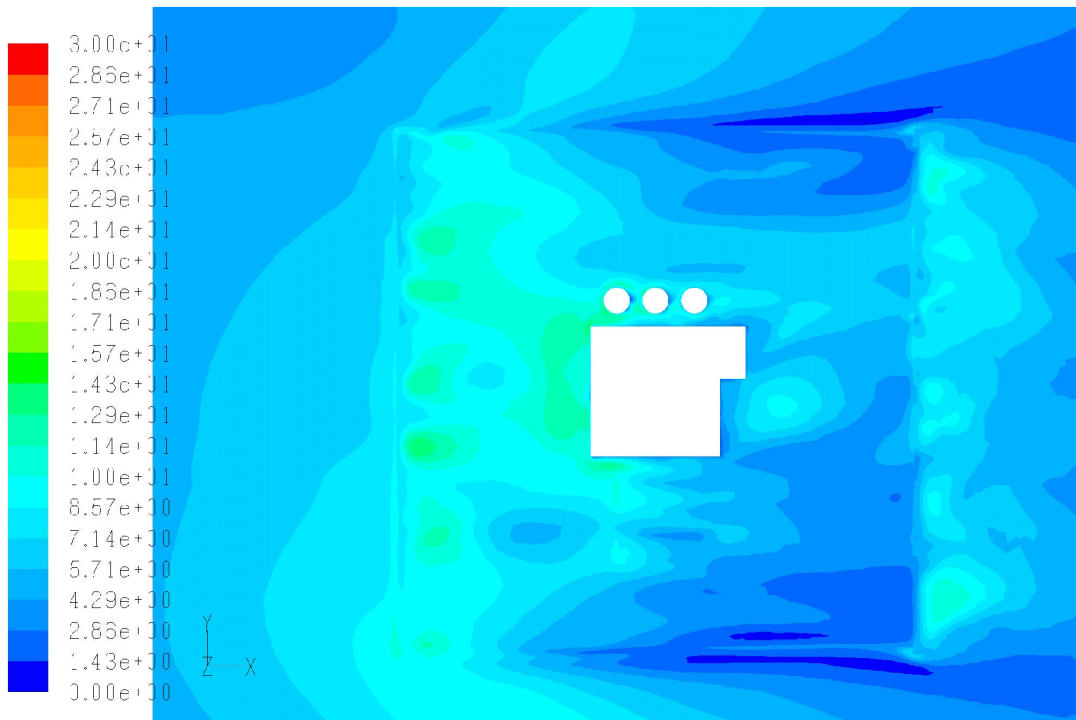


14/d ábra. A dimenziótlan koncentráció eloszlás 15 méteres magasságban, délnyugati szél esetén.

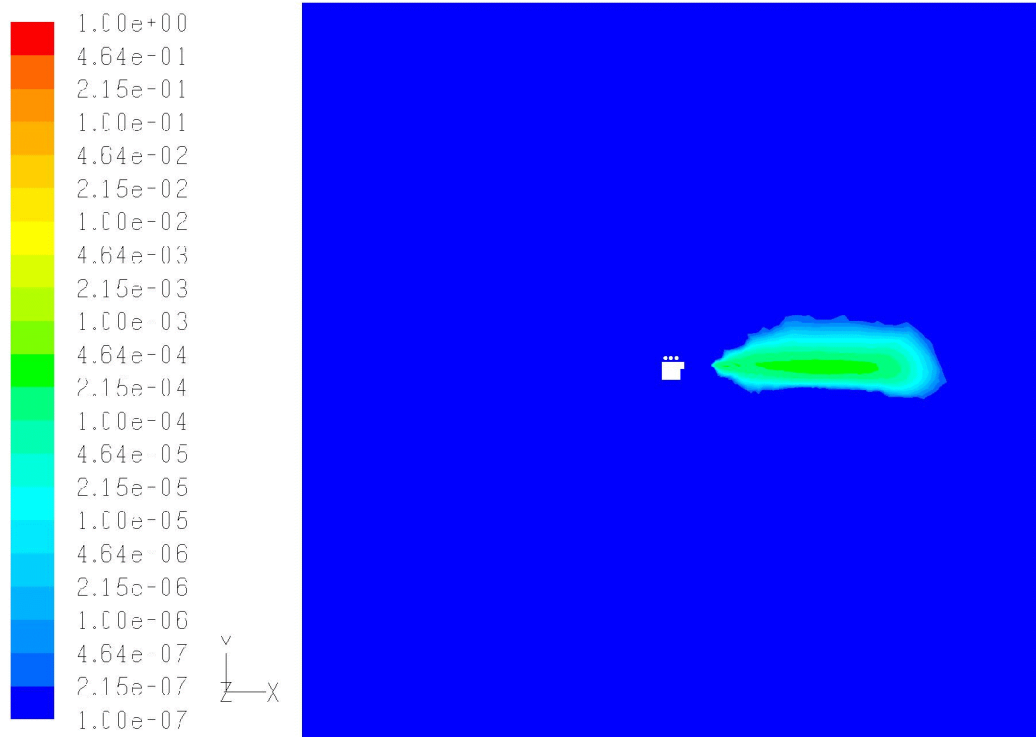
A stationárius áramlás jellemzői és a szennyezőanyag-terjedés nyugati szél esetén



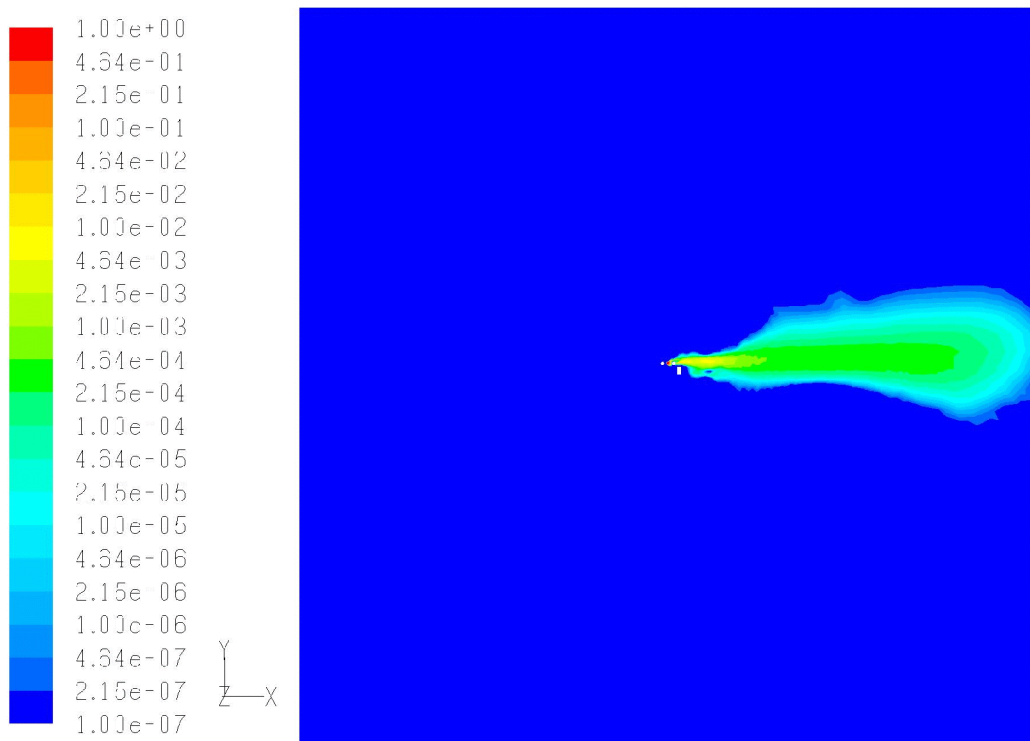
15/a ábra. A sebességeloszlás 4 méteres magasságban az épületek közelében, nyugati szél esetén.



15/b ábra. A dimenziótlan turbulencia intenzitás 4 méteres magasságban az épületek közelében, nyugati szél esetén.

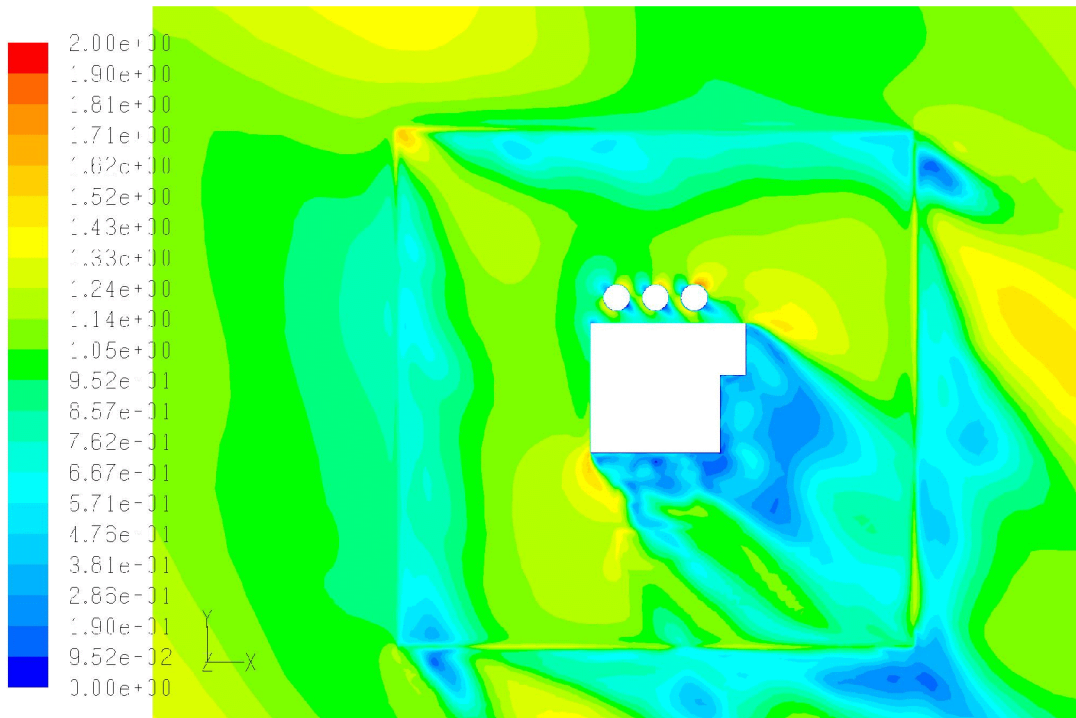


15/c ábra. A dimenziótlan koncentráció eloszlás 4 méteres magasságban, nyugati szél esetén.

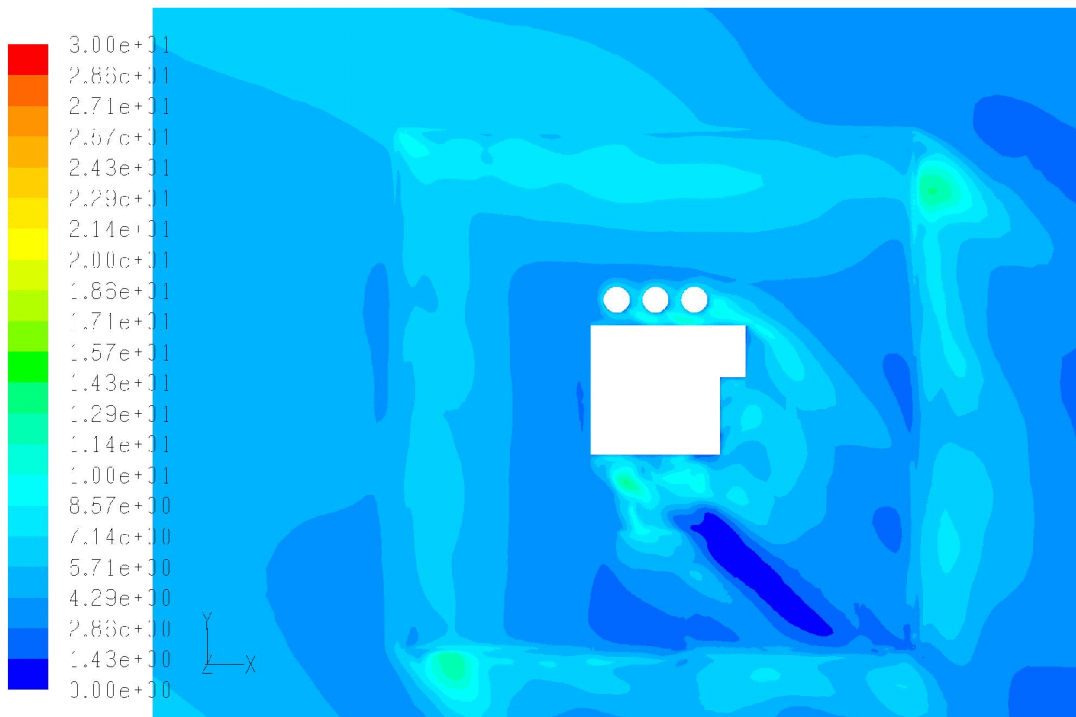


15/d ábra. A dimenziótlan koncentráció eloszlás 15 méteres magasságban, nyugati szél esetén.

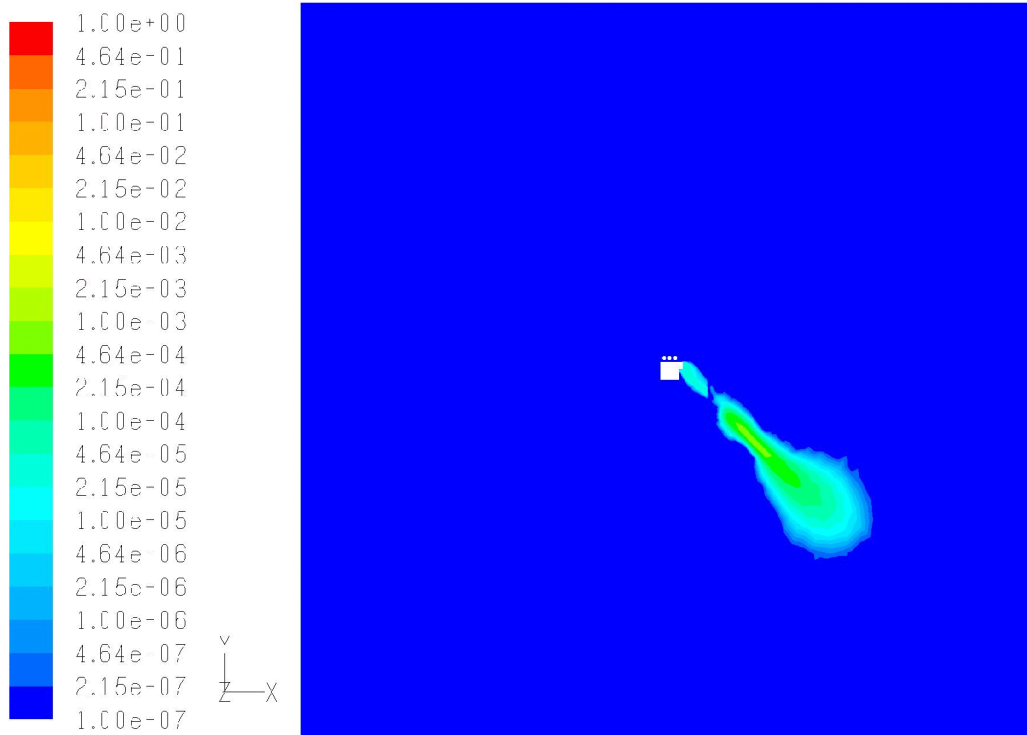
A stacionárius áramlás jellemzői és a szennyezőanyag-terjedés északnyugati szél esetén



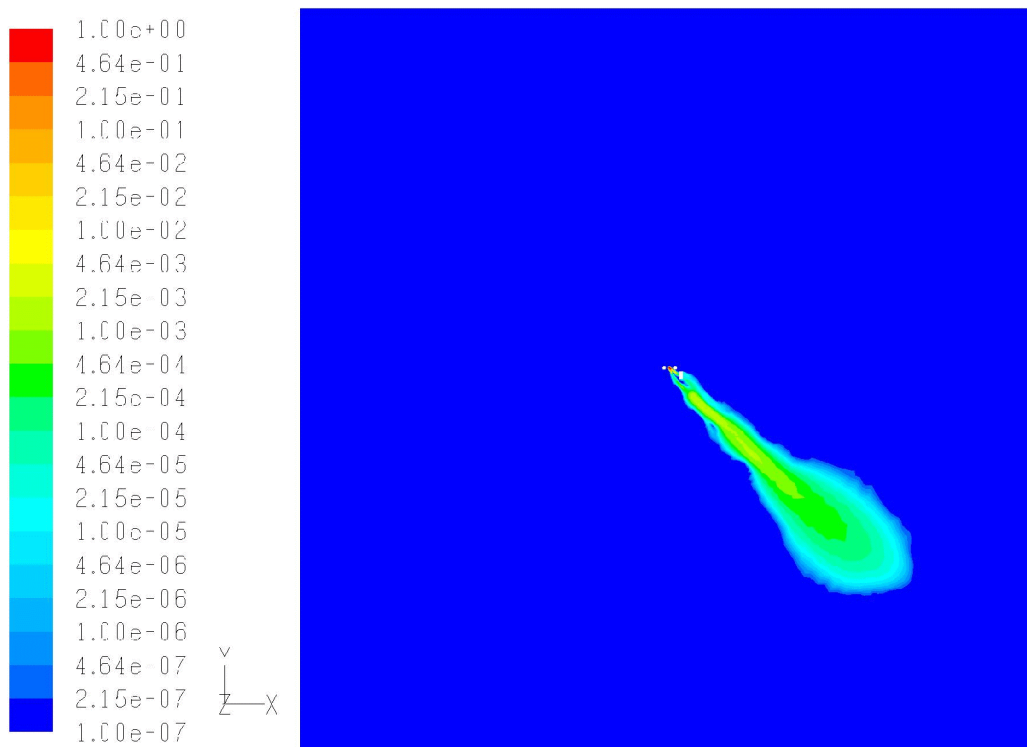
16/a ábra. A sebességeloszlás 4 méteres magasságban az épületek közelében, északnyugati szél esetén.



16/b. ábra. A dimenziótlan turbulencia intenzitás 4 méteres magasságban az épületek közelében, északnyugati szél esetén.

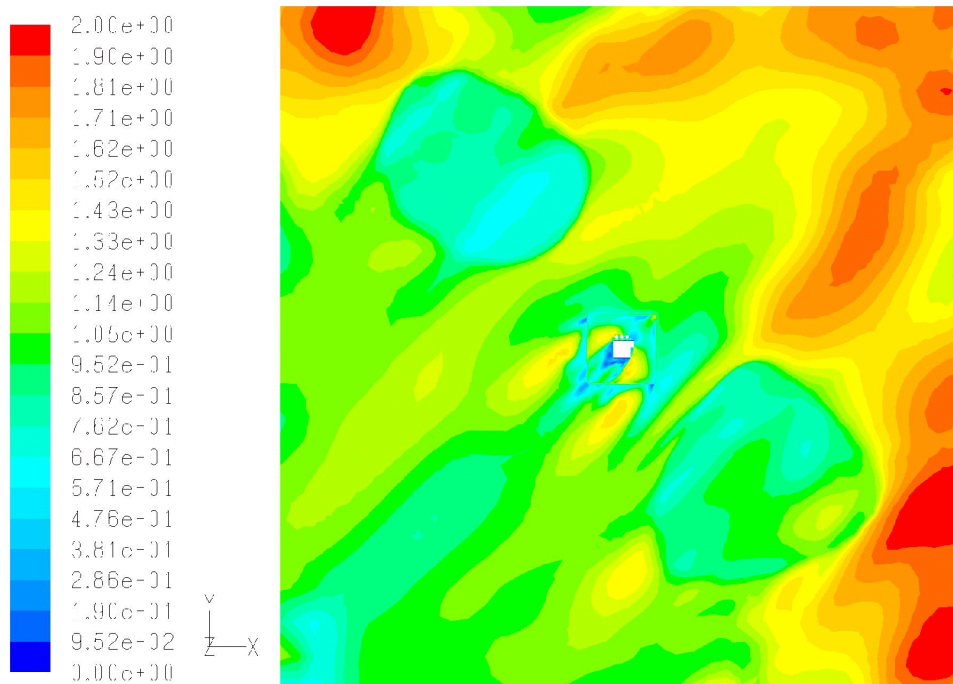


16/c ábra. A dimenziótlan koncentráció eloszlás 4 méteres magasságban, északnyugati szél esetén.

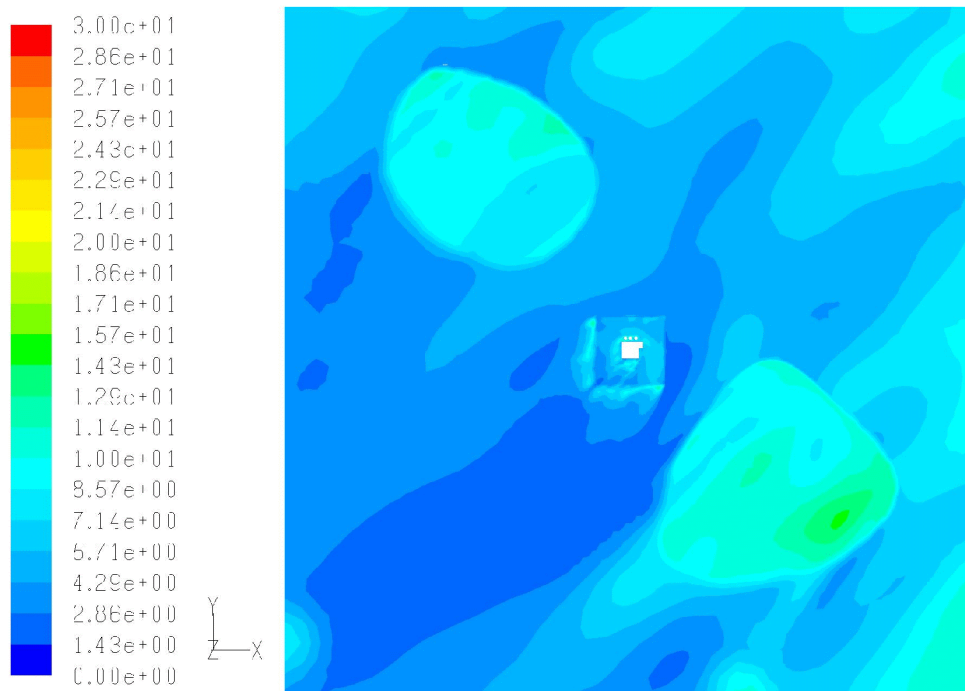


16/d ábra. A dimenziótlan koncentráció eloszlás 15 méteres magasságban északnyugati szél esetén.

**A stacionárius áramlás jellemzői erdőállománnyal kiegészített modellben,
északkeleti szél esetén**

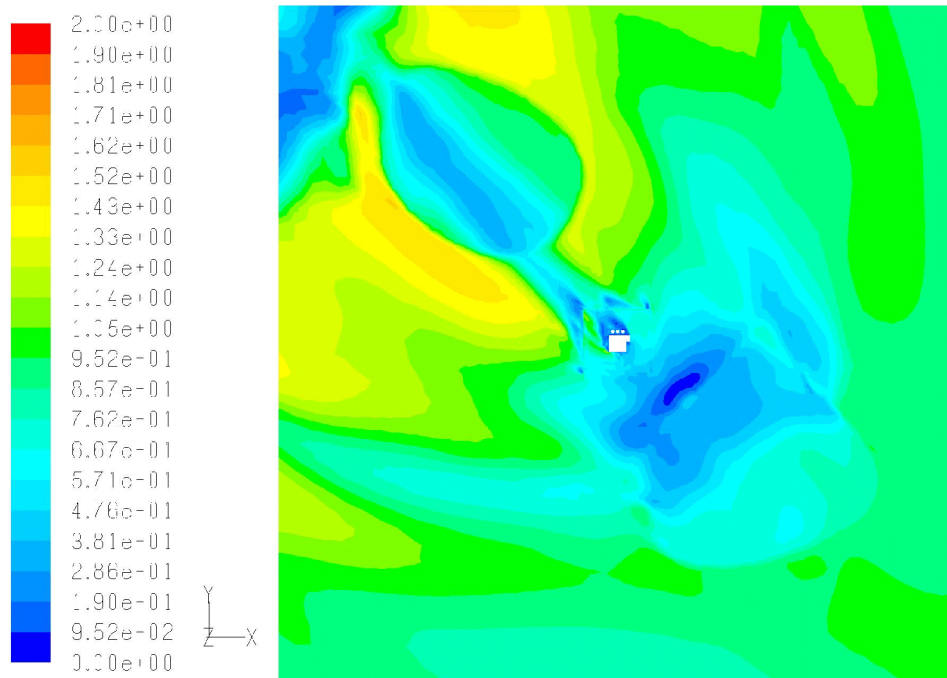


17/a ábra. A sebességeloszlás az erdőállománnyal kiegészített modellben 4 méteres magasságban, északkeleti szél esetén.

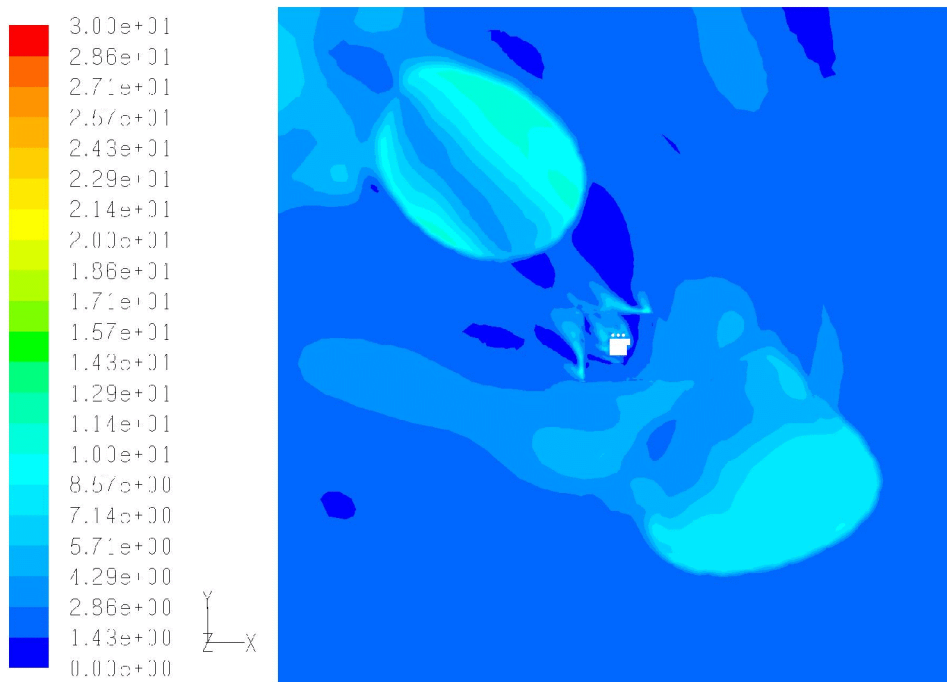


17/b ábra. A dimenziótlan turbulencia intenzitás az erdőállománnyal kiegészített modellben 4 méteres magasságban, északkeleti szél esetén.

**A stacionárius áramlás jellemzői erdőállománnyal kiegészített modellben,
délkeleti szél esetén**

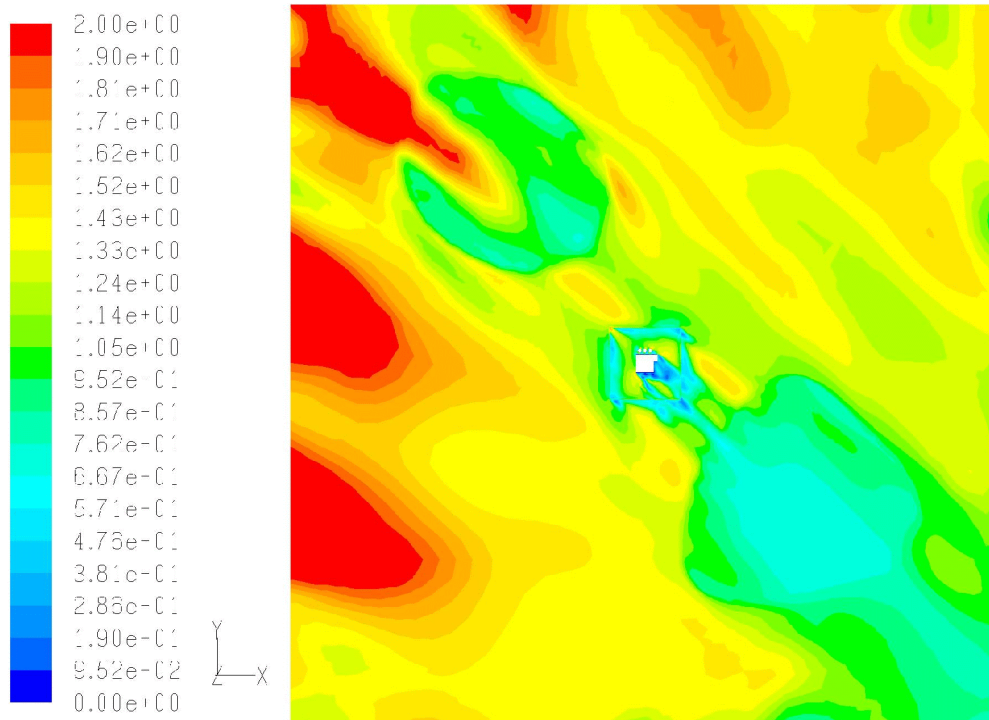


18/a ábra. A sebességeloszlás az erdőállománnyal kiegészített modellben 4 méteres magasságban, délkeleti szél esetén.

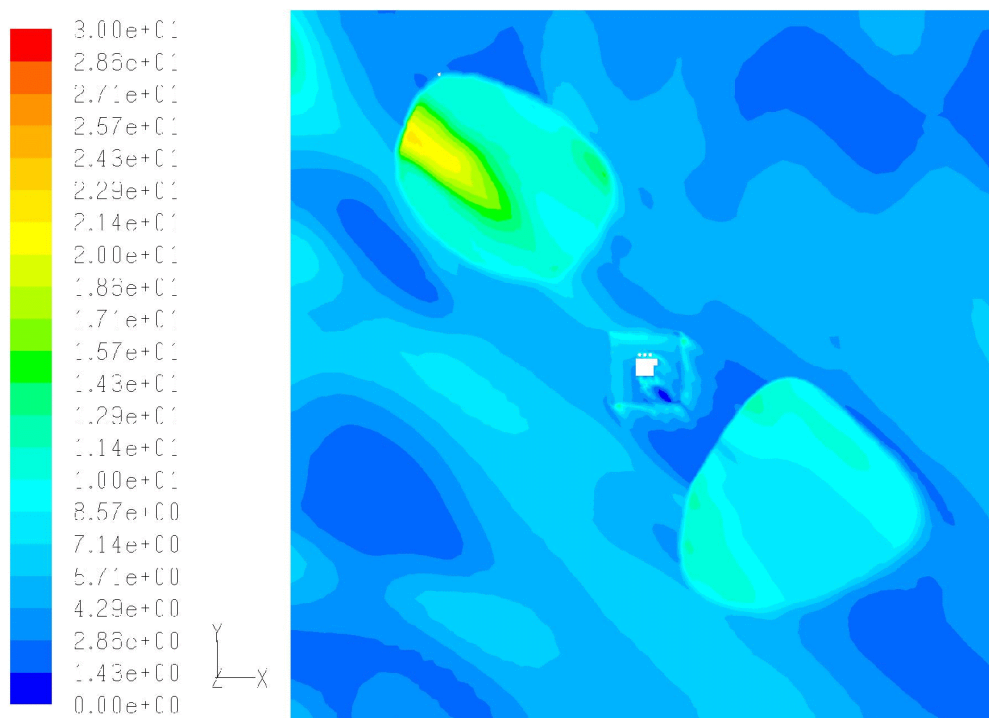


18/b ábra. A dimenziótlan turbulencia intenzitás az erdőállománnyal kiegészített modellben 4 méteres magasságban, északkeleti szél esetén.

**A stacionárius áramlás jellemzői erdőállománnyal kiegészített modellben,
északnyugati szél esetén**

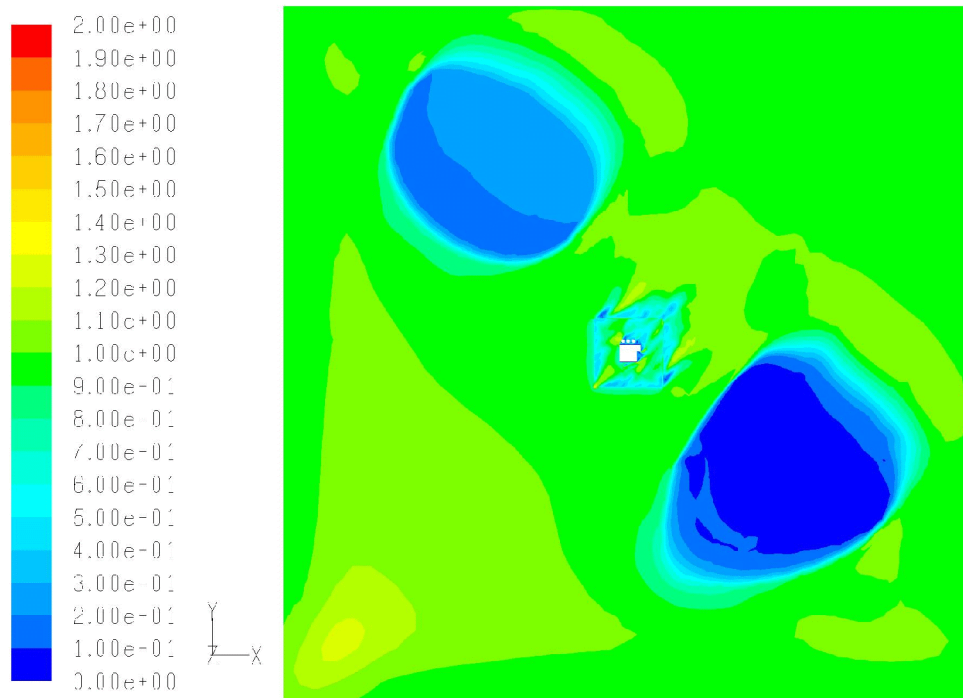


19/a ábra. A sebességeloszlás az erdőállománnyal kiegészített modellben 4 méteres magasságban, északnyugati szél esetén.

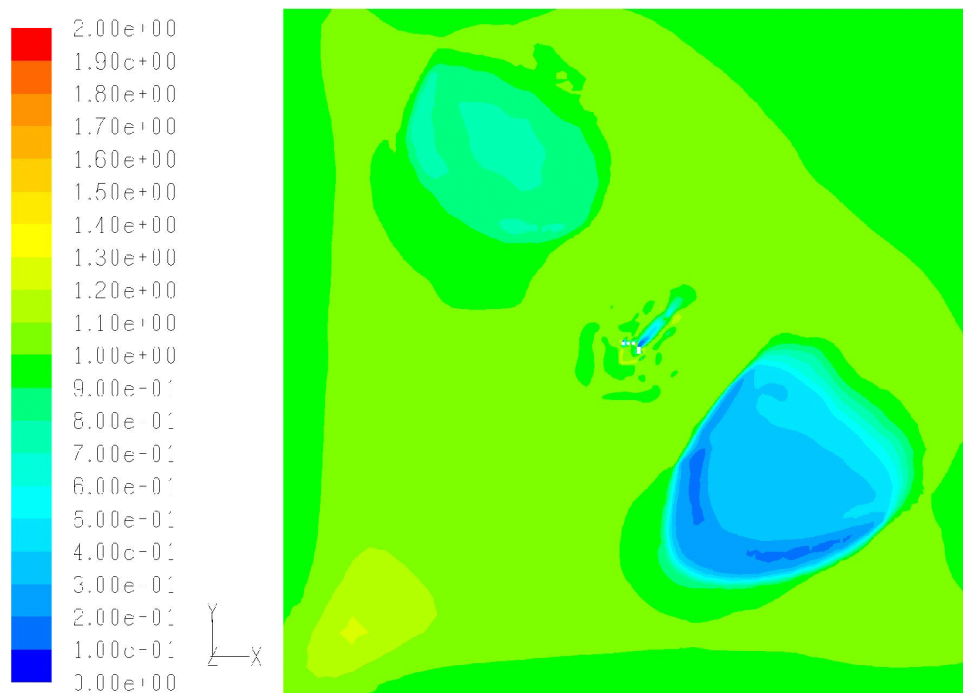


19/b ábra. A dimenziótlan turbulencia intenzitás az erdőállománnyal kiegészített modellben 4 méteres magasságban, északnyugati szél esetén.

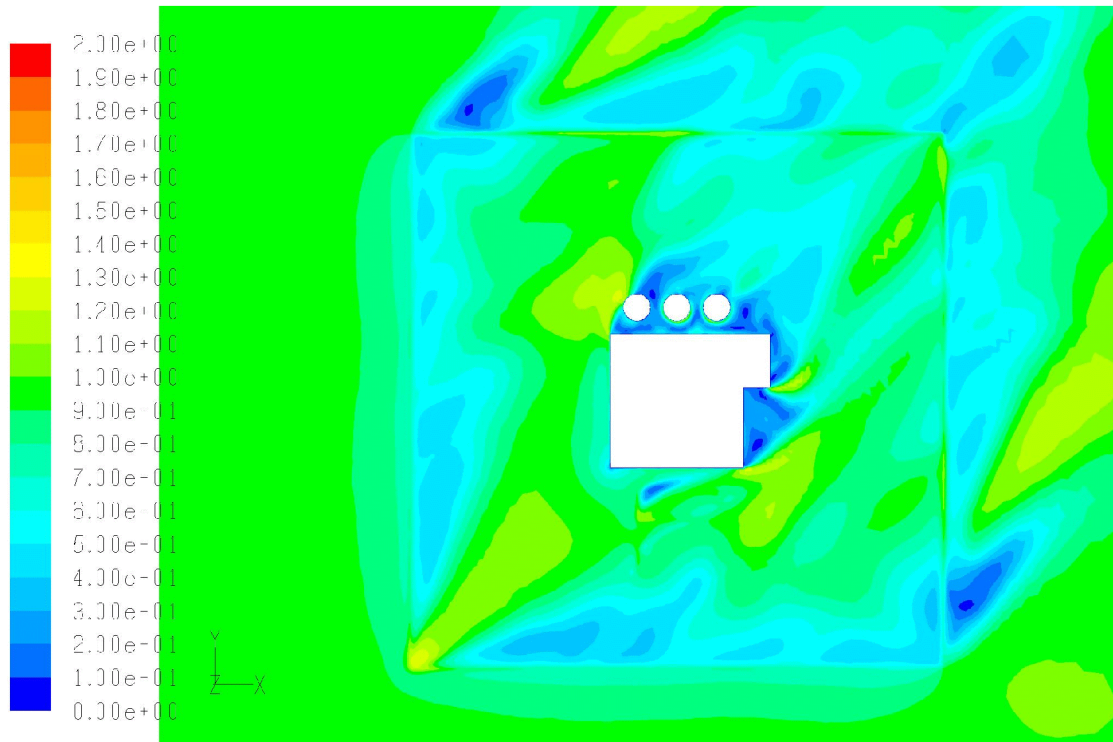
**Az időfüggő áramlás jellemzői és a szennyezőanyag-terjedés
erdőállománnyal kiegészített modellben, délnyugati szél esetén**



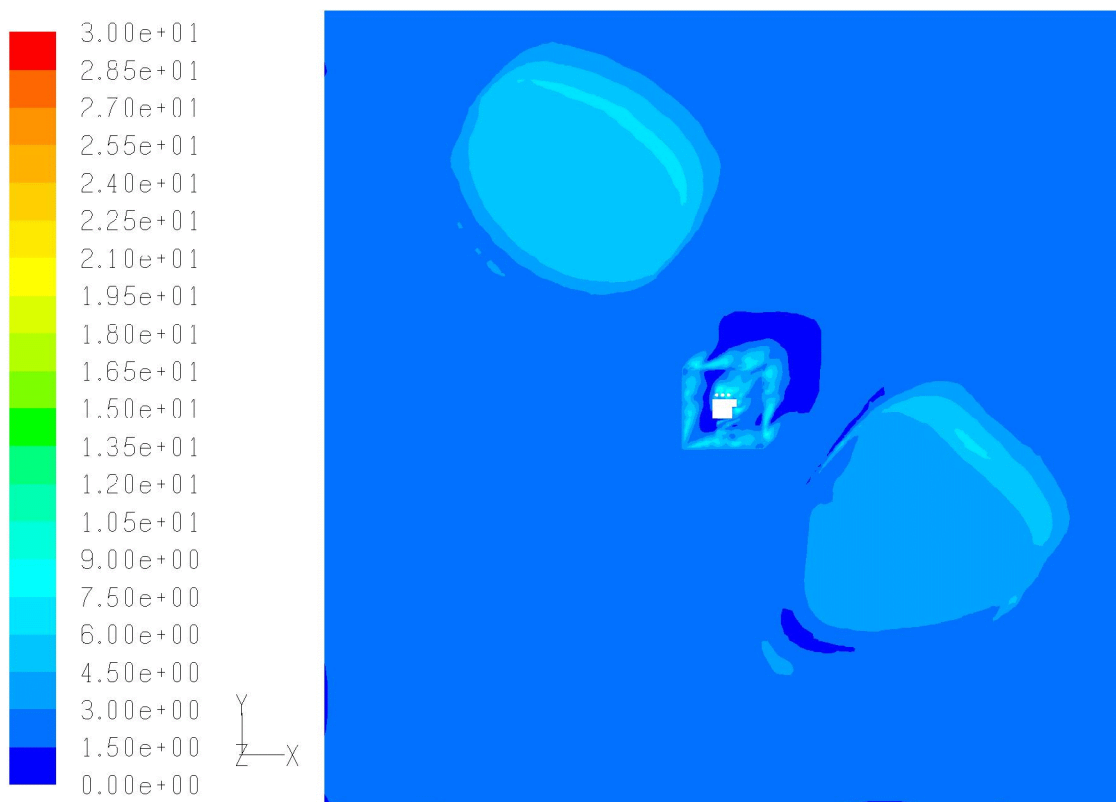
**20/a ábra. A sebességeloszlás 4 méteres magasságban, délnyugati szél esetén,
időfüggő esetben.**



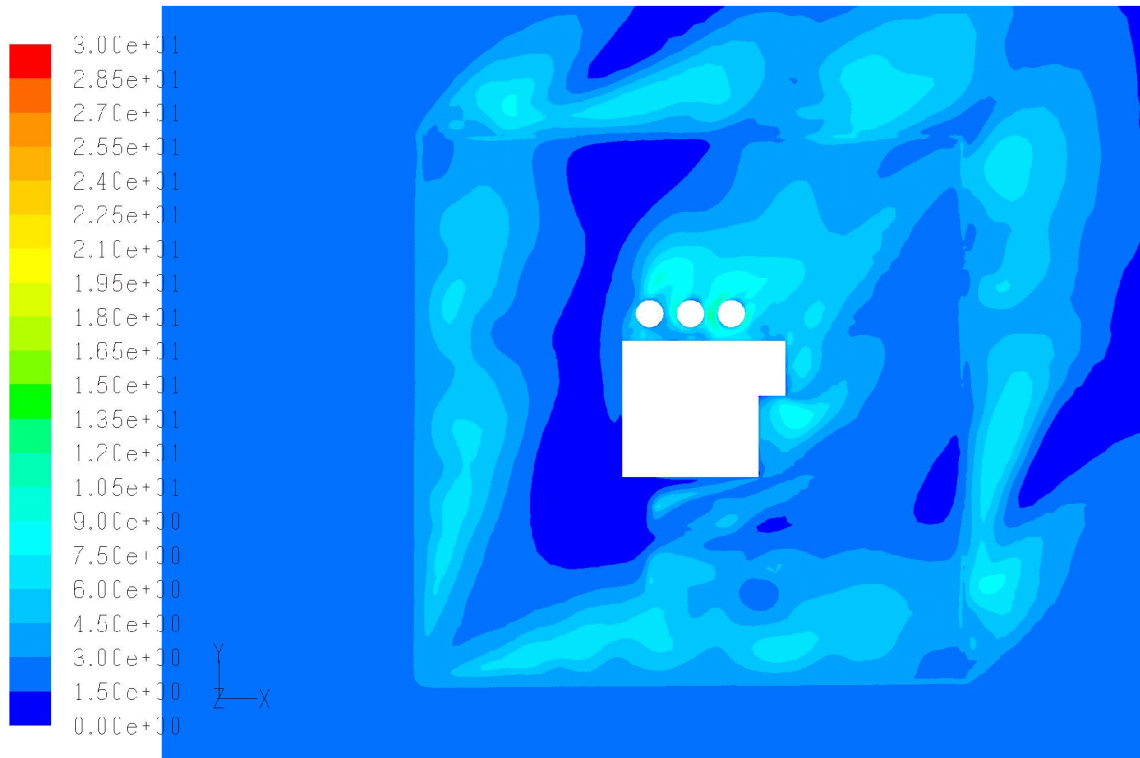
**20/b ábra. A sebességeloszlás 15 méteres magasságban, délnyugati szél esetén,
időfüggő esetben.**



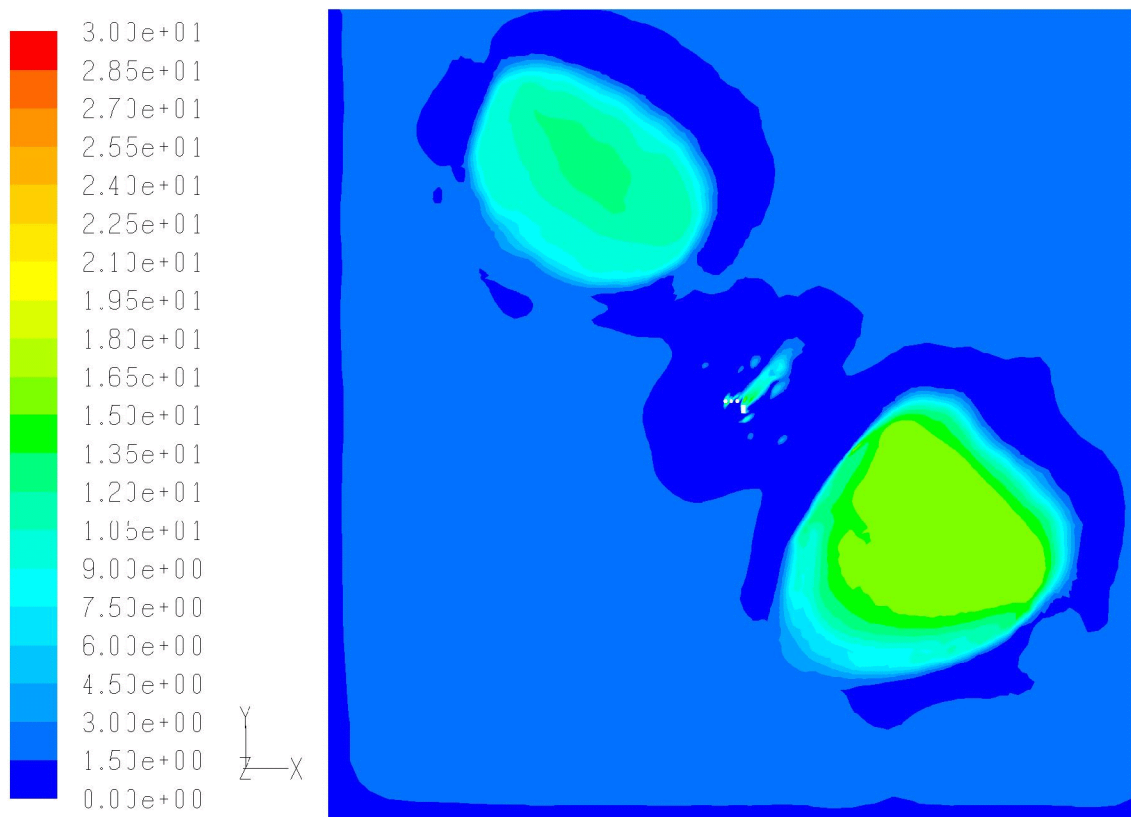
20/c ábra. A sebességeloszlás 4 méteres magasságban a falak közelében, délnyugati szél esetén, időfüggő esetben.



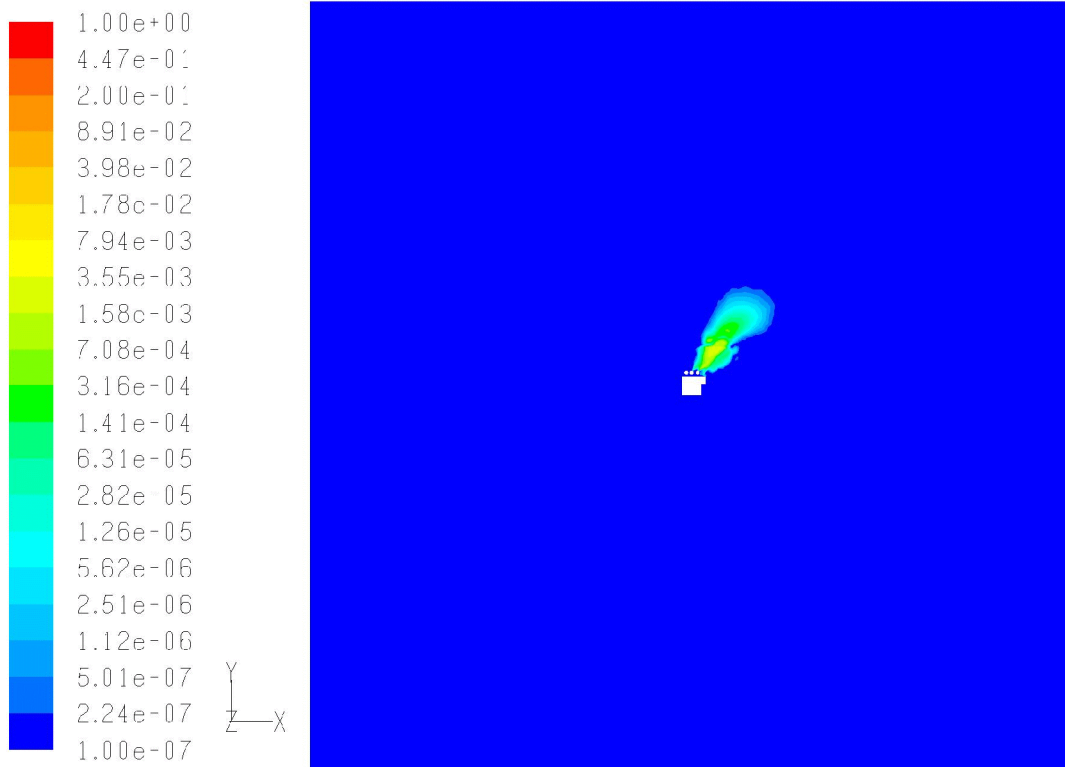
20/d ábra. A dimenziótlan turbulencia intenzitás 4 méteres magasságban, délnyugati szél esetén, időfüggő esetben.



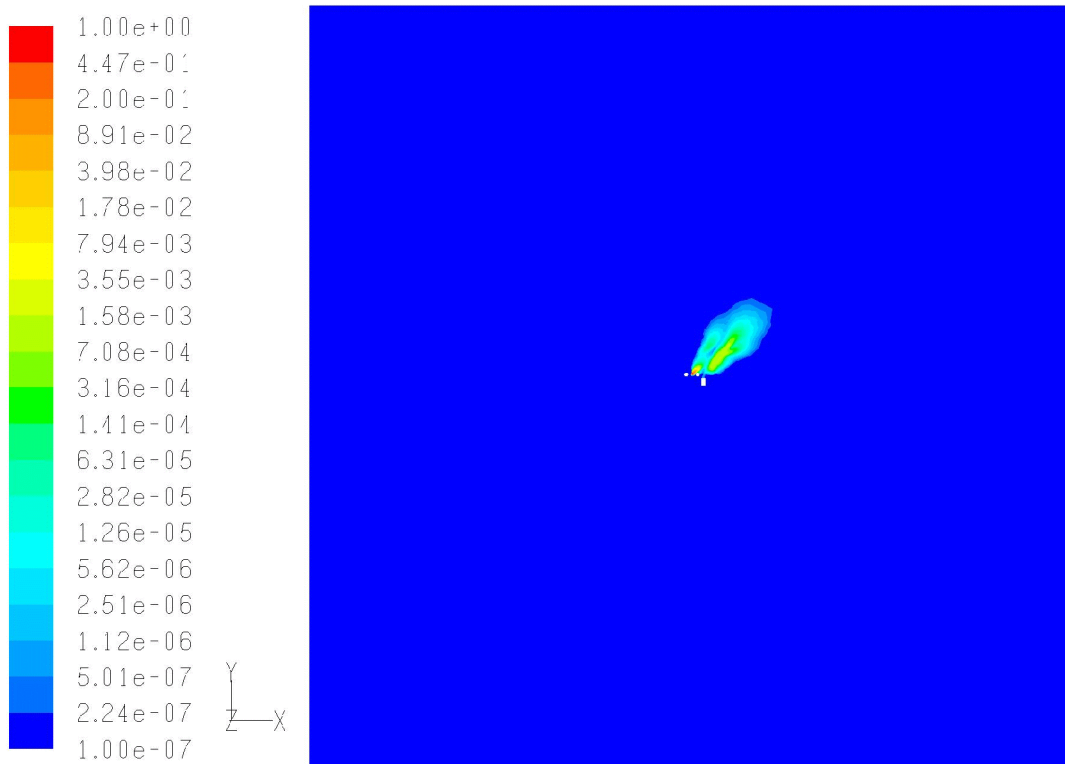
20/e ábra. A dimenziótlan turbulencia intenzitás 4 méteres magasságban az épületek közelében, délnyugati szél esetén, időfüggő esetben.



20/f ábra. A dimenziótlan turbulencia intenzitás 15 méteres magasságban, délnyugati szél esetén, időfüggő esetben.



20/g ábra. A dimenziótlan koncentráció eloszlás 4 méteres magasságban, délnyugati szél esetén, időfüggő esetben.



20/h ábra. A dimenziótlan koncentráció eloszlás 15 méteres magasságban, délnyugati szél esetén, időfüggő esetben.

3.5 Kiértékelés

A stacionárius eseteket vizsgálva minden szélirány esetén szembetűnő az épületek, akadályok áramlásra gyakorolt hatása, valamint az azok hatására kialakuló örvénystruktúrák. A szélesebbesség eloszlását ábrázoló képeken a zöld területek az alapáramlásnak megfelelő sebességeket jelölik, a kék területek jelzik azokat a zónákat, ahol a sebesség lecsökken az alapáramláshoz képest, a piros területeken pedig relatív sebesség növekedést tapasztalhatunk. Az épületek sarkainál és éleinél jönnek létre azok az örvények, amelyekben lecsökken a sebesség, míg a nagyobb nyílt területek felett felgyorsul az áramlás. Az akadályok látványos „nyomot”, leválási buborékot hagynak maguk után az áramlási képen, a szél alóli oldalukon, amit a tartályok, és a magasabb részek megnyújtanak (pl. 12–16 ábra). Bizonyos szélirányok esetében az akadályok szélfelőli oldalán is sebesség csökkenés figyelhető meg (pl. 16/a), az itt kialakuló nagyméretű patkóörvények miatt. A sebesség csökkenéssel megegyező területeken a turbulencia intenzitás ábráin megnövekvő intenzitás értékeket láthatunk, pontosan amiatt, hogy ezeken a helyeken az alapáramlás kinetikus energiájának egy része turbulens kinetikus energiává alakul. A szennyezőanyag-terjedés szempontjából a falak mellett tapasztalható sebességcsökkenés, valamint a nagyméretű örvények kialakulása kiemelt fontosságú, mert ezekben a tartományokban megnő a koncentráció, illetve ezek az örvények, mint koherens struktúrák jelentős szerepet játszanak a transzportfolyamatokban.

A növényállománnyal kiegészített stacionárius esetekben (17–19. ábra) jól látható, hogy a növényállomány jelentősen befolyásolja a kialakuló áramképet, és ezzel együtt a terjedést is. A vegyi üzem áramlásmódosító hatása, még az erdőállomány belsejében is érvényesül megfelelő szélirány esetén (pl. 18. ábra), hiszen az épület nyoma a növényállományban is szélesebbesség csökkenést okoz, és ezzel együtt a turbulencia intenzitása is csökken. A sebességeloszlásból ebben az esetben is detektálhatók a leválási örvények, mind az épületek, mind pedig a növényállomány mögött.

Az időfüggő esetet vizsgálva (20/a–h) szembetűnő, hogy a stacionárius esetekhez képest kisebb sebességek tapasztalhatók, de ugyanúgy megfigyelhetőek a leválási zónák, és az akadályok szélfelőli oldalán a patkóörvények (pl. 20/d). A kisebb szélesebbesség miatt ebben az esetben is lecsökken a turbulencia intenzitás. A növényállomány áramlásra gyakorolt hatásának vizsgálatánál hasznosabb lehet ez a módszer, mert a bonyolultabb geometriák körül az áramlás a valóságban is erősen időfüggő, valamint az időfüggő

számítás numerikusan stabilabb. A kapott eredményekből látszik, hogy a módszer jól használható mikroskálájú szennyezőanyag terjedés modellezésére. Az áramképek alapján elkülöníthetők azok a helyek, ahol veszélyes mértékben megnövekedhet a szennyezőanyag koncentrációja, így hasznos információkhoz jutunk már az áramképek kiértékelésével is. A dimenziótlan szennyezőanyag koncentráció pedig megfelelően skálázva, hasznos, számszerű információkat szolgáltat.

4. Összefoglalás

A dolgozat célja az volt, hogy a műszaki tudományok területén sikeresen használt áramlástan numerikus szimulációt (Computational Fluid Dynamics – CFD) alkalmazzuk légköri áramlások, valamint szennyezőanyag terjedés modellezésére. Az elmúlt évek kutatásai lehetővé tették mikroskálájú szennyezőanyag terjedés modellezését CFD szoftverekkel. A dolgozatban egy olyan módszert mutattam be, mellyel pontosabb képet kaphatunk egy kisebb terület áramlási viszonyairól, és a szennyezőanyag terjedést jelentősen befolyásoló turbulencia leírásáról, az ANSYS FLUENT nevű általános célú CFD megoldó használatával. Összefoglaltam a módszertani elemzés lépéseit, bemutattam a megoldó által használt hidrodinamikai és termodinamikai folyamatokat leíró differenciálegyenleteket, és a turbulencia modellezésének lényegét. Fejezetenként részleteztem az előfeldolgozás, a modellezés, valamint az utófeldolgozás folyamatát. Kitértem a légköri rétegződés leírását lehetővé tevő transzformációra is.

Elkészítettük egy képzeletbeli vegyi üzem 3-dimenziós modelljét, majd kiegészítettük növényállománnyal is, hogy vizsgálni tudjuk az erdők áramlásra, és turbulenciára gyakorolt hatását. Az irodalomban található összefüggések segítségével leírtuk a szélesebbég profilokat az állomány belsejében és fölötté. A numerikus modellben az erdők hatásának leírásánál megadtuk a levélfelület sűrűség vertikális eloszlását, a valós mérésekhez illesztett modell alapján. Ezek után elkészítettük a nyolc szélirányra vonatkozó stacionárius szélmezőket, melyeket kezdeti feltételként használtunk fel a további szimulációk futtatásához. Az erdőállomány áramlásra gyakorolt hatásának vizsgálatához 3 szélirányra (északkeleti, délkeleti, és északnyugati) végeztünk szimulációkat. Az eredmények grafikus megjelenítésével elemeztük az időfüggő áramlással számolt szennyezőanyag koncentráció eloszlását is.

A jelen dolgozathoz használt ANSYS FLUENT CFD megoldóval további, szennyezőanyag terjedést módosító folyamatokat is leírhatunk, amiket mi a munkánk során nem vettünk figyelembe. Lehetőség van a domborzat áramlásmódosító hatását is modellezni, modell geometriájának módosításával, amely az előfeldolgozási folyamat során kerül megvalósításra. A transzportot módosító tényezők közül a szenzibilis, és látens hőáramot, valamint a nedvességadvekción emelhetjük ki. Ezen tényezők fontos szerepet játszanak a felhő- és ködképződési folyamatokban is, ezáltal módosítva az anyagok kiülepedési, és kémiai tulajdonságait. A szennyezőanyag terjedésnél az adott szennyező

ismeretében lehetőségünk van a kémiai reakciók, illetve akár az égés folyamatának leírására is. E folyamatok parametrizálása a közeli jövő feladata.

Ugyancsak szerepel a terveink között egy döntés előkészítő rendszer kifejlesztése is, ami nagyban megkönnyítené a szimulációs eredmények kiértékelését, és könnyű értelmezését. E rendszerrel gyorsan, és hatékonyan lehet majd elrendelni a megfelelő óvintézkedéseket, és pontosabban meghatározhatók az érintett körzetek egy baleset vagy csapás esetén. Ennek az eljárásnak a használatával előre el lehet készíteni azoknak az objektumoknak (pl. katonai bázisok, erőművek, vegyi üzemek), területeknek a kiürítési tervét, ahol fenn áll a veszélye egy esetleges támadásnak, vagy balesetnek.

Irodalomjegyzék

BLOCKEN, BERT; STATHOPOULOS, TED; CARMELIET, JAN (2007): CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. *Atmospheric Environment*, Vol. 41, pp. 238-252

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. (2002): Computational methods for fluid dynamics. *Springer*

FINNIGAN, J. J.; BELCHER, S. E. (2004): Flow over a hill covered with a plant canopy. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 130, pp. 1-29

FLUENT 6.3 Documentation

GÖTZ, G.; RÁKÓCZI, F. (1981): A dinamikus meteorológia alapjai. *Tankönyvkiadó*, Budapest

HARGREAVES, D. M.; WRIGHT, N. G. (2007): On the use of the κ - ϵ model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 95, pp. 355-369

<http://www.ara.bme.hu/~cfd/FLUENTkurzus>

HUI, SHIU YEUNG; CROCKFORD, ANTHONY (2006): Wind Profiles and Forests; Validation of Wind Resource Assessment Methodologies Including the Effects of Forests. *M.Sc. Thesis Project at Technical University of Denmark*

JIAO-JUN, ZHU; XIU-FEN, LI; YUTAKA, GONDA; TAKESHI, MATSUZAKI (2004): Wind profiles in and over trees. *Journal of Forestry Research*, Vol. 15, pp. 305-312

- KATUL, GABRIEL G.; MAHRT, LARRY; POGGI, DAVIDE; SANZ, CHRISTOPHE (2004): One- and two-equation models for canopy turbulence. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 113, pp. 81-109
- KOVÁCS, T. (2008): Intézkedések és várható helyzet meghatározása biológiai fegyverrel történő csapáskor. *Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem*
- KRISTÓF, G.; LOHÁSZ, M.; RÉGERT, T.; LAJOS, T. (2002): Numerikus áramlástan alkalmazások az épületgépészetben. *Magyar Épületgépészet*, LI. évf. 2002/8.
- KRISTÓF, G.; RÁCZ, N.; BALOGH, M. (2009): Adaptation of Pressure Based CFD Solvers for Mesoscale Atmospheric Problems. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 131, pp. 85-103
- LAJOS, T. (2004): Az áramlástan alapjai. *Műegyetemi Kiadó*, Budapest
- LALIC, B.; MIHAILOVIC, D. T. (2004): An Empirical Relation Describing Leaf-Area Density inside the Forest for Environmental Modelling. *Faculty of Agriculture, and Center for Meteorology and Environmental Modelling, University of Novi Sad*
- LALIC, B.; MIHAILOVIC, D. T.; RAJKOVIC, B.; ARSENIC, I. D.; RADLOVIC, D. (2003): Wind profile within the forest canopy and in the transition layer above it. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 18, pp. 943-950
- LIANG, LI; XIAOFENG, LI; BORONG, LIN; YINGXIN, ZHU (2006): Improved κ - ϵ two-equation turbulence model for canopy flow. *Atmospheric Environment*, Vol. 40, pp. 762-770
- MELLOR, GEORGE L.; YAMADA, TETSUJI (1974): A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layers. *Geophysical Fluid Dynamics Program, Princeton University*

- ROSS, J.; ROSS, V.; KOPPEL, A. (2000): Estimation of leaf area and its vertical distribution during growth period. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 101, pp. 237-246
- SANZ, CHRISTOPHE (2003): A Note on κ - ϵ Modelling of Vegetation Canopy Air-Flows. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 108, pp. 191-197
- SANZ, CHRISTOPHE; KATUL, GABRIEL G. (2007): Dual length scale two-equation modelling of the canopy turbulent kinetic energy wake budget. *Comptes Rendus Mecanique*, Vol. 335, pp. 685-690
- SHIH, T.-H.; LIOU, W.W.; SHABBIR, A.; YANG, Z.; ZHU, J. (1995): A New-Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows-Model Development and Validation. *Computers Fluids*, Vol. 24, pp. 227-238
- WANG, YANSEN; CIONCO, RONALD (2007): Wind Profiles in Gentle Terrains and Vegetative Canopies for a Three-Dimensional Wind Field (3DWF) Model. *U.S. Army Research Laboratory Computational and Information Sciences Directorate*

Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt köszönetemet fejezem ki Balogh Miklósnak (BME Áramlástan Tanszék) a sok segítségért, és a közös munka során rám szánt időért.

Ezúton szeretnék köszönetet mondani Dr. Lajos Tamásnak (BME Áramlástan Tanszék) a lehetőségért, hogy az általa vezetett tanszéken írhattam a diplomamunkámat.

Végül szeretném megköszönni Dr. Weidinger Tamásnak (ELTE TTK Meteorológiai Tanszék) a hasznos konzultációkat, amivel segítette munkámat.

Melléklet