

Lokális szennyezőanyag-terjedés modellezése

Készítette:

Leelőssy Ádám

III. éves Fizika BSc szakos, meteorológia szakirányos hallgató

Témavezető:

Mészáros Róbert
adjunktus

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Meteorológiai Tanszék



Budapest, 2010.

Tartalomjegyzék

Bevezetés	3
1. Áramlási modellek áttekintése.....	3
1.1. Méretskálák	3
1.2. Léggöri modellek.....	4
1.3. A turbulencia modellezése.....	8
1.4. CFD áramlásmodellezés	11
1.5. A léggöri és a CFD áramlási modellek összehasonlítása	12
2. Az A2C modell bemutatása.....	13
2.1. A HOTMAC modell.....	14
2.2. A HOTMAC CFD képességei	16
2.3. A RAPTAD terjedési modell.....	20
2.4. A modellek verifikációja.....	21
2.5. Az A2C próbaváltozata	22
3. Az A2C modell alkalmazása	23
3.1. A geometria felépítése.....	23
3.2. A kibocsátás paraméterei	24
4. Eredmények.....	24
4.1. Érzékenység a vertikális felbontásra.....	24
4.2. A szél- és koncentrációmezők összefüggése	28
4.3. A RAPTAD eredményeinek stabilitása.....	33
4.4. Az ülepedés hatása	34
5. Az A2C alkalmazhatósága	35
Összefoglalás.....	36
Köszönetnyilvánítás	37
Irodalomjegyzék.....	38

Bevezetés

A különböző forrásokból a légkörbe kerülő szennyezőanyagok diszperziójának modellezése összetett, nagy számításigényű feladat, mely egyben hatékony eszköz lehet a várható káros hatások mérséklése érdekében. Ehhez részletes tér- és időbeli felbontású, egyszerre gyors és pontos modellekre van szükség. Az utóbbi évtizedekben bekövetkezett baleseti kibocsátások ráirányították a figyelmet ezen modellek folyamatos fejlesztésére és tesztelésére, hatékonyságuk növelésére. A különböző célú feladatok megoldására eltérő szemléletű és térbeli felbontású modellek állnak rendelkezésre. Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén évek óta folyik a légköri szennyezőanyagok terjedésének és kiülepedésének becslésére alkalmas modellek adaptálása, fejlesztése és a diszperzió különböző skálán történő szimulálása.

Szakdolgozatommal e kutatási témához kapcsolódva, a szennyezőanyagok légköri terjedésének mikroskálán történő szimulációjára alkalmas modell tesztelését végeztem el. A Paksi Atomerőműből egy esetleges baleset során a légkörbe jutó radioaktív szennyezés terjedésére több gaussi, euleri és lagrange-i személetmódú modell is rendelkezésre áll. Emellett felmerült az igény az erőmű közvetlen környezetére végzett, az épületek geometriáját is figyelembe vevő mikroskálájú modellezésre a vészhelyzeti forgatókönyvek pontosítása és az üzemi területen dolgozók egészségének megóvása céljából. Ehhez első lépésben egy kifejezetten ilyen célra alkalmas CFD modell előzetes tesztelését és az elsődleges eredmények elemzését végeztem el.

Szakdolgozatom első részében a különböző skálájú légköri és terjedési modelleket tekintem át, majd részletesen bemutatom az alkalmazott A2C modellt. A modell próbaverzióját a Paksi Atomerőmű térségére adaptálva bemutatom az elsődleges tesztfuttatások eredményeit és a továbbfejlesztési lehetőségeket.

1. Áramlási modellek áttekintése

1.1. Méretskálák

A légköri folyamatokat jellemző horizontális kiterjedésük alapján három mérettartományba sorolhatjuk; ezek a makro-, mezo- és mikroskála.

A *makroskála* a 2000 km feletti nagyságrendű folyamatokat foglalja magába. Ilyenek az általános légköri cellák, vagy a Rossby-hullámok. A tartomány alsó határa a mérsékletövi ciklonok és anticiklonok mérete. Az ide tartozó jelenségek karakterisztikus ideje (az az idő, ami alatt egy adott pont felett áthaladnak) néhány naptól néhány hónapig terjed. A globális időjárási modellekkel az általános légkörzés állapota, változásai, a globális léptékű szennyezőanyag-terjedés írható le, továbbá ezek biztosítják a mezoskálájú időjárás-előrejelző modellek peremfeltételeit is.

A *mezoskála* a napi előrejelzési gyakorlat színtere, a 2 km és 2000 km közötti jellemző méretű folyamatokat foglalja magába. A tartomány felső határát az időjárási frontok, alsó határát pedig a zivatarok, konvektív cellák nagyságrendje jelenti. Karakterisztikus idejük egy órától egy-két napig terjed. Az időjárás előrejelzésével kapcsolatos legfontosabb jelenségek ebbe a tartományba esnek, a fent említetteken kívül például a planetáris határréteg, a hegy-völgyi széljárás vagy a városi hősziget jelensége. A tartomány alsó határa körülbelül az időjárási modellek rácsfelbontásával egyezik meg, így a mikroskálájú folyamatokat – de általában már a konvektív cellákat, városokat is – paraméterezni kell.

A *mikroskála* a 2 km alatti mérettartományt jelenti. Ebbe beletartoznak olyan lokális időjárási jelenségek, mint a tornádók, termikek vagy szélrohamok, továbbá a legkisebb méretskálák is: a felszín-légkör kölcsönhatásának folyamatai és a légköri turbulencia. A mikroskálájú kutatások előretörése mellett napjaink feladata, hogy a rácsfelbontás szűkítésével a mikroskála folyamatait beépítsük az mezoléptékű időjárási modellekbe. Ez különösen fontos a szennyezőanyag-terjedési vizsgálatok esetében. A rácsfelbontás csökkentésével azonban – a számítási igény növekedésén túl – számos probléma jelentkezik. Jelen dolgozat alapvető célja ezen problémák és megoldási kísérleteik felvázolása, majd egy ilyen, a mezo- és mikroskálát összekötő modell bemutatása.

1.2. Légköri modellek

A numerikus időjárási modellek a számítástechnika megjelenése óta annak egyik legnagyobb kihívását jelentik. A szinoptikus térképek izobár- és izallobár-elemzésén alapuló hagyományos előrejelzési módszert mára jelentős részben felváltotta a numerikus modellezés (l. pl. Grell et al., 1994). Az időjárási modellek alapvető tulajdonsága, hogy a légkört cellákra osztva, fizikai megfontolások alapján rácsponthonként számítják az egyes meteorológiai mennyiségek változását. A

meteorológiai modellek által kezelt változók: hőmérséklet, nyomás, szélvektor és valamilyen nedvességi mérőszám. A modellekben legtöbbször paraméterként szerepel a csapadékképződés és fázisátalakulások mechanizmusa, bár a jelenlegi fejlesztések egyik fő iránya ezen folyamatok numerikus modellezése. Egyes specifikus időjárási modellekben egyéb változók, mint például szennyezőanyagok koncentrációja is szerepel (Lagzi et al., 2006).

A modellek – előzetes adat-asszimiláció után – rácspontonként megoldják a légköri hidrotermodinamikai egyenletrendszer (*HTE*), ami lényegében a fenti mennyiségekre felírt megmaradási egyenleteket tartalmazza (Stull, 1988). Ezek a következők:

- mozgásmennyiségekre: a Navier–Stokes-egyenletek három komponense,
- tömegre: a kontinuitási egyenlet,
- vízgőztartalomra: a nedvességszállítási egyenlet,
- hőmennyiségre: a hőtranszport-egyenlet,
- nyomanyagokra: az anyagszállítási egyenlet.

Az egyes egyenletek pontos formáját az adott feladat határozza meg. Az eredmények pontosságát nagyban befolyásolja a felszíni viszonyok figyelembe vétele. A felszín áramlásmódosító hatását érdességi paraméterekkel, a sugárzasháztartást pedig az albedó, a nedvességtartalom és a talajviszonyok ismeretében modellezzük.

Az időjárási modellekben a hőmérséklet helyett a száraz adiabatikusan elmozduló légréteg megmaradó mennyiségét, a potenciális hőmérsékletet használjuk:

$$\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R}{c_p}}, \quad (1)$$

ahol T a Kelvinben mért hőmérséklet, p_0 a felszíni légnyomás: $p_0 = 1000 \text{ hPa}$; R a száraz levegő specifikus gázállandója: $R = 287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$; végül c_p pedig a száraz levegő hőkapacitása: $c_p = 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. A hőmérséklettel szemben a potenciális hőmérséklet csak akkor változik meg a légréteg felemelkedése közben, ha sugárzás, fázisátalakulás vagy más légréteggel történő érintkezés miatti hőleadás, ill. hőfelvétel következik be. A száraz adiabatikus hűlés ily módon történő kiküszöbölésével a fenti lényeges folyamatok követése, modellezése könnyebbé válik.

A meteorológiában megszokott jelölésmódhoz igazodva a felszín adott pontján a keletre (x), északra (y) és felfelé (z) mutató vektorok által meghatározott koordinátarendszerben felírt szélvektor komponensei: (u,v,w). A továbbiakban ezt a

jelölésmódot használjuk.

A vertikális koordinátázásra sokféle módszert dolgoztak ki, mert a Descartes-i koordinátarendszerben igen nehézkes a nyomási felületek és a domborzat parametrizálása. A meteorológiai modellekben használt függőleges koordinátarendszerek fő típusai:

- Felszínkövető magassági koordinátarendszerek:
 $[z^*]=m$; $[\eta]=m/m$; (pl. HOTMAC: Yamada and Bunker, 1988)
- Nyomási koordinátarendszerek:
 $[p]=hPa$; $[\sigma]=hPa/hPa$; (pl. MM5: Grell et al., 1994)
- Egyéb koordinátarendszerek:
pl. S izentróp rendszer (Kasahara, 1974).

A numerikus áramlásmodellezés egyik legnehezebb feladata a szennyezőanyag-terjedés szimulációja. A probléma méretskálájától és a konkrét feladattól függően különböző szemléletmódokat alkalmaznak (ezek áttekintését l. pl. Holmes and Morawska, 2006; Mészáros et al., 2010).

A gaussi modellek a legrégebbi, de sok esetben még ma is jól használható megközelítést alkalmazzák. A szennyezőanyag koncentrációjának függőlegesen és szélirányra merőlegesen a forrás tengelyétől számított Gauss-eloszlását feltételezik, amelyhez hozzáadódik a szél irányába történő transzport. A terjedés mértékét – az eloszlás szélességét – a légköri stabilitás, illetve a kibocsátástól eltelt idő alapján számítják. Ez egyszerű matematikai kezelést tesz lehetővé, de csak álló forrás esetén, stacionárius és homogén áramlásban, valamint lassan ülepedő szennyezőanyagra ad jó közelítést. A modell egyszerűsége ellenére képes figyelembe venni a felszínről és a planetáris határrétegről való visszaverődést és egyszerű kémiai reakciókat is.

Az Euler-féle szemléletmód egy adott ponton (mérőállomás vagy modellbeli rácspont) figyeli a légköri állapotváltozók változását, és ezek összesítéséből az áramlási mező pillanatnyi képéről ad információt:

Valamely mennyiség teljes időbeli megváltozását Euler-féle megközelítésben a lokális időbeli megváltozás mellett az x és y irányú advekciónak, illetve a z irányú konvekciónak határozza meg:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} . \quad (2)$$

Egyszerűbb matematikai kezelhetősége és a mérési, előrejelzési pontok helyhez kötöttsége miatt a legtöbb meteorológiai modellben ezt a szemléletmódot alkalmazzák. Az euleri terjedési modellek az anyagszállítási egyenlet numerikus megoldásán alapulnak. A módszer előnye, hogy az euleri szemlélet miatt könnyen illeszthető az általános áramlási modellekbe, továbbá a kémiai reakciók paraméterezhetők benne. Széleskörűen alkalmazzák műszaki célú CFD szoftverekben, vagy levegőkémiai feladatok megoldásában (pl. az ELTE-n fejlesztett TREX modellben, Lagzi et al., 2006; Mészáros et al., 2010).

A lagrange-i modellek egyes szennyezőanyag-csomagok trajektóriáját számítják. Az áramvonalmenti mozgáson felül a sűrűségkülönbségből adódó felhajtóerő és a turbulens sebesség-ingadozás miatti korrekciókat is figyelembe veszik, utóbbit sztochasztikus (Monte-Carlo) módszerekkel. Az egyes csomagokban általában a hagyományos terjedési modellekhez hasonlóan gaussi koncentráció-eloszlást feltételeznek, amelyek összegzéséből állítják elő a koncentrációmezőt. Matematikailag ez bonyolultabb feladat az euleri szemléletmódban felírt problémáknál, és a valós mérésekhez való illesztése is nehezebb. Alkalmazási területe elsősorban a légköri transzportfolyamatok modellezése, ahol a szennyezőanyag-trajektóriák ismeretével, azok statisztikus elemzéséből adhatunk kielégítő közelítést a koncentrációmező változására. A módszer jól használható bonyolult felszíni és áramlási viszonyok mellett is, míg stacionárius és homogén esetben visszaadja a gaussi modellek megoldásait. Az általunk használt RAPTAD terjedési modell is ezen az elven működik.

A felszínnel közvetlenül érintkező planetáris határréteg (*PBL*) a légkör azon tartománya, ahol a jelentős átkeveredés miatt közvetlenül jelentkeznek a felszíni hatások. Szennyezőanyag-terjedési problémákban különösen fontos a határréteg magasságának ismerete, mert rövid időtávon csak ebben a tartományban valósul meg a terjedés, keveredés. A határréteg magassága a modellekben lehet paraméter (pl. RAPTAD: Yamada, 2002), vagy talaj- és sugárzási viszonyok, érdességi hosszskálák alapján modellezett mennyiség (pl. AERMOD: Cimarelli et al., 2005).

A légköri modellekben hidrosztatikus közelítést alkalmaznak. Ez elhanyagolja a függőleges gyorsulásokat, ami csak abban az esetben jó közelítés, ha a légkör közel kétdimenziós, azaz vízszintes kiterjedése sokkal nagyobb a függőlegesnél. Ez az egyszerűsítés alkalmazható a makro- és mezoskálájú időjárási modellekben, ugyanakkor nem ad megfelelő eredményt a modellezett légkör magasságával összemérhető

vízszintes rácsméret (5–10 km) alatt, ahol a konvektív folyamatok már jelentősek. Az időjárási modellek fejlesztésének egyik iránya a nemhidrosztatikus nyomási korrekciók figyelembe vétele (pl. az MM5-nél: Grell et al., 1994).

1.3. A turbulencia modellezése

A turbulencia kezelése az áramlási modellek fejlesztésének fő kihívása. A turbulens áramlások jellemzője a széles méretskálán megfigyelhető instacionárius viselkedés, amelynek teljes vagy részbeni numerikus szimulációja (*Direct Numeric Simulation, DNS*, illetve *Large Eddy Simulation, LES*) az áramlástan legkutatottabb területének számít (pl. Siebesma et al., 2003), de széleskörű alkalmazása még meghaladja a számítástechnika adta lehetőségeket. Ugyanakkor a turbulencia pontos becslése rendkívül fontos az áramlásmodellezésben, mert szerepe a hő- és anyagszállításban, valamint az energia disszipációjában több nagyságrenddel felülmúlja a molekuláris hatásokét. A turbulens áramlások szimulációjára elméleti megfontolások és szélesatorna-mérések alapján számos turbulenciamodellt dolgoztak ki, amelyek fejlesztése és alkalmazhatóságuk korlátai komoly kutatások tárgyát képezik a műszaki tudományokban és a meteorológiában. Ezekről jó áttekintést ad pl. Davidson (1997).

A turbulenciamodellek alapelve, hogy a $\underline{v}$ sebességvektort egy időátlagolt $\bar{\underline{v}}$ átlagsebesség és a $\underline{v}'$ turbulens sebesség-ingadozás összegeként írják fel. Az átlagolás időtartama sokkal nagyobb, mint a turbulens időskála (az a karakterisztikus idő, ami alatt a legnagyobb örvény a tér egy pontján áthalad), ezért $\underline{v}'$ időátlaga 0. A sebességgel együtt természetesen ingadozik a nyomás is:

$$\underline{v} = \bar{\underline{v}} + \underline{v}'; \quad p = \bar{p} + p' \quad \text{és} \quad \overline{\underline{v}'} = \overline{p'} = 0$$

Az áramlás mozgásegyenleteit az időátlagokra lehet felírni, míg a turbulens sebesség-ingadozások látszólagos, ún. Reynolds-feszültségként jelennek meg (*Reynolds-Averaged Navier–Stokes, RANS egyenletek*). A Reynolds-feszültségekből adódó tagokkal kiegészített mozgásegyenlet első komponense: (Lajos 2008; Stull, 1988).

$$\frac{d\bar{u}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \Delta \bar{u} - \frac{\partial (\overline{u'^2})}{\partial x} - \frac{\partial (\overline{u'v'})}{\partial y} - \frac{\partial (\overline{u'w'})}{\partial z}, \quad (3)$$

ahol a bal oldalon a szélkomponens teljes időbeli megváltozása áll, a jobb oldali első tag

a nyomási gradiensből származó erő, a második tag a súrlódás, ahol ν a kinematikai viszkozitás. Végül a jobb oldal utolsó három tagja származik a turbulens Reynolds-feszültségekből. A turbulens tagok a meglévő négy (u, v, w, p) mellett hat új ismeretlen jelentenek, amelyek megállapításához az eddig felírt négy egyenlet kevés. Ezért a turbulenciamodellek célja az egyenletrendszer további egyenletek bevezetésével történő lezárása (closure).

A terjedési modellekben a turbulencia kiemelt szerepet játszik, mert a turbulens örvények jelentősen átkeverik a légkört, és a szennyezőanyag-transzportban mérhető hatásuk 1–5 nagyságrenddel nagyobb a molekuláris diffúzióénál. Egy szennyezőanyag c koncentrációját is felbonthatjuk egy időátlagolt és egy ingadozó tag összegére: $c = \bar{c} + c'$

A turbulens anyagáramot a koncentráció- és sebesség-ingadozás szorzatának időátlaga adja meg. Az anyagszállítási egyenlet a turbulens tagok figyelembevételével:

$$\frac{d\bar{c}}{dt} = \left(\nabla D_c \nabla \bar{c} - \frac{\partial \overline{u'c'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'c'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{w'c'}}{\partial z} \right) + S, \quad (4)$$

ahol D_c a molekuláris diffúziós együttható, S pedig egy forrástag. A zárójelben szereplő első tagot, a molekuláris diffúziót sok terjedési modell elhanyagolja a turbulencia mellett, ami a legtöbb esetben igen jó közelítés.

Turbulens viszkozitáson alapuló modellek

Az RANS egyenletrendszer lezárása általában az áramlásra jellemző K turbulens viszkozitás bevezetésével történik. A turbulencia így extra viszkozitásként jelenik meg a mozgásegyenletben, úgy, hogy a (3) egyenlet utolsó három tagját a $\nabla K \nabla \bar{u}$ kifejezéssel helyettesítjük.

A turbulens viszkozitás megállapítására számos modell létezik (Davidson, 1997), amelyek további mennyiségeket vezetnek be, majd ezekre kísérleti adatok alapján adnak becslést. A legfontosabb modellezett mennyiségek a következők: l keveredési úthossz, k turbulens kinetikus energia és annak ε disszipációja. A turbulens kinetikus energia fogalma a sebesség-ingadozás által képviselt energiát mutatja meg:

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}). \quad (5)$$

A turbulens kinetikus energia transzportjára felírható egy egyenlet, ezáltal az áramlási modellben változóként megoldható. Mivel a turbulens örvények k energiájának egy része disszipálódik és hővé alakul, fontos mennyiség az ε disszipáció. A műszaki célú CFD (*Computational Fluid Dynamics*, részletesen l. később) szoftverekben a k mellett még egy változóra írnak fel transzportegyenletet, ez általában az ε disszipáció, vagy az l keveredési úthossz (k - ε , k - l modellek).

Az alkalmazható közelítések függenek a konkrét problémától. Ugyanakkor a modell és a bemenő paraméterek megválasztása jelentősen befolyásolhatja a kapott áramlási képet, ezért a CFD szoftverek fejlesztése – és sokszor alkalmazása is – szélesatorna-mérésekkel együtt történik (Goricsán et al., 2004).

A terjedési problémákra a viszkozitásnál látottakhoz hasonlóan bevezetjük a molekuláris diffúzióval analóg mennyiséget, a D_t turbulens diffúziós együtthatót:

$$\overline{u'c'} = D_t \frac{\partial c}{\partial x}. \quad (6)$$

Ezt a (4) egyenletbe beírva a lamináris esettel azonos alakú egyenletet kapunk egy új, turbulens tag megjelenésével, így a turbulenciát már ismert matematikai formában tudjuk kezelni.

A turbulencia hatása a hőáramban is jelentős. Ennek mértékét a turbulens hővezetési tényező bevezetésével az anyagszállításhoz hasonló módon becsülhetjük.

Reynolds-feszültség-modellek

A turbulens viszkozitáson alapuló modellek igen elterjedtek a műszaki gyakorlatban (Lajos, 2008). Meteorológiai alkalmazásukat azonban megnehezíti az, hogy izotróp turbulenciát feltételeznek, ami a légkörben nem elfogadható közelítés. A meteorológiai modellekben a turbulens viszkozitás bevezetése helyett közvetlenül a Reynolds-feszültség $\overline{u_i' u_j'}$ tagjaira írnak fel transzportegyenletet (*Reynolds Stress Model, RSM*). Ez lehetővé teszi az anizotrópia figyelembe vételét, a matematikai kezelést azonban nagymértékben bonyolítja. A feszültségtranszport egyenletei önmagukban nem

megoldhatók, ezért bizonyos mennyiségeket mérések alapján paramétereznek, illetve a megoldás stabilitását és izotropitását elősegítő közelítéseket alkalmaznak. (Davidson, 1997). Az RSM modellek nagyobb számítási kapacitást igényelnek a k - ϵ -hoz hasonló modelleknél, de anizotróp közegekben, ahol a felszín görbülete vagy a sűrűségi rétegzettség jelentős, csak ezek adnak jó közelítést.

1.4. CFD áramlásmodellezés

A modern CFD (*Computational Fluid Dynamics*) szoftvereket széleskörűen alkalmazzák a műszaki gyakorlatban áramlási problémák megoldására. Alkalmazásaival találkozhatunk egyebek mellett az aerodinamika, az építészet, a biztonságtechnika és a gépészet területén. A CFD szoftverek alapja a Navier–Stokes-egyenletek finom felbontású rácson történő numerikus megoldása valamilyen turbulenciamodell alkalmazásával. Képességeik túlmutatnak a légköri alkalmazásokon, mert olyan bonyolult, a meteorológiában elhanyagolható hatásokat is szimulálni tudnak, mint az áramló levegő dinamikus nyomása, a közeg összenyomhatósága (akusztika), az áramlásba helyezett testekre ható erő, vagy a kavitáció. Ugyanakkor a légköri áramlások néhány sajátosságát, mint a forgás, az anizotróp turbulencia, a gravitációs hullámozás és a felszín görbülete, a műszaki célra kifejlesztett modellek nem képesek kezelni.

A CFD szoftverek nagy előnye a felszín és a falak közelében kialakuló bonyolult áramlás kép kifinomult szimulációja. A meteorológiai alkalmazásokban „no-slip” peremfeltételt alkalmaznak, amely a fal mentén csak azzal párhuzamos szélsősebességet engedélyez. A fal mentén kialakuló határréteg áramlási és turbulencia-viszonyainak, illetve azok transzportjának pontos szimulációja alapvetően fontos az áramlási tér egésze szempontjából (Deville et al., 2002). A határrétegek menti problémákat leggyakrabban az l keveredési úthossz fogalmának bevezetésével kezelik, amely a sebességprofil és a turbulencia között teremt kapcsolatot:

$$|u'| = l \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|. \quad (7)$$

A keveredési úthossz értékének becslésére a konkrét problémától függően több számítási javaslat létezik (l. pl. Lajos, 2008).

A CFD áramlási modellek egyre megbízhatóbb eredményeket adnak a

mikrometeorológiai folyamatok modellezésében, elsősorban a városon belüli szennyezőanyag-terjedési vizsgálatokban. A Budapesti Műszaki Egyetem Áramlástan Tanszékén a FLUENT általános célú CFD szoftvert és a kifejezetten városi szennyezőanyag-terjedési alkalmazásokra szánt német MISKAM CFD modellt alkalmazzák. A kapott eredményeket szélcsatorna-mérésekkel verifikálják (Goricsán et al., 2004).

A CFD szoftverek $k-\varepsilon$ (vagy hasonló) turbulenciamodellt használnak. Ezek légköri alkalmazásának korlátaira többen is rámutattak (pl. Baklanov, 2000). A fejlesztések egyik fő iránya a $k-\varepsilon$ modellek módosításával a műszaki célú CFD szoftverek képességeinek kiterjesztése a légköri alkalmazásokra (Kristóf et al., 2007). Ez mikroskálán sok esetben sikeres, a méretskála növelésével azonban egyre több probléma jelentkezik. Másik, biztató eredményekkel szolgáló kutatási terület egy általános célú CFD szoftver mezoskálájú időjárási modellbe való beágyazása (például az ALADIN és a francia Saturne modell egyesítésével: Laporte et al., 2009). Ehhez hasonló az általunk használt A2C elnevezésű szoftver, amely egy meglévő időjárási modellbe próbál CFD képességeket ültetni.

1.5. A légköri és a CFD áramlási modellek összehasonlítása

A légköri modellek nagy előnye az elsősorban műszaki alkalmazásokra kifejlesztett CFD szoftverekkel szemben a meteorológiai elemek kezelése. Figyelembe veszik a sugárzási viszonyokat, a felszín albedóját, a felhőzetet és a csapadékot, illetve ezek napi menetét. Bemenő adataik nagyobb léptékű időjárási modellek eredményei, vagy felszíni, ballon- és toronymérések lehetnek. Hátrányuk a nagy térbeli és időbeli felbontás, illetve a hidrosztatikus közelítés használata, ezért mikroskálán ezek csak a peremfeltételek biztosítására alkalmazhatók.

A CFD modellek néhány méteres rácsfelbontást alkalmaznak, ezáltal képesek az áramlási tér szimulálására az épületek körül. A nyomást is változóként kezelik, figyelembe véve annak turbulens ingadozását és az áramlás keltette dinamikus nyomást is. Kezelni tudják a felszín és az épületek hőmérsékletét és annak hatását az áramlási mezőre. Hátrányuk a nagy számítási igény, illetve, hogy a nagyobb skálájú meteorológiai folyamatokat és azok változásait nehezen tudják kezelni.

Az 1. táblázat a légköri (mezoskálájú) és a CFD (mikroskálájú) áramlási modellek legfontosabb tulajdonságait hasonlítja össze.

1. táblázat: Légtörri és CFD áramlási modellek tulajdonságainak összehasonlítása

Áramlási modell:	Légtörri	CFD
Rácsfelbontás nagyságrendje	1 km	1 m
Függőleges koordinátázás	z* (felszínkövető), p (nyomási)	z (Descartes-i)
Meteorológiai állapotjelzők	Potenciális hőmérséklet Sugárzási viszonyok, albedó Csapadék, nedvesség, felhőzet	Hőmérséklet Felszín hőmérséklete, hővezetése
Időbeli menet	Napi menet; órás, háromórás átlagok	Stacionárius áramlási tér
Skálajellemzők	Hidrosztatika, forgás, felszín görbülete, domborzat, nehézségi hullámozás	Konvekció, dinamikus nyomás, felszín-közeg kölcsönhatás, diffúzió
Turbulenciamodell	RSM	k-ε, k-l (jövőben: LES, DNS)
Felszíni objektumok (épületek) kezelése	Érdességként	Légellenállás („canopy drag”) figyelembevétel, vagy az áramlási tér megoldása

2. Az A2C modell bemutatása

Az A2C (*Atmosphere to CFD*) modellt a Yamada Science & Art Company fejlesztette ki. Céljuk az volt, hogy a meglévő HOTMAC meteorológiai modellt CFD lehetőségekkel egészítsék ki. A szoftvercsomag része a HOTMAC-kel együtt kifejlesztett RAPTAD lagrange-i szennyezőanyag-terjedési modell.

A HOTMAC (*Higher Order Turbulence Model for Atmospheric Circulation*) légtörri áramlási modellt az Egyesült Államokban széleskörűen alkalmazzák mezoskálájú szennyezőanyag-terjedési vizsgálatokban, például a MOHAVE program keretében (Yamada, 2000a).

A HOTMAC képes legfeljebb három egymásba ágyazott rács kezelésére. Az egyes rácsok más vízszintes felbontással rendelkezhetnek, így a modell egyszerre kezeli a mezoskálájú, és ehhez illesztve a mikroskálájú áramlási teret. Az átalakított HOTMAC – amely az A2C nevet kapta – már képes a mikroskálájú áramlás CFD szimulációjára az épületek és a felszíni hatások figyelembevételével. A modell előnye, hogy egyszerre

képes a városi és városkörnyéki áramlás kezelésére, ezért fő alkalmazási területének a fejlesztők a komplex domborzatú terepen, vagy tengerparton elhelyezkedő városokat szánják, ahol a városkörnyéki áramlás modellezése is szükséges a városi viszonyok pontos szimulációjához.

Az A2C elnevezésű szoftvercsomag két modulból áll: a HOTMAC áramlási, és a RAPTAD terjedési modellből.

2.1. A HOTMAC modell

A HOTMAC légköri modell részletes leírását Yamada and Bunker (1988) és Yamada (2004) adta meg. A továbbiakban a modell főbb jellemzőit tekintjük át.

A HOTMAC vertikális irányban a z^* felszínkövető koordináta-rendszert használja, amely a légköri szinteket a felszín (a modellben 0 m) és rács tetejének felszín feletti $\bar{H}$ magassága közötti tartományba transzformálja. Eszerint egy z tengerszint feletti magasságban lévő pont z^* koordinátája a következőképpen írható:

$$z^* = \bar{H} \frac{z - z_g}{H - z_g}, \quad (8)$$

ahol z_g a földfelszínnek, H pedig a rács tetejének tengerszint feletti magassága.

A H magasságot célszerűen úgy választják, hogy teljesüljön a $H = \bar{H} + z_{g \max}$ feltétel, ahol $z_{g \max}$ a felszín legmagasabb pontjának tengerszint feletti magassága.

A w vertikális sebesség felírása a z^* rendszerben, figyelembe véve a z_g domborzatot:

$$w^* = \frac{\bar{H}}{H - z_g} w - \frac{\bar{H} - z^*}{H - z_g} \left(u \frac{\partial z_g}{\partial x} + v \frac{\partial z_g}{\partial y} \right). \quad (9)$$

A HOTMAC kormányzó egyenletei

A HOTMAC viszkózus, hidrosztatikus, forgó légkört feltételez. A felszínkövető rendszerben felírt mozgásegyenlet első komponense:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w^* \frac{\partial u}{\partial z^*} = f(v - v_g) + g \frac{\bar{H} - z^*}{\bar{H}} \left(1 - \frac{\langle \theta \rangle}{\theta} \right) \frac{\partial z_g}{\partial x} + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\bar{H}}{H - z_g} \frac{\partial}{\partial z^*} (-\overline{u'w'}) \end{aligned} \quad (10)$$

ahol v_g a geosztrofikus szél y irányú komponense, θ a potenciális hőmérséklet az adott szintre vonatkozó $\langle \theta \rangle$ átlagtól vett eltérése, K_x , K_y és K_{xy} a turbulens viszkozitási együtthatók, f pedig a Coriolis-együttható.

A (10) egyenlet jobb oldalán szereplő tagok rendre: a Coriolis-gyorsulás, a domborzatból adódó gyorsulás, végül az áramlás-, nyíró- és vertikális irányú turbulencia hatását leíró tagok.

A mozgásegyenlet második komponense az elsőhöz hasonlóan írható fel. A harmadik komponens kiszámítása a z^* rendszerben nehézkes, ezért a meteorológiai modellekben elfogadottan összenyomhatatlan közeget feltételezünk, ami a légkörben előforduló szélsőségeknél igen jó közelítés. A harmadik szélkomponens így a kontinuitás egyenletéből számítható:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (11)$$

A z^* felszínkövető koordinátarendszerben a (9) egyenlet felhasználásával a kontinuitás feltétele:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} - \frac{1}{H - z_g} \left(u \frac{\partial z_g}{\partial x} + v \frac{\partial z_g}{\partial y} \right) = 0. \quad (12)$$

A potenciális hőmérséklet $\langle \theta \rangle$ átlagát a paraméterként megadott hőmérsékleti gradiens alapján kapjuk minden magassági szintre. A modellezett állapotjelző így a potenciális hőmérséklet átlagától vett θ eltérés lesz:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\bar{H}}{H - z_g} \left(\frac{\partial}{\partial z^*} (-\overline{w'\theta'}) + \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial R_N}{\partial z^*} \right). \quad (13)$$

A hővezetésben a turbulens hőáramot, illetve a jobb oldalon szereplő utolsó tagban a hosszúhullámú sugárzást vesszük figyelembe, ahol R_N az elnyelt fluxus, ρ a levegő sűrűsége és c_p az állandó nyomáson vett fajhő (Sasamori, 1968). A felszín közelében ez a formula nem kielégítő a talajba történő hővezetés és a fázisátalakulási hőből származó látens hőáram miatt. A talajfelszínre felírt energiaegyensúly:

$$R_S + R_{L\downarrow} + R_{L\uparrow} = H_S + LE + G_S, \quad (14)$$

ahol R_S az elnyelt direkt sugárzás, $R_{L\downarrow}$ a beérkező, illetve a kimenő hosszúhullámú sugárzás, H_S a felszíni (turbulens) hőáram, LE a látens hőáram, G_S pedig a talajba vezető hőáram. Az egyes tagokat a talajparaméterek, valamint a sugárzási és nedvességi viszonyok ismeretében Yamada and Bunker (1988) alapján számítják.

2.2. A HOTMAC CFD képességei

Lee és Fernando (2004) szerint a HOTMAC modell elsősorban kis idő- és térbeli skálájú levegőminőségi vizsgálatokra lehet alkalmas, mezoskálán már nem éri el az MM5 modell előrejelzési adatainak pontosságát. A HOTMAC-be is beépített, mezoszínoptikus légköri jelenségeknél elfogadható hidrosztatikus közelítés ugyanakkor a méretskála csökkentésével egyre kevésbé alkalmazható. A kis mérettartományokban fellépő másik probléma a felszíni objektumok kezelése, mert azok magassága már összemérhető a rácsfelbontással.

A fejlesztők két új lehetőséggel bővítették a HOTMAC modellt, hogy az képes legyen kezelni a mikroskálájú áramlásokat: az épületek légellenállásának figyelembevételével, illetve a nemhidrosztatikus nyomási korrekció bevezetésével.

Légellenállás

Az épületek légellenállásának hatását a fák lombkoronájának légköri modellekben széleskörben használt parametrizációjához hasonlóan az épület-cella térfogatának η arányszáma segítségével adják meg (Yamada, 2002):

$$\eta = \frac{V_{\text{épület}}}{V_{\text{cella}}}. \quad (15)$$

A HOTMAC eredeti (10) mozgásegyenletének jobb oldalához újabb tagként hozzáadódik az épület légellenállása:

$$-\eta \frac{\partial p}{\partial x} = -\eta C_d \alpha(z) \cdot u \cdot |v|, \quad (16)$$

ahol C_d a légellenállási együttható, $\alpha(z)$ a levegő specifikus térfogata az adott magasságban, u az x irányú szélkomponens, $|v|$ pedig az adott pontban mérhető szélsébség.

Nemhidrosztatikus nyomás

A hidrosztatikus nyomás közelítésének elvetésével a nyomás Δp nemhidrosztatikus része is megjelenik a modellben, amelyhez a szélsébség komponenseit úgy kell illeszteni, hogy a kontinuitás feltétele ne sérüljön.

Az egy adott időlépcsőben és rácscellában fellépő nyomási korrekciós tag:

$$\Delta p = - \frac{\rho}{2\Delta t \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)} \text{div} \underline{v}, \quad (17)$$

ahol Δx és Δy a horizontális, Δz pedig a vertikális rácsfelbontás.

Ha a divergencia nem nulla, a szomszédos rácsponatok szélsébségeit a nyomási korrekció segítségével módosítják. Az iteráció addig folytatódik, amíg a divergencia nem csökken egy megszabott korlát alá (Yamada, 2004). Megjegyzendő, hogy az általános CFD szoftverekkel ellentétben a nyomás ebben a közelítésben nem jelenik meg modellezett változóként, így a nyomási mező kirajzolására, vagy az áramló levegő dinamikus nyomásának figyelembevételére sincs lehetőség. A nyomásingadozást csak a szélsébségek korrekciójában vesszük figyelembe.

Turbulencia

A HOTMAC a Mellor–Yamada turbulenciamodellek „Level 2” $k-l$ típusát használja. (Mellor és Yamada, 1982). A fejlesztők egy teljes („Level 4”) Reynolds-feszültség-

modell egyszerűsítésével turbulenciamodellek sorozatát készítették el, amelyekben a számítási idő csökkentése érdekében különböző célokra megfelelően alkalmazható parametrizációkat vezetnek be. A HOTMAC-ben használt „Level 2” turbulenciamodell a turbulens kinetikus energia mellett a keveredési úthossz fogalmát használja. Ez az egyszerűsített turbulenciamodell lehetővé teszi a rácsméret csökkentését, a CFD képességek beültetését.

Vízszintes irányban a modell bevezeti a (10) és (13) egyenletben szereplő K_i turbulens viszkozitási együtthatókat. Függőleges irányban a légköri stabilitást mutató Richardson-szám alapján adják meg a Reynolds-feszültségek értékét (Yamada and Bunker, 1988):

$$\overline{u'w'} = -lqS_M \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (18)$$

ahol l a keveredési úthossz, S_M a Richardson-számtól függő stabilitási paraméter, q pedig a turbulens kinetikus energia függvénye: $q = \sqrt{\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}}$.

A turbulens kinetikus energia transzportjában szereplő tagok: (Yamada, 2002; Lajos, 2008):

- Horizontális irányú turbulens diffúzió a K_i turbulens viszkozitási együtthatók alapján.
- Vertikális irányú turbulens diffúzió az S_M stabilitási paraméter alapján.
- Produkció: a főáramlás mozgási energiájának egy része turbulens kinetikus energiává alakul. Számítása pl: $\overline{u'w'} \frac{\partial u}{\partial z}$.
- Felhajtóerőből származó produkció: $\beta \overline{gw'\theta_v'}$ (ahol β a térfogati hőtágulási együttható; θ_v pedig a virtuális potenciális hőmérséklet ingadozása).
- Disszipáció: a turbulens kinetikus energia egy része hővé alakul.
- A felszíni légellenállás miatti produkció.

Hasonló transzportegyenlet írható fel a keveredési úthosszra is.

A Mellor–Yamada turbulenciamodell-családot sikerrel alkalmazták a környezeti áramlások számos területén (Mellor and Yamada, 1982). A vízszintes és függőleges irányú turbulencia különböző kezelésével és a légköri stabilitás figyelembevételével a „Level 2” Mellor–Yamada modell átmenetet jelent a CFD szoftverekben, határrétegek

mentén alkalmazott $k-l$ és a mezoskálán használt RSM turbulenciamodellek között.

A bemenő és a számított paraméterek

A fent leírt egyenletek numerikus megoldásához bemenetként az A2C HOTMAC modellje a következő adatokat használja:

- A koordinátázáshoz: a rács és a felszín H és $z_{g\ max}$ magassága, a Δx , Δy , Δz rácsfelbontás.
- A mozgásegyenlethez: u_0 , v_0 kezdő szélesség a szabad légkörben, φ földrajzi szélesség, $\langle \theta \rangle$ tengerszinti átlagos potenciális hőmérséklet, potenciális hőmérsékleti gradiens a határréteg alatt és felett, határréteg magassága, turbulenciaparaméterek.
- Sugárzás és energiaháztartás számításához: φ , λ földrajzi koordináták, albedó, felszínhasználat, sugárzási és talajparaméterek.

A HOTMAC időlépcsőnként és rácspontonként kiszámítja a következő mennyiségeket:

- (u, v, w) szélkomponensek és azok σ_u , σ_v , σ_w turbulens szórása
- θ potenciális hőmérséklet
- Turbulens kinetikus energia és keveredési úthossz ($k-l$)

A Δt időlépcsőt a program állapítja meg úgy, hogy minden rácspontra teljesüljön a stabilitás Courant–Friedrichs–Lewy-feltétele:

$$u \frac{\Delta t}{\Delta x} + v \frac{\Delta t}{\Delta y} + w \frac{\Delta t}{\Delta z} < CFL, \quad (19)$$

ahol CFL a matematikai probléma által meghatározott állandó (Deville et al., 2002). A formulán látszik a felbontás sűrítésének korláta: kisebb Δx , Δy rácsfelbontás esetén a több ponton rövidebb időlépésenként kell elvégezni a műveleteket, a futási idő így a horizontális felbontás köbével lesz arányos. Ugyancsak látszik, hogy kétdimenziós áramlásban, ahol a w komponens elhanyagolható, a vertikális felbontás a horizontálisnál sokkal sűrűbb lehet, ami a mezoskálájú szimulációknál meg is valósul. Mikroskálán azonban, ahol a w komponens jelentős, a függőleges felbontásnak a vízszintessel összemérhetőnek kell lennie, ami komoly korlátokat jelent a számítások pontosságában.

Az általunk végzett futtatások során a vízszintes felbontás 10 m, a függőleges felbontás 1–2 m volt. Az időlépcsők így 0,5 és 2 s között adódtak.

2.3. A RAPTAD terjedési modell

A RAPTAD (*Random Puff Transport and Diffusion*) a HOTMAC-kel együtt kifejlesztett lagrange-i szennyezőanyag-terjedési modell. A nyomanyagot adott tömegű, a középpontból kifelé Gauss-i koncentráció-eloszlást mutató szennyezőanyag-csomagok, „puffok” formájában kezeli. A puffok középpontjának mozgását a következő egyenletek írják le (Yamada and Bunker, 1988):

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + (u_i + u'_i)\Delta t, \quad (20)$$

ahol x_i az i . puff középpontjának koordinátája, u_i a HOTMAC által szimulált szélsősebesség nyugati komponense az adott rácspontban és időpontban, u'_i pedig a sebességkomponens turbulens ingadozása. Ha a szennyezőanyag és a levegő sűrűségkülönbségét elhanyagoljuk, a főáramlás és a turbulens ingadozás sebességének összege lesz a puff középpontjának sebessége. A turbulens sebesség-ingadozás számítása:

$$u'_i(t + \Delta t) = au'_i(t) + b\sigma_{ui}\zeta, \quad (21)$$

ahol ζ egy gaussi eloszlásból származó véletlen szám, σ_{ui} a sebességkomponens HOTMAC által számított turbulens szórása az adott rácspontban, a és b pedig a turbulencia karakterisztikus időskálájának függvényei (Yamada and Bunker, 1988).

A levegőtől eltérő sűrűségű szennyezőanyagok terjedésének modellezésére további kiegészítések szükségesek. A kibocsátott anyag környezettől eltérő hőmérséklete és sűrűsége módosítja az áramlási viszonyokat. Ezt a hatást a RAPTAD-nál elhanyagolják, mert figyelembe vétele nagyban megnövelné a számítási időt és a modell komplexitását.

A levegőtől eltérő sűrűségű puff nem az áramvonalak mentén fog mozogni, ahogy azt a fent bemutatott eredeti RAPTAD modell feltételezte. A továbbfejlesztett modellben a sűrűségkülönbségtől adódó felhajtóerő számítási módját Yamada (2000b) mutatta be. A B felhajtóerő a θ potenciális hőmérsékletekkel, illetve a ρ sűrűségekkel kifejezve:

$$B = \frac{g}{T} (\theta_{puff} - \theta_{levegő}) = g \frac{\rho_{levegő} - \rho_{puff}}{\rho_{levegő}}. \quad (22)$$

A felhajtóerő ismeretében a (20) egyenletben szereplő áramvonalmenti $w+w'$ vertikális sebesség és a sűrűségkülönbségből adódó W sebesség összege lesz a puff függőleges irányú sebessége: $w_{puff,i} = W_i + w_i + w'_i$. A sűrűségkülönbségből adódó mozgást csillapított rezgésként írjuk le a Brunt–Väisälä-frekvencia figyelembevételével (Yamada, 2000b).

A modellben a felszínre elérő puffok egyszerűen visszapattannak. A felszínre kiülepedő mennyiség figyelemvételéhez az ülepedési sebesség paraméterként megadható.

Minden időlépcsőben a koncentrációmezőt az egyes puffok összegéből állítják elő, a puffokban lévő koncentrációt Gauss-eloszlásúnak feltételezve. A puff szélességének turbulens diffúzióból származó növekedését a sebességkomponensek σ_{ui} szórásából számítják. Megjegyzendő, hogy a RAPTAD modellben a turbulenciát kétszeresen veszik figyelembe a terjedés szimulációjánál: egyrészt a (21) egyenletben a puff mozgásában, másrészt annak növekedésében. Ez a módszer a mérésekkel összevetve jó egyezést mutatott (Yamada and Bunker, 1988).

A RAPTAD modell felhasználó által megadható főbb bemenő paraméterei:

- a kibocsátás ideje, helye, időtartama és a forrás(ok) mérete,
- kibocsátott puffok száma,
- a puff kezdő w függőleges sebessége és a kezdeti B felhajtóerő,
- a kibocsátás mértéke $g\ s^{-1}$ egységekben,
- a turbulencia számításnál használt időskálák,
- ülepedési sebesség.

2.4. A modellek verifikációja

A HOTMAC-RAPTAD modellpárost sok esetben sikerrel alkalmazták mezoskálájú terjedési feladatokra (Yamada, 2000a). Ezek továbbfejlesztett változata, az A2C modell CFD képességeit a fejlesztők szélcsatorna-mérésekkel való összevetéssel vizsgálták (Yamada, 2009). A modell eredményei jó kvalitatív egyezést adtak a szélcsatorna-vizsgálatokkal. Az épületek körüli áramlás modellezésében az A2C elérte a $k-\varepsilon$

modellek pontosságát, ugyanakkor bizonyos esetekben az épületek mögötti áramlási tér jelentős eltérést mutatott a szélcsatorna-mérésektől. A mérések alapján a fejlesztők a következő megállapításokat tették az épületek körüli áramlás szimulációjával kapcsolatban:

- A horizontális felbontás legyen maximum 10 m, a vertikális felbontás a talaj közelében néhány méter.
- A RAPTAD-ban a turbulencia karakterisztikus időskálája legyen 10–20 s.

Ezeket a beállításokat használtuk mi is a futtatások során.

Whale et al., (2008) valós épületek körüli mérésekkel vetették össze az eredményeket. Az A2C a horizontális szélmezőt, valamint a vertikális és horizontális turbulencia eltérését jól modellezte. Ugyanakkor a függőleges szélkomponenst felül-, a turbulens kinetikus energiát pedig alábecsülte. Az 5 m-es horizontális rácsfelbontást nem találták elég részletesnek a turbulencia megfelelő modellezéséhez.

2.5. Az A2C próbaváltozata

Jelen kutatás során első lépésként az A2C modell próbaváltozatát használtuk, mely csak korlátozott mértékben engedi a modell bemenő adatainak változtatását. Vizsgálataink során a következő rögzített bemenő adatokat használtuk:

Dátum és idő:	július 20. 12 óra helyi idő szerint
Tengerszinti potenciális hőmérséklet:	$\langle \theta \rangle (z = 0) = 25^\circ\text{C}$
Határréteg magassága:	1000 m
Pot. hőm. gradiense a határréteg alatt:	$1^\circ\text{C} / 100 \text{ m}$
Pot. hőm. gradiense a határréteg felett:	$3^\circ\text{C} / 100 \text{ m}$
Bemenő szélesség a szabad légkörben:	6 m s^{-1}
Szélirány a szabad légkörben:	270° Ny^*
Felszíni légnyomás:	1000 hPa

Továbbá nem használható néhány, a teljes verzióba beépített funkció: felszínhasználat, külső adatbeolvasás, felhő- és csapadékképződés mikrofizikája.

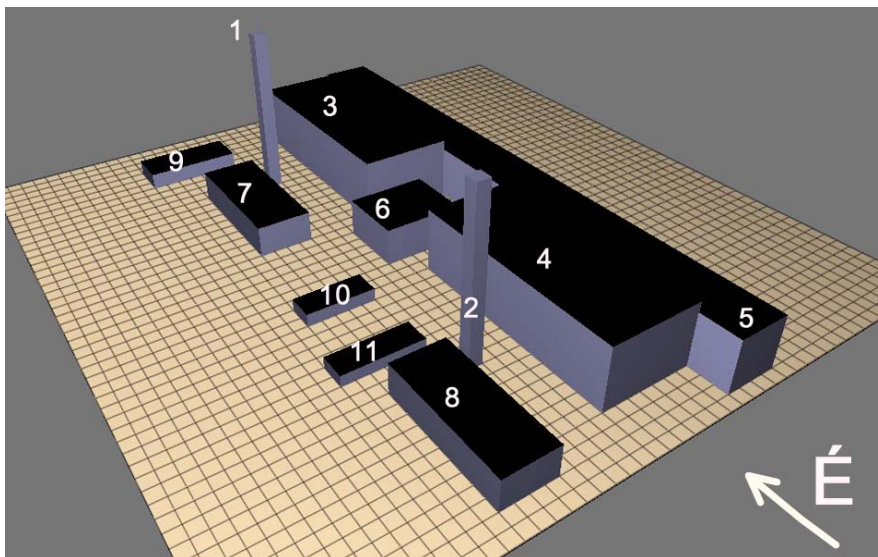
*A szélirányt a terep geometriájának forgatásával 90° -onként tudtuk állítani.

3. Az A2C modell alkalmazása

3.1. A geometria felépítése

A szakdolgozat keretében a Paksi Atomerőmű környezetében vizsgáltuk egy esetleges baleseti kibocsátás során a légkörbe jutó szennyezőanyag terjedését az erőmű üzemi területén belül. Ehhez az atomerőmű egyszerűsített geometriáját építettük be a modellbe (1. ábra; 2. táblázat). A rács mérete vízszintesen 500×500 m volt, a fejlesztők által javasolt 10 m-es horizontális felbontással. Függőlegesen 30 szintet használtunk. A vertikális felbontást a felszín közelében 1 és 4 m között változtattuk a különböző modellfuttatások során. A HOTMAC a megadott függőleges felbontást egy általunk meghatározott magasságig tartja meg, onnan a fennmaradó rácspontokat a rács tetejéig parabolikusan növekvő távolságokban elosztja.

Az alapterület 0,2-es albedójú síkfelszín volt. A futtatások célja az épületek hatásának vizsgálata, ezért a növényzetet most nem vettük figyelembe. Egyéb felszín- és turbulenciaparamétereknek a fejlesztők által javasolt értékeket vettük.



1. ábra: A modell horizontális rácsfelbontása és az épületek elrendezése

2. táblázat: A modellben használt épületek geometriája. Az épületek sorszáma megegyezik az 1. ábrán megadottal.

Épület	ÉNy-i sarok koord. [m]	DK-i sarok koord. [m]	Magasság [m]
1.	(200, 400)	(210, 390)	120
2.	(200, 130)	(210, 120)	120
3.	(240, 470)	(310, 300)	50
4.	(240, 220)	(310, 50)	50
5.	(310, 490)	(350, 20)	40
6.	(220, 290)	(280, 240)	26
7.	(150, 400)	(190, 300)	24
8.	(150, 130)	(190, 30)	24
9.	(120, 470)	(190, 440)	12
10.	(140, 230)	(190, 210)	9
11.	(130, 170)	(190, 150)	8

3.2. A kibocsátás paraméterei

A déli (2.) kéményből 120 m, illetve 10 m magasságból kibocsátott gáz terjedését vizsgáltuk. Az emisszió paramétereit Mészáros et al. (2010) alapján állítottuk be. A B felhajtóerő kezdő értékét a (22) összefüggés alapján -1 m s^{-2} -nek vettük. A kilépés sebessége $w = 0,4 \text{ m s}^{-1}$ volt. A folyamatos kibocsátást a RAPTAD-ban 1000 puff/óra rátájú, egyenletes időközönként történő puff-kibocsátással modelleztük. Az összehasonlíthatóság érdekében ugyanezeket a paramétereket használtuk a 120 m és a 10 m magasságból történő kibocsátásnál.

4. Eredmények

4.1. Érzékenység a vertikális felbontásra

A függőleges felbontás megválasztása bizonytalan, mert a rendelkezésre álló 30 rácspontot úgy kell elosztani, hogy a felszín közelében és az épületek körül kielégítő pontossággal számíthassuk az áramlás bonyolult szerkezetét, ugyanakkor a terjedési problémák kezeléséhez szükséges volna legalább a határréteg magasságáig kitolni a rács tetejét. A két szempont együttes megvalósítása nem lehetséges, ezért négy különböző felosztást kipróbálva, azonos kezdeti paraméterekkel, nyugati szél esetén vizsgáltuk meg a szél- és koncentrációmező felbontástól való függését. A modellezendő tartomány legkisebb magasságát a kémény 120 m-es magasságának figyelembevételével 150

méterben állapítottunk meg. A határréteg magassága egységesen 1000 m volt. A megadott függőleges rácsfelbontások az egyes esetekben:

- a) Az alsó 15 m-en 1 m, majd egyre nő 150 m-ig
- b) Az alsó 30 m-en 2 m, majd egyre nő 150 m-ig
- c) Az alsó 40 m-en 4 m, majd egyre nő 300 m-ig
- d) Az alsó 20 m-en 4 m, majd egyre nő 1000 m-ig

A 4 m-es vertikális felbontás a felszínen nem volt elégséges az épületek körüli áramlás modellezéséhez. A konstans bemenő adatok ellenére a kapott áramlási kép időben változó és sok esetben irreális volt. Az 1 és 2 m-es felbontás ugyanakkor stacionárius áramlási mezőt adott, ez esetben azonban le kellett mondanunk a határréteg magasságáig való modellezésről. Bár az 1 és 2 m-es felbontást is csak a legkisebb épületek magasságáig tudtuk végig megtartani, azt tapasztaltuk, hogy mind az áramlási tér egésze, mind a terjedés szempontjából különösen nagy jelentősége van a felszíntől a kibocsátás magasságáig (10 m) terjedő tartománynak.

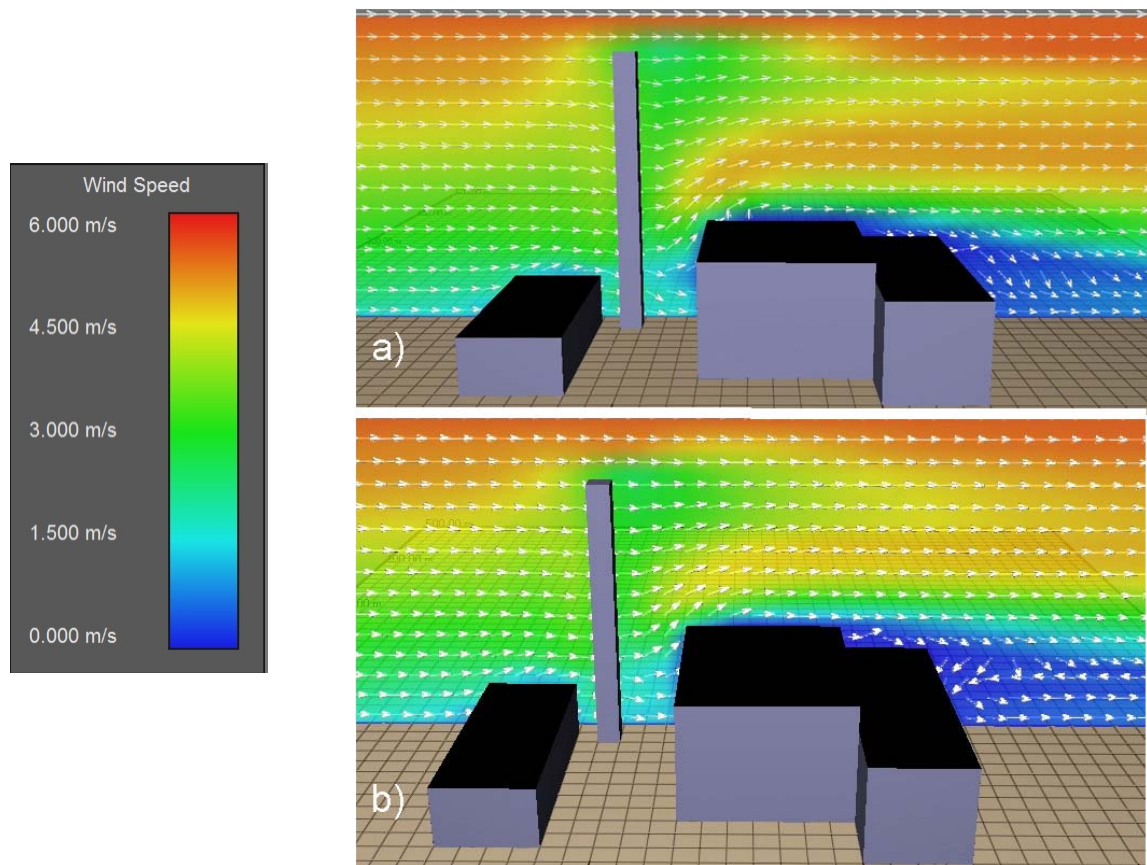
Az a) esetben alkalmazott magassági szintek (egész méterre kerekítve):

1-15 m 1 m-enként, majd 17, 19, 23, 28, 34, 40, 48, 56, 66, 76, 87, 100, 113, 127, 150 m

A b) esetben alkalmazott magassági szintek (egész méterre kerekítve):

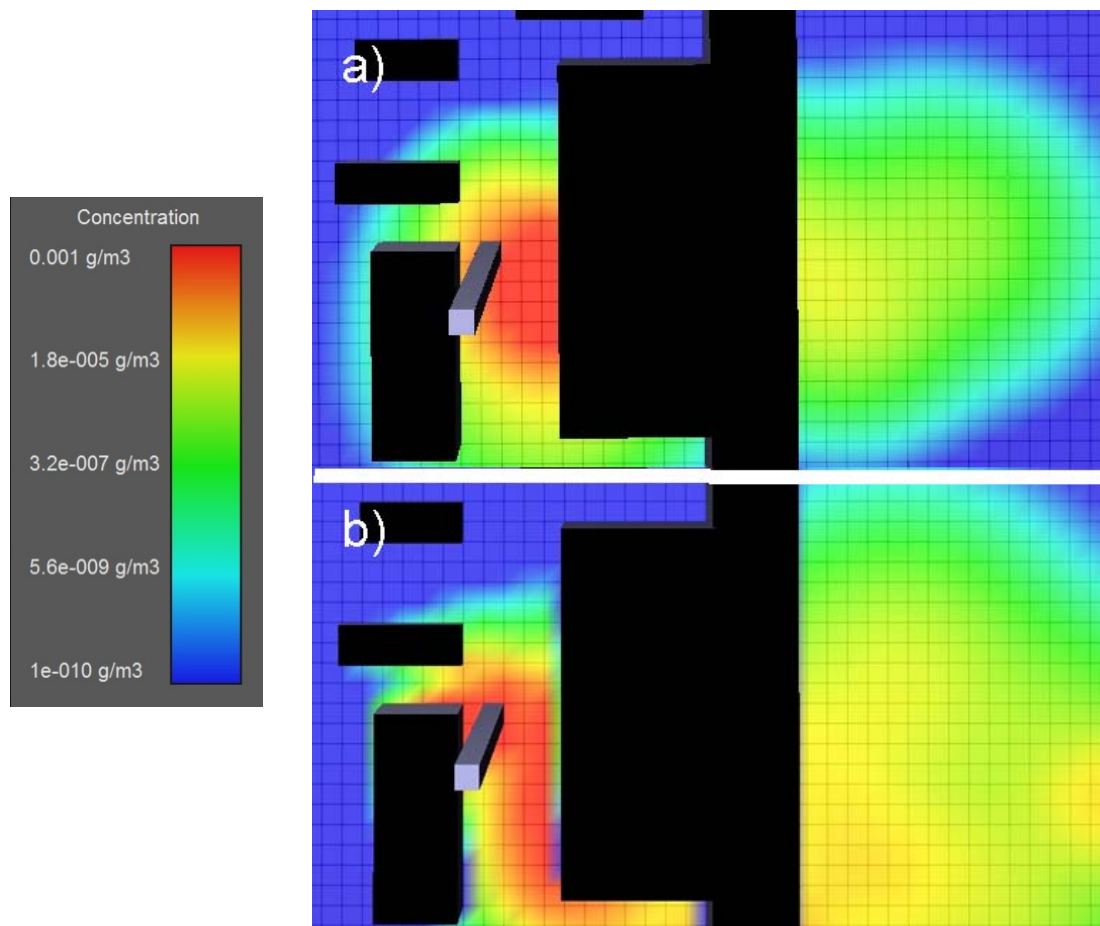
1-29 m 2 m-enként, majd 32, 35, 39, 44, 50, 56, 63, 70, 79, 88, 97, 108, 119, 131, 150 m

A 2. ábrán látható a szélmező kelet-nyugati irányú vertikális metszete a torony síkjában; az a) 1 m és b) 2 m felszíni függőleges felbontás mellett. A színskála a szélsébség abszolútértékét, a nyilak a (v,w) szélvektorokat mutatják. A kapott eredmények jó egyezést mutatnak. Az épületek között és mögött a b) eset visszaadta a finomabb a) felbontás által kapott áramlási képet, bár nem érte el annak részletességét. Az épület szél felőli oldalán kialakuló torlódás okozta sebességcsökkenést csak az a) eset mutatta ki. A 60–100 méteres magasságban az épületek emelő hatása miatti sebességtöbblet mindkét felbontásnál megjelenik.



2. ábra: A szélmező Ny-K irányú metszete, nyugati szél, a) 1 m és b) 2 m felszíni függőleges felbontás esetén.

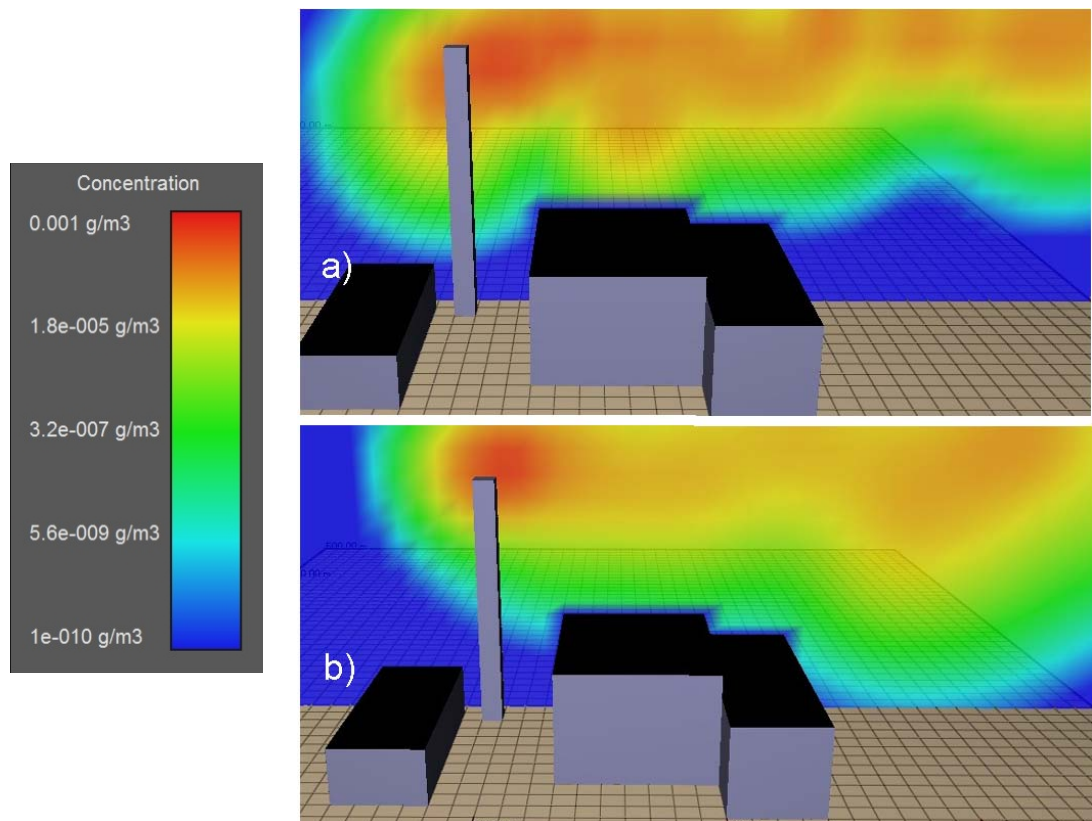
A szennyezőanyag-terjedésben a vertikális felbontásnak jelentős szerepe van. A 3. ábrán látható a koncentrációmező 1 m magasságban vett metszete a déli toronyból 10 m magasan történő 30 percnél folyamatos kibocsátás után. Az a) 1 m-es felszíni felbontással való futtatás széliránnyal szemben nagyobb, szélre merőlegesen kisebb mértékű terjedést feltételez.



3. ábra: Az 1 m magasságban kapott koncentrációmező nyugati szél, a) 1 m és b) 2 m felszíni függőleges felbontás esetén, a toronyból 10 m magasan történő folytonos kibocsátásnál, 30 perc elteltével.

Megállapíthatjuk, hogy az épületek közötti áramlási tér elfogadható modellezéséhez a felszínen legalább 2 m-es felbontásra van szükség. A felszínközeli szintek nagy jelentőséggel bírnak az áramlási tér egészére nézve, ezért a rendelkezésre álló rácspontokat úgy érdemes elosztani, hogy minél részletesebb felbontást kapjunk az alacsony magasságokra. A későbbiekben az a) jelű koordinátázást alkalmaztuk: a 30 rácspont felét az alsó 15 méteren helyeztük el 1 m-es felbontással, a fennmaradó pontokat pedig a program egymástól egyre növekvő távolságokban elosztotta 150 m-ig.

Összehasonlításként elvégeztük a 120 m magasságból, a torony tetejéről történő kibocsátás vizsgálatát is. A várakozásoknak megfelelően itt a b) koordinátázás adott a várakozásoknak jobban megfelelő eredményt. Az a) eset a kibocsátás magasságában túl ritka (~15 m) felbontás miatt a vertikális keveredést alábecsülte, továbbá a 120 m magasról kibocsátott puffok egyenként kirajzolódtak a koncentrációmezőben (4. ábra). A torony mentén lefelé történő terjedés nagy időbeli változékonyságot mutatott, és világosan kirajzolódtak benne az egyes puffok mozgásai.

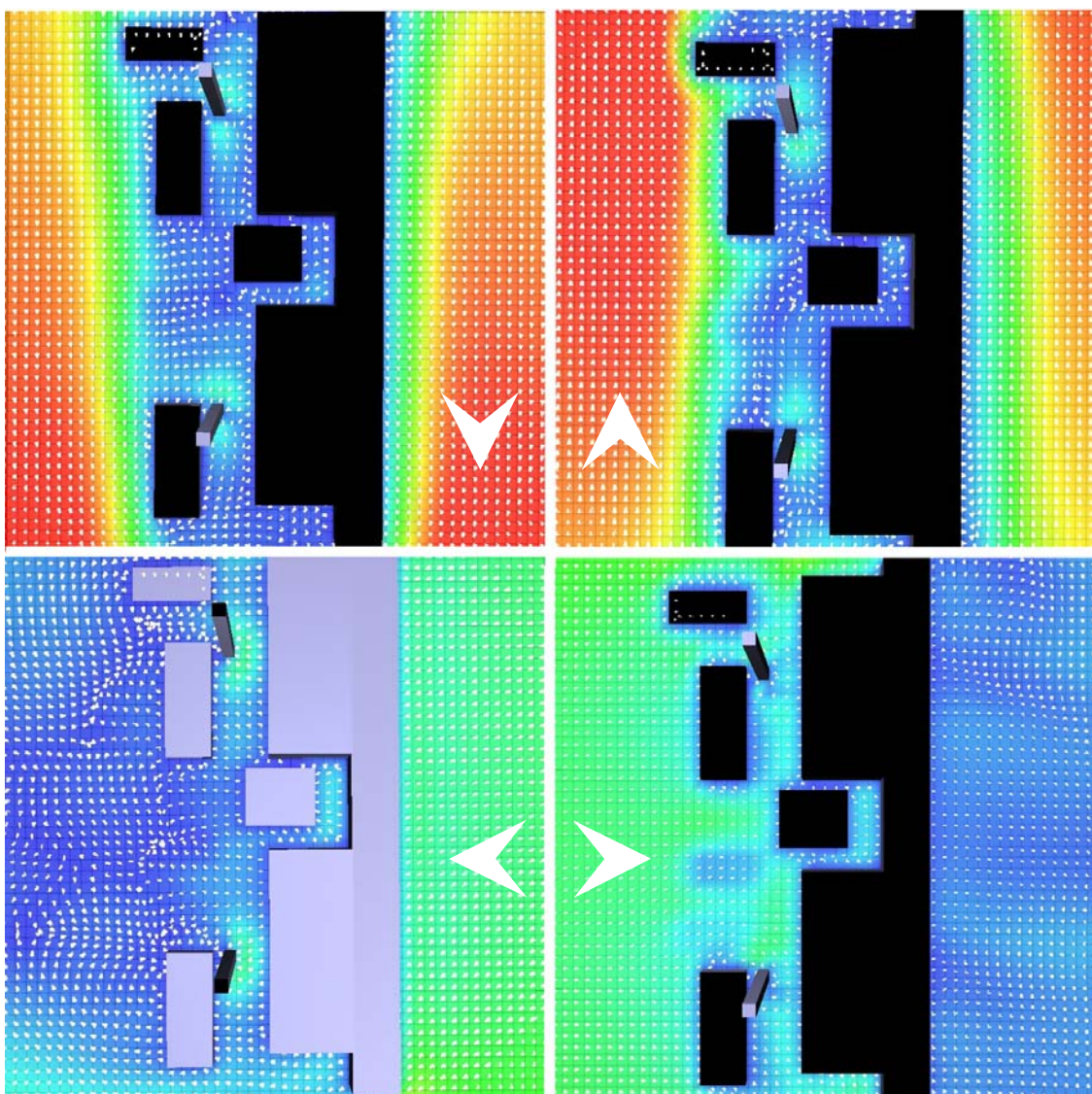


4. ábra: A koncentrációmező Ny-K irányú metszete nyugati szél és 120 m magasan történő kibocsátás esetén, a) 1 m (fent) és b) 2 m (lent) felszíni felbontás mellett, a kibocsátás kezdetétől számított 30 perc elteltével.

4.2. A szél- és koncentrációmezők összefüggése

Az épületeket vízszintes síkban homogén szélmezőbe helyeztük, ezért külső rácsokat nem használtunk.

Azt tapasztaltuk, hogy az áramlás szélirányú és függőleges komponense stacionárius áramlási képet mutat, ugyanakkor szélre merőlegesen időben változó cirkulációt kaptunk. Mivel ez a komponens lényegesen kisebb a szélirányúnál, csak a talajközeli kis sebességeknél kap jelentőséget. Az 5. ábrán a 11 m magasan mérhető szélmezőt mutatjuk be a négy szélirány esetén:



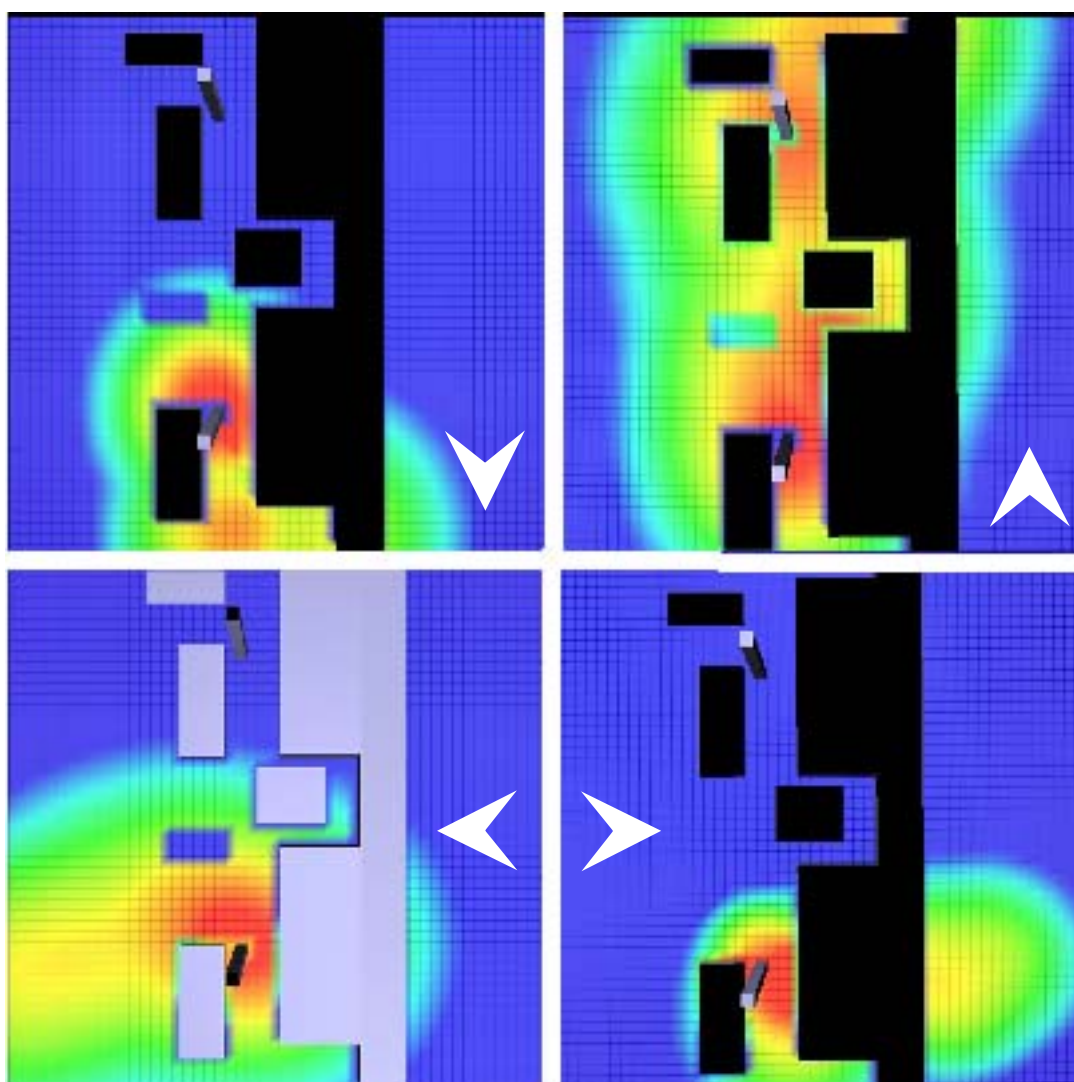
5. ábra: A 11 m magasan mérhető szélsébségek a négy szélirány (fent É, D, lent K, Ny) esetén. A bemenő szélirányt a fehér nyilak mutatják, a színskála megegyezik a 2. ábránál használttal.

Az épületek között minden esetben jelentős sebességcsökkenést, $1,5 \text{ m s}^{-1}$ alatti szélsébséget kaptunk. Meglepően nagymértékű a sebesség csökkenése a nyitottabbnak tűnő észak-déli szélirány mentén is. A 3. táblázat mutatja a szélsébségeket a két tornyot összekötő szakasz felezőpontjában. Az adatokon az alacsony épületek szinte tökéletes árnyékoló hatása és a nyugati irányba való nyitottság figyelhető meg. A reaktorépület 50 m-es magassága felett a kelet-nyugati áramlás már nagy szélsébségeket eredményez, észak-déli irányban azonban az épületek okozta fékező hatás még itt is jelentős.

3. táblázat: Szélsébségek a két tornyot összekötő szakasz felezőpontjában a négy szélirány esetén

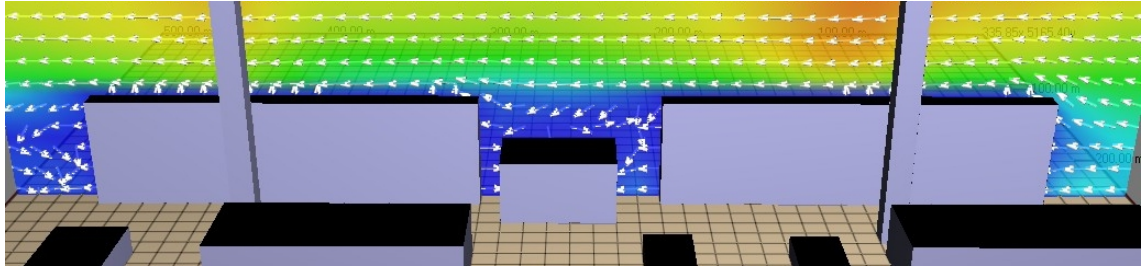
Szélirány	É	D	K	Ny
$z^* = 1\text{ m}$	$0,297\text{ m s}^{-1}$	$0,104\text{ m s}^{-1}$	$0,231\text{ m s}^{-1}$	$1,062\text{ m s}^{-1}$
$z^* = 11\text{ m}$	$0,277\text{ m s}^{-1}$	$0,256\text{ m s}^{-1}$	$0,344\text{ m s}^{-1}$	$1,318\text{ m s}^{-1}$
$z^* = 28\text{ m}$	$0,250\text{ m s}^{-1}$	$0,508\text{ m s}^{-1}$	$0,090\text{ m s}^{-1}$	$2,165\text{ m s}^{-1}$
$z^* = 56\text{ m}$	$2,153\text{ m s}^{-1}$	$1,458\text{ m s}^{-1}$	$4,367\text{ m s}^{-1}$	$4,376\text{ m s}^{-1}$

Az alacsony felszíni szélsébség kedvez a szennyezőanyagok feldúsulásának: a 6. ábrán jól látszik, hogy a magas koncentrációjú részek a szélvédett területeken alakulnak ki.

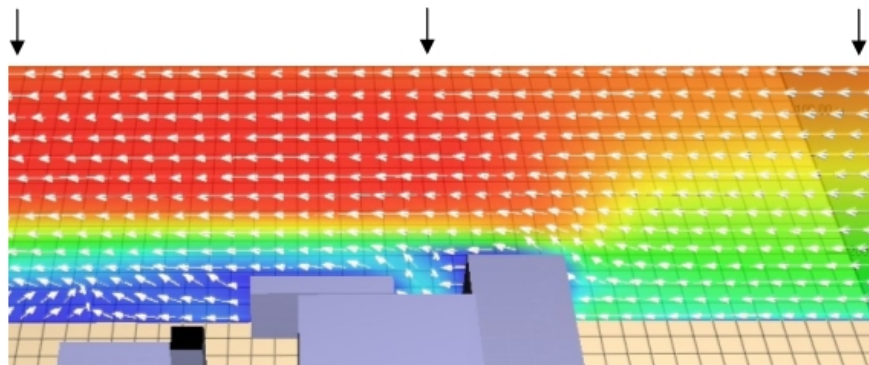


6. ábra: A 11 m magasan mérhető koncentrációk a négy (fent É, D, lent K, Ny) szélirány esetén, a déli toronyból 10 m magasról történő folyamatos kibocsátás kezdete után 30 perccel. A bemenő szélirányokat a fehér nyilak mutatják, a színskála megegyezik a 3. ábránál használttal.

Az épületek emelő hatása és a mögöttük kialakuló örvénylezés meghatározó jelentőségű a terjedés szempontjából. Előbbi jól, utóbbi nagy vonalakban kirajzolódik a vertikális metszeteken (7. ábra):

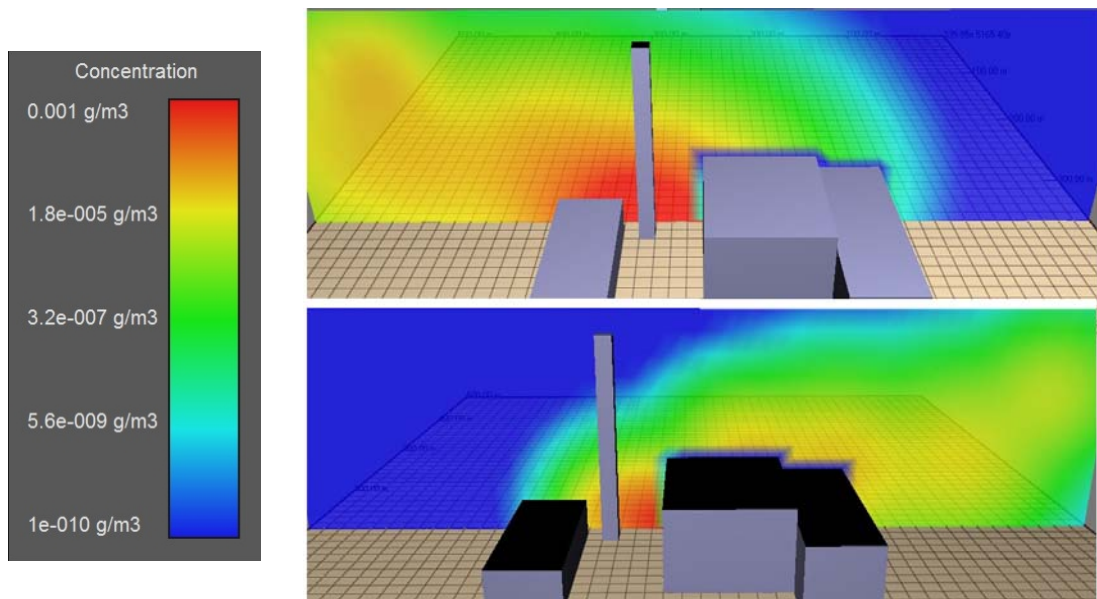


7. ábra: Az épületek körüli áramlási tér É-D irányú metszete déli szél esetén. A színskala megegyezik a 2. ábránál használttal.



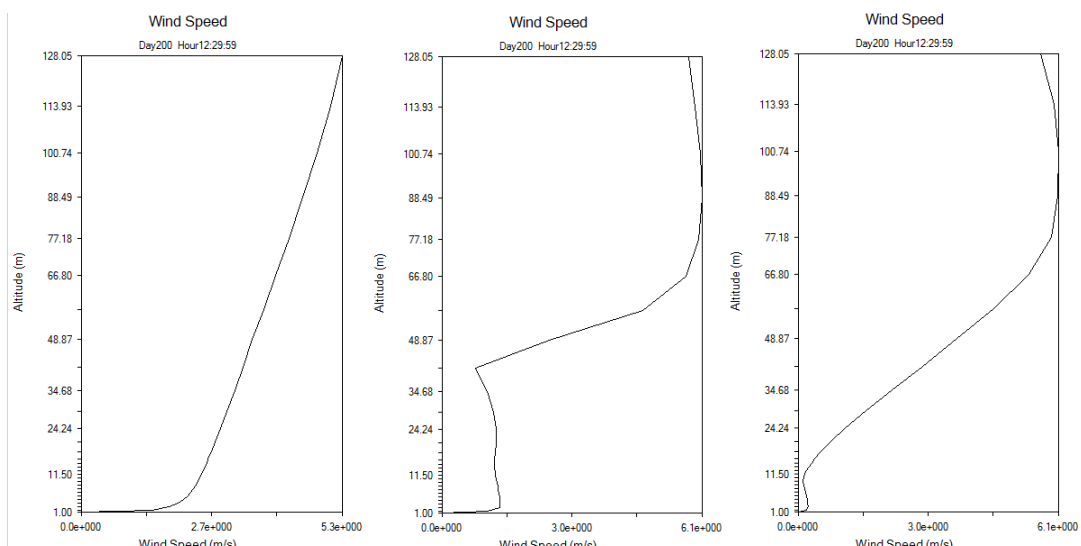
8. ábra: A 40 m magas csarnoképület által megemelt áramlás és a szélárnyékos területen fellépő szívóhatás keleti szél esetén a modelltartomány egy K–Ny-i metszetén. A színskala megegyezik a 2. ábránál használttal.

A 8. ábrán a 40 m magas csarnoképület hatása látszik a keleti irányból érkező áramlásra. Az épületek felett, kb. 60 m magasságban nagy szélesebség alakul ki, amely szívóhatást gyakorol az épületek közötti alacsonyabb rétegekre. Ennek következménye a jelentős vertikális átkeveredés és a széllel szembeni terjedés 9. ábra.



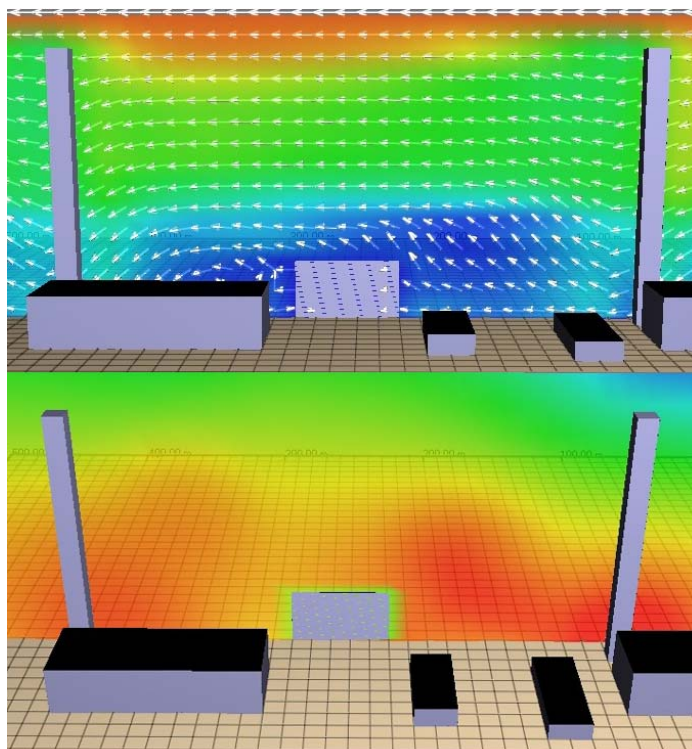
9. ábra: A koncentrációmező Ny-K irányú metszete keleti (fent) és nyugati szél esetén, 10 m magasságból történő folyamatos kibocsátásnál, 30 perc elteltével

A 10. ábra a vertikális szélprofilokat mutatja keleti szél esetén. A függőleges profilok helyét a 8. ábrán nyilak jelölik. A rács belépő oldalán a felszíni szélprofil zavartalan szerkezete jól kirajzolódik (bal oldali ábra). A középső ábra a csarnoképület mögötti szélvédett területet és a 60–100 méteres magasságban megfigyelhető szélsébség-növekedést mutatja. Végül az épületektől távol, a rács kilépő oldalán a torzult szélprofil jól mutatja 50 m magasságig az épületek fékező hatását.



10. ábra: A vertikális szélprofilok keleti szél esetén. Balról jobbra: a rács keleti peremén (500,250), a csarnoképület mögötti szélvédett térben (290,250) és a rács nyugati peremén (10,250).

Alacsony felszíni koncentrációt vártunk az épületek be- és kilépő oldalán, ahol a főáramlás nem éri el a talajt. Bár az épületek mögötti örvények minden széliránynál kirajzolódtak (7. ábra), azok szerkezetének, és így a bennük kialakuló koncentrációnak pontos modellezéséhez nem volt elegendő felbontásunk. Az épületek fala mentén várt koncentrációcsökkenést így sehol nem tudtuk visszaadni.



11. ábra: A szélmező (fent) és a koncentrációmező (lent) É-D irányú metszete a déli toronyból 10 m magasról történő folyamatos kibocsátásnál, 30 perc elteltével, déli szél esetén. A színskálák megegyeznek a 2. és 3. ábránál használtakkal.

A 11. ábrán látszik, hogy a legnagyobb szennyezettségű foltok mozgása jól követi a szélirányt, az alacsony szélesebségek ugyanakkor kedveznek a szennyezőanyagok felhalmozódásának. A középső 26 m magas épület szélárnyékos oldalán tapasztalható ugyan némi koncentráció-csökkenés, de 10 m vízszintes felbontás mellett az épületek közvetlen környezetében a koncentrációmező szerkezete nem megállapítható.

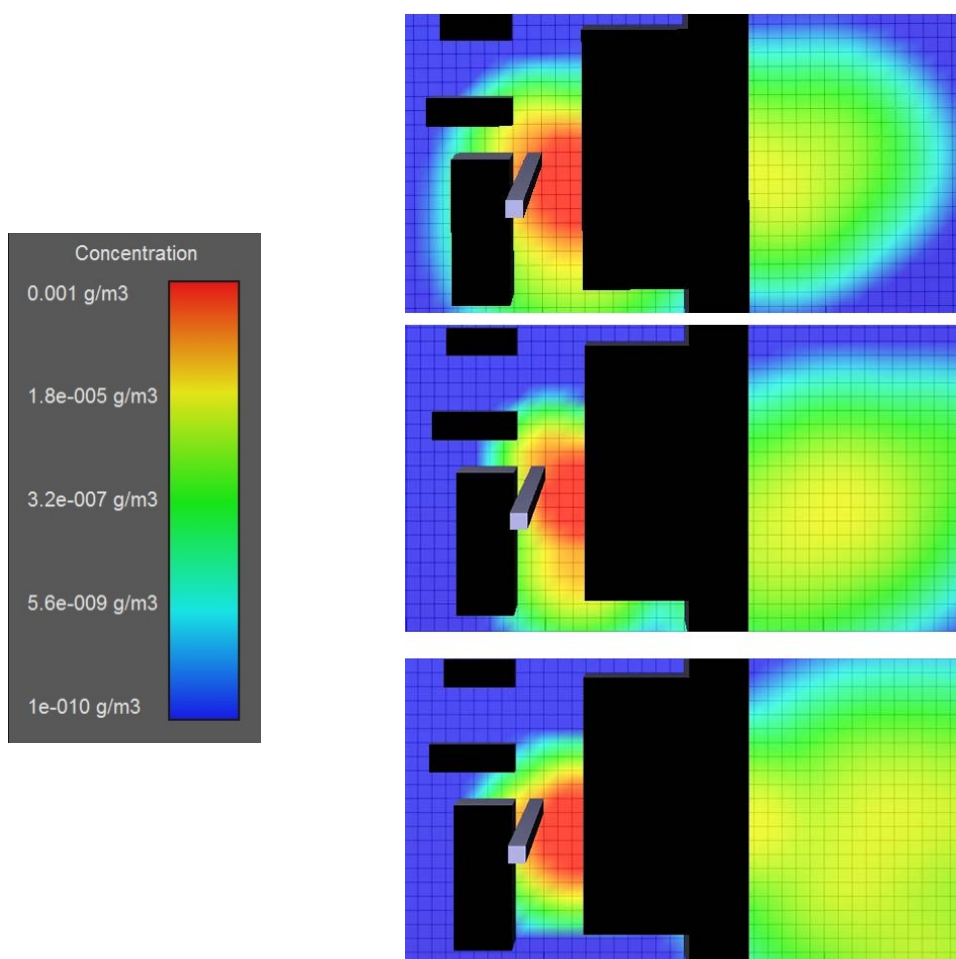
4.3. A RAPTAD eredményeinek stabilitása

A HOTMAC modell szimmetrikus esetekben az elvárásoknak megfelelően teljesített a fejlesztők tesztelése során (Yamada, 2009). A RAPTAD-dal kapcsolatban ugyanakkor nem találtunk hasonló vizsgálatot. Mivel a puffok terjedésében véletlen

számokon alapuló módszereket is használnak, felmerült a kérdés, hogy a RAPTAD azonos bemenő paraméterekkel elvégzett többszöri futtatásai mennyire különböző eredményeket adnak. A nyugati szél esetén elvégzett terjedési vizsgálat kétszeri lefuttatása és néhány véletlenszerűen kiválasztott rácspont koncentráció-adatainak összehasonlítása után az eredmények igen jó egyezést mutattak. A RAPTAD által számított pontosságig a véletlen módszerek nem okoztak eltérést a koncentrációmezőben.

4.4. Az ülepedés hatása

Mivel a felszíni paramétereket nem modelleztük pontosan, az eddigi esetekben az ülepedést nem vettük figyelembe. Az ülepedés jelentőségét nyugati szél esetén végzett futtatásokkal vizsgáltuk (12. ábra).



12. ábra: 1 m magasan mérhető koncentrációk nyugati szél esetén ülepedés nélkül (fent), 0,5 cm s⁻¹ (középen) és 1 cm s⁻¹ (lent) ülepedési sebesség mellett, a toronyból 10 m magasról történő kibocsátásnál, 30 perc elteltével.

A 12. ábra (fentről lefelé) az ülepedés nélkül, illetve $0,5$ és 1 cm s^{-1} ülepedési sebesség esetén 1 m magasságban kapott koncentrációkat mutatja. Az ábrán jól látszik, hogy az ülepedési sebesség értéke jelentősen befolyásolja a koncentrációmező térbeli szerkezetét. Értékének helyes megválasztása a fentiek alapján rendkívül nagy jelentőséggel bír a terjedés pontos szimulációjában. Mivel célunk most nem valós kibocsátás modellezése, hanem a szoftver tulajdonságainak tesztelése, a korábbi vizsgálatokban figyelmen kívül hagytuk az ülepedés hatását. A későbbi alkalmazás során az ülepedés paraméterezése fontos szempont lesz.

5. Az A2C alkalmazhatósága

A próbaváltozattal végzett kísérleti futtatások tapasztalatai alapján az A2C alkalmas lehet egy mezoskálájú modell kiegészítőjeként egyszerű terjedési problémák CFD szimulációjára. A vizsgálatok során az A2C jól kimutatta az épületek fékező hatását és a szélvédett területeken megnövekvő koncentrációt. A bonyolult geometriájú területeken a szél- és koncentrációmező megbízható kvantitatív előrejelzését pontosítaná a térbeli felbontás finomítása. Alkalmazási célja elsősorban mezoskálájú modellek eredményeinek pontosítása lehet a kibocsátás környezetének CFD szimulációjával. Használható lehet továbbá az épületek és a domborzat mikroskálájú áramlásmódosító hatásának elemzésére, amely hasznos információkat szolgáltat a nagyobb skálájú modellek pontos paraméterezéséhez.

Az A2C felhasználásának legnagyobb korláta a felbontás megválasztása. Megjegyezzük, hogy a teljes verzióban is csak $60 \times 60 \times 40$ rácspont áll rendelkezésre, amely terjedési problémák CFD megoldásához nem elégséges. Vízszintesen a modell képes három egymásba ágyazott rács kezelésére, amellyel a vizsgált tartomány mérete jelentősen kitolható úgy, hogy a belső rács felbontása elfogadhatóan sűrű maradjon. Ugyanez függőlegesen nem valósítható meg, mert mindhárom rács ugyanazokat a vertikális szinteket használja. Mivel mezoskálájú terjedési problémákban elengedhetetlen a határréteg magasságáig való modellezés, a rácspontok korlátos száma miatt a bonyolult geometriájú felszín által létrehozott áramlási tér pontos szimulációja nem lehetséges.

A RAPTAD hátránya a kémiai reakciók kezelésének hiánya, amely a Paksi Atomerőmű esetében a rövid felezési idejű izotópok kibocsátásánál kaphat nagy jelentőséget. Arimitsu and Tarnai (2004) sikerrel bővítette a RAPTAD modellt fotokémiai reakciók kezelésére alkalmas modullal.

Az A2C verifikációjáról kevés szakirodalmi hivatkozás áll rendelkezésre. Bár szélcsatorna-mérések igazolták az alapvető CFD képességek meglétét, Whale et al. (2008) rámutattak, hogy valós áramlási problémákban az A2C pontatlan lehet a turbulencia és a vertikális sebesség előrejelzésében. Mivel nincs lehetőségünk a modell mérésekkel történő verifikációjára, a kapott eredményeket csak kvalitatívan tekinthetjük mérvadónak.

Az A2C előnye a meteorológiai paraméterek kezelése és a nagyobb léptékű modellekbe való illeszthetőség. A teljes verzió képes az MM5 által szolgáltatott adatok beolvasására. Az A2C-vel lehetőség nyílik a hagyományos terjedési modellek pontosítására olyan körülmények között, ahol a kibocsátás környezetében a felszíni objektumok jelentősen befolyásolják az áramlási teret.

Összefoglalás

Szakdolgozatomban bemutattam az A2C modell CFD képességekkel rendelkező, szabadon hozzáférhető próbaverzióját és a modellel készített szimulációk elsődleges eredményeit. A szimulációkat a Paksi Atomerőmű környezetére, az épületek egyszerűsített geometriáját beépítve, lokális skálán végeztük. Feltételezett baleseteket követően bemutattuk a szennyezőanyag térbeli eloszlását a szélirány függvényében. Az elsődleges eredmények hozzájárulnak az egyes modellparaméterek érzékenységeinek vizsgálatához, és a részletesebb, finomabb felbontású modellszimulációk fejlesztéséhez. A tapasztalatok és szimulációs eredmények alapján az alábbi szükséges/lehetséges modellfejlesztési irányvonalak rajzolódtak ki:

- sugárzási-, turbulencia- és talajparaméterekre való érzékenység vizsgálata,
- a valós domborzati adatbázis felhasználásával az áramlási mező egymásba ágyazott rácsokon történő szimulációja,
- a térbeli felbontás javítása,
- a RAPTAD modell bővítése kémiai folyamatok kezelésére

- az eredmények összehasonlítása más, nyitott forráskódú általános célú CFD szoftver (pl. OpenFoam, OpenFlow) szimulációival,
- az A2C modell beillesztése valamilyen mezoskálájú modellbe (hasonló fejlesztést végzett más modellel Laporte et al., 2009),
- saját fejlesztésű TREX modell módosítása CFD feladatok megoldására.

Összességében elmondható, hogy a szakdolgozat keretében vizsgált A2C modell a tapasztalatok alapján alkalmas a Paksi Atomerőmű környezetére vonatkozó CFD modellszimulációk elvégzésére, de számos további érzékenységi vizsgálat, valamint modellfejlesztési feladat elvégzése szükséges a modell esetleges operatív alkalmazása előtt.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm témavezetőmnek, dr. Mészáros Róbertnek a sok támogatást és szakmai segítséget, amivel a dolgozat elkészítéséhez hozzájárult.

Irodalomjegyzék

T. Arimitsu and M. Tamai, 2004: A Numerical Simulation of Secondary SPM Originated from Automobiles with Lagrangian Model, *13th World Clean Air and Environmental Protection Congress and Exhibition*, London, UK, August 22 - 27

A. Baklanov, 2000: Application of CFD Methods for Modelling in Air Pollution Problems: Possibilities and Gaps, *Environmental Monitoring and Assessment* 65, 181-189.

A.J. Cimorelli, S.G. Perry, A. Venkatram, J.C. Weil, R.J. Paine, R.B. Wilson, R.F. Lee, W.D. Peters and R.W. Brode, 2005: AERMOD: A Dispersion Model for Industrial Source Applications. Part I: General Model Formulation and Boundary Layer Characterization, *Journal of Applied Meteorology*, 44, 682-693.

L. Davidson, 1997: An Introduction to Turbulence Models. *Report 97/2*, Dept. of Thermo and Fluid Dynamics, Chalmers

M.O. Deville, P.F. Fischer and E.H. Mund, 2002: High-order Methods for Incompressible Fluid Flow, Cambridge University Press, pp. 4-19., 131-135.

Goricsán I., Balczó M., Rékert T. and Suda J.M., 2004: Comparison of Wind Tunnel Measurement and Numerical Simulation of Dispersion of Pollutants in Urban Environment. *Impact of Wind and Storm on City Life and Built Environment*, ed. by J.P.A.J. van Beeck, COST C14 *International Conference on Urban Wind Engineering and Buildings Aerodynamics*, D.6.1-D.6.10.

G.A. Grell, J. Dudhia and D. R. Stauffer, 1994: A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR Tech. Note NCAR/TN-398+STR, pp. 122

N. Holmes, L. Morawska, 2006: A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available, *Atmospheric Environment*, 40(30), 5902-5928.

A. Kasahara, 1974: Various Vertical Coordinate Systems Used for Numerical Weather Prediction, *Monthly Weather Review*, 102, 509-522.

Kristóf G., Rácz N. and Balogh M., 2007: Application of ANSYS-FLUENT for meso-scale atmospheric flow simulations, *ANSYS Conference & 25th CADFEM Users' Meeting*, Dresden, Germany

Lagzi I., Mészáros R., Ács F., A.S. Tomlin, Haszpra L. and Turányi T., 2006: Description and evaluation of a coupled Eulerian transport-exchange model: Part I: model development, *Időjárás* 110, 3–4, 349–363.

Lajos T., 2008: Az áramlástan alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest, pp. 371-396.

L. Laporte, É. Dupont, B. Carissimo, L. Musson-Genon and C. Sécolier, 2009: Atmospheric CFD Simulations coupled to Mesoscale Analyses for Wind Resource assessment in complex terrain, *European Wind Energy Conference and Exhibition*, Marseille, France

S-M. Lee and H.J.S. Fernando, 2004: Evaluation of Meteorological Models MM5 and HOTMAC Using PAFEX-1 Data, *Journal of Applied Meteorology*, 43, 1133-1148.

G.L. Mellor and T. Yamada, 1982: Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems, *Reviews of Geophysics*, 20(4), 851–875,

Mészáros R., Vincze Cs. and Lagzi I., 2010: Simulation of Accidental Release Using a Coupled Transport (TRES) and Numerical Weather Prediction (ALADIN) model, *Időjárás* 114, 1-2, 101-120.

T. Sasamori, 1968: The Radiative Cooling Calculation for Application to General Circulation Experiments, *Journal of Applied Meteorology*, 7, 721-729.

A.P. Siebesma, C.S. Bretherton, A. Brown, A. Chlond, J. Cuxart, P.G. Duynkerke, H. Jiang, M. Khairoutdinov, D. Lewellen, C-H. Moeng, E. Sanchez, B. Stevens and D.E.

Stevens, 2003: A Large Eddy Simulation Intercomparison Study of Shallow Cumulus Convection, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 60, 1201-1219.

R. Stull, 1988: An introduction to boundary layer meteorology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, pp. 671.

J. Whale, T.Y. Lyons, H-M. Dreher and D.M. Chand, 2008: Investigating the Use of a Mesoscale Model as Part of a Feasibility Study for a Rooftop Wind System, *3rd International Solar Energy Society Conference - Asia-Pacific Region (ISES-AP-08)*, Sydney, Australia

T. Yamada, 2009: Numerical Simulation of Airflows and Transport and Diffusion from Wind Tunnel to Terrain Scales, *89th American Meteorological Society Annual Meeting, Eighth Symposium on the Urban Environment*, Phoenix, USA

T. Yamada, 2004: Merging CFD and Atmospheric Modeling Capabilities to Simulate Airflows and Dispersion in Urban Areas. *Computational Fluid Dynamics Journal*, 13(2):47, 329-341.

T. Yamada, 2002: Modification of a Mesoscale Atmospheric Model for Simulation of Airflow around Buildings, *Air & Waste Management Association 95th Annual Conference and Exhibition*, Baltimore, USA

T. Yamada, 2000a: Numerical Simulations of Airflows and Tracer Transport in the Southwestern United States, *Journal of Applied Meteorology*, 39, 399-411.

T. Yamada, 2000b: Lagrangian Dispersion Model for Nonneutrally Buoyant Plumes, *Journal of Applied Meteorology*, 39, 427-436.

T. Yamada and S. Bunker, 1988: Development of a Nested Grid, Second Moment Turbulence Closure Model and Application to the 1982 ASCOT Brush Creek Data Simulation, *Journal of Applied Meteorology*, 27, 562-578.