

MTA DOKTORI ÉRTEKEZÉS BÍRÁLATA

ÉRTEKEZÉS CÍME: Új matematikai modellek szemcsés anyagok modellezéséhez

ÉRTEKEZÉS SZERZŐJE: Dr. Oldal István

BÍRÁLÓ: Dr. Zsoldos Ibolya, MTA doktora

1. BEVEZETÉS

Oldal István MTA doktori értekezésének fő témája mezőgazdasági termények, szemcsehalmozatok silóból való kifolyási folyamatainak vizsgálata, valamint diszkrét elemes szimuláció számára új kapcsolati modell felírása.

Az értekezés szerkezete és kivitelezése megfelel az elvárásoknak. Kb. 30 %-ot tesz ki a kellő részletességgel bemutatott irodalomfeldolgozás, amelyet több, mint száz releváns irodalmi forrás felhasználásával állított össze. Számos ábrával, diagrammal, matematikai összefüggések leírásával együtt összességében tartalmas munkának látom. A fogalmazás általában érthető, logikus, olvasható. A szerkesztés és a kivitelezés igényes, szép munka.

A kutatómunkát két különálló fejezetben részletezi. Először a módszertanról, majd ezt követően a kutatási eredményekről olvashatunk. Ebben a sorrendben szerkeszttem a részletes bírálatot is.

2. A KUTATÁS SORÁN ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

A felsorolt területeken alkalmazott módszertant, felhasznált eszközöket, anyagokat mutatja be.

2.1 Boltozódási vizsgálatok: a boltozódás alakját leíró függvény keresése a cél. Az ehhez alkalmazott, a MATE jogelőd intézményében, a GATE Mechanika és Műszaki Ábrázolás Tanszékén épített kísérleti berendezést mutatja be. A leírás kellően részletes, érthető.

Kérdések:

- A kísérleti berendezés tervezése, építése kinek a nevéhez fűződik, Jelöltnek volt-e ebben szerepe?
- A berendezéssel síkmodelleket vizsgálnak. A boltozódás síkmodellje tekinthető-e a térbeli boltozódás metszetének?
- A boltozódási jelenségben van-e hasonlóság különböző méretű modellek között?

2.2. Kifolyási vizsgálatok

Szemcsés anyagok kifolyásánál azt vizsgálja, hogy folytonos-e az áramlás, vagy vannak-e elkülöníthető fázisok. Homokórával, nagy- és kisméretű hengeres silóval és síkáramlású modellsilóval dolgozott. A kísérleti eszközök a SZIE-en épített saját eszközök, két eszköz építésében volt közvetlen szerepe Jelöltnek. A leírások érthetőek, kellően részletesen mutatja be a berendezések változtatható paramétereit is.

Észrevételek, kérdések:

- A kifolyási folyamatban van-e hasonlóság különböző méretű, de hasonló geometriájú silók esetén?

2.3. Silókifolyás diszkrét elemes modellje

A szemcsemodellt és a szemcsék közötti kapcsolati modellt ismerteti részletesen. A kapcsolati modellnél bemutatja a korábban Keppler István által alkalmazott modellt, ezután új, saját kapcsolati modellt vezet be, amelynek számítógépi kódját C++ rendszerben programozta, majd ennek felhasználásával MercuryDPM nyílt forráskódú diszkrét elemes modellező szoftverben végzi a futtatásokat. Végül ejtési és statikus nyomóvizsgálatokkal validálja az új modellt.

Észrevételek, kérdések:

- Szemcsemodellként a búzaszemet 3 gömbbel modellezi. A 19. ábra szerint a búzaszem jellemző méretei 5,3 mm x 3 mm, a leírás szerint a három egymásba csúsztatott gömbből álló szemcse jellemző méretei pedig csak 4,5 mm x 2,5 mm. Miért kisebb a modell az átlagos búzaszemenél?
- A DEM modellben merev szemcsékkel dolgozik, és a szemcsék összenyomódását a szemcsék átfedéseként értelmezi. Ez számomra irreálisnak tűnik. Mit ért a szemcsék átfedésén?
- A (18), a (22) és a (26) összefüggésekben úgy tűnik, hogy különböző mértékegységek adódnak a baloldalra és a jobboldalon szereplő két tagra. Jól látom ezt? Ha igen, akkor mindenképpen meg kell magyarázni.
- A 21. ábrához szükség van magyarázatra: $t=0$ pillanatban nem mozognak a szemcsék, de a baloldali színskála szerint mégsem a 0 m/s-nak megfelelő kék színű a töltet. Az ürítésnél pedig kék színű a töltet, ami a színskála szerint éppen 0 m/s-nak felel meg. A baloldali színskála mindegyik képre vonatkozik?

3. EREDMÉNYEK

3.1. Kifolyási tömegáram meghatározása hengeres silókra

Új hipotézist állít fel, amely szerint a szemcsés anyag kifolyása folyamatosan kialakuló és összeomló, saját elnevezése szerint ún. instabil boltozatok sorozataként jön létre. A hipotézist először homokórában történő kifolyáson, fotók sorozatának segítségével, szemrevételezéssel igazolja. Silóból való kifolyás vizsgálatánál egy nagyon fontos tényt is magyaráz az instabil boltozatok szerepével: a kifolyási tömegáram szemcsés anyagok esetében állandó, ellentétben a folyadékokkal, ahol a kifolyási tömegáram csökken a folyadékoszlop csökkenésével.

Észrevételek, kérdések:

- Feltételezte, hogy a természetes, azaz önmagától kialakuló boltozatok alakját leíró függvény típusa azonos stabil és instabil boltozatok esetében. Lát-e lehetőséget a stabil és az instabil boltozatok alakjának tényleges összehasonlítására (azaz az instabil boltozat alakjának mérésére, pl. fotón, nagysebességű kamerás felvételen, legalább síkáramlású silóknál)?
- A 3. táblázatban 10 stabil boltozatra, pontokra illesztett függvények R^2 értékei vannak feltüntetve. Az illesztett parabolák paraméterei (a , b és c paraméterek egy $f(x)=ax^2+bx+c$ formulában) ugyanazok, vagy különbözőek voltak?
- Mi a különbség az átmeneti és az instabil boltozat között? A 29. ábrához jó lett volna egy rövid magyarázat: a nyíllal (és nyíl nélküli) görbék az egymás utáni átmeneti boltozatok?
- A (33) összefüggésnél mi értelme van a boltozat magasság-szélesség arány bevezetésének? Hiszen hengeres silók esetén a boltozat magassága nem mérhető, így az arány sem. (A δ_b boltozati alaktényezőben benne marad a boltozat magassága.) A δ_b boltozati alaktényezőt innentől kezdve anyagjellemzőként feltételezi. De vannak-e erre utaló kísérleti tapasztalatok, vagy irodalmi adatok? δ_b valóban csak anyagjellemző? Sejtéseim szerint függhet a siló garatjának geometriai méreteitől, alakjától is.
- A térfogatáramot egyetlen instabil boltozat összeomlásából adódó, a kifolyónyílás keresztmetszetén kiesőszemcsék átlagos sebességével határozta meg. De az instabil boltozatok amint keletkeznek, azonnal össze is omlanak, és azonnal ki is alakul a következő instabil boltozat? Mert ha nagyon rövid ideig is, de stabilak, akkor a fennállási idejüket bele kellene kalkulálni a térfogatáram meghatározásába. Minden instabil boltozat ugyanolyan méretű és alakú? Ezen kívül a felírt összefüggés feltételezi azt is, hogy az egész boltozat egyszerre folyik ki, a kifolyónyílás keresztmetszetén folytonosan, homogén elrendeződésben, hézagok nélkül haladnak át a szemcsék. Ezeket a bizonytalanságokat feloldja a későbbi „Tömegáram eredmények” fejezetekben, ahol látjuk, hogy a mért kifolyt tömegárammal egybeesnek a számolt eredmények, tehát a folytonosan kialakuló instabil boltozatok elvének helyességét később igazolja.

3.2. Kifolyási tömegáram meghatározása síkáramlású silókra

A hengeres silókhoz hasonlóan síkáramlású silók esetében is levezeti az instabil boltozatok elvén alapuló tömegáram számítására vonatkozó összefüggéseket.

Észrevételek, kérdések:

A levezetett új összefüggésekkel kapcsolatosan hasonló kérdések merülnek fel, mint hengeres silóknál. Egyetlen különbség az, hogy a síkáramlású siló esetében egy átlátszó falú siló nagysebességű kamerás kísérletével talán igazolni lehetne, mit is jelent pontosan az instabil boltozat, és össze lehetne vetni a geometriai paramétereket a stabil boltozatéval. Esetleg meg lehetne mutatni, hogy minden instabil boltozat azonos

(vagy közelítően azonos) méretű és alakú. A kutatómunka folytatásánál javaslom ezt meggondolni.

3.3. Sebességeloszlások eredményei

Hengeres silókra az előző fejezetekben levezetett kifolyónyílás sebességeloszlásokat, térfogat és tömegáramokat most mérési eredményekkel hasonlítja össze (mák szemcsékre), még hozzá a kifolyónyílás kettéosztásával, finom lépésekben növelt körszeleteken mért adatokkal. Az irodalomban korábban feltételezett homogén sebességeloszláshoz képest nagyon szépen kimutatja a saját összefüggések helyességét, és ezzel az előző fejezetekben felmerült kérdések jó része tisztázódik is. Ezzel együtt az instabil boltozatok elmélete is kísérleti igazolásra kerül.

Síkáramlású silókra a saját összefüggésekkel, valamint DEM szimulációval számolt eredményeket hasonlítja össze több fajta, nagyobb szemcseméretű szemcsés anyagra.

Észrevételek, kérdések:

- A 35. ábrán az illesztett függvénynél mekkora volt az R^2 érték?
- Hengeres silóknál δ_b boltozati alaktényezőt hogy vette fel a saját számításoknál?

3.4. Tömegáram eredmények

Három tényező hatását vizsgálja a hengeres és síkáramlású silókban: anyag, kifolyónyílás mérete és garat nyílásszög. Az eredményeket saját analitikus modellből számolja, és a számolt adatokat saját mérésekkel hasonlítja össze. Meghatározza a saját modellek alkalmazhatósági korlátjait. Itt válik egyértelművé a térfogati és a tölcséres kifolyás közötti egyértelmű különbség, és a különbség okai. Általában jól alátámasztott, helyes összefüggésekre következtet.

Észrevételek, kérdések:

- A 4. táblázat tartalmazza az anyagonként meghatározott δ_b boltozati alaktényezőt. De hogyan történt a meghatározás? Analitikus modell és mérések összehasonlításából kijön az alaktényező?
- A 37. ábra magyarázatánál azt írja, hogy háromszor ismételt minden mérést, de a diagramon csak egy mérési pont van minden átmérőre. Ez a három mérés átlaga? Ha igen, akkor mekkora volt a szórás?

3.5. Új elvű csillapítási modell DEM alkalmazás számára

A csillapítási modellnek egy új matematikai leírását vezeti be új kapcsolati függvénnyel. Nagyon tetszett, hogy az új matematikai leírás a korábbiakhoz képest lényegesen egyszerűbb azzal, hogy az ütközési tényező számításánál kiesik az integrál tényező, így nagyon sok függvény alkalmazására ad lehetőséget. Ezt abszolút praktikus, egyedi ötletnek látom.

Egyszemcsés és többszemcsés és laza halmazsal végzett ejtés folyamatán hasonlítja össze a Hertz-Mindlin és az új, saját kapcsolati függvénnel végzett számításokat, részletesen elemzi a különbségeket.

Végül izotróp nyomóvizsgálat szimulációján mutatja meg az eredmények hasonlóságát a régi és az új modellel számítva. Ezen a példán demonstrálja a szimuláció futási idejében adódó előnyt: az új modellel a futási idő kb. egyharmadrészre csökken.

Észrevételek, kérdések:

- A modell matematikailag valóban szépen kezelhető. De van-e realitás abban, hogy az összenyomódási szakasz végpontja és a tágulási szakasz kezdőpontja között szakadás van? Tud-e így viselkedni egy anyagrészecske (szemcse) a valóságban?
- Az (51-52) összefüggések előtt azt írja, hogy egy irányfüggetlen a és egy irányfüggő b konstanssal bontja két részre az $f(\delta)$ függvényt. De az összefüggésekben c_1 és c_2 konstans szerepel.
- Egy példán látunk futási időbeli különbséget. Valóban, a harmadára csökkent futási idő nagyon jelentős. De néhány másodpercnyi futási idővel a gyakorlatban nem igazán foglalkoznak. Végzett-e nagyobb modelleken futási idő kalkulációt? A futási idő arányosan csökken (egyharmadnyi arányban) nagy modelleken is, ahol több óra, vagy esetleg több napos futási időre számíthatunk?
- Felmerülhet-e DEM szimulációk gyorsítása párhuzamos programozással, vagy grafikus kártyán való futtatással?
- Az új csillapítási modellt felajánlotta-e, hogy integrálják pl. választható opcióként a MercuryDPM DEM szoftverbe?

4. ÖSSZEGZÉS

Jelölt az instabil boltozatok elvének feltételezéséből új összefüggések vezetett le hengeres és síkaramlású silók kifolyásának leírására. Az új összefüggések helyességét kísérleti úton igazolta, az alkalmazási korlátokat meghatározta. A silók alakjára vonatkozó geometriai jellemzők és az anyagjellemzők hatásait részletesen vizsgálta.

Szemcsés anyagok diszkrét elemes szimulációjához új kapcsolati modellt írt fel, amelynek matematikai formulája jelentősen megkönnyíti a DEM szimulációk tervezését, és számottevően gyorsítást eredményez. Az új kapcsolati függvényt összehasonlította hagyományos függvénnel: szemcsék, szemcsehalmozok ejtési kísérletein mutatta meg, hogy elvben azonos, vagy közel azonos eredmények adódnak az új modellel is, miközben a szimuláció futási ideje számottevően csökken.

Az instabil boltozatok matematikai modelljéből egy tézist, az új kapcsolati modellből két tézist írt fel. Mind a hármat elfogadom új tudományos eredményként azzal a megjegyzéssel, hogy a bírálatban megfogalmazott észrevételeket és kérdéseket tisztázni kell.

A bíráló előző részeiben megfogalmazott észrevételek, kritikák, kérdések tisztázhatók, kiegészíthetők, magyarázhatók írásbeli válaszban és szóbeli védésen, nem kérdőjelezzik meg az új tudományos eredmények erősségét. A téziseknél hivatkozott saját publikációk nehezen azonosíthatók be, mert más formában vannak megadva, mint a saját publikációk listáján. A 12. fejezetben felsorolt publikációk (29 db) azonban tartalmilag kötődnek az értekezés témájához, valamint az MTMT publikációs listában is szerepelnek, közöttük több Q1 és Q2 minősítésű cikk van. A harmadik tézisenél egy bíráló alatt lévő publikáció van megadva, ez viszont egyértelműen azonosítható: egy 2026-ban már megjelent Q1 cikk.

Javaslom az MTA doktori értekezés nyilvános vitájának kitűzését, sikeres védés esetén az MTA doktora tudományos fokozat megítélését.

Győr, 2026. 03. 17.

Zsoldos Ibolya