



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI
EGYETEM

PHD TÉZISFÜZET

Atmoszférikus áramlások numerikus
szimulációja általános célú áramlástani
megoldókkal

Szerző:

BALOGH Miklós

Témavezető:

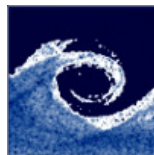
Dr. KRISTÓF Gergely

*Az értekezés a PhD követelmények teljesítésének
megfelelően került benyújtásra*

Gépészmérnöki Kar



Áramlástan tanszék



2014. szeptember 24.

Bevezető

A légköri áramlások számszerű vizsgálata azóta fejlődik intenzíven, amióta számítógépeket alkalmazunk az ilyen összetett problémák megoldására. Az ENIAC volt az első általános célú elektronikus számítógép, és egy légköri szimulációs feladat egyike volt az első sikeresen kivitelezett számításoknak, amit ezen a forradalmi gépen elvégeztek. Az utóbbi évtizedekben a számítástechnika rohamos fejlődését figyelhattuk meg, amely megteremtette a mezo- és mikro-léptékű légköri jelenségek részletes numerikus vizsgálatának lehetőségét. Mivel a térbeli felbontás az egyre kisebb léptékek felé közelít a számítási kapacitás növekedésével, egyre több részletet kell figyelembe vennünk az áramlási mezőre gyakorolt hatásaiknak megfelelően. Ezek a részletek, mint az építmények és szerkezetek geometriája turbulenciát keltenek, és módosítják az áramlás mintázatát kisebb léptékeken. Az általános célú áramlástani megoldók megfelelően kezelhetik a geometriai kényszerek hatásait, de a légköri áramlások fizikai sajátosságainak reprezentációja továbbra is kihívást jelent.

Ez a kutatás az általános célú áramlástani megoldókkal végzett, mikro- és mezo-léptékű légköri áramlások numerikus szimulációjára összpontosít. Az általános mérnöki gyakorlatban egyre nagyobb igény jelentkezik a kis léptékű légköri jelenségek pontos leírására, hiszen a fenntartható fejlődés érdekében, a mérnöki alkotásoknak egyre több környezetvédelmi és energetikai szempontnak kell megfelelniük. Számos mérnöki feladat kapcsolódik szorosan a légköri folyamatokhoz, például a szélfarmok optimális telepítésének, a városi átszellőzésének, az épületekre és mérnöki műtárgyakra ható szélterhelésnek, valamint a szennyezőanyagok terjedésének a vizsgálata. Ennek megfelelően ez a tanulmány a mérnöki gyakorlatban széles körben használt megoldók adaptációjával, modellek fejlesztésével, verifikációjával és validációjával, valamint a modellezés folyamatának kidolgozásával foglalkozik. A munka négy nagyobb egységre tagolódott, amelyek lefedik a kutatás során vizsgált problémaköröket.

Az első problémakör a neutrális légköri határréteg (ABL) áramlások numerikus szimulációihoz használt peremfeltételekre fókuszál. A feladat fizikailag helyes peremfeltételeket igényel, amelyek jellemzőek az egész határrétegre. Mivel az légkört alulról a földfelszín

határolja, annak alsó határfelületét mindég érdesnek tekinthetjük. A mérnöki gyakorlatban az érdes falfüggvényeket alkalmazzuk a felületi érdesség hatásának modellezésére, a homokérdességgel és az érdességi konstanssal jellemezve a felületi minőségét. Ezzel szemben a neutrális határréteg leírásánál a felület minőségét az érdességi magassággal jellemezzük, a meteorológiai terminológiának megfelelően. Emiatt az általános célú megoldókban rendelkezésünkre álló érdes falfüggvények és a légköri profilok együttes alkalmazása vitatható, hiszen a teljesen kialakult belépő profilok elfajulnak a tartomány hossza mentén, még teljesen sík, homogén érdességű felszín mellett is, ami így inhomogén határréteghez vezet.

A második problémakör a komplex domborzat feletti áramlások szimulációjával foglalkozik. Egy olyan turbulenciamodell, amit a homogén neutrális ABL problémáinak megoldására fejlesztettünk és alkalmaztunk, nem megfelelő a komplex domborzat felett inhomogén határrétegekre. A megoldás egy általánosított turbulencia modell lehet, amely érvényes kevert határrétegekre is.

A harmadik problémakör a városi határréteg szimulációját foglalja magába. A városi áramlások modellezésénél az épületek geometriája figyelembe vehető a térbeli diszkrétizáció során, de ez magas számítási költségeket von maga után, hiszen a szükséges térbeli felbontás ($\sim 0.1 - 10$ m) kezelhetetlenül nagy számú cellát eredményez, főleg nagyobb méretű tartományok esetén. A meteorológiai célokra használt korlátos tartományú légkörmodellek térbeli felbontása ($\sim 100 - 10000$ m) nem teszi lehetővé az épületek geometriai részleteinek felbontását, de a beépített környezet hatása parametrizálható. Ezt a két skálát közelítenünk kell egymáshoz, hiszen a számítási költségeket csökkentenünk kell, de az áramlás fontos részleteit fel kell bontanunk annak érdekében, hogy elfogadható eredményeket kapjunk ésszerű számítási igény mellett.

Az utolsó nagyobb egység számos kisebb részre tagolódik, mivel a légköri áramlások szimulációja számos problémáspecifikus feladatot foglal magába, mint például a komplex domborzat geometriai reprezentációja, a peremfeltételek beállítása, a felületi érdesség és más felszínparaméterek megadása, valamint a hálógenerálás az előbbieket figyelembevételel. Ezek a feladatok különböznek az általános mérnöki gyakorlat feladataitól, ezért specializált módszertanra van szükségünk.

Eredmények és értékelésük

Amint azt a bevezetőben említettem, a kutatás négy problémakörre tagolódik, amiket a következőkben tárgyalok. Bemutatom a problémák megoldására kifejlesztett módszereket, közelítéseket és modelleket azok eredményeivel együtt.

Az érdes falfüggvények parametrizációjából adódó problémák leküzdésére egy alternatív számítási módszert vezettem le az érdeességi paraméterek meghatározásához, első-rendbéli egyezést előírva a falfüggvény és a belépő profil által számított sebességre, a fal melletti első cellában. Élve azzal az egyszerűsítéssel, hogy a fali érdeesség a rezsim teljesen érdes tartományába esik, a módosított érdeességi konstans és az ekvivalens homok érdeességet az első cellaközéppont faltávolságából és a érdeességi magasságból számítjuk ki. Az új módszernek megvan az az előnye, hogy az alkalmazása nem igényli a falfüggvény módosítását, így az közvetlenül alkalmazható a legtöbb általános célú CFD megoldóban. Meg kell jegyezni, hogy a módszer alkalmazását limitálhatja a megoldóban megadott érdeességi konstans tartomány. A belépő peremfeltételek áramlás irányban történő elfajulása motiválta egy konzisztens belépő és fali peremfeltétel készlet kifejlesztését és implementálását. A módosítások alapjául a STD $k-\epsilon$ turbulencia modell szolgált, amit úgy módosítottam, hogy az érvényes legyen az egész homogén neutrális határrétegre (HBL), azaz hogy biztosítva legyen a modell, a belépő peremfeltételek és a falfüggvények összhangja. A módszert kiterjesztettem a határréteg fölé egy új profilkészlet alkalmazásával, amely egy négy paraméterű turbulens kinetikus energia profilt tartalmaz annak érdekében, hogy az jobb egyezést biztosítson a peremfeltételek és a kísérleti profilok között. Levezettem a kiterjesztett módszernek megfelelő forrástagokat, amelyek biztosítják a modell érvényességét a határrétegben, és a felett is. Az így kiterjesztett turbulencia modellt HBL $k-\epsilon$ modellnek neveztem el. A belépő peremfeltételeket, falfüggvényeket és az implementált HBL $k-\epsilon$ modellt valós skálán elméleti profilokkal, laboratóriumi skálán pedig három különböző szélcsatorna kísérlet méréseivel validáltam. Az eredmények azt szemléltetik, hogy az új belépő profilkészlet visszaadja a mért profilokat minden vizsgált esetben, ahogy azt a 0.8 feletti korrelációs együtthatók mutatják. Ez jelentős előrelépést jelent a korábban javasolt peremfeltételekhez képest, amelyeknél a turbulens kinetikus energia profilok korrelációs együtthatói rendre 0.119, 0.416 és -0.785 értéket értek el, és

amelyeket az új módszer rendre 0.822, 0.966 és 0.941 értékre javított. Mindezek mellett, a kiterjesztett modellre levezett forrástagok biztosítják a sebesség és turbulencia profilok áramlás irányú homogenitását, amint ezt a tartomány belépő és kilépő oldalán tapasztalt egyezés mutatja, még a határreteg vastagság felett is.

A komplex domborzat felett kialakuló inhomogén ABL szimulációinak megfelelően továbbfejlesztettem a HBL $k-\varepsilon$ modellt, hogy az a határreteg homogénnek tekinthető részein saját formalizmusát, a komplex domborzat által okozott áramlásirányú inhomogenitás esetén pedig a STD $k-\varepsilon$ modellt alkalmazza. Az új modell, az ún. ABL $k-\varepsilon$ turbulencia modell folytonosan sima átmenetet biztosít a formalizmusok között, a referencia sebesség és a szimuláció során számított sebesség normalizált különbsége alapján. Az átmenet rohamosságát egy új szinuszos hatványfüggvénnyel adtam meg, kiegészítő küszöbérték eltolás alkalmazásával, amely a fal melletti kicsiny numerikus eltérések által okozott, korábbi átmeneti függvényeknél tapasztalt hamis átmenet megakadályozására szolgál. A hatványfüggvény optimális kitevőjét N -t különböző komplex domborzat feletti áramlások szimulációjával határoztam meg. A vizsgált egész értékek közül az $N = 3$ esetén kaptam legmegfelelőbb eredményeket. Az ABL $k-\varepsilon$ turbulencia modellt laboratóriumi és valós skálán is mérésekkel validáltam, az optimális kitevő használata mellett. A szimulációkkal kapott sebesség jól egyezett a mérésekkel mind laboratóriumi és valós skálán, míg a turbulens kinetikus energia elfogadható egyezést mutatott. Annak érdekében, hogy az ABL $k-\varepsilon$ modellnek köszönhető javulás mérhető legyen, az eredményeit olyan szimulációs eredményekkel hasonítottam össze, amelyeket a szakirodalomban korábban javasolt formalizmusok alkalmazásával kaptam. Az új eredmények jelentősen jobbnak bizonyultak, mint a korábban javasolt módszerek alkalmazásával kapottak. A sebesség esetén 10–15%-os, míg a turbulens kinetikus energiára esetén 10–20%-os találati pontosság javulást okozott az új modell alkalmazása. A szakirodalomban megtalálható ajánlásoknak megfelelően implementáltam a Kato-Launders (KL) modifikációt, a Yap korrekciót, valamint a Murakami-Mochida-Kondo (MMK) modellt, hogy javítsam az ABL $k-\varepsilon$ modell képességeit olyan áramlások szimulációiban, ahol torlódás vagy leválás figyelhető meg. Ezek hatását részletesen megvizsgáltam a korábbi validációra használt eseteken. A vizsgálatokkal kimutattam, hogy laboratóriumi skálán, a módosítások alkalmazása 1–2%-os találati pontosság csökkenést okoz a sebességre, és a turbulens kinetikus energiára egyaránt. Valós skálán a Kato-Launders modifikáció és a Yap korrekció közös alkalmazása nem eredményez lényeges javulást, viszont az MMK modell jelentősen javított az eredményeken, elérve a 100%-os találati pontosságot a sebességre vonatkozóan. Annak érdekében, hogy tovább bővítssem az ABL $k-\varepsilon$ modellel kapcsolatos vizsgálatokat, számszerű összehasonlítást végeztem az ANSYS-Fluent és az OpenFOAM általános célú megoldók eredményei között. Az OpenFOAM megoldó jelentősen jobb eredményeket mutatott hasonló számítási költségek mellett. A megoldókba eredetileg beépített

modellekkel kapott számszerű eredmények hasonlóak voltak, bár rosszabbak, mint az új modellel kapottak. Megállapítottam, hogy a szignifikáns eltérések az implementáció módjának különbségeiből származnak. Míg az OpenFOAM egy nyílt forráskódú C++ könyvtár, egy új modell implementációja egyértelmű. Ezzel szemben az ANSYS-Fluent kereskedelmi megoldó csak felhasználói függvényekkel módosítható, ráadásul a modellek formalizmusának forrása nem hozzáférhető, ezért a pontos implementáció lehetőségei korlátozottak.

A harmadik problémakör kezelésére egy skála adaptív hibrid módszert fejlesztettem ki, amely kombinálja a meteorológiai gyakorlatban alkalmazott parametrizációs módszerek és a geometria explicit modellezésén alapuló, annak részleteit felbontó CFD módszerek előnyeit. A módszer lényege, hogy a vizsgálat szempontjából mellékes területeken a porózus ellenállás erő közelítést alkalmazza az épületek és a vegetáció hatásának leírására, míg hálósűrítéssel az épületblokkok, vagy akár néhány kiválasztott épület geometriája explicit figyelembe vehető a azokon a területeken, ahol az áramlás jellemzői fontosak az analízis szempontjából. Egy olyan speciális hálózó eljárást fejlesztettem ki, amely lehetővé teszi a különböző felszínborítottságú területek elkülönítését, továbbá folytonos átmenetet biztosít a kevésbé fontos területeken alkalmazott durvább és a célterületen alkalmazott legfinomabb felbontású háló között. A porózus ellenállás erő közelítést a légköri áramlásokra specializáltam és azt az ANSYS-Fluent általános célú megoldóban implementáltam, a momentum, a turbulens kinetikus energia, és disszipációjának transzport-egyenleteihez adott forrástagokkal. A forrástagok a lokális cellaváltozók értékéből, valamint az inicializációnál minden cellára automatikusan megadott felszínparaméterekből kerülnek kiszámításra. A skála adaptív hibrid módszert felskálázott szélcsatorna mérésekkel validáltam, az összehasonlítás érdekében a tisztán explicit és implicit módszerek alkalmazásával együtt. A tisztán explicit módszer a elérte a validációs határt (66%) az áramlásirányú és a függőleges sebesség komponensekre egyaránt, rendre 75.44% és 77.21%-os találati pontossággal. A turbulens kinetikus energia találati pontossága éppen csak elmarad a validációs határtól 64.84% értékével. Az explicit eredmények jól egyeznek a korábban végzett MISKAM szimulációk eredményeivel a célterületen elhelyezkedő mérőtoronynál, habár a mérésekkel való egyezés nem kielégítő. A hibrid és explicit módszer eredményei jól egyeztek a célterületen, viszont a új módszer lényegesen kevesebb számítási erőforrást igényelt, nevezetesen az ötödét. A rétegre átlagolt sebességre kapott eredmények jó egyezést mutattak a három különböző módszer között a tetőmagasság alatt, míg kisebb eltérések mutatkoztak a felett, ami azt bizonyítja, hogy az implicit módszer képes érzékelteni a tetőréteg hatását nagyobb skálán. Az új módszert elméleti profilokhoz hasonlítottam egy gyakorlati alkalmazási példában, amely demonstrálta a módszer használatában rejlő lehetőségeket a valódi szélmérnöki feladatokban.

Az utolsó problémakör által felvetett problémaspecifikus feladatok kezelésére megoldási módszert dolgoztam ki. Az oldalsó peremfeltételek megadásának egyszerűsítésére, javaslatot tettem a tartomány kibővítésére az ún. relaxációs zónával. Ebben a tartományt körbefoglaló zónában a domborzat és a felszínborítottság paraméterei is folytonosan sima átmenettel kapcsolódnak a tartomány határain megadott állandó értékű felszínmagassághoz és felszínparaméterekhez. Ez nem csak leegyszerűsíti a peremfeltételek megadását, de javítja a számítások numerikus stabilitását és konvergenciáját. Ajánlásokat fogalmaztam meg a számítási tartomány kiterjesztett méretére és a letérképezési vetület kiválasztására vonatkozóan, a célterület helyzetének és méretének, valamint a domborzat sajátosságainak függvényében. A kiterjesztett méretre vonatkozó ajánlásokat numerikus szimulációk sorozatával támasztottam alá, míg a letérképezési vetületre vonatkozó ajánlásokat gyakorlati megfontolások alapján adtam meg. Hálókészítési módszereket fejlesztettem ki olyan tartományok hatékony és automatikus hálózásához, amelyek komplex domborzattal és egymástól elkülönülő, különböző felszínborítottságú területekkel rendelkeznek. A domborzat simítását és a relaxációs zóna kialakítását is a hálókészítő keretrendszerbe építettem be. Kidolgoztam a légköri szimulációk előkészítésének valamint végrehajtásának módszertanát és azt különböző eseteken sikeresen alkalmaztam, új turbulencia modellezési módszerek alkalmazásával. Ez a módszertan útmutatóként szolgál a mérnöki gyakorlatban előforduló légköri feladatok megoldásához.

Új tudományos eredmények

1. Tézis: Peremfeltételek légköri áramlások szimulációihoz

Új falfüggvény parametrizációt vezettem le érdes falakra az atmoszférikus áramlások modellezésére. Egy korábbi módszert valóságosabb belépő peremfeltételekkel terjesztettem ki, amely egy négy paraméterű turbulens kinetikus energia profilt tartalmaz. Levezettem a homogén neutrális atmoszférikus határréteg szimulációjához szükséges forrástagokat. A kiterjesztett módszert alkalmazó turbulencia modellt, aminek neve HBL $k-\epsilon$, az OpenFOAM általános célú áramlástani megoldóba implementáltam, és azt mérésekkel validáltam, a korábban javasolt módszerekkel együtt az összehasonlításhoz.

- a) Az érdes falfüggvények parametrizációs problémáinak megoldására egy új alternatív formalizmust vezettem le az érdeességi konstans és a homokérdesség meghatározására. A módszer előnye az, hogy alkalmazása nem igényli a CFD megoldók által általánosan használt falfüggvény megváltoztatását, amelyeket a CFD megoldókban általánosan.
- b) Egy konzekvens peremfeltétel és falfüggvény készletet implementáltam az OpenFOAM szimulációs rendszerbe. A OpenFOAM STD $k-\epsilon$ turbulencia modelljét úgy módosítottam, hogy az érvényes legyen a homogén neutrális atmoszférikus határrétegben (HBL), azaz hogy biztosítva legyen a peremfeltételek és a modell összhangja [1, 2]. Ez utóbbit kiterjesztettem a határréteg fölé egy új profilkészlettel, amely egy négy paraméterű turbulens kinetikus energia profilt tartalmaz. Levezettem a kiterjesztett módszernek megfelelő forrástagokat, amelyek biztosítják a modell érvényességét a határrétegben, és a felett is [3]. A kiterjesztett turbulencia modellt HBL $k-\epsilon$ modellnek neveztem el.
- c) Az implementált peremfeltételeket, fal függvényeket és a HBL $k-\epsilon$ modellt valós skálán elméleti profilokkal, laboratóriumi skálán pedig mérésekkel validáltam. Az eredmények azt szemléltetik, hogy az új belépő profilkészlet visszaadja a mért profilokat minden vizsgált esetben, ahogy azt a 0.8 feletti korrelációs együtthatók

mutatják. Ez jelentős előrelépést jelent a korábban javasolt peremfeltételekhez képest. Emellett, a kiterjesztett modell biztosítja a sebesség és turbulencia profilok áramlás irányú homogenitását, amint ezt a tartomány belépő és kilépő oldalán tapasztalt egyezés mutatja, még a határreteg vastagság felett is [3].

2. Tézis: Domborzat feletti áramlások modellezése

A HBL k - ϵ modellt úgy általánosítottam, hogy az egyaránt alkalmas legyen homogén és inhomogén, domborzat feletti ABL áramlások modellezésére. Egy új szinuszoidális átvivőfüggvényt alkottam meg az univerzális, úgynevezett ABL k - ϵ modellhez. Az ABL k - ϵ modellt mérésekkel validáltam. A szakirodalomban ajánlott, torlódásos és leválásos áramlásokra vonatkozó turbulencia modell modifikációkat implementáltam az általánosított modellben, és hatékonyságukat különböző eseteken vizsgáltam.

- a) A HBL k - ϵ modellt úgy általánosítottam, hogy az a határreteg homogén régióiban a HBL modell formalizmusát alkalmazza, és folytonos átmenettel váltson a STD modell formalizmusra azokon az inhomogén részeken, ahol a domborzat jelentős hatással van a sebességmezőre. Az általánosított, ún. ABL k - ϵ modell folytonosan sima átmenetet biztosít a két formalizmus között a referencia és a számított sebesség normalizált különbsége alapján. Az átmenet rohamosságát egy új szinuszoidális hatványfüggvénnyel adtam meg. A hatványfüggvény optimális kitevőjét N -t különböző komplex domborzat feletti áramlások szimulációjával határoztam meg. A vizsgált egész értékek közül az $N = 3$ esetén kaptam legmegfelelőbb eredményeket [1, 2, 4].
- b) Az ABL k - ϵ modellt laboratóriumi és valós skálán mérésekkel validáltam az optimális kitevőt használva. Az új eredményeket a szakirodalomban korábban javasolt módszerekkel kapottakhoz hasonlítottam. A számított sebesség jól egyezett a mérésekkel, mind laboratóriumi, mind valós skálán, és elfogadható egyezést kaptam a turbulens kinetikus energiára. Az új eredmények jelentősen jobbnak bizonyultak, mint a korábban javasolt módszerekkel kaphatók [1, 2, 4].
- c) A szakirodalmi ajánlásoknak megfelelően implementáltam a Kato-Launder modifikációt, a Yap korrekciót, valamint az MMK modellt, hogy javítsam az ABL k - ϵ modell képességeit olyan áramlások szimulációiban, ahol torlódás vagy leválás figyelhető meg. Ezek hatékonyságát részletesen megvizsgáltam 3D eseteken, mind laboratóriumi, mind valós skálán. A vizsgálatokkal kimutattam, hogy a Kato-Launder modifikáció és a Yap korrekció nem eredményez lényeges javulást, viszont az MMK modell jelentősen javított a valós skálájú eredményeken [1, 2, 4].

3. Tézis: Városi áramlások skála adaptív modellezése

Újszerű skála adaptív hibrid módszert dolgoztam ki a városi környezet légköri áramlásainak szimulációjához, amit egy általános célú megoldóban implementáltam, mérésekkel validáltam, és egy a mérnöki gyakorlatnak megfelelő alkalmazáson verifikáltam.

- a) Az új hibrid módszer kombinálja az implicit, nagyobb skálákon alkalmazott porózus ellenállás erő módszer és a geometria explicit modellezésén alapuló, annak részleteit felbontó CFD módszerek előnyeit. Az új módszer lényege az, hogy a tartomány kevésbé fontos területein a porózus ellenállás erő közelítést alkalmazza az épületek és a vegetáció hatásának leírására, míg az analízis szempontjából fontos célterületen, a háló sűrítésével figyelembe veszi a városi környezet geometriai részleteit. Egy olyan speciális hálózó eljárást fejlesztettem ki, amely lehetővé teszi a különböző felszínborítottságú területek elkülönítését, továbbá folytonos átmenetet biztosít a kevésbé fontos területeken alkalmazott durvább és a célterületen alkalmazott legfinomabb felbontású háló között [5, 6].
- b) A porózus ellenállás erő közelítést a légköri áramlásokra specializáltam és azt az ANSYS-FLUENT általános célú megoldóban implementáltam. A skála adaptív hibrid módszert felskálázott szélcsatorna mérésekkel validáltam, az összehasonlítás érdekében a tisztán explicit és implicit módszerek alkalmazásával együtt. A rétegre átlagolt sebességre kapott eredmények jó egyezést mutattak a három különböző módszer között a tetőmagasság alatt, míg kisebb eltérések mutatkoztak a felett. A hibrid és explicit módszer eredményei jól egyeztek a célterületen, viszont a új módszer lényegesen kevesebb számítási erőforrást igényelt. Az új módszert elméleti profilokhoz hasonlítottam egy gyakorlati alkalmazási példán keresztül, amely demonstrálta a módszer használatában rejlő lehetőségeket a valódi szélmérnöki feladatokban [5, 6].

4. Tézis: Légköri áramlások szimulációinak módszertana

Kialakítottam a légköri áramlástani szimulációk módszertanát, ami azokra a problémáspecifikus feladatokra fókuszál, amik eltérnek az általános mérnöki gyakorlat feladataitól. Ilyen feladat a komplex domborzat geometriai realizációja, az oldalsó peremfeltételek és a felszínparaméterek megadása, valamint a hálókészítés folyamata és a turbulencia modellezése.

- a) Az oldalsó peremfeltételek megadásának egyszerűsítésére, javaslatot tettem a tartomány kibővítésére az ún. relaxációs zónával. Ebben a tartományt körbefoglaló zónában a domborzat és a felszínborítottság paraméterei is folytonosan sima átmenettel kapcsolódnak a tartomány határain megadott állandó értékű felszínmagassághoz és felszínparaméterekhez. Ez nem csak leegyszerűsíti a peremfeltételek megadását, de javítja a számítások numerikus stabilitását és konvergenciáját [7, 5, 6].
- b) Ajánlásokat fogalmaztam meg a számítási tartomány kiterjesztett méretére és a letérképezési vetület kiválasztására vonatkozóan, a célterület helyzetének és méreteinek, valamint a domborzat sajátosságainak függvényében. A kiterjesztett méretre vonatkozó ajánlásokat numerikus szimulációk sorozatával támasztottam alá, míg a letérképezési vetületre vonatkozó ajánlásokat gyakorlati megfontolások alapján adtam meg.
- c) Hálókészítési módszereket fejlesztettem ki olyan tartományok hatékony és automatikus hálózásához, amelyek komplex domborzattal és egymástól elkülönülő, különböző felszínborítottságú területekkel rendelkeznek. A domborzat simítását és a relaxációs zóna kialakítását is a hálókészítő keretrendszerbe építettem be [7, 5, 6].
- d) Kidolgoztam a légköri szimulációk előkészítésének valamint végrehajtásának módszertanát és azt különböző eseteken sikeresen alkalmaztam (lásd pl. [6, 2, 1, 8, 4]), új turbulencia modellezési módszerek alkalmazásával. Ez a módszertan útmutatóként szolgál a mérnöki gyakorlatban előforduló légköri feladatok megoldásához.

Publikációk tézispontokhoz

- [1] M. Balogh, A. Parente, and C. Benocci. RANS simulation of ABL flow over complex terrains applying an enhanced k- ϵ model and wall function formulation. In *13th International Conference on Wind Engineering*, 2011.
- [2] M. Balogh, A. Parente, and C. Benocci. RANS simulation of ABL flow over complex terrains applying an enhanced k- ϵ model and wall function formulation: Implementation and comparison for FLUENT and OpenFOAM. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012(104–106):360–368, 2012.
- [3] M. Balogh and A. Parente. Extended formulation of an enhanced k- ϵ model for realizable boundary conditions. In *The 6th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2014)*, pages 382–383, 2014. 6 page long extended abstract in digital proceedings.
- [4] C. Peralta, A. Parente, M. Balogh, and C. Benocci. RANS simulation of the atmospheric boundary layer over complex terrain with a consistent k-epsilon model formulation. In *The 6th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2014)*, pages 236–237, 2014. 8 page long extended abstract in digital proceedings.
- [5] M. Balogh and G. Kristóf. Multiscale modelling approach for urban boundary layer flows. In *ICUC7 Proceedings: The 7th international conference on urban climate*, 2009.
- [6] M. Balogh and G. Kristóf. Fine scale simulation of turbulent flows in urban canopy layers. *Időjárás*, 114(1–2):135–148, 2010.
- [7] M. Balogh and G. Kristóf. Automated grid generation for atmospheric dispersion simulations. In *microCAD 2007 International Scientific Conference*, 2007.
- [8] M. Balogh. Általános célú áramlástanai megoldók alkalmazása a mérnöki meteorológiában és a meteorológiai feladatok megoldásában: Az openfoam szoftvercsomag. In A.Z. Gyöngyösi and T. Weidinger, editors, *Alkalmazott számszerű előrejelzés* –

numerikus időjárési és csatolt modellek a gyakorlatban., chapter 6, pages 135–153.
ELTE TTK, 2013.

Publikációk a témával kapcsolatban

- [1] M. Balogh. Repülőgépes mérések felhasználása az aladin számszerű időjárás-előrejelzési modellben. *Légekör*, 51(3):24–36, 2006.
- [2] N. Rácz, G. Kristóf, T. Weidinger, and M. Balogh. Simulation of gravity waves and model validation to laboratory experiments. In *Proceedings of the 6th International Conference on Urban Air Quality*, 2007.
- [3] G. Kristóf, N. Rácz, and M. Balogh. Adaptation of pressure based CFD solvers to urban heat island convection problem. In *Proceedings of the 6th International Conference on Urban Air Quality*, 2007.
- [4] G. Kristóf, N. Rácz, and M. Balogh. CFD analyses of flow in stratified atmosphere. In *Proceedings of International Workshop on Physical Modelling of Flow and Dispersion Phenomena*, 2007.
- [5] G. Kristóf, N. Rácz, and M. Balogh. Application of ANSYS-FLUENT for meso-scale atmospheric flow simulations. In *ANSYS Conference & 25. CADFEM Users Meeting*, 2007.
- [6] M. Balogh and G. Kristóf. Automated grid generation for atmospheric dispersion simulations. In *microCAD 2007 International Scientific Conference*, 2007.
- [7] M. Balogh. A felszín légekör kölcsönhatások számszerűsítése kombinált talajnedvesség-előrejelző modell segítségével. *Légekör*, 52(1):30–35, 2007.
- [8] T. Lajos, M. Balczó, M. Balogh, and I. Goricsán. Többléptékű terjedési modellrendszer fejlesztése és tesztelése, development and testing of a multiscale model system. *GÉP*, LIX(5–6):17–19, 2008.
- [9] G. Kristóf, N. Rácz, and M. Balogh. Atmoszférikus áramlások szimulációja, simulation of atmospheric flows. *GÉP*, LIX(5–6):24–25, 2008.
- [10] G. Kristóf, N. Rácz, and M. Balogh. Adaptation of pressure based CFD solvers for mesoscale atmospheric problems. *Boundary Layer Meteorology*, 131(1):85–103, 2009.

-
- [11] M. Balczó, M. Balogh, I. Goricsán, J. M. Suda, and T. Lajos. Dispersion modelling of a 9 km long section of the budapest ring motorway. In *Proceedings of International Workshop on Physical Modelling of Flow and Dispersion Phenomena*, 2009.
- [12] M. Balogh and G. Kristóf. Multiscale modelling approach for urban boundary layer flows. In *ICUC7 Proceedings: The 7th international conference on urban climate*, 2009.
- [13] M. Balogh and G. Kristóf. Fine scale simulation of turbulent flows in urban canopy layers. *Időjárás*, 114(1–2):135–148, 2010.
- [14] M. Balogh, A. Horányi, A. Z. Gyöngyösi, K. André, M. Mile, T. Weidinger, and P. Tasnádi. The ALADIN/CHAPEAU model as a new tool for education and inter-comparison purposes at the eötvös loránd university in budapest. In Tilly Drieseenaar No. 58, editor, *HIRLAM Newsletter*, pages 107–112. HIRLAM NWP Europe, 2011.
- [15] M. Balogh, A. Horányi, A. Z. Gyöngyösi, M. Mile, T. Weidinger, and P. Tasnádi. Development of a uniform model postprocessing system of the aladin chapeau model for education and comparison study, 4 2011. Poster at 21st ALADIN Workshop & HIRLAM All Staff Meeting 2011, 5-8 April 2011, Norrköping, Sweden.
- [16] M. Balogh, A. Parente, and C. Benocci. RANS simulation of ABL flow over complex terrains applying an enhanced k- ϵ model and wall function formulation. In *13th International Conference on Wind Engineering*, 2011.
- [17] I. Goricsán, M. Balczó, M. Balogh, K. Czader, A. Rákai, and Cs. Tonko. Simulation of flow in an idealised city using various CFD codes. *International Journal of Environment and Pollution*, 44(1–4):359–367, 2011.
- [18] M. Balczó, M. Balogh, I. Goricsán, T. Nagel, J. M. Suda, and T. Lajos. Air quality around motorway tunnels in complex terrain - computational fluid dynamics modeling and comparison to wind tunnel data. *Időjárás*, 115(3):179–204, 2011.
- [19] M. Balogh, A. Parente, and C. Benocci. RANS simulation of ABL flow over complex terrains applying an enhanced k- ϵ model and wall function formulation: Implementation and comparison for FLUENT and OpenFOAM. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012(104–106):360–368, 2012.
- [20] M. Balogh. Általános célú áramlástanai megoldók alkalmazása a mérnöki meteorológiában és a meteorológiai feladatok megoldásában.: Az openfoam szoftvercsomag. In A.Z. Gyöngyösi and T. Weidinger, editors, *Alkalmazott számszerű előrejelzés – numerikus időjárási és csatolt modellek a gyakorlatban.*, chapter 6, pages 135–153. ELTE TTK, 2013.

-
- [21] M. Balogh and A. Parente. Extended formulation of an enhanced k- ϵ model for realizable boundary conditions. In *The 6th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2014)*, pages 382–383, 2014. 6 page long extended abstract in digital proceedings.
- [22] C. Peralta, A. Parente, M. Balogh, and C. Benocci. RANS simulation of the atmospheric boundary layer over complex terrain with a consistent k-epsilon model formulation. In *The 6th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2014)*, pages 236–237, 2014. 8 page long extended abstract in digital proceedings.