

Bírálat

Dr. Kovács Róbert Sándor

Két időskálás hővezetési modellek elemzése és alkalmazása heterogén anyagokra

című MTA doktori értekezéséről

A dolgozat a hővezetés jelenségének Fourier-elméletén túli világával foglalkozik. Ennek keretében a kutatások elsősorban a heterogén, összetett szerkezetű anyagok termikus modellezése irányultak. Azaz, a dolgozat központi témája a Fourier-féle hővezetési törvényen túlmutató kontinuum-termodinamikai modellek vizsgálata, különös tekintettel a heterogén anyagok (például fémhabok, kompozitok) termikus jellemzésére. A kutatásai során a jelölt az ilyen anyagokat nem azok aprólékos részleteivel, hanem az eredő termikus viselkedésével jellemzi.

A továbbiakban áttérek a munka részletes elemzésére.

A téma jelentősége és aktualitása. A hővezetési jelenségek precíz leírása a modern mérnöki tudományok egyik kritikus területe. Míg a klasszikus Fourier-törvény a legtöbb makroszkopikus mérnöki alkalmazásban kielégítő pontosságú, a technológiai fejlődés – különösen a heterogén anyagok (fémhabok, kompozitok, porózus anyagok) és a mikro/nanotechnológia terjedése – rávilágított ezen elmélet korlátaira. A jelölt témaválasztása rendkívül aktuális, mivel a nem-Fourier (beyond-Fourier) hővezetési modellek alkalmazása az effektív anyagjellemzők meghatározásában hiánypótló terület. A dolgozat hidat képez az elméleti fizikában gyökerező irreverzibilis termodinamika és a gyakorlati gépészmérnöki alkalmazások között.

A dolgozat szerkezete és módszertana. A dolgozat felépítése logikus, hat fejezetre tagolódik. A dolgozat felépítése és az egyes fejezetek tartalma az alábbiak szerint foglalható össze:

1. Bevezetés: A szerző ismerteti a kutatás motivációját, kiemelve a modern technológiák (pl. úrkutatás, orvostechika) igényeit, amelyeknél a klasszikus modellek már nem elégségesek. Bemutatja a történelmi háttérrel, többek között a szuperfolyadékokban megfigyelt „második hang” és ballisztikus hőterjedés jelenségét.
2. A Fourier-egyenleten túli modellek termodinamikai háttéréről: Ez a fejezet az elméleti alapokat fekteti le. A szerző bemutatja a két időskálás modelleket, mint a Guyer–Krumhansl- és a Jeffreys-egyenlet, valamint tárgyalja a duális fáziskésésű (DPL) modelleket és azok termodinamikai konzisztenciáját.
3. Az anyagi nemlinearitások szerepe: A fejezet azt vizsgálja, hogyan befolyásolják a modellek viselkedését az anyagi tulajdonságok (pl. hőmérsékletfüggő hővezetési tényező). Külön kitér a Navier–Stokes–Fourier-egyenletrendszerre és a nemlineáris hatások következményeire.

4. Megoldási módszerek: Itt kerülnek bemutatásra a modellek gyakorlati alkalmazásához szükséges matematikai eszközök. A szerző részletezi az analitikus megoldásokat (pl. változók szétválasztása, Galjorkin-módszer) és a numerikus eljárásokat (pl. eltolt mezős véges differenciák módszere) egy- és kétdimenziós esetekben.

5. Heterogén anyagok termikus jellemzése: Ez a fejezet a gyakorlati alkalmazásokról szól. A szerző bemutatja, hogyan használhatók a nem-Fourier modellek olyan anyagok leírására, mint a kompozit fémhabok, szénhabok, fémorganikus térhálók, vagy akár a biológiailag lebontható nyomtatott áramkörök.

6. Összefoglalás és tézisek: A dolgozat zárófejezete összefoglalja a tudományos eredményeket hét tételbe foglalva, hangsúlyozva a két időskálás modellek létjogosultságát a heterogén anyagok modellezésében.

Függelék: Részletes matematikai levezetéseket, az entrópia definícióját és egyes speciális numerikus demonstrációkat tartalmaz.

A dolgozat matematikai tartalmának értékelése A dolgozat egyik kiemelendő erénye a kiemelkedő matematikai szigorúság. A jelölt nem csupán alkalmazza a meglévő egyenleteket, hanem mélyreható matematikai analízisnek veti alá azokat:

- **Analitikus megoldások:** A szerző a Fourier-egyenleten túli modellek (Guyer-Krumhansl, Jeffreys) megoldására a Galjorkin-módszer egy speciális, spektrális felbontáson alapuló változatát alkalmazta. Bizonyította, hogy a klasszikus Fourier-feladat sajátfüggvény-rendszere öröklődik a bonyolultabb modellekre is, ami jelentősen egyszerűsíti a mérnöki számításokat.
- **Numerikus stabilitásvizsgálat:** A nemlineáris, hőmérsékletfüggő együtthatókkal rendelkező parciális differenciálegyenletek numerikus megoldásához a szerző a Neumann-féle stabilitásvizsgálati módszert terjesztette ki. Egzakt becsléseket adott a stabilitási határookra a véges differenciás módszerek megbízható alkalmazásához.
- **Peremfeltételek kezelése:** A dolgozat elegáns matematikai választ ad a magasabb rendű térderiváltakat tartalmazó modellek peremfeltételeinek problémájára az eltolt mezős (staggered grid) diszkretizáció és Lagrange-extrapoláció használatával.

A szerző publikációs tevékenységének értékelése. A jelölt publikációs teljesítménye kiemelkedő, és teljes mértékben lefedi az értekezés témakörét.

- **Mennyiség és lefedettség:** A szerző minden tézispontját bőséges publikációs háttérrel támasztotta alá (átlagosan 5-9 közlemény tézisenként). A hivatkozott saját közlemények száma meghaladja a 20-at, a munka minden része tudományosan verifikált.
- **Minőség:** A közlemények a szakterület elit folyóirataiban jelentek meg. Külön kiemelendő a **Physics Reports** (IF: ~30) folyóiratban megjelent összefoglaló tanulmány. Emellett számos cikket közölt a **International Journal of Heat and Mass Transfer** és az **International Journal of Engineering Science** (Q1, D1 kategória) hasábjain. Ez a portfólió egyértelműen bizonyítja a jelölt nemzetközi elismertségét.

Új tudományos eredmények (Tézisek) A jelölt 7 tézispontban foglalta össze eredményeit, amelyek mindegyike elfogadható:

- **1-2. Tézis:** Az onsageri alak fontossága és a Fourier-szám újraértelmezése az időskálák szétválasztásához.
- **3-4. Tézis:** A nemlinearitások hatása a GK és Jeffreys egyenletekben, különös tekintettel a transzportegyütthatók hőmérsékletfüggésére.
- **5-6. Tézis:** Analitikus spektrális megoldások és a numerikus stabilitásvizsgálat kiterjesztése.
- **7. Tézis:** Kísérleti bizonyíték arra, hogy a dinamikus hőfokvezetési tényező szignifikánsan eltér a statikustól.

Hiányosságok és kritikai észrevételek

1. A kontinuum-megközelítés miatt a fenomenologikus paraméterek (τ és κ) és a konkrét mikrostruktúra (pl. pórusméret) közötti matematikai kapcsolat mélyebb kifejtése hasznos lett volna.
2. A 2-hőmérsékletű modell elvetésekor a szerző elsősorban technikai nehézségekre hivatkozik, miközben bizonyos heterogén rendszerekben a fizikai indokoltsága továbbra is fennállhat.
3. Félig átlátszó anyagok esetén a lézeres gerjesztés térfogati hőforrásként való kezelése esetleg pontosabb paraméter-illesztést eredményezhetett volna.

Kérdések a nyilvános vitára.

1. Milyen matematikai feltételeknek kell teljesülniük az operátorok struktúrájában ahhoz, hogy a Fourier-feladat sajátfüggvény-rendszere tetszőleges, bonyolultabb nem-Fourier modellekre is örökölheto legyen?
2. A Neumann-féle stabilitásvizsgálat során a nemlineáris együtthatókat lokálisan konstansnak tekintette. Létezhet-e olyan paramétertartomány, ahol a lokális stabilitás ellenére globális instabilitás lép fel?
3. Hogyan biztosítható matematikailag a GK-egyenlet extra peremfeltételeinek kompatibilitása az irreverzibilis termodinamika II. főtételeből adódó entrópiatermelés-pozitivitással?
4. Hogyan integrálhatóak az Ön által kidolgozott stabil numerikus sémák a mérnöki gyakorlatban elterjedt végesesemes szoftverekbe (pl. COMSOL, ANSYS)?
5. Tudna adni egy intuitív, mikroszerkezeti alapú magyarázatot arra, miért nagyobb mindig a dinamikus hőfokvezetési tényező a statikusnál?

Összegzés Dr. Kovács Róbert Sándor értekezése magas színvonalú, elméleti és gyakorlati szempontból is jelentős munka, amely a Szerző eddigi kutatói munkájának eredménye és összegzése. A Szerző publikációs teljesítménye impozáns. Matematikailag sokoldalú és rendkívül igényes munka, amelyben a Szerző a matematikai eszköztárát korrekt módon és hatékonyan alkalmazza. Az elméleti eredmények jól verifikáltak. A bírálatomban felsorolt kritikai észrevételek semmiben nem csökkentik a munka értékét, inkább amég tökéletesebbé tételt szolgálnak.

A benyújtott értekezés tudományos eredményei véleményem szerint tartalmi és formai szempontból egyaránt megfelelnek az MTA doktora cím elnyeréséhez szükséges színvonalnak, így javaslom az értekezés nyilvános védésre bocsátását.

Budapest, 2026 január 7.

A handwritten signature in black ink, reading "Faragó István". The signature is written in a cursive, slightly stylized script.

/Faragó István/

MTA doktora