

## Válasz

Házi Gábor, az MTA doktorának bírálataira

Janiga Gábor:

*Numerical Investigations of Turbulent Structures in Fluids*  
című MTA doktori értekezésére vonatkozóan

Köszönöm a Bíráló észrevételeit, javaslatait, valamint értékes megjegyzéseit.

A Bíráló helyesen rávilágított arra, hogy az értekezés fő célja a turbulens áramlási struktúrák vizsgálata volt. Ez azonban nem korlátozódik kizárólag a 4. és 5. fejezetekre. A 3. fejezetben bemutatott ábrák a 23. és 24. oldalakon már ezt a kérdéskört járják körül. Ezen felül ebben a fejezetben vizsgáltam meg a turbulens sebességekből számított energiaspektrumokat, valamint a spektrális entrópia változását.

Először a formai megjegyzésekre szeretnék reflektálni.

1. megjegyzés: *A Jelölt a 3. fejezetben a 25. és 28. oldalon is hivatkozik a 3.7 ábrára.*

Válasz: Köszönöm a Bírálónak, hogy felhívta a figyelmemet egy sajnálatos hibára, hogy két különböző ábrát is 3.7. sorszámmal jelöltem. A LaTeX programkörnyezetben készített kézirat korábbi változata még nem tartalmazta ezt a hibát. Miután a 34. és 35. oldalon található ábrák méretét a jobb olvashatóság érdekében megnöveltem, az ábrák automatikusan a fejezet végére kerültek és itt vélhetően a 3.7 fejezet számlálója felülírta az ábra sorszámát szintén 3.7-re. Sajnálom, hogy ezáltal az ábrák automatikus sorszámozása a LaTeX környezetben egy fordítási hiba által a 3. fejezetben nem lett következetes.

Válasz a 2.a megjegyzésre:

Elfogadom a Bíráló azon felvetését, hogy a teljesség kedvéért célszerű lett volna az átmeneti áramlásokat már az értekezés kezdetén is megemlíteni.

Válasz a 2.b megjegyzésre:

Egyetértek a Bírálónak azzal észrevételével, hogy az átlagolás nem csak idő szerint történhet. Ha feltételezzük, hogy egy vizsgált mennyiség a térben homogén eloszlást mutat, akkor természetesen tér szerinti átlagolást is alkalmazhatunk. A gyakorlatban viszont a turbulens áramlásokban vizsgált

mennyiségek inhomogén eloszlása folytán, az idő szerinti átlagértékek pontról pontra váltakoznak a térben, ezért ebben az esetben a tér szerinti átlagolás ritkán célravezető.

Egy periodikus áramlás idő szerinti átlagolása esetében a periódus alapján végzett fázis-átlagolt értékek alkalmazása lehet indokolt.

(I) Általános esetben, ha az áramlási mennyiségek statisztikai értelemben állandó – stacionér – átlagértéket követnek, akkor egy időintegrál segítségével képezhetjük a megfelelő időbeni átlagértéket.

(II) Ha az időbeni átlagértékek időbeni változást mutatnak, akkor a statisztikában is használatos időpontok átlagolásával képezzük az adott jellemző időben változó időátlagait.

Az értekezésben alkalmazott idő szerint átlagolt kifejezés általános értelemben értendő, mely egyaránt jelképezi a fent említett (I)-es és (II)-es lehetőséget is.

Válasz a 3. megjegyzésre:

A 2.1 fejezetben a (2.3) és (2.4) egyenleteknél felvetett  $Y$ , valamint  $e_t$ -változók valóban nincsenek szó szerint nevesítve, azonban a szövegben utaltam ezek szerepére. Az  $Y$  a kémia alkotóelemek tömegarányára utal, mely valóban csak a 2.4 fejezetben van először megnevezve. A (2.4)-es energiaegyenletben az  $e_t$  egy ideális gáz tömegegységre vonatkoztatott fajlagos belső energiáját jelöli.

Válasz a 4. megjegyzésre:

A  $\varphi$  változó az értekezésben két környezetben is megjelenik, mely valóban zavaró lehet. A 2.3 alfejezetben bevezetett  $\varphi$ -vel jelzett mennyiség egy keverék ekvivalencia arányát jelöli. Ez a mennyiség az 5.1-es áttekintő táblázatban, valamint az 5.2-5.5 ábrákon kerül alkalmazásra. Az irodalom szokásos jelölését követve szintén  $\varphi$ -vel jelöltem a 2.6.1 alfejezetben bevezetett térbeli módusokat a POD felbontás kapcsán. Ez gyakran előfordul, hogy különböző tudományos területek szokásos jelölésrendszerében más-más mennyiségek jelennek meg azonos szimbólummal. Mivel az általam használt  $\varphi$  jelölés jelentései egymástól jól elkülönülnek és egy fejezeten belül nem keverednek, ezért erre nem fordítottam elegendő figyelmet.

Az alábbiakban igyekszem tételesen válaszolni a bírálóban feltett kérdésekre:

1. kérdés: *A 2.6.2. fejezetben szerepel a spektrál entrópia bevezetése, ami nekem egy kicsit zavaros. [...]*

Válasz: A klasszikus ortogonális dekompozíció (proper orthogonal decomposition, POD) a szinguláris értékek szerinti (SVD) felbontáson alapul. Az ehhez szükséges mátrix mérete  $M \times N$ , ahol a vizsgált térbeli pontok számát  $M$ , valamint a figyelembe vett időpontok számát  $N$  jelöli. A POD módszer egyik továbbfejlesztett változata az SPOD (snapshot POD, vagy Sirovich-féle POD) egy időszerinti autokorrelációs mátrixon alapszik, melynek mérete  $N \times N$ . Az így nyert sajátértékfeladat megoldásával  $N$  sajátértéket nyerünk. Berkooz<sup>1</sup> bizonyította, hogy a két módszer – az SVD felbontáson alapuló, illetve az SPOD is – azonos eredményre vezet. A mátrix méretéből adódóan könnyű felismerni, hogy az SVD változat elsősorban kis számú térbeli pont esetén előnyös, például kétdimenziós PIV mérések kiértékeléséhez. Ha a vizsgált térbeli pontok száma növekszik, például háromdimenziós esetekre, akkor az SPOD módszer válik hatékonyabbá. Bármelyik módszert is követjük, a feladat megoldása során nyert sajátértékek sorba rendezhetők nagyság szerint. Egy időben állandó – stacionér – áramlás esetén, csak egyetlen sajátérték lesz nullától különböző. Egy időben változó folyamat esetén azonban a rendszer energiája több sajátértéken oszlik el. Az értekezésben bevezetett spektrális entrópia ennek az energiának a sajátértékeken való eloszlását kívánja megmutatni. Ha csak egyetlen sajátértéket tekintünk, ahol a többi zérus, akkor az entrópia minimális, vagyis zérus. Az entrópia, vagyis a „rendezetlenség” akkor lenne maximális, ha az energia egyenlő mértékben oszlana el valamennyi sajátértéken, tehát ha a kinetikus energia valamennyi móduson egyforma szerepet játszana.

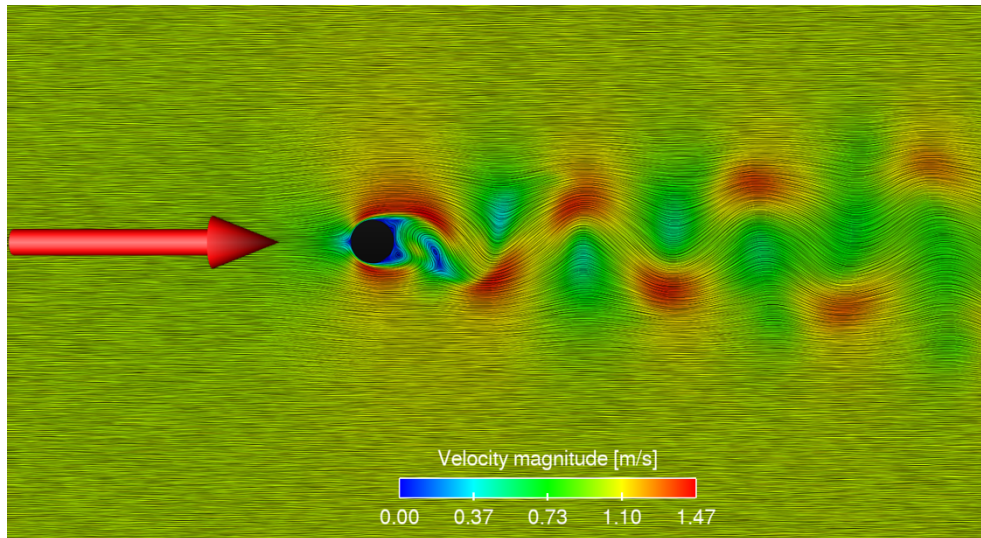
A vizsgálatot időskáláját korábban DNS szimulációk segítségével elemeztük a Reynolds-szám változtatása mellett<sup>2</sup>. A tanulmányban vizsgált idő kétszerese volt az integrál időskálának (integral time scales). Nagyobb Reynolds-számok esetén már 10 POD snapshot alkalmazása is elegendő a spektrális entrópia meghatározásához, mely kvalitatív értelemben alkalmas a különböző áramlási tartományok megkülönböztetésére.

A Bíráló által felvetett kérdés időben periodikus, de nem turbulens áramlások esetén arra ösztönzött, hogy egy Kármán-féle örvénysor kétdimenziós szimulációs eredményein keresztül illusztráljam a módszert.

---

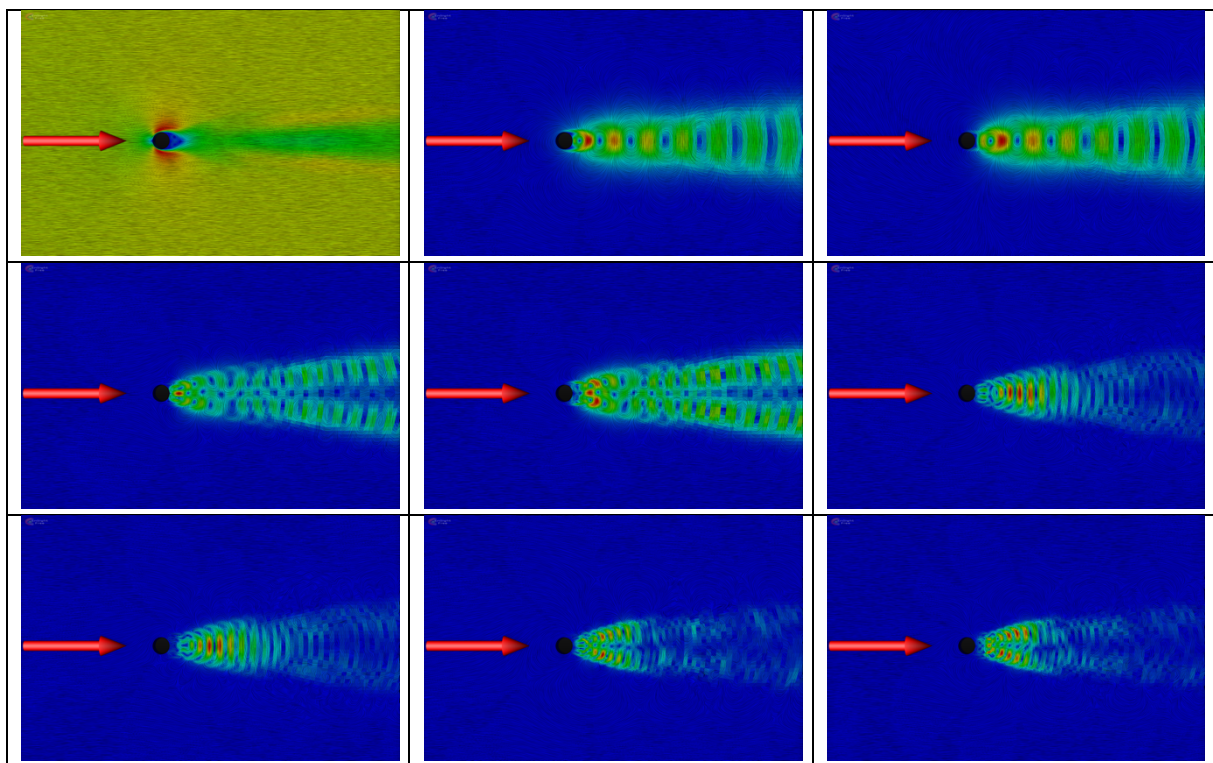
<sup>1</sup> Berkooz, G.: Turbulence, coherent structures and low dimensional models. PhD thesis. Cornell Univ. (1991)

<sup>2</sup> Abdelsamie, A., Janiga, G., Thévenin, D.: Spectral entropy as a flow state indicator, International Journal of Heat and Fluid Flow 68, 102–113 (2017) <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2017.09.013>



1. ábra: Egy álló körhenger körül kialakuló kétdimenziós lamináris áramlás numerikus szimulációval nyert sebességeloszlás pillanatképe

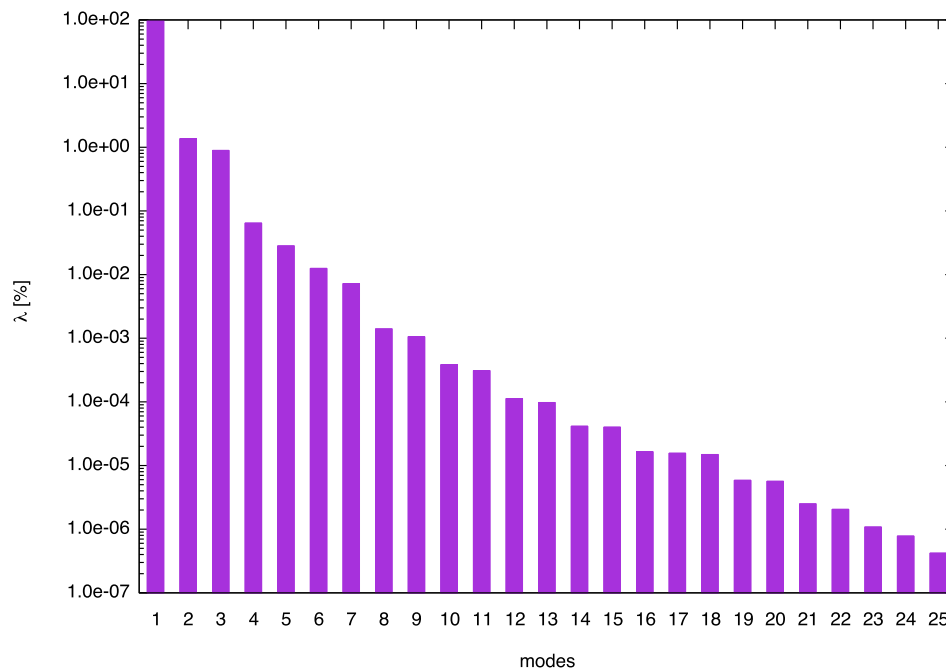
Az 1. ábrán egy álló körhenger körül kialakuló kétdimenziós lamináris áramlás numerikus szimulációval nyert sebességeloszlás pillanatképe látható. A POD módszerben a leváló örvények egy periódusát 26 egyenközű időlépés segítségével vizsgáltam.



2. ábra: A POD módszerből nyert első 9 módus

Az így nyert módusokból az első 9-et a 2. ábra mutatja be. A módusokhoz rendelt sajátértékeit a 3. ábra illusztrálja. Jól megfigyelhető az első módus kiemelt szerepe, mely a spektrális energiából önmaga 97,6 %-ért felelős. Ha ehhez még hozzávesszük a következő két módus egyenként közel 1 % körüli értékeit, akkor megállapítható, hogy az első három módus összesen a rendszer

csaknem 99,9 %-át lefedi. A Kármán-féle örvénysor ezen kétdimenziós modelljére 0,13-as spektrális entrópiát számítottam. Ez az alacsony érték a lamináris áramlások ismertetőjele.



3. ábra: A POD módusokhoz rendelt sajátértékek ábrázolása logaritmikusan léptékben

A spektrális entrópia alkalmazását véráramra, egy egyszerűsített folyóiratszámítás keretében vizsgáltam<sup>3</sup>. Ez a mennyiség többek között alkalmas lehet háromdimenziós időben változó áramlások egymással való összevetésére. Két különböző koponyaűri aneurizma esetén nagy felbontású mágneses rezonancia képalkotásának segítségével mért, időben változó véráramlási sebességeket vettem össze numerikus szimulációk eredményével. A mért értékekből származtatott spektrális entrópia értéke a lamináris áramlásokra jellemző 0,57-et, illetve 0,49-et eredményezett. Az azonos geometriában lamináris áramlás feltételezésével elvégzett szimulációkból nyert spektrális entrópia 0,60, illetve 0,66 volt.

2.a) kérdés: *A kérdésem az, hogy a Jelölt szerint az általa végzett számítások felbontása mennyire állt távol egy direkt numerikus szimuláció felbontásától (a határreteg a leírás szerint teljesen felbontva)?*

Válasz: Jain<sup>4</sup> részletes szimulációi alapján 20  $\mu\text{m}$  alatt becsülte meg a Kolmogorov-hosszat az adott geometriára,  $\text{Re}=3500$  Reynolds-szám esetén.

<sup>3</sup> Janiga, G.: Quantitative assessment of 4D hemodynamics in cerebral aneurysms using proper orthogonal decomposition, J. Biomech. 82:80–86 (2019) <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2018.10.014>

<sup>4</sup> Jain, K.: Efficacy of the FDA nozzle benchmark and the lattice Boltzmann method for the analysis of biomedical flows in transitional regime, Med Biol Eng Comput 58:1817–1830 (2020) <https://doi.org/10.1007/s11517-020-02188-8>

Az általam vizsgált nagyobb Reynolds-szám ( $Re=6500$ ), ettől kisebb Kolmogorov-hosszat eredményez. A numerikus vizsgálataim legkisebb véges térfogatos cellái ugyan ezeket az apró méreteket megközelítik ( $24 \times 24 \times 25 \mu\text{m}$ ), mégsem érik el. Ezért nem beszélhetünk DNS felbontásról. A falak mentén a felbontás  $7,5$  és  $27,5 \mu\text{m}$  között változik. Ez lehetővé teszi a határréteg teljes felbontását ( $y^+ \sim 1$ ).

*2.b) kérdés: A hibrid számításoknál a spektrálenrópiát használta fel a Jelölt a modellváltáshoz. Alakját a 3.9 ábrán adta meg. Hasonló ábrát a 3.7 ábra alapján is elő lehetett volna állítani, egyszerűen a sebességfluktuációk intenzitása alapján, egyszerűbb fizikai megfontolásokat felhasználva. A kérdésem az, hogy a spektrálenrópián alapuló választás miben „tud többet”, mint amit egyszerűen a sebességfluktuációk intenzitásán alapuló választás nyújtana?*

Válasz: A Bíráló által javasolt turbulenciaintenzitás valóban egyszerűen képezhető négyzetes statisztikával a tér minden pontjában. Egy térbeli tartomány elemzése megvalósítható a pontbeli értékek átlagolásával. Az áramlási sebességek időbeli változásából számított kinetikus energiaspektrummal a teljesen kifejlődött turbulencia is jól jellemezhető. Azonban ezek a mennyiségek nem alkalmasak lamináris vagy lamináris-turbulens átmeneti áramlások számszerű karakterizálására.

A spektrális entrópia kifejlesztését az indokolta, hogy egy folyadékáramlásban kialakuló lamináris, átmeneti, illetve turbulens régiók egymástól számszerűen elkülöníthetőek legyenek.

A folyadékáramlás sebességterének POD-vel történő analízise egyszerre alkalmazható egy adott két- vagy háromdimenziós tartományra. A Bíráló helyesen világított rá arra, hogy mind a turbulencia intenzitása, mind a spektrális entrópia növekszik a turbulencia mértékének növekedésével. Az utóbbi időben végzett még publikálatlan vizsgálataim ugyan hasonlóságot mutatnak, de nem figyelhető meg az egyenes arányosság e két jellemző között. Ezen a téren a jövőben további szisztematikus vizsgálatokra van szükség, hogy a pontos kapcsolatot minden részletében megértsük. Szeretném kiemelni, hogy a korábbi DNS adatrendszeren végzett vizsgálataink iránymutató számokat nyújtanak a spektrális entrópia és az áramlás állapota között. Ez különösen érdekes az átmeneti áramlásokra, ahol a turbulencia intenzitása önmagában nem nyújt elegendő felvilágosítást az áramlás állapotáról.

*2.c) kérdés: Megjegyzem, hogy érdekes lett volna látni, hogy az URANS-felbontás mellett elvégzett LES milyen eredményeket ad.*

Válasz: Érdekes a Bíráló felvetése az URANS-felbontás mellett elvégzett LES szimulációja kapcsán. Ez a VLES (very large eddy simulation) szimulációs technikának is nevezett módszer csökkenti a számítási igényt, de nem alkalmas arra, hogy azt az általánosnak mondható kritériumot kielégítse, mely szerint a folyadék energiájának legalább 80 %-át fel kell bontani egy gondos nagyörvény szimuláció esetén<sup>5</sup>. Ha ez a kritérium sérül, akkor a fel nem bontott méretek szerepe megnövekszik ott, ahol a subgrid-modell (pl. Smagorinsky) aktív. Így az eredmény sokkal inkább a subgrid-modell függvénye lenne. Erre az esetre ilyen vizsgálatot nem végeztem, de feltehető, hogy a durvább hálófelbontás nagyobb numerikus disszipációval járna.

2.d) kérdés: *A spektrumokon én nehezen fedezem fel a -5/3-os meredekséget, talán azért, mert túl alacsony a Reynolds-szám. Az ábrázolás számomra kissé szokatlan. Miért nem egyszerűen a hullámhossz függvényében vannak ábrázolva a spektrumok?*

Válasz: Térbeli korrelációk esetén gyakran a hullámhossz függvényében ábrázoljuk az energia spektrumokat. Az értekezésben bemutatott időbeli korrelációk vizsgálata gyakran a frekvencia vagy a Strouhal-szám függvényében történik. A dimenziótlan ábrázolás érdekében az értekezésben a Strouhal-szám szerinti ábrázolást alkalmaztam.

Amint a Bíráló helyesen rávilágított a Reynolds-szám elég alacsony, ezért a teljesen kifejlődött turbulenciára jellemző -5/3-os meredekség a 35. oldalon található a (k)-(o) ábrákon is csak kis mértékben figyelhető meg. A -10/3-os meredekség itt sokkal dominánsabban van jelen, mely a viszkózus disszipáció alaptartományára jellemző.

3.a) kérdés: *Egy kicsit hiányolom ebből a fejezetből a hivatkozásokat (pl. Mendoza et. al., Chem. Eng. Des., 132, 865, 2018 és az ebben szereplő Derksen-hivatkozásokat, aki pl. a rács-Boltzmann módszert alkalmazva úttörőként vizsgálta ezt a problémát numerikus módszerrel).*

Válasz: Jos Derksen kutatócsoportja valóban úttörőként vizsgálta a tartályokban történő keveredési folyamatokat az LES szimulációs módszer segítségével. Az elmúlt két évtized számos közleménye közül, az értekezésben a 32-es hivatkozással<sup>6</sup> utalok a kutatócsoport munkásságára. Ebben a publikációjukban az LES és a RANS módszert hasonlítják össze LDA mérésekkel. Derksen kutatócsoportja széles körben ismert a rács-Boltzmann szimulációs módszer alkalmazásában és sok esetben Rushton típusú keverőt vizsgálnak.

---

<sup>5</sup> Pope, S.: Turbulent flows, 2000, Cambridge

<sup>6</sup> Hartmann, H., Derksen, J.J. et al.: Chemical Engineering Science 59, 2419–2432 (2004)

3.b) kérdés: *Mendoza és társai is nagyon hasonló vizsgálatot végeztek, mint a Jelölt (szimulált áramlási mező, POD snapshot-ok analízise), igaz, hogy az átmeneti tartományban. Több mint 6 millió cellát használtak fel a számítások során, és ellenőrizték, hogy a megoldás rácsfüggetlen-e. Rámutatna a Jelölt, hogy mik voltak azok az alapvető eltérések, amelyek pl. Mendoza és tsai., illetve a Jelölt vizsgálatait jellemzik? Gondolok itt tartálméretre, felbontásra, rácsfüggetlenség ellenőrzésére, lapátszámra stb.*

Válasz: A Bíráló által hiányolt hivatkozásban Mendoza és szerzőtársai<sup>7</sup> az ANSYS CFX kereskedelmi kóddal végzett szimulációt kétdimenziós PIV mérésekkel vetették össze. A céljuk a lamináris és turbulens közötti átmeneti tartomány vizsgálata volt. Ehhez kizárólag lamináris számítási beállítást alkalmaztak. A 6 millió cellát tartalmazó strukturálatlan számítási hálózat tetraéder elemeket, illetve 5 réteg prizma-réteget tartalmazott a falak mentén. Tapasztalatom szerint ilyen hálózatok könnyen előállíthatók, azonban az ezeken végzett számítások lényegesen magasabb numerikus disszipációt eredményeznek, a strukturált hálózatokkal szemben.

Mendoza és szerzőtársai által vizsgált tartály falán négy terelő lapát található, szemben az értekezésben bemutatott tartállyal, mely ilyen terelőelemeket nem tartalmaz. Az általuk vizsgált átmérő, illetve tartály mélység 20 cm alatt volt, az értekezésben vizsgált keverő esetén ezek a méretek valamivel 10 cm alatt voltak.

A szimulációban bemutatott keverő választását egy az irodalomban egyedülálló saját méréssel való összehasonlítás motiválta. A Magdeburgi Egyetem és a Max-Planck Intézet munkatársaival közösen először sikerült egy keverőben az időben változó áramlási sebességek mindhárom komponensét meghatározni a mágneses rezonancia képalkotásának segítségével<sup>8</sup>. Ez a mérés nem tárgya a jelen értekezésnek, de a számítási geometria megegyezik a mérésben vizsgált esettel. Az általam vizsgált méreteknek korlátot szabott a mágneses tomográfiába behelyezhető maximális méret.

A Mendoza és szerzőtársai által bemutatott POD analízis kizárólag kétdimenziós tartományokra korlátozódik, szemben az általam bemutatott háromdimenziós vizsgálattal.

---

<sup>7</sup> Mendoza, F. et al.: Hydrodynamics in a stirred tank in the transitional flow regime, Chemical Engineering Research and Design, 132:865–880 (2018) <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.12.011>

<sup>8</sup> Janiga et al.: Noninvasive 4D Flow Characterization in a Stirred Tank via Phase-Contrast Magnetic Resonance Imaging, Chemical Engineering & Technology 40:1370–1377. (2017)



4.a) kérdés: *Nem nagyon értem, hogy a Jelölt az 5.2.2 fejezetben miért tárgyal és ismertet egy tucat végesdifferencia-közelítést. A számításokat a Parcomb3D programmal végezte, amely nem saját fejlesztés eredménye (lehet, hogy tévedek, de itt csak a hivatkozásokra tudok hagyatkozni), így itt nem igazán látom indokoltnak ezeknek a közelítéseknek az ismertetését, ráadásul a teljesség igénye nélkül. Az természetesen közismert, hogy DNS-t csak olyan numerikus megközelítéssel szabad végezni, ahol a közelítés hibái (pl. numerikus disszipáció stb.) nem befolyásolják jelentősen a megoldást.*

Válasz: A Parcomb egy reaktív áramlások vizsgálatára fejlesztett DNS kód. A fejlesztéseket Thévenin professzor a 90-es években kezdte el. Az első összefoglaló közlemény ezzel kapcsolatosan 1996-ban jelent meg<sup>9</sup>. Személy szerint 2004-ben kapcsolódtam be a reaktív áramlások numerikus vizsgálatába Thévenin professzor vezetése alatt.

A Bíráló helyesen emelte ki, hogy a DNS szimuláció fontos ismerve a nagy pontosságú numerikus közelítések használata, ezáltal lecsökkentve a numerikus disszipáció lehetőségét. A DNS szimulációkra az értekezésben bemutatott nagy pontosságú véges differenciákra épülő diszkretizációs eljárás a deriváltakat hatod rendben pontos centrális sémákkal kezeli, melyek a határok mentén harmad rendben pontos sémákra redukálódnak. Mivel ezek szerepe kulcsfontosságú, ezért ismertettem a vonatkozó végesdifferencia-közelítéseket.

4.b) kérdés: *Ennek a fejezetnek a konklúziója (5.5) egy kicsit zavarba ejt. Mit tekint itt a Jelölt új tudományos eredménynek, mert ez számomra ebből a fejezetből nem derült ki? Azt kérném, hogy a Jelölt fejtse ki, mi az, amit a szimulációból tanultunk, és amit a tézisek alapján publikáltak is a [26-29] cikkekben. Véleményem szerint erről kellene olvasnunk az (5.5) fejezetben, kiemelve a Jelölt saját tevékenységét.*

Válasz: 2004 óta a Parcomb szimulációs program számos fejlesztésen esett át, melyekben aktívan vettem részt. Ide tartozik többek között a kezdetben kétdimenziós kód háromdimenziós kiterjesztése (Parcomb3D), párhuzamosítási feladatok, a program szuperszámítógépes környezethez való illesztése, kvantitatív kiértékelések elvégzése, illetve a tématerülettel foglalkozó doktoranduszok segítése, valamint tudományos munkájuk vezetésében való részvétel.

Az 5. fejezetben közölt tudományos eredmények között a következő megállapításokat kell kiemelni. A metán égését 16 komponenssel és 50 elemi

---

<sup>9</sup> Thévenin, D., Behrendt, F., Maas, U., Przywara, B., Warnatz, J.: Development of a parallel direct simulation code to investigate reactive flows. *Computers & Fluids* 25(5), 485–496 (1996)

reakció-egyenlet segítségével modelleztem, melynek során az áramlást leíró – az energiaegyenletet is figyelembe véve – összesen 5 alapegyenletén kívül még további 16 transzportegyenlet megoldása vált szükségessé. Ez így adódó számítási feladat különösen érzékeny, megoldása nagy körültekintést igényel. Az összenyomható közegre érvényes Navier-Stokes egyenleteket együtt alkalmaztam részletes kémiai modellekkel, valamint többkomponensű transzportmodellekkel, szemben az ipari feladatok megoldásánál használatos egyszerűsített modellekkel.

A bemutatott számítási eredményekben alkalmazott Reynolds-számok meghaladják a legtöbb napjainkban ismert DNS-sel számított turbulens égési feladat megoldásában szereplő értékeket.

Megmutattam, hogy az így nyert nagy pontosságú számítások lehetővé teszik az áramlástan paraméterek és a kémiai folyamatok közötti összefüggések alaposabb megértését. A Reynolds-szám szisztematikus változtatásával megvizsgáltam a turbulencia lángra gyakorolt hatását. A vizsgálat során kiderült, hogy a turbulencia intenzitásának a növekedésével a láng egyre gyakrabban alszik ki.

#### A tézisekkel kapcsolatban adott válaszok:

Az I. és a III. tézis összevonásával kapcsolatosan ki kell hangsúlyozni, hogy az I. tézis a spektrális entrópia bevezetését taglalja, mely jól alkalmazható a lamináris, átmeneti és turbulens áramlások kategorizálására. A III. tézis ezen túlmenően, a spektrális entrópiában rejlő lehetőséget kiaknázva hibrid-számításokra is ad útmutatást.

A II. tézis megfogalmazásánál fontos kiemelni, hogy nemcsak lamináris tartományok számításáról van szó, hanem a lamináris, átmeneti és turbulens áramlások egyidejű meghatározásáról. A Bíráló által kifogásolt mondatban az egyidejűsége (simultaneously) van a hangsúly.

A Bíráló IV-es és V-ös számú tézisek összevonására tett megjegyzése kapcsán szeretném kiemelni, hogy míg a IV-es tézis esetén a háromdimenziós koherens áramlási struktúrák meghatározása a cél a turbulens áramlási sebességek POD módszerének segítségével, addig az V-ös tézis a makroinstabilitások Fourier-analízisével végzett vizsgálatait taglalja.

Tekintettel arra, hogy a numerikus modell parallelizálása a modellfejlesztés szerves része, elfogadom a Bíráló javaslatát a VI-os és VII-es tézisek összevonására. A VIII. tézis azonban új tudományos eredményeket tartalmaz.

Ebben a tézisben a Reynolds-szám szisztematikus változtatásával megvizsgáltam a turbulencia lángra gyakorolt hatását. A vizsgálat során megfigyelhető volt, hogy a turbulencia intenzitásának a növekedésével a láng egyre gyakrabban alszik ki.

A magyar nyelvű tézisek beillesztését a dolgozatba nem tartottam szükségesnek, mert a tézisfüzetet a pályázat részének tekintettem. Az angol megfogalmazásban követtem a publikációkban használt nyelvhasználatot és kerültem az elsőszámban való fogalmazást.

Végezetül megköszönöm a Bírálónak, hogy támogatta az értekezés nyilvános vitára bocsátását.

Magdeburg, 2020. szeptember 29.

Janiga Gábor