

H I V A T A L O S B Í R Á L A T

Sipos András Árpád

**Mechanikai és természeti formák elemzése:
matematikai modellek a morfológiában**

című MTA doktori értekezéséről

Formai szempontok

A 114 oldal terjedelmű, magyar nyelven írt értekezés öt fejezetre tagolódik, melyet a Köszönetnyilvánítás és egy 142 tételből álló Irodalomjegyzék zár. A kéthasábos szerkesztésű disszertáció formai szempontból megfelel az MTA doktori értekezésre vonatkozó követelményeknek, néhány apró szövegszerkesztési hibától (pl. az *a/az* névelők nem megfelelő használata a képletek előtt, elütések, betűcserék) eltekintve az értekezés kivitele példásnak mondható. Az értekezés felépítése logikus, fogalmazása szakszerű, egyik értékének tekintem, hogy a gondolatmenetek és az eredmények jelentős része *Definíció*, *Lemma*, *Tétel*, *Bizonyítás* útján van felépítve, amelyeket több esetben is diszkutáló-magyarázó *Megjegyzések* követnek. Az értekezéshez tartozik a magyar nyelvű, 15 oldalas téziszfüzet.

Áttekintő vélemény

A Tartalomjegyzéket követő 1. fejezet a 9 oldalas Bevezetés, amely az irodalmi áttekintést és az értekezés célkitűzéseit tartalmazza, megadva a dolgozat által gyakrabban használt jelölések – meglehetősen rövid – jegyzékét is.

A 38 oldalt kitevő 2. fejezet, amely mechanikai rendszerekhez köthető formákat és mintázatokat vizsgál, három különböző témakört érint. A 2.1 alfejezet puha robotkarok maximális kinyúlásával, a 2.2 és a 2.3 alfejezet vékony filmek ráncosodásával, a 2.4 alfejezet pedig síkbeli falazott ívekkel foglalkozik. A bemutatott eredményeket az értekezés 1. és 2. tézise foglalja össze.

A 30 oldalt kitevő 3. fejezet tárgya konvex testek egyedi, parciális differenciálegyenletekkel leírható geometriai alakfejlődése. A 3.1 alfejezet síkgörbével határolt tartomány görbület-vezérelt kopásával, a 3.2 alfejezet pedig ooid részecskék alakfejlődésének síkbeli modelljével foglalkozik. A 3.3 alfejezet numerikus modellt és kísérleti vizsgálatot mutat be a görbület-vezérelt kopás két fázisának szimulációjára, illetve igazolására. Az ismertetett eredményeket az értekezés 3. és 4. tézise foglalja össze.

A 20 oldal terjedelmű 4. fejezet kavics populációk kollektív alakfejlődésével kapcsolatos elméleti és numerikus vizsgálatokat mutat be. Az elért eredményeket az értekezés 5. tézise tartalmazza.

Az értekezés 5. fejezete az eredmények rövid, záró gondolatokként megfogalmazott összefoglalását és a tudományos eredményekből összeállított öt tézist tartalmazza.

Az értekezés mindhárom érdemi fejezete egy-egy Kitekintés nevű alfejezettel zárul. Ezekben megtalálható a vonatkozó fejezetben ismertetett eredmények összefoglalása és diszkussziója, felvázolva a vizsgált területen folytatható – vagy már jelenleg is folyamatban lévő – további vizsgálatok lehetőségeit is. Ezek az alfejezetek az értekezés olvasása közben felmerülő kérdések egy részére is megadják a válaszokat.

A disszertáció analitikus, numerikus és kísérleti eredményeket is bemutat. Az egyes fejezetekben ismertetett modellek és vizsgálatok egy előre jól definiált keretrendszerben vannak elhelyezve, amely a felállított modellek érvényességi körét és az eredmények alkalmazhatósági határait is megmutatják. Az analitikus megoldásokat Jelölt több esetben saját kísérleti eredményekkel veti össze és támasztja alá, a numerikus eredményeket részben saját fejlesztésű algoritmusok és programok szolgáltatják. Az elért eredmények egy része nemzetközi együttműködés keretében végzett kutatómunkán, illetve saját PhD hallgatójával végzett, közös munkán alapul. A disszertáció értékét, eredményeit és azok hitelességét Jelölt színvonalas – általában többszerzős – publikációi is egyértelműen jelzik, amelyek a téziseket közvetlenül megalapozó 9 saját publikációból és a tézispontokban nem hivatkozott, de a dolgozat témájához tartozó további 19 saját publikációból állnak.

Észrevételek, megjegyzések és kérdések

Az alábbiak néhány, az értekezés olvasása közben felmerülő észrevételt-megjegyzést és kérdést tartalmaznak. Az észrevételeket-megjegyzéseket E betű és sorszám, a kérdéseket K betű és sorszám különbözteti meg. Az észrevételek, illetve megjegyzések a lényegét kevésbé érintik, inkább a megértésben és a követhetőségben okozott nehézségekre utalnak.

E.1. A 2. fejezetben a *nyúlás* és a *nyújtás*, mint relatív és abszolút alakváltozási jellemzők használatában (és értékében) némi inkonzisztencia teszi próbára az olvasó figyelmét:

- A 12. oldal (2.7) képletében megjelenő λ_i értékeket a dolgozat *nyúlásoknak* nevezi, lentebb $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$ (?) és $\lambda_3 = 1$ értékeket ad meg rájuk, ugyanakkor a 2.3. fejezetben λ már *nyújtásként* (stretch) van definiálva.
- A (2.58)-ban makroszkopikus *nyúlásként* definiált ε értékei a 12. oldalon már *nyújtásértékeként* vannak említve.

K.1. A 2.2. ábra szerint a vizsgált rúd geometriailag erősen nemlineáris alakváltozást is szenvedhet, kezdeti görbülete jelentősen megváltozhat. Milyen korlátot jelenthet a puha robotkarok kinyúlásának vizsgálatában a nyomatékok és a görbületek közötti (2.23) szerinti lineáris anyagmodell feltételezése, amely a rúd hajlítási és csavarási merevségeit – a görbülettől függetlenül – állandónak tekinti?

E.2. A 2. fejezet 21. oldalán L a terheletlen film hosszaként van bevezetve. Célszerű lett volna az ugyanezen oldalon először megjelenő másik, ugyanilyen betűvel jelölt – és a későbbiekben is többször használt – L operátor értelmezésére is utalni.

E.3. A (2.54) szerinti, *linearizált nyúlási tenzor*-ként bevezetett \mathbf{e} tenzor az elmozdulásmezőnek nemlineáris függvénye, csak részlegesen linearizált nyúlási tenzor. Bevezetése

inkább zavarónak tűnik, mivel a dolgozat rövidesen áttér a Green-Lagrange-féle \mathbf{E} nyúlási tenzor használatára. A 2.2.1. alfejezet gondolatmenete – megfelelő feltételezések után – szerintem egyértelműbb lenne kizárólag a (2.63) és (2.55) bevezetésével, majd a (2.64), (2.57) és $\Psi_m(\mathbf{E})$ (2.56) alakú közvetlen felírásával. Ezzel egyrészt elkerülhetővé válna az \mathbf{e} -ről \mathbf{E} -re való áttérés indoklása (illetve az arra vonatkozó utalás), másrészt a Saint Venant-Kirchhoff-féle anyagmodell eleve a Green-Lagrange nyúlási tenzor és a II. Piola-Kirchhoff feszültségi tenzor között tételez fel lineáris kapcsolatot.

- E.4. A (2.69) képletben megjelenő q -t a dolgozat *rögzített* paraméterként értelmezi, amely félreérthető. A későbbiek alapján kiderül, hogy q az ortotrópia mértékével és anyagjellemzőivel együtt egy folyamatosan változó paraméter.
- E.5. A 23. oldalon (jobb oszlop) a dolgozat (2.73)-ra Euler-Lagrange egyenletként utal, amely valószínűleg elírás, feltételezhető, hogy (2.65)-(2.66) lenne a helyes hivatkozás.
- E.6. A dolgozat a matematikai átalakításokat többnyire megfelelően részletezi, a (2.78)-(2.79) parciális differenciálegyenletek megoldását viszont csak közli, (2.80)-(2.81) alakjában. Hiányolom a megoldásra vonatkozó utalást, mert az ránézésre szerintem nem következik.
- E.7. A 29. oldal 2.3.1. alfejezetének elején a síkbeli *alakváltozási mező* helyett a síkbeli *elmozdulásmező* van értelmezve és bevezetve.
- K.2. A (2.85) szerinti Ψ_m energiasűrűség a \mathbf{C} alakváltozási tenzor függvénye, így Ψ_m elvileg a C_{12} alakváltozási komponensből is függhet. Megjelenik-e ez a komponens a számításokban, illetve milyen szerepe van/lehet ennek komponensnek a ráncosodás és az anizotrópia (ortotrópia) kialakulása során?
- K.3. A (2.90)-ben megjelenő \mathbf{K} tenzor azonos-e a korábban bevezetett és használt \mathbf{k} hajlítási tenzonnal?
- K.4. A 2.3 alfejezetben milyen modellezési korlátot jelenthet az, hogy a membrán energia nemlineárisan rugalmas anyagmodellel történő figyelembe vétele mellett a hajlítási energia továbbra is lineáris anyagmodellt tételez fel?
- K.5. A vékony filmek ráncosodásának vizsgálata során mennyire helytálló az a feltételezés, hogy a hajlítási energia független a kialakuló ortotrópiától és a károsodás mértékétől, például a ráncos és a sima tartományok átmeneténél?
- K.6. A 3.4.(a) ábrán látható ooid részecskék egy része nem látszik tengelyesen szimmetrikusnak, közülük többnek is van konkáv szakaszokat tartalmazó határológörbéje. Milyen lehetőségek rejlenek a geometriai parciális differenciálegyenletekben az ilyen típusú – nem tengelyesen szimmetrikus és konkáv határológörbékkel rendelkező – alakzatok fejlődésének leírására?
- E.8. A 3.16. Tételben (66. oldal) megjelenik a D_2 szimmetria fogalma, de értelmezését nem találtam meg, a későbbiek alapján derül ki, mit ért rajta a dolgozat. Részben

azért említem ezt meg, mert a D_2 szimmetriacsoport fogalma és jele a 3. tézisben explicit módon is megjelenik, azonban ott már index nélküli D_2 -ként.

- E.9. A 4.6. Tétel *kollektív kernel*re fogalmaz meg állítást. A tétel bizonyítása alapján feltételezhető, hogy ez a kernel azonos a korábban *összetett kernel* néven definiált (4.25) kernellel. Nem tartom szerencsésnek, ha egy dőlt betűvel kiemelten definiált fogalmat (kernel nevet) a rá vonatkozó tétel eltérő néven említ. (Kevésbé zavaró, ezért csak zárójelben említem, hogy az ugyancsak dőlt betűvel definiált *összegzési kernel*t a 4.2. Lemma már összeg kernelnek nevezi és fogalmaz meg rá állítást).
- K.7. A 4.1.2. alfejezetben bemutatott numerikus eredmények síkbeli vagy térbeli ütközések szimulációjával nyert eredmények? Van-e, várható-e lényeges különbség a kétféle szimulációval kapható eredmények között?
- K.8. A 3. és a 4. fejezetben elért eredmények nagyszerűsége és eleganciája abban áll, hogy bonyolult fizikai (mechanikai) és kémiai folyamatokat geometriai-matematikai szabályok felállításával tud figyelembe venni az alakfejlődés, illetve a méretfejlődés és eloszlás differenciálegyenletekkel történő leírása során. Pontosítaná-e (és mennyiben) az alakfejlődési és a kopási folyamatok leírását, illetve modellezését, ha az anyagmodelleket, a súrlódási és kopási törvényeket, a mozgási és helyzeti energiák szerepét, az áramló közeg sebességét, valamint a kémiai folyamatokat fizikai-mechanikai modellek felállításával próbálnánk – feltételezhetően jóval bonyolultabb és kevésbé elegáns módon – figyelembe venni?

Tézisek értékelése

Az értekezés három érdemi fejezetében részletezett vizsgálatok eredményeit az 5. fejezetben található öt tézis összegzi. A tézisekre vonatkozóan az alábbi megállapításokat teszem.

1. Az 1. tézist, amely vékony robotkarok maximális kinyúlásával kapcsolatos eredményeket, valamint vékony filmek ráncosodására vonatkozó, ortotrop modellel elért kutatási eredményeket ismertet, új tudományos eredményeknek ismerem el. A tézis értékét és hitelességét Jelölt két angol nyelvű, rangos nemzetközi folyóiratokban közzétett cikke is mutatja.
2. A 2. tézist, amely egyrészt a Mullins-hatás figyelembevételével felépített modellel ad magyarázatot a vékony filmek ráncosodási folyamatára, másrészt a húzószilárdság nélküli falazott ívek állékonyságára vonatkozó eredményeket tartalmaz, új tudományos eredményeknek ismerem el. A tézis értékét és hitelességét jelzi a témához köthető két angol nyelvű, neves nemzetközi folyóiratokban megjelent saját publikáció.
3. A 3. tézist, amely konvex görbék geometriai parciális differenciálegyenletekkel leírható alakfejlődésére vonatkozó eredményeket ismertet, új tudományos eredményként ismerem el. A tézis értékét és hitelességét a témához köthető két, elismert nemzetközi folyóiratokban közölt angol nyelvű cikk is jelzi.

4. A 4. tézist, amely a Bloore-féle alakfejlődési modell alkalmazásával kétfázisú, görbület-vezérelt kopásra mutat be numerikus algoritmusokat és eredményeket, új tudományos eredményként ismerem el. Hozzáteszem, hogy ez a tézis szorosan kapcsolódik a 3. tézisben foglalt eredményekhez, amit az a tény is jelez, hogy a 3. és a 4. tézis eredményeit az értekezés 3. fejezete tárgyalja részletesen. Bár nagyon sok munkát takar, ez a tézis közelebb áll egy PhD értekezés téziséhez. A tézist a témához köthető két angol nyelvű saját publikáció támasztja alá, amelyek neves nemzetközi folyóiratokban jelentek meg.
5. Az 5. tézist, amely kavics populációk kollektív alakfejlődésével kapcsolatos eredményeket ismertet, új tudományos eredményként ismerem el. A tézis értékére és hitelességére utal a témához köthető angol nyelvű saját cikk, amely színvonalas nemzetközi folyóiratban került publikálásra.

Összefoglalás

Összegzőképpen megállapítható, hogy Sipos András Árpád MTA doktori disszertációja egy színvonalas szakmai munka eredményeiből tevődik össze, amely a szilárdtest mechanika és a morfológia területén felmerülő problémák megoldására mutat be új, matematikailag megalapozott tudományos eredményeket. Az értekezésben és az öt tézisben foglalt eredmények tudományos értékét és hitelességét Jelöltnek az értekezés témájában készített 28 publikációja és azok minősége is kiválóan mutatja. Mindezek alapján *javasolom a benyújtott értekezés nyilvános vitára bocsátását.*

Miskolc, 2022. december 30.



Dr. Bertóti Edgár
egyetemi tanár, az MTA doktora