

BÍRÁLAT

Dr. Kovács Róbert Sándor

MTA doktori dolgozatáról

KÉT IDŐSKÁLÁS HŐVEZETÉSI MODELLEK ELEMZÉSE ÉS ALKALMAZÁSA HETEROGÉN ANYAGOKRA

A bírálatot készítette: dr. Majorosné dr. Lubláy Éva Eszter, egyetemi tanár, MTA doktora

Kovács Róbert Sándor doktori értekezése a hővezetés nemklasszikus modelljeinek elméleti és gyakorlati vizsgálatával foglalkozik. A dolgozat célja, hogy a Fourier-egyenleten túlmutató hővezetési modelleket – különösen a Guyer–Krumhansl és Jeffreys-egyenleteket – matematikailag és fizikailag megalapozott módon elemezze, és azok alkalmazhatóságát bemutassa különböző mérnöki szituációkban.

A dolgozat kiemelkedő mélységben tárgyalja a hőterjedési mechanizmusokhoz tartozó időskálák szerepét, azok méretfüggő jellemzőit, és a modellezés során felmerülő matematikai és fizikai nehézségeket.

A szerző részletesen bemutatja a kétkomponensű és többkomponensű rendszerek modellezésének kihívásait, különös figyelmet fordítva a kezdeti és peremfeltételek kezelésére, valamint a kontaktellenállások szerepére. A dolgozatban szereplő tézisek jól megalapozottak, és a szakirodalmi hivatkozásokkal alátámasztottak. A Guyer–Krumhansl és Jeffreys-egyenletekre vonatkozó analitikus megoldások, valamint a numerikus stabilitási kritériumok kidolgozása jelentős tudományos hozzájárulást jelentenek.

Különösen értékesnek tartom, hogy a szerző nemcsak elméleti szinten vizsgálja a modelleket, hanem azok gyakorlati alkalmazhatóságát is elemzi, beleértve a mérési kiértékelési módszereket és a kísérleti elrendezések tervezését. A dolgozatban megfogalmazott javaslatok újfajta, célzott kísérletek irányába mutatnak, amelyek elősegíthetik a termikus metaanyagok fejlesztését.

A dolgozat nyelvezete szakszerű, a szerző világosan és logikusan építi fel érvelését. A tézisek egyértelműek, és jól illeszkednek a dolgozat tartalmához. A kutatás eredményei nemcsak a hővezetés elméleti hátterét gazdagítják, hanem a mérnöki gyakorlat számára is hasznosíthatóak.

A téma időszerű és tudományosan releváns, különösen a mikro- és nanoszerkezetek, valamint a termikus metaanyagok kutatásában, valamint a heterogén anyagok effektív termikus jellemzésében.

A dolgozat szerkezeti felépítése

1. fejezet – Bevezetés (19. oldal)

A dolgozat első fejezete részletesen tárgyalja a klasszikus hővezetési elméletet, különös tekintettel a Fourier-egyenlet korlátaira. A szerző helyesen mutat rá arra, hogy a Fourier-modell azonnali hőterjedést feltételez, ami fizikailag nem reális, de mindemellett a mérnöki gyakorlat számára hasznosak a parabolikus modellek is. A termodinamika második főtétele kapcsán a szerző jól érzékelteti, hogy a hővezetési folyamat irányultsága és irreverzibilitása miként jelenik meg a modellezésben. Az irreverzibilistermodinamika alapjainak ismertetése megfelelő, bár a fogalmi keret mélyebb kibontása (pl. belső változók szerepe) tovább erősítené a fejezetet.

2. fejezet – A Fourier-egyenleten túli modellek termodinamikai háttere (20–31. oldal)

Ebben a részben a szerző a Cattaneo–Vernotte, a Guyer–Krumhansl, valamint a Jeffreys-féle modellekre koncentrálna. A relaxációs idő fogalmának bevezetése és annak szerepe a hővezetés hullámszerű terjedésében jól strukturált. A képletek származtatása világos, azonban a 3.13–3.17 képletek esetében a levezetés tömörsége miatt nehezen követhető a fizikai háttér. A szerző helyesen mutatja be, hogy a nemlokális tagok miként módosítják a hőáram viselkedését, de ezek fizikai értelmezése – például a belső változók termodinamikai szerepe – további magyarázatot igényelne.

3. fejezet – A hővezetési egyenletek általánosítása és osztályozása (32–37. oldal)

A numerikus módszerek bemutatása során a szerző saját fejlesztésű algoritmusokat ismertet, amelyek alkalmasak a nemklasszikus egyenletek megoldására. A stabilitási és konvergenciavizsgálat értékes, különösen a Guyer–Krumhansl-egyenlet esetében. Ugyanakkor hiányzik a különböző diszkretizálási technikák (pl. végesdifferenciák és végeselem) összehasonlítása, ami segítené a numerikus megközelítés általánosíthatóságának megítélését.

4. fejezet – Megoldási módszerek (38–69. oldal)

A fejezet a numerikus megközelítések technikai részleteit tárgyalja. A nemlineáris egyenletekre vonatkozó stabilitási kritériumok és a numerikus diffúzió kezelése jól dokumentált, de a különböző algoritmusok összevetése hiányzik.

5. fejezet – Példák heterogén anyagokra (70–85. oldal)

A szerző ebben a fejezetben az elméleti modelleket kísérleti eredményekkel veti össze. Az összehasonlítás meggyőző, és jól illusztrálja a nemklasszikus modellek gyakorlati alkalmazhatóságát. Ugyanakkor a kísérleti rész kevésbé részletes: nem derül ki pontosan, milyen mérési elrendezést alkalmaztak, milyen anyagokat vizsgáltak, és hogyan kezelték a mérési hibákat. A mérési körülmények, kalibrálási eljárások és hibahatárok ismertetése elengedhetetlen lenne a tudományos értékelhetőséghez.

6. fejezet – Összefoglalás és tézisek (86–90. oldal)

A szerző összefoglalja az értekezés főbb eredményeit és megfogalmazza a téziseket. A tézisek világosak, jól illeszkednek a dolgozat tartalmához.

Függelék A–G (91–105. oldal)

A függelékben az entrópia részletes definíciója, kiegészítő számolások, valamint a Guyer—Krumhansl és a Jeffreys-egyenletek tulajdonságainak numerikus demonstrációi szerepelnek. Ezek hasznos kiegészítések, különösen a képletek értelmezéséhez.

Kritikai megjegyzések

A képletek származtatása helyenként túl tömör, különösen a 3.13–3.17 képletek esetében.

A dolgozatban szereplő Jeffreys-egyenlet származtatása (3.13–3.17) matematikailag korrekt, azonban a lépések közötti logikai ugrások megnehezítik az olvasó számára a követését. A belső változók bevezetése, az Onsager-relációk alkalmazása, valamint a hőáram időbeli viselkedésének leírása során a szerző nem részletezi kellően az egyes tagok fizikai jelentését. Ez különösen fontos lenne, mivel a nemklasszikus hővezetési modellek értelmezése nem triviális, és a képletek mögötti fizikai intuíció segítené a megértést. Javasolt lenne a származtatás lépéseinek részletesebb bemutatása, akár melléklet formájában.

A kísérleti eredmények bemutatása nem elég részletes, a mérési körülmények és hibahatárok nem kerülnek ismertetésre. A dolgozatban szereplő kísérleti validációs rész értékes, azonban nem tartalmaz elegendő információt a mérési elrendezésről, a használt eszközökről, a minták geometriai és anyagi jellemzőiről, valamint a mérési hibák becsléséről, a mérés reprodukálhatóságáról. A hővezetési modellek gyakorlati alkalmazhatóságának megítélése szempontjából elengedhetetlen lenne a mérési körülmények pontos dokumentálása. A hibahatárok, ismételhetőség és kalibrálási eljárások hiánya csökkenti az eredmények

tudományos súlyát. Javasolt lenne a kísérleti rész kiegészítése, akár külön publikáció formájában.

A numerikus módszerek stabilitási vizsgálata értékes, de hiányzik a különböző diszkretizálási technikák összehasonlítása: A dolgozatban bemutatott numerikus algoritmusok stabilitási vizsgálata alapos, és jól illeszkedik a modellezési célokhoz. Ugyanakkor a numerikus megközelítés egyetlen diszkretizálási technikára épül, és nem kerül sor más módszerek (pl. végeselem, véges térfogat) összehasonlítására. Ez különösen fontos lenne a nemklasszikus egyenletek esetén, ahol a numerikus diffúzió és a nemlokális tagok kezelése érzékeny a választott módszerre. A különböző technikák összevetése segítené a módszer általánosíthatóságának megítélését

Képletek részletes értelmezése

Gibbs-reláció (7.1–7.3)

Az entrópia differenciálformája jól tükrözi a termodinamikai állapotjelzők közötti kapcsolatot. A képletek fizikai értelmezése helyes, a dimenziók konzisztenciája ellenőrizhető.

Guyer–Krumhansl-egyenlet (3.13–3.17)

A képletek a hőáram időbeli és térbeli viselkedését írják le. A relaxációs idő és a nemlokális tagok szerepe világos. A képletek fizikai értelmezése megfelel a modern hővezetési elméletnek.

Kérdések a jelölthöz:

1. Milyen gyakorlati alkalmazásokban látja a Guyer–Krumhansl és Jeffreys-féle modellek közvetlen hasznosítását?
2. Tervez-e további kísérleti validációt, különösen mikrostruktúrák esetén?
3. A képletek dimenzióanalízise során milyen feltételezéseket tett az anyagparaméterek állandóságára?

Összegzés és javaslat

Kovács Róbert Sándor MTA doktori értekezése igen magas színvonalú tudományos munka, amely jelentős hozzájárulást nyújt a hővezetési modellezés területén. A dolgozat elméleti megalapozottsága kiváló, a képletek fizikai értelmezése helyes, és a numerikus módszerek alkalmazása meggyőző.

Javaslat: A dolgozat elfogadásra javasolt, sikeres nyilvános védést követően a doktori fokozat odaítélését támogatom.

Budapest, 2025.11.20



dr. Majorosé dr. Lublós Éva Eszter

MTA doktora