

Bírálat

Oldal István:

„Új matematikai modellek szemcsés anyagok modellezéséhez”

című doktori értekezéséről

Általános áttekintés

Az értekezés két, egymáshoz közvetlenül kapcsolódó témakörben mutat be értékes kutatási eredményeket:

- (1) Szemcsés anyagok tölcséres kifolyása silókból;
- (2) Diszkrétéleemes numerikus modellek kapcsolati anyagmodelljében a normálirányú csillapítás modellezése.

Az első kérdéskör a szakirodalomban található számos korábbi próbálkozás ellenére lezáratlan kérdések sokaságát veti fel ma is. Jelölt úttörő eredményei a kifolyási sebességre és a tömegáramra vonatkozóan elméleti és gyakorlati szempontból egyaránt értékesek, különös tekintettel arra, hogy tölcséres kifolyásra a Jelölt által 2007-es PhD-értekezésében felvetett ötlet előtt nem léteztek analitikus modellek. A második téma a korszerű numerikus modellezés szempontjából abszolút időszerű: Jelölt olyan csillapítási modellt vezet be, amely amellett, hogy (megfelelő kalibrálás esetén) realizisztikusan viselkedik, mintegy harmadára csökkenti a vizsgált feladattípusban a futási időt. DEM-szimulációk esetén, amikor a futási időigényt gyakran hetekben mérjük, egy ilyen gyorsítás nagyon komoly segítség a mérnököknek és kutatóknak: addig praktikusán szimulálhatatlan jelenségeket vizsgálhatóvá lehet így tenni.

Mindkét témakörben jellemző Jelölt eredményeire az az ötletesség, amely a jelenség vagy modell igazi megértésén alapulva találó választ ad olyan problémára, amely addig a témakör egyik szűk keresztmetszete volt. Nagyra értékelendő emellett az a precíz, gondos kísérleti (esetenként virtuális kísérleti) munka is, amellyel Jelölt a javaslatait alátámasztja.

Formai észrevételek

→ Az értekezés felépítése követi a klasszikus „szakirodalmi áttekintés – alkalmazott módszerek – eredmények” hármas formát, mindhárom lépésen belül mindkét témakörre kitérve. Ez az értekezés olvashatóságát némileg nehezíti. Mivel a vizsgált két témakörnek erősen eltérő a szakirodalma és az alkalmazott eszközök

jelentősen különböznek, célszerűbb lett volna a fordított forma: az egyes témakörökre külön-külön, folytatólagosan venni végig a témakör előzményeit a vizsgálni kívánt kérdésekkel, majd bemutatni az alkalmazott módszereket és végül az eredményeket. A szerkesztésmód azonban a tudományterület szokásainak, elvárásainak is függvénye, így nem rovom fel hibának.

- Nagyra becsülöm, hogy az értekezés nyelve magyar, azaz Jelölt vállalta azt a pluszmunkát, amit a cikkei szövegének magyar szaknyelvre való átültetése, az ábrák feliratainak és a táblázatok szövegeinek magyarra fordítása jelentett.
- Az értekezésben fellelhetők elütések és kisebb nyelvi hibák (ezeket jelöltem a nálam lévő példányában), de ezek a megértést általában nem akadályozzák. Ahol mégis, ott a lentiekben rákérdezek, jól értettem-e, amit Jelölt közölni akart.

Kisebb tartalmi észrevételek és kérdések

1. A szakirodalmi áttekintés a kutatásokban tárgyalt két témakörön túlnyúlóan is informatív. A szemcsehalmozok kontinuum-modelljeivel kapcsolatban esetleg hiányolható lehet egy megjegyzés a folyadékként való modellezés lehetőségére (bár ennek ma már inkább történeti érdekessége van), a diszkrételes modellekre vonatkozóan pedig hiányzik egy utalás az implicit eljárások létezésére, hiszen implicit időintegrálás esetén jóval kevésbé okoznak gondot a Jelölt kutatásai által csökkenteni kívánt numerikus oszcillációk. Ezekről eltekintve az értekezés szakirodalmi áttekintése kellően alapos.
2. A 3.4.1 fejezet a diszkrételes modellekben szokásosan alkalmazható csillapításokat tekinti át. Pontatlannak érzem azt a két állítást, hogy „A két test találkozását ütközésként írjuk le.” illetve „A diszkrételes modellezés esetében a legelterjedtebb csillapítás az ütközési tényező alkalmazása a kapcsolati modellben.”. Az érintkező szemcsék egymáson való megcsúszásakor fellépő súrlódási disszipáció, illetve az esetleges kohézió felszakítása miatti energiaveszteség az adott feladattól, a halmaz pillanatnyi állapotától stb. függően akár fontosabb is lehet, mint az ütközések miatti energiaveszteség.
3. Az irodalmi áttekintés egészen végigvonul az a felfogás, mintha a diszkrételes szoftverekben az egyes szemcsék mindig merev testek lennének, amelyek valamilyen sima, konvex, kétszergörbült alakúak (pl. gömbök), vagy ilyenekből vannak összerakva, tehát hogy az érintkezéseik mindig pontszerűek. Hiányolom annak említését, hogy a diszkrételes modellek másik nagy csoportjában az elemek poliéder alakúak, így közöttük lap-lap, él-lap, él-él érintkezések modellezése szükséges, illetve hogy gyakran maguk az elemek is deformálhatók. Jelölt kapcsolati modelljéről fontos rögzíteni, hogy jelen állapotában gömb alakú (vagy gömbökből összerakott), végtelen merev elemek esetére vonatkozik.

4. Vélhetően csak elírás, 25. oldal, utolsó bekezdés első sora: Kapcsolati viszkózus csillapítás esetén nem a sebességtől, hanem az érintkezést adó két anyagi pont relatív sebességétől függ a csillapító tag.
5. A síkáramlású silóból kifolyó anyag szétosztásával kapcsolatban (37.-38. oldal): Véleménye szerint van-e valós lehetőség a sebességprofil feltérképezésére oly módon, hogy sok terelőlemezt alkalmazva szeletekre osztjuk a kiáramló anyagot? Esetleg tud-e ilyen vizsgálatról a szakirodalomban?
6. A kifolyáskori sebességeloszlással kapcsolatban: Mák (tehát igen apró, gömbszerű szemcse) esetére látványosan meggyőző a 34. ábra. A numerikus szimulációk lehetővé tennék gyakorlatilag tetszőleges alakú, kellően kicsiny szemcsék vizsgálatát. Várakozása szerint ugyanilyen jól működne-e a kifolyási modell másféle szemcsealakokra (akár pl. rücskös felszínű, egymásba akadni is képes homokszemcsékre)?
7. Az 5.6.1 fejezetben Jelölt megadja különféle anyagok esetére a kialakuló boltozat magasságának és szélességének arányát, az ún. boltozati alaktényezőt, mint anyagjellemzőt. Ennek értékét a legtöbb esetben egyetlen értékes jegyre határozta meg (64. oldal 4. táblázat), feltételezhetően a mérés kivitelezésének nehézségei miatt. A térfogatáram és a tömegáram megbízható előrejelzése szempontjából viszont pontosabb eredmények lennének szükségesek. Kérem, részletezze, hogyan történt pontosan ez a mérés, és hogy van-e javaslata pontosabb mérési módszerre.
8. Érdekes, hogy a 4. táblázatban szereplő boltozati alaktényező mintha monoton csökkenne a szemcseméret növekedésével (a táblázatból az látható, hogy az adott 100 mm-es kifolyónyílás esetén minél kisebb a szemcse, annál magasabb a boltozat, bár az egyetlen értékes jegye való pontosság miatt ezt nem lehet biztosan állítani, különösen hogy a PE-LD granulátum szemcseméretére és -alakjára nem találtam adatot az értekezésben). Más méretű kifolyónyílásra is végzett vizsgálatokat Jelölt, vagy tud ilyen vizsgálatokról? Ha igen, akkor ott is ugyanilyen tendencia és ugyanilyen értékek adódtak?
9. A szemcséknek természetesen nem csupán a mérete, de az alakja is jelentősen befolyásolhatja a boltozat csúcsosságát, ezért a jövőben érdemes lehet legalábbis diszkrétételes szimulációkkal megvizsgálni, hogyan függ az alaktól és a mérettől a boltozat alakja. A silókban tárolt szemcsehalmozok boltozódási jelenségeit a diszkrétételes modellekben tapasztalható numerikus oszcillációk miatt mindeddig igen nehéz volt megbízhatóan vizsgálni: a numerikus oszcillációk túl gyakran „szétrázták” a kialakulni próbáló boltozatokat, és nem lehetett elkülöníteni, mi a numerikus hiba és mi a valós jelenség. Jelölt csillapítási módszere komoly előrelépést hozhat ezen a téren.
10. Jelölt kétdimenziós kísérleteiben (5.2.2 pont) azt találta, hogy a boltozat alakja mindig másodfokú parabola (bár igaz, hogy az R^2 értékek egyes esetekben jóval

0,9 alatt maradnak). Háromdimenziós esetre indirekt módon bár, de alátámasztja a másodfokú parabola alakot a tömegáramra és a sebességeloszlásra vonatkozó előrejelzések sikeressége. Mi lehet a másodfokú parabola alak fizikai oka?

11. Egy fogalmazásbeli pontatlanság: Jelölt sokszor hivatkozik a Mindlin-Deresiewicz-féle kapcsolati modellre, de a fogalmazásmód több helyen azt sugallja, mintha e modell lényege egyfajta normálirányú csillapítás lenne. A fogalmazásmód félrevezető: a Mindlin-Deresiewicz-modell a (nyomóerővel egyidejűleg ható) nyíróerővel foglalkozik. Ennek az igen bonyolult modellnek az egyszerűsített verzióit használják diszkrétéleemes modellekben az érintőirányú relatív eltolódás és az érintőirányú erő közötti összefüggés megteremtésére.
12. Vélhetően elírás: az 57. oldalon, az (51) képlet előtt a és b konstansokat említ a szöveg, de a képletekben c_1 és c_2 szerepel. Ugyanarról van szó?
13. Saját kapcsolati csillapítási modelljének célja, hogy (71. oldal első bekezdés) „az energiaelnyelés maximumát is a maximális összenyomódás és erő közelébe koncentráljuk”. A fogalmazásmód itt is némileg félreérthető. Az (57) képlet azt látszik inkább mutatni, hogy a már létrejött kapcsolat esetén az oszcilláló mozgás során a még jobban egymásba nyomódó – lazuló – még jobban egymásba nyomódó – lazuló ciklusok minden egyes lazuló lépésekor az alacsonyabb ágon történik az erő számítása, azaz minden egyes ciklusban megtörténik az energiaelnyelődés a lazulási lépésben.
14. Nem találtam az értekezésben: Milyen szemcseszámmal történtek az izotrop nyomóvizsgálatok?
15. A csillapítási módszer hatékonyságát célszerű lett volna a Hertz-modell mellett az egyszerű konstans merevségű kapcsolati modellel is összevetni. Sok feladattípusnál – különösen ha a szemcsék anyaga nem tekinthető lineárisan rugalmasnak – az utóbbit alkalmazzák, éppen jóval kedvezőbb numerikus viselkedése miatt.

Lényegi észrevételek és kérdések

1. Az 5.3 és 5.4 fejezet foglalkozik a kifolyási sebességeloszlással és ez alapján a kifolyási tömegáram előrejelzésével, mindkét fajta silóra. Itt a ρ_h halmazsűrűségi paraméter számszerűsíti azt, hogy a halmaz esés közben fellazul, sűrűsége változik. Milyen szemcsejellemzők befolyásolják ezt a számot? Tapasztalata szerint anyagjellemző-e ez egyáltalán, vagy függ a szemcseméretnek a kifolyónyílás méretéhez való viszonyától, a boltozat magasságától, esetleg egyéb paraméterektől? Ha anyagjellemzőnek tekinti: Hogyan lehetne egy-egy anyagra kísérletileg megmérni ezt a számot?
2. A 4.1 és 4.2 fejezetekben (a boltozódási ill. kifolyási vizsgálatok leírásánál) és az 5. fejezetben (amely az ezekkel kapcsolatos eredményeket mutatja be, megalapozva

az 1. tézist) nehéz elkülöníteni, mely vizsgálatok és felismerések azok, amelyek Jelölt PhD-értekezésében is megjelentek már, és melyek azok, amelyeket újaknak tekinthetünk. Kérem Jelöltet, hogy válaszával tegyen ebben rendet: emelje ki egyértelműen a PhD-értekezése óta végzett vizsgálatokat illetve az esetleges korábbi kísérletekből a PhD-értekezés után levont következtetéseket.

3. Jelölt merőleges ütközésekre, laza halmaz leejtésére, illetve izotrop tömörítési folyamat szimulációjára tesztelte kapcsolati csillapítási modelljét. Izotrop tömörítés vagy laza halmaz ülepítése során viszont – különösen amíg még nagy a hézagtenyező – az ide-oda pattogó szemcsék csúsznak is egymáson, vagy érintőirányban is megütik egymást. Ez már itt is indokolta volna Jelölt csillapítási módszerének az érintőirányú komponensekre való alkalmazását. (A silókifolyás szimulálásánál alkalmazott Tsuji et al (1992) modell (41. oldal, (22) képlet) tartalmaz érintőirányú ütközési csillapítást, de még azt a változatot, amit normálirányban Jelölt javítani kívánt.) Jelölt modelljének mindenképp szükséges továbbfejlesztési iránya lenne az érintőirányú erőkre való kiterjesztés. Hogyan lehetne ezt megtenni, mit kellene esetleg másképp csinálni, mint a normálirányú komponens esetében?
4. Jelölt hangsúlyozza, hogy csillapítási modellje rugalmas erő-átfedés-összefüggésre alkalmazható. Feltétlenül szükséges ez a korlátozás? A kérdés azért is lényeges, mert az érintőirányú komponensre való kiterjeszthetőséget jelentősen korlátozná, ha így lenne. (A Mindlin-Deresiewicz-elméletben már kis érintőirányú kapcsolati erő esetén is megjelenik az a körszimmetrikus tartomány, amelyen képlékeny állapotban van a kapcsolat – nem beszélve a teljes súrlódásos megcsúszásról, amely valós halmazok nyírása esetén az energiaelnyelés egyik fő része. Valós szemcsék esetén ráadásul a Mindlin-Deresiewicz-elmélet nem is ad jó közelítést, amikor a felületek alakja nem pontosan gömb.)
5. Ahogy azt Jelölt is kiemeli, az explicit időintegrálásos diszkrétéleemes eljárásoknál az irreális numerikus oszcillációk komoly numerikus nehézségeket okoznak, kapcsolati csillapítási modellje épp ezért jelentős előrelépést hozhat, ha elterjed a nemzetközi gyakorlatban. Az oszcillációk különösen olyankor akadályozzák a megbízható numerikus modellezést, ha nem dinamikus folyamatot szimulálunk, hanem egy halmaz egyensúlyi állapotát keressük. Jelölt csillapítási modelljének fontos előnye lenne, ha az egyensúlyi állapotba való eljutást is segítené, a kiegyensúlyozódás folyamatát gyorsítva fel. Kérem Jelöltet, hogy mutasson ilyen esetre is példát (pl. egy nagyobb elemszámú ülepítési vagy rézsűmegcsúszási feladatot), összevetve az egyensúly eléréseig szükséges futási időt a korábbi Hertz-modelles és – ha megoldható – egy konstans normálmerevségű verzióval.

A tézisekről

- Az 1. tézis Jelölt PhD-kutatásainak logikus továbbfejlesztéseként született, az alapötlet egyértelműen Jelölté. A tézist adó négy képlet közül azonban a negyedik – amelyik a síkmozgás esetében adja meg a tömegáramot – Jelölt tanítványának PhD-tézisei között (Safranyik Ferenc 2016-os értekezésének 4. tézisében) is szerepel. Bár mester és tanítvány közös munkáját gyakran nem lehet elválasztani, és Safranyik Ferenc maga is az Oldal-féle analitikus modell kiterjesztésének nevezi az általa tézisként megfogalmazott összefüggést, mégis véleményem szerint Jelölt értekezésében helyesebb lett volna „közös eredmény Safranyik Ferencsel” megjegyzést tenni ehhez a képlethez. A tézis többi részét Jelölt saját eredményeként fogadom el.
- A 2. és 3. tézis szorosan összefügg. A 2. tézis általános javaslatot tesz tetszőleges kapcsolati normálerő-átfedés-összefüggés esetére, a 3. tézis pedig ezt a javaslatot alkalmazza a Hertz-modellre. A két tézist célszerű lett volna összevonni, hiszen önmagában a 2. tézis nem megy túl az – amúgy értékes – ötletfelvetésen, a Hertz-modellre vagy más konkrét erő-átfedés-függvényre való alkalmazása nélkül nem lenne ellenőrizhető, a 3. tézis viszont a 2. tézisben szereplő ötlet alkalmazása és gondos ellenőrzése különféle típusú problémák szimulációjában. A 2. és 3. tézist tehát csak együttesen tartom tézisértékűnek.

Az értekezés nyilvános vitára bocsátását egyértelműen javaslom. Érdeklődéssel várom Jelölt további kutatásait, mindenekelőtt csillapítási modelljének az érintőirányú komponensekre való kiterjesztését, majd az így kapott, a numerikus oszcillációk szempontjából sikeresen feljavított diszkrételemes modellel a silókból való kifolyásra és a boltozódásra vonatkozó, várhatóan nagy nemzetközi érdeklődésre számottartó jövőbeli eredményeit.

Budapest, 2026. május 15.

Bagi Katalin

Bagi Katalin
az MTA Doktora, egyetemi tanár
Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék
BME