

Kovács Róbert

Két időskálás hővezetési modellek elemzése és
alkalmazása heterogén anyagokra
című MTA doktori dolgozatának bírálata

A dolgozat főszövege 90 oldal hosszúságú, melyet 15 oldalas függelék egészít ki. Az előszóban a szerző megfogalmazza fő motivációját, melyen új fizikai modellek alkalmazásával szeretne hozzájárulni műszaki eszközök termodinamikai leírásához, azon belül a hővezetéshez. Az alkalmazások alapján úgy tűnik, hogy az időben változó hővezetési folyamatok modellezését segíti elő a szerző, ami viszont az előszóból nem derül ki. Általánosan is elmondható, hogy a gondolatmenet sokszor nehezen követhető, és a szöveg nehezen érthető.

A "Bevezetés" fejezet bemutatja az első fizikai kísérleteket, melyek leírásához már nem volt elegendő a klasszikus időfüggő Fourier-féle hővezetési egyenlet. Röviden ismerteti a különböző megközelítési módszereket a probléma leírására, többek közt a fononhidrodinamikai, kontinuum-termodinamikai és statisztikai alapú modelleket. Ezt követően azokat az idő- és méretskálákat mutatja be, ahol a több időskálás hővezetési modellek szükségesek a jelenség pontos leírásához. Később a műszakilag releváns heterogén anyagokat ismerteti, ahol hasonló jelenségek mérnöki gyakorlatban gyakori idő- és mérettartományban is megfigyelhetők. Majd a később is használt mérés technikai módszert és konkrét kísérleti eredményt mutat be a szerző. Ezek alapján világosan megfogalmazza tudományos célkitűzéseit. A fejezet alapvetően logikus felépítésű, de mégis nehezen olvasható. Többször kezd új gondolatba a jelölt, ami néhol felesleges vagy csak később derül ki, hogy miért releváns. Célszerű lett volna a szöveg koherenciára jobban odafigyelni. Tartalmi szempontból viszont kellően igényes és széleskörű a bevezetés.

A második fejezet a különböző hővezetési egyenletek levezetését mutatja egységes keretrendszerben. Ismertetésre kerül a hőtan második főtétele, azonban értelmezése egy vélhetőleg szerkesztési hiba miatt hibásnak tűnik. A σ_s entrópiaprodukció a bíráló szerint egy nem negatív érték, ami a folyamat során pozitív, egyensúlyban zérus, szemben a szerző állításával miszerint a "folyamat mentén folyamatosan növekszik". Valószínűleg a fajlagos entrópia növekedésére gondol, azonban a szövegben nem ez szerepel. Ezt követően a Fourier-egyenlet levezetése, az egyszerűsítések részletes ismertetése későbbi relevanciájukkal és a peremfeltételek bemutatása történik meg. A szerző külön kitér az egyenletek hőmérséklet-alapú (T) és hőáramsűrűség-alapú (q) reprezentációjára. Ezt követően mutatja be a levezetését a különböző két időskálás hővezetési modelleknek. Bár érintőlegesen a szerző utal az első fejezetben a modellekre, nem világos az olvasó számára, hogy a pontosan mi az újdonságtartalom. Vélhetőleg az egyenletek ismertek voltak már korábban is kontinuum közegre is, ezért az egyenletek egységes keretrendszerben történő levezetése vagy azok elemzése lehet újdonság. Ezt jobb lett volna tisztázni, vagy legalább referenciákat közölni. Például nem világos, hogy a (2.10) egyenletben szereplő összefüggés a fajlagos entrópiára ismert volt-e korábban.

A két időskálás modellek közül a levezetést a Guyer–Krumhansl-egyenlet (GK) és an-

nak egyszerűsített változatoként felfogható Maxwell–Cattaneo–Vernotte (MCV) egyenlet kezdi. Részletesen és világosan ismerteti az egyszerűsítési lehetőségeket és a megjelenő új tagok fizikai relevanciáját. Azonban egy látszólagos ellentmondás van a szövegben. A 18. oldal tetején azt állítja a szerző, hogy az MCV egyenletnek csak alacsony hőmérsékleten van jelentősége, az általa vizsgált heterogén anyagok esetén nincs. Majd később azt állítja, hogy az $\eta_{1,2}$ együtthatók "további méretskála bevezetését jelentik, de ennek a jelentősége a heterogén anyagok modellezésében csekély, ..." Azonban az együtthatók 0 értéke esetén a modell az MCV egyenletre redukálódik, amiről azt állította a szerző, hogy nem alkalmas heterogén anyagok viselkedésének leírására.

Ezt követően a Jeffreys-egyenletet mutatja be a szerző. Érdekes, hogy ebben az esetben a hőáramsűrűség más fizikai jelentéssel bír mint a korábbi két esetben. Végül a későbbiekben nem tárgyalt egyéb lehetséges megközelítések kerülnek röviden bemutatásra. Majd a fejezet összefoglalójában bemutatja az első két tézist. Az eredmények kellően alátámasztottnak tűnek, azonban a tézisek megfogalmazása nem szerencsés. A véleményem szerint azoknak tisztán tudományos állításoknak kell lenniük és nem beszámolóknak, ezért például a "kimutattam" és "megállapítottam" kifejezések feleslegesek.

A harmadik fejezet a modellek nem-lineáris változatának elemzésével foglalkozik. A fejezet elején egy érdekes példát mutat, ahol két különböző, hőmérsékletfüggő hővezetési tényezőjű anyaggal megvalósított termikus egyenirányítót mutat be. A jelenség ismertetésére korábbi cikkét ajánlja, de jobb lett volna két mondatban összefoglalni a dolgozatban is, hogy ne az olvasónak kelljen kitalálnia, hogyan működik. Bár az informatív ábrák ezt jelentősen megkönnyítik. Ezt követően Guyer–Krumhansl-egyenlet és a Jeffrey-egyenlet esetén tárgyalja a nem-lineáris transzportváltozók hatását, amikből a fejezet végén megfogalmazza további két tézist is. A fejezetben ezenkívül a Navier-Stokes-Fourier-egyenleteken keresztül kerül bemutatásra a Liu-eljárás. A módszer segítségével a változók lehetséges függőségét ismerteti a többi állapotváltozótól. Mivel a dolgozat nagy részében szilárd, heterogén anyagok modellezésével foglalkozik nem világos, hogy az alfejezetnek mi volt a célja, és benne a jelölt milyen hozzájárulása található.

A negyedik fejezet a megoldási módszereket taglalja. A mérőberendezés is itt kerül bemutatásra, amiben lézer hőimpulzussal gerjesztenek egy próbatestet, és mérik a hőmérsékletét. Véleményem szerint a jobb lett volna bemutatni a berendezést részletesebben az 5. fejezetben, ahol a kísérleti eredmények találhatók. Ezek után különböző megoldási módszereket és azokkal kapott eredményeket ismerteti a szerző. Az "Analitikus megoldások" fejezet tagolása nem szerencsés. Például a peremfeltételeket, amit vélhetőleg több módszer esetén is használ, a változószeperációs módszerrel közli. A változók szétválasztásával kapott eredményeit kereskedelmi végeleszoftverrel hasonlítja össze és megmutatja, annak gyengeségeit: jelentős pontatlanságát és instabilitását Fourier-tól eltérő hővezetési egyenletek esetén. Ezt követően a Galjorkin-módszer segítségével mutat példát 1D hővezetési feladatnál a kezdeti értékek kiszámolására, inhomogén kezdeti hőmérséklet eloszlás esetén. A módszer a feladat megoldására is alkalmas, de csak első- és másodfajú peremfeltételek esetén működik. Később kiterjeszti

két-dimenziós hengeres testekre is. Ez látszólag könnyedén elvégezhető akár háromdimenziós testek esetére is, azonban a szerző ezt nem taglalja. Illetve a sajátfüggvényeket és az integrálokat numerikusan kiszámítva tetszőleges geometrián is elvégezhetőnek tűnik a módszer, mind a peremek kezelésére, mind a feladat megoldására.

Ezeket követően a numerikus megoldásokat ismerteti a dolgozat. A fő problémát a különböző változókra definiált peremfeltételek kompatibilitása okozza. Erre egy- és két-dimenziós esetben mutat megoldást alacsonyrendű végesdifferencia sémák segítségével és elemzi a korábban tapasztalt problémát a végeselemmódszerrel. Majd a nem-linearitások kezelését mutatja be, illetve a tárgyalt egyenletekhez az időlépés stabilitási feltételét is meghatározza az általa módosított Neumann-módszer segítségével. Eredményeiből megfogalmazza az 5. és 6. tézisét. Sajnos ezek nagyon beszámoló jellegűek a főbb tudományos eredmények hiányoznak belőlük. Nem világos az sem, hogy az 5. tézisben miért nem konkretizálta a jelölt, hogy a módszerhez Laplace-operátor sajátfüggvényeit szükséges használni.

Az 5. fejezet foglalkozik a szobahőmérsékletű heterogén anyagok időbeli hővezetési tulajdonságainak mérésével és a Fourier és a Guyer–Krumhansl-modellek paramétereinek meghatározásával. A jelölt az eredmények leírásánál doktorandusza disszertációjára hivatkozik. Azonban célszerű lett volna az illesztés menetét röviden ismertetni. Nem világos, hogy a Jeffreys-modell paramétereit miért nem illeszti, de feltehetőleg az időállandó illesztése történik és ebből számolja a paramétereket, így a két modell paraméterei egymásból származtathatóak. Akkor viszont felmerül a kérdés, hogy el lehet-e dönteni a mérések alapján, hogy a kettő közül melyik két-időskálás modell jobb adott heterogén anyag esetén?

Ezt követően különböző heterogén anyagok esetén ismerteti az eredményeket. Bemutatja, hogy a modell paraméterek jelentősen függnak a próbatest méretétől. Az eredmények alapján úgy tűnik, hogy egy adott mérést két időskálás modellt alkalmazva jobban tud illeszteni, azonban a módszer prediktív jellege nem tűnik kellően alátámasztottnak, ehhez valószínűleg további kutatások is szükségesek. Továbbá azonos méretű, reprezentatív darabszámú próbatestek esetére statisztikai módszerekkel is célszerű lett volna elemezni az adatokat. A fejezet végén a mérési eredmények alapján fogalmazza meg utolsó, 7. tézisét.

Végezetül az utolsó fejezetben röviden összefoglalja a művet, megismétli a téziseket és egy rövid kitekintőt a következő kutatási irányokról és lehetőségekről a modellek alapján. Bírálóként a paraméterek jelentős méretfüggése miatt a bemutatott módszer prediktív jellegét látom az egyik legnagyobb kihívásnak.

A dolgozat összességében alapvetően logikus felépítésű, megfelelően tagolt. Azonban a mondatok koherenciája kifejezetten rossz, nagyon gyakran felesleges közbeszúrások, félreértelmezhető utalások rontják az olvashatóságot. A téma nehézsége miatt erre érdemes lett volna jobban figyelni a tudományos tartalom mellett. Összességében a nyelvezet precíz, de azért előfordulnak pontatlan kifejezések és ritkán helyesírási hibák is. A tézisek megfogalmazását nem tartom szerencsésnek. Kíváncsi lett volna akár hosszabb tézisek formájában, de tisztán tudományos állításokat megfogalmazni. A tézisek többsége ezeket is tartalmazza, de sokkal több tudományos eredményt lehetett volna beleírni a dolgozat alapján. Új tudományos eredményként mindegyik

tézisét elfogadom, az 5. tézis kivételével.

A MTA doktori dolgozattal kapcsolatban az alábbi kérdéseket teszem fel:

1. A két időskálás egyenletek levezetésénél, tárgyalásánál mi pontosan az újdonságtartalom?
2. Mit ért a jelölt pontosan az alatt, hogy a Guyer–Krumhansl-egyenletben az $\eta_{1,2}$ együtt-hatók jelentősége heterogén anyagok modellezésében csekély?
3. Ha egy Guyer–Krumhansl illetve Jeffreys-egyenlettel modellezett termodinamikai testen belül kijelölünk egy véges nagyságú kockát és annak felületén a hőáramsűrűséget integráljuk, akkor a két különböző megközelítés ugyanarra az értékre vezet? Ha nem, mi annak az oka, mi a fizikai jelentése?
4. Mi az a nem-poláros folyadék?
5. Lehetséges-e Galjorkin-módszer segítségével több-dimenziós, tetszőleges alakú testek két időskálás időfüggő hővezetési problémáit megoldani, ahol a sajátfüggvények és integrálok kiszámítása numerikus módszerek használatával történik? Ha igen, milyen előnyei, hátrányai lennének a módszernek a bemutatott numerikus megoldásokhoz képest?
6. A két időskálás Guyer–Krumhansl és Jeffreys-modellek ugyanarra az illesztett hőmérséklet görbére vezetnek a bemutatott kísérletekben? Ha igen, milyen méréssel lehetne eldönteni, hogy melyik modell alkalmasabb adott heterogén anyag hővezetésének leírására? Ha nem, akkor miért csak a Guyer–Krumhansl modell paramétereinek illesztése történt meg?

A továbbiakban a dolgozat specifikus részeire vonatkozó észrevételeimet sorolom fel:

- 4. oldalon az "Ezeket a tulajdonságokat később matematikai formába öntöm, és konkrét hővezetési modellekhez kapcsolom." mondatban nem világos, hogy mely tulajdonságokat érti a szerző az ezeket kifejezés alatt.
- 4. oldalon: nem világos, hogy a szerző mit ért az első mérföldkő esetén a második hang modellezése alatt, sem hivatkozást, sem módszert nem közöl, miközben a második mérföldkő is a második hang modellezése kontinuum-termodinamikával.
- A 7. oldalon szereplő "Ennek egyik hírhedt példája az úgynevezett "fagyott hús kísérlet" [48], ... " kezdetű mondatban az "ennek" valószínűleg heterogén anyagokra utal, amik nem az előtte lévő mondatban, hanem az egyel előtte lévőben szerepelnek. Nagyon gyakran fordul elő, hogy az "ez", "ezek" mutató névmások nem egyértelműen jelölik ki, hogy mire gondol a szerző.
- 7. oldalon nem világos, hogy mit definiál a szerző effektív modellezés alatt. Valószínűleg szerkesztési hiba lehet, mert a kifejezést később a 8. oldalon definiálja megfelelően.
- Az izotróp/anizotróp kifejezés többször is többször is helytelenül "izotrop"/"anizotrop"-ként szerepel. (11., 12., 16., 23., 27., 33., 79. oldalak.)

- 18. oldalon a lap alján az "Ez a tulajdonság kifejezés" vélhetőleg a 3 mondattal korábban szereplő "második diffúziós időskálá"-ra utal.
- Ha jól értelmezem, a hátlapon mindig adiabatikus peremfeltételt feltételez a szerző, míg az előlapon csak a hőimpulzus után. A leírásból viszont ez nem derül ki; pontosabban az, hogy a hőimpulzus alatt milyen peremfeltétel volt a hátlapon.
- A 43. oldalon a "felintegrálható" nyelvtanilag kifogásolható kifejezés szerepel.
- Az 56. oldalon szerepel a "síkhullám" kifejezés, viszont az egyenlet egy dimenziós, így a "hullám" vagy a "térbeli hullám" kifejezés pontosabb lett volna.

Mindent összefoglalva úgy gondolom, hogy a mű magas színvonalú, tudományosan kiemelkedő dolgozat a fizika és a mérnöki tudományok határán. Időfüggő hővezetési problémák pontosabb megoldásához járulhat hozzá a jövőben. A doktori munka tudományos eredményeit elegendőnek tartom az MTA doktori cím megszerzéséhez, és a nyilvános védés kitűzését javaslom.

Bíráló: Dr. Nagy Péter Tamás
 okleveles gépészeti modellező (PhD)
 tudományos munkatárs, BME Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék

Kelt: Budapest, 2025. szeptember 23.

Bíráló aláírása