

Házi Gábor DSc  
Energiatudományi Kutatóközpont  
1121 Budapest  
Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

hazi.gabor@energia.mta.hu  
tel.: 392-2295  
fax: 395-9293

## Opponensi vélemény

Janiga Gábor:

„*Numerical investigations of turbulent structures in fluids*”  
című DSc értekezéséről.

Az angol nyelvű értekezés<sup>1</sup> címe egy kicsit általánosra sikeredett, és nem is teljes mértékben fedi le a dolgozat témáját. A 87 oldalas dolgozat első 40 oldalán ugyanis nem igazán találkozhatunk kifejezetten turbulens áramlásokban kialakuló struktúrák vizsgálatával. Ettől függetlenül megértem és elfogadom a jelölt címválasztását, hiszen a dolgozatában három, teljesen eltérő rendszerben kialakuló turbulens áramlás numerikus szimulációs eredményeit mutatja be, igyekezve részletesen kiemelni mindhárom probléma esetén az áramlások főbb jellemzőit. Ez kifejezetten igaz a 4. és 5. fejezetre, ahol a fókusz tényleg az áramlások tulajdonságain van.

A dolgozat formai szempontból megfelel a doktori értekezésekkel szemben támasztott követelményeknek. Szerkesztése általában szerencsésnek mondható, nyelvezete egyszerű és gördülékeny, szakmailag megfelelő, félregépelést is csak egy-kettőt fedeztem fel benne.

Ugyanakkor meg kell említenem néhány igen zavaró tényezőt:

1. A Jelölt a 3. fejezetben a 25. és 28. oldalon is hivatkozik a 3.7 ábrára, amelyen energiaspektrumokat kellene látnunk, ehelyett a hivatkozások környezetében a 27. oldalon található 3.7 ábrán pillanatnyisebesség-profilok láthatók, amelyekre egyébként a Jelölt szintén hivatkozik. Első olvasásra ez igencsak zavaró. Aztán egy kicsit ugyan távol a 25. és 28. oldalon megadott ábrahivatkozásokról, a 34. oldalon felbukkannak az energiaspektrumok, szintén 3.7-es ábraszámozás mellett.
2. A Jelölt néhány esetben túlságosan kategorikus, amivel nem tudtam mindig azonosulni:
  - a. Az 1.2. fejezet első mondata után egy kicsit megijedtem, mert a Jelölt itt kategorikusan azt állítja, hogy a Reynolds-szám függvényében minden áramlás két csoportba sorolható: lamináris és turbulens. Szerencsére a 3. fejezetben

---

<sup>1</sup> Az idegen nyelvű doktori mű benyújtását az illetékes bizottság gondolom engedélyezte. Erről tájékoztatást nem kaptam, illetve arról sem, hogy az eljárás mely része zajlik idegen nyelven. Ezért a bírálat magyarul készült.

nyilvánvalóvá vált, hogy a Jelölt a köztes, átmeneti tartomány jelentőségével is tisztában van.

- b. Szintén az 1.2 fejezetben a Jelölt a Reynolds-átlagolásnál idő szerinti átlagolást jelöl meg, mint a RANS-egyenletek származtatásának módszere, holott az átlagolás történhet sokaság vagy akár tér szerint is. Ráadásul a sokaság szerinti átlagolás statisztikai értelemben sokkal általánosabb irányba tereli a modellezést.
3. Néhány egyszerű szerkezeti változtatás segítette volna az olvashatóságot. Például a 2.1 fejezetben a (2.3) és (2.4) egyenletekben  $Y$ -t és  $e_r$ -t nem azonosítja a Jelölt. Aztán a 2.4 fejezetben  $Y$  azonosítására és meghatározására is sor kerül. Úgy gondolom, hogy szerencsésebb lett volna a 2.1 fejezetben minden mennyiséget nevesíteni, és a további fejezetekben csak a modellezést igénylő tagok meghatározását tárgyalni.
4. Egy-két fejezet elnagyolt. Pl. a 2.3-ban bevezetett mennyiségek egyike se jelenik meg az alapegyenletekben (később ráadásul  $\phi$  megjelenik mint POD sajátfüggvény), így nem kifejezetten reaktív közegek áramlásával foglalkozó szakember számára nehéz lehet követni, hogy  $\alpha$  és  $\phi$  hogyan is kerül felhasználásra.

Mindezen hiányosságok ellenére a dolgozat szakmailag értékelhető, észrevételeim és kérdéseim pedig a következők:

1. A 2.6.2. fejezetben szerepel a spektrál entrópia bevezetése, ami nekem egy kicsit zavaros. Ez egy időszerinti autokorrelációhoz köthető magfüggvényből származik, amelynek az értéke alapján a Jelölt szerint eldönthetjük, hogy egy áramlás éppen milyen állapotban van (lamináris, turbulens, vagy átmeneti). A fejezet végén írja, hogy ennek minimuma nulla, amikor is csak egy sajátvektor van felgerjesztve, és ilyenkor a Jelölt szerint az áramlás „steady”. Mit jelent ez, milyen értelemben tekintjük „steady”-nek? Milyen időskálán kell ezt a vizsgálatot elvégezni (mi alapján tudom eldönteni – az autokorreláció meghatározására gondolok)? A Jelölt szerint milyen spektrálenrópia értéket kaphatunk időben periodikus, de nem turbulens áramlások esetén (pl. Kármán-féle örvénysor vagy véráram)?
2. A 3. fejezetben a Jelölt egy benchmark problémát vizsgál nagy örvény és hibrid szimulációs módszerek segítségével. Megemlíti, hogy a korábbi lamináris és RANS-számítások rendre kudarcot vallottak, ami nem tűnik meglepőnek a probléma geometriáját és a használt Reynolds-számokat figyelembe véve, hiszen egymást követik konvergáló és divergáló szekciók, amelyek között elhelyeztek egy rövid csőszakaszt. Így a csőszakaszra vonatkoztatott alacsonyabb Reynolds-számok esetén egymást váltogathatják a lamináris, átmeneti és turbulens zónák, és ezek mindegyikének modellezésére nem alkalmas se a lamináris, se a RANS-megközelítés. A Jelölt a vizsgálatok során használt legmagasabb Reynolds-számnál (6500) végzett LES- és hibrid számításokat. A 3.5 és 3.6 ábrán bemutatott eredmények mutatják a LES potenciálját az adott probléma esetén. Ezt az eredményt tartom a dolgozat legfőbb értékének.

- a. A kérdésem az, hogy a Jelölt szerint az általa végzett számítások felbontása mennyire állt távol egy direkt numerikus szimuláció felbontásától (a határréteg a leírás szerint teljesen felbontva)?
  - b. 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?
  - c. Megjegyzem, hogy érdekes lett volna látni, hogy az URANS-felbontás mellett elvégzett LES milyen eredményeket ad.
  - d. 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?
3. A 4. fejezetben egy tartályban zajló keveredési folyamatot vizsgált a Jelölt. Ehhez LES segítségével előállított 3D-s sebességmezőt használt fel, amelyet POD segítségével analizált. A 4.1.1 fejezetben a POD-ot a Jelölt mint relatív új technikát említi, holott már közel 30 éve használják. A LES-t szintén régóta használják tartályban történő keveredési folyamatok szimulációjához. A Jelölt azt emeli ki, hogy a korábban mérési pontokban, illetve síkban elvégzett vizsgálatokkal szemben az analízist először terjesztette ki a teljes 3D-s tartományra.
- a. 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).
  - b. 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 tartályméretre, felbontásra, rácsfüggetlenség ellenőrzésére, lapátszámra stb.
4. Az 5. fejezetben direkt numerikus szimulációval foglalkozik a Jelölt 16 különböző komponens figyelembevételével modellezve egy metánláng begyulladását és kiterjedését.
- a. Nem nagyon értem, hogy a Jelölt az 5.2.2 fejezetben miért tárgyal és ismerttet 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.

- b. 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.

A tézisekkel kapcsolatban:

Az I. tézist elfogadom a III. tézissel összevonva, amennyiben a Jelölt az 1. és 2. észrevételeimre, kérdéseimre válaszol.

A II. tézist tartalmilag elfogadom, de a megfogalmazásait nem érzem túlságosan szerencsésnek: pl. „(...) turbulence model are not able to predict the laminar (...)”

A IV. tézis jelenleg azt állítja, hogy a tartályban keverést tanulmányozta, annak érdekében, hogy koherens áramlási struktúrákat (pl. másodlagos áramlást) határozzon meg. Ez így nem egy eredmény, össze kell vonni az V. tézissel. A IV. és V. tézist együtt elfogadom, ha a Jelölt a 3. észrevételemre, illetve kérdéseimre válaszol.

A VI-VIII. téziseket egy tézisként fogadom el, ha a Jelölt kifejti, hogy az itt felsoroltakból mi az, amit saját eredményének tart (milyen tudományos szerepe volt ezeknek az eredményeknek az elérésében), és válaszol a 4. pontban megfogalmazott kérdéseimre.

Utólag elolvasva a dolgozathoz csatolt magyar nyelvű téziszfüzetet úgy látom, több helyen nevesítve van, hogy a Jelölt mit tart saját eredményének. Ez sajnos az angol nyelvű tézisekből nem derül ki egyértelműen. Szerencsésebb lett volna legalább a kivonatot és a téziseket magyarul is beilleszteni a dolgozatba.

A fentiek figyelembevételével javaslom az értekezés nyilvános vitára bocsájtását.

Budapest, 2020.03.24.

Házi Gábor