



## Bírálat

Börzsönyi Tamás

*Szemcsés anyagok folyási jelenségei*

című MTA doktori értekezéséről

Dolgozatában Börzsönyi Tamás a szemcsékből álló anyagok folyási jelenségeinek kísérleti vizsgálata során nyert eredményeit foglalja össze. Munkája sokrétű, a szemcsés anyagok folyásának több olyan területére is kiterjed, amelyek az elmúlt 15-20 évben a fizikai kutatások frontvonalába tartoztak. Laboratóriumi méréseivel egyrészt a korábbiaknál pontosabb, részletesebb kvantitatív jellemzését adta folyási jelenségeknek, másrészt meghatározta, hogy a szemcsék szabálytalan, vagy elnyújtott alakja hogyan befolyásolja a rendszer jellemzőit. A maga által épített laboratóriumi kísérletekben a legmodernebb vizsgálati módszereket kombinálta: a rendszer felszínén zajló folyamatokat nagysebességű kamerás felvételekkel követte, míg a szemcsés anyag belsejét röntgentomográfus (CT) és mágneses rezonancia képalkotás (MRI) eszközeivel tárta fel. Ez az egyedülálló részletességű és pontosságú jellemzés segíti a jelenségkör mélyebb megértését és lehetővé teszi pontosabb diszkrét modellek konstrukcióját, valamint annak tisztázását, hogy a kontinuum és diszkrét modellekben használt egyszerűsítő feltételek relevánsan befolyásolják-e az eredményeket. A szemcsés anyagok folyásának jelenségköre fizikai, anyagtudományi érdekessége mellett gyakorlati jelentőséggel is bír, az eredményeknek több esetben talajmechanikai, geofizikai alkalmazásai is lehetségesek.

A kutatómunka tisztán kísérleti jellegű, a jelölt doktoranduszok és diplomamunkázó hallgatók közreműködésével maga építette a laboratóriumi eszközeit, valamint külföldi mérőhelyeken jutott hozzá speciális CT és MRI berendezésekhez. Börzsönyi Tamás csoportja hazánkban egyedülálló kutatásokat folytat a szemcsés anyagok területén, együttműködve neves külföldi kutatóhelyekkel. Méréseit számos esetben elméleti csoportok, részben együttműködő partnerek diszkrét elem szimulációs eredményei, vagy kontinuum mechanikai számolásai motiválták. A munka nagy erényének tartom a vizsgálatok részletgazdagságát és a mérések pontosságát, ami lehetővé tette egy új jelenség, a másodlagos konvekció kimutatását is szemcsés anyag nyírása közben.

## A dolgozat felépítése

A 130 oldalas dolgozat hét fő részből épül fel: *Bevezetés, Irodalmi áttekintés, Szemcsés anyag lejtőn, Nyírási zónák homogén és rétegzett anyagokban, Anizometrikus részecskék folyása, Szemcsés folyás tartályban*, valamint az *Összefoglalás*. A *Bevezetés* röviden vázolja a szakterületet, ahol a jelölt saját kutatómunkáját végezte, felvillantva a dolgozat keretében vizsgált legfontosabb jelenségeket és azok gyakorlati, műszaki, geológiai jelentőségét.

Nagyon hasznosnak találtam az ezt követő *Irodalmi áttekintés, előzmények, célkitűzések* című fejezetet, amely világosan, közérthetően foglalja össze a szemcsés anyagok alapvető jellemzőit, valamint a szemcsés folyás legfontosabb jelenségeit. Az egyes alfejezetekben a jelölt bemutatja a lejtőn történő folyás instabilitásait, a nyírási zónák létrejöttének aspektusait lassan deformált anyagokban, és a szemcsés anyag tartályban ereszkedését kísérő jelenségeket. Minden egyes jelenségkörnél áttekintést ad a szakirodalomban fellelhető legfontosabb kísérleti és számítógépes szimulációs eredményekről, amelyek saját munkája motivációjául szolgáltak, majd összefoglalja a szakterület nyitott kérdéseit és megfogalmazza az adott területen végzett saját kutatómunkája célkitűzéseit. A szakirodalmi háttér ismertetése közben felhívja a figyelmet arra is, hogy a meglévő kísérleti és elméleti vizsgálatok jelentős része gömb alakú részecskékre korlátozódik, ugyanakkor számos jele van annak, hogy anizometrikus részecskealakok esetén a folyási jelenségek komplexebbé válnak. A problémafelvetés kapcsán kitér arra is, hogy a saját kutatásaiban csoportjának mely tagjai voltak segítségére. Az áttekintő fejezet végén külön alfejezetben foglalta össze a kutatásaiban használt legfontosabb kísérleti módszereket és az adatfeldolgozás során alkalmazott eljárásokat.

Az irodalmi áttekintés nagyon jól előkészíti a jelölt saját eredményeinek bemutatását, amelyeket négy nagyobb fejezetre bontva tárgyal a vizsgált jelenségeknek megfelelően. Az egyes fejezetek elején röviden összefoglalja, hogy milyen jelenségek elemzésével, mely kérdésekre keresi a választ. A saját eredmények ismertetése nagyon szépen, didaktikusan van felépítve a dolgozatban. A jelölt viszonylag kisszámú egyenlettel, a nem szakember számára is kifejezetten érthetően, élvezetesen fogalmazza meg a legfontosabb eredményeit. A fejezetek végén, és azon belül is a nagyobb alfejezetek zárásaként, röviden kiemeli az igazán újszerű felismeréseit és megmutatja, hogy ezek mely publikációk alapjául szolgáltak.

A dolgozat végén található *Összefoglalás* című fejezet annyiban talán nem szokványos, hogy egy rövidebb felvezetéstől eltekintve az új tudományos eredmények tézispontok formájában történő megfogalmazására korlátozódik.

A dolgozat általános felépítése jól áttekinthető, egyértelműen elkülönül benne a jelölt munkásságának bemutatása, könnyen azonosíthatók a jelölt saját eredményei. A dolgozat megfogalmazása lényegre törő, világos, dicséretesen kevés benne az elírás. A szöveges kifejtést nagyon szép grafikus illusztrációk egészítik ki, az ábrák nagyon jól kidolgozottak, informatívak és mindig alátámasztják a szerző következtetéseit.

A dolgozat 169 referenciára támaszkodik, amelyek között számos szakkönyv, monográfia is szerepel. A dolgozat alapjául szolgáló, valamint a saját, de a dolgozat témájához szorosan nem kapcsolódó publikációk elkülönítve kaptak helyet.

#### Megjegyzések, a dolgozat szerkesztésével kapcsolatban

1. A dolgozat szerkesztése gondosan történt, a szövegben nagyon kevés az elírás, amelyeket megtaláltam, segítségként a bíráló végén kigyűjtöttem. A szerző gondot fordított a magyar szakkifejezések használatára is.
2. A referenciák formátuma néhány apróságtól eltekintve egységes (néhány esetben a folyóirat teljes névvel és nem rövidítéssel szerepel, illetve néha a kötet betűjele és sorszáma vesszővel van elválasztva, míg többnyire nem).
3. Az ábrák nagyon jól kidolgozottak, informatívak, de néhány esetben előfordul, hogy egy mennyiség jelölése a szövegben és az ábrán nem egyezik meg.
4. Hasznosnak tartottam volna, ha az *Összefoglalás* fejezetben nagyobb teret fordít arra, hogy elhelyezze eredményeit a szakirodalomban: röviden bemutassa, hogy a jelölt maga, illetve mások a szakterületen hogyan folytatták a kutatásokat, gondolták tovább az eredményeket. Érdeemes lett volna egy kitekintést adni arról, milyen jövőbeni tervei, lehetőségei vannak a munka folytatásának.

#### **A jelölt kutatómunkája**

A jelölt kutatómunkája tisztán kísérleti jellegű. A dolgozatban bemutatott doktori munkásság nagyon fontos eleme, hogy a jelölt a szemcsés folyás jelenségeinek vizsgálatához szükséges laboratóriumi összeállításokat maga tervezte és építette. Ennek megfelelően az eredményeket tárgyaló fejezetek elején vázolja a kísérleti elrendezéseket és bemutatja azokat a kulcsfontosságú eszközöket (gyorskamera, CT és MRI berendezések), amelyekkel páratlan részletességű betekintést nyert a szemcsés anyagok folyási jelenségeibe. Kísérleteit több különböző anyagból készült gömb, elnyúlt, valamint szabálytalan alakú szemcsékkel is megismételte, szisztematikusan feltárva az anyagi és alakjellemzők szerepét a vizsgált jelenségek létrejöttében.

A lejtőn történő folyás esetén meghatározta a szemcsés anyagok folyási törvényének paramétereit és megállapította azok kapcsolatát az anyag rézsűszögével. Nagyobb sebességű folyásnál feltárta az áramlási tér szerkezetét és kimérte az effektív belső súrlódási együtthatónak az inerciális számtól való függését.

Nagy pontosságú méréseinek köszönhetően részletes jellemzését adta a szemcsés anyag felületén haladó lavinák térbeli és időbeli fejlődésének, amelyeket kontinuum számításokkal is össze tudott vetni.

Lassan terhelt szemcsés anyagok esetén meghatározta a nyírási zónák alakját és elemezte belső szerkezetüket, valamint ezen jellemzők változását a szemcsék elnyúltságának növelésével. Megmutatta, hogy rétegzett anyagokban a nyírási zóna megtörik. Különböző geometriájú rendszerekben megmérve a törési szög értékét kvantitatív megerősítést adta korábbi elméleti jóslatoknak.

Megmutatta, hogy anizometrikus, elnyújtott alakú szemcsék rendszerében a nyírási zóna kialakulását a szemcsék orientációs rendeződése kíséri. A szemcsék átlagos orientációjáról kimutatta, hogy az nem esik egybe a folyásiránnyal, hanem a szemcsék alakjától függő szöget zár be vele. Azt találta, hogy sem a rendeződés mértéke, sem az átlagos orientáció nem függ a nyírási rátától, viszont a szemcsék elnyúltságának növelésével az előző nő, míg az utóbbi csökken.

Nyújtott szemcsékből álló anyagot osztott aljú hengeres elrendezésben nyírva kimutatta egy úgynevezett másodlagos konvekció létrejöttét, ami merőleges a nyírás irányára. Részletes mérésekkel feltárta az áramlási tér szerkezetét és meggyőzően alátámasztotta, hogy a megfigyelt jelenség nem tranzienst, hanem a szemcsék elnyúltságának következménye.

Silóban ereszkedő szemcsés anyagok esetén az áramlási tér elemzésével megmutatta, hogy minél elnyúltabbak a szemcsék az áramlás annál inkább a siló közepére koncentrálódnak. Megállapította, hogy az elnyúltság növekedésével a sebesség fluktuációk nőnek, aminek az a meglepő következménye, hogy elnyúlt szemcsék esetén nagyobb a siló bedugulásának esélye.

A dolgozat végén a siló zene eredetének tisztázásához megmutatta, hogy egy hengeres cső kiürülésekor sűrűség hullámok jönnek létre, amelyek felfelé haladnak úgy, hogy a cső alján nagyobb a hullámsebesség, mint fentebb. Ennek eredményeként a fal-szemcse kölcsönhatást a cső felső részén már a stick-slip mechanizmus dominálja, ami fontos szerepet játszik a siló zenét eredményező rezgések létrejöttében.

Kísérleti eredményeit, ahol csak lehetett, igyekezett összevetni a szakirodalomban található elméleti eredményekkel, amelyeket diszkrét elem szimulációkkal, vagy kontinuum modellek numerikus megoldásával kaptak. A jelölt munkájának jelentőségét jól mutatja, hogy mérései több esetben megerősítettek elméleti jóslatokat, tisztázták modellfeltevések helyességeit, vagy éppen kihívások elé állítják a szemcsés anyagok elméleti leírásával foglalkozó kutatócsoportokat.

Összességében a dolgozat didaktikusan felépítve, jól megvilágítja a tézispontokban tömören összefoglalt kutatási eredmények háttérét. A tézispontokban megfogalmazott eredmények 18 publikációra épülnek, amelyek közül három a Physical Review Letters-ben jelent meg, de a többi publikáció is D1 vagy Q1 minősítésű folyóiratban került közzésre. Ezek a publikációk mindenképpen azt jelzik, hogy a szerző jelentős eredményeket ért el, amelyek, a hivatkozásaik alapján, komoly nemzetközi visszhangot váltottak ki. A publikációk néhány szerzősek, a jelölt 12 cikkben szerepel az első helyen, máshol pedig második, vagy utolsó a szerzői listán. Az egyes tézispontok megfogalmazásában az egyes szám első személy használatával is kiemeli domináns szerepét. A téziszűzetben lényegretörően foglalta össze munkája motivációit és

célkitűzéseit, majd 4 fő tézispontban összegezte a legfontosabb eredményeit. Az utolsó, 4(b) pont kivételével, a tézispontok több publikációra épülnek.

A jelöltnek a következő kérdéseket szeretném feltenni:

1. Méréseivel nagyon szépen igazolta, hogy eltérő sűrűlési együtthatójú komponensekből álló, rétegzett szemcsés rendszer deformációjakor a kialakuló nyírási zóna megtörik. A mérések és az elméleti számolások egyezése azt mutatja, hogy ez egy robusztus viselkedés rétegzett rendszereknek. Megfigyelhető-e a nyírási zóna megtörése a természetben például réteges szerkezetű talajban, vagy ott a szemcsék közötti kohézív kölcsönhatás ezt meggátolja?
2. Kísérleteiben több különböző anyagból készült szemcséket használt, közöttük száraz magvakat is. Maximálisan mekkora erők léphetnek fel a szemcsék kontaktusainál? Előfordulhat-e, hogy egy szemcse maradandó alakváltozást szenved, illetve a magvak olaj tartalma miatt, nagyobb deformáció esetén létrejöhet-e tapadás a szemcsék között?
3. A 2.8(b) ábrán nem világos, hogy mi az ábrázolt 4 adathalmaz paramétere, miben térnek el az egyes adathalmazok? Mennyi az illesztett exponens értéke a 2.8(d) ábrán?
4. Van valamilyen kvalitatív magyarázat arra, hogy a stacionárius nyírási zóna szélessége a mintán belül egy negyedkörrel jól közelíthető? (A 2.10 ábra aláírása félkört említ.)
5. A többkomponensű rendszerekben a nyírási zóna megtörésének vizsgálatakor bizonyos feltételek mellett a zóna felhasad. Említi, hogy ez a felhasadás megfigyelhető a 4.19(c) ábrán, de ez nem igazán látszik. A színkód segítségével hogyan kellene észrevenni itt a felhasadást?
6. Az 5.2(a) és 5.2(b) ábrákon az elnyújtott alakú szemcsék orientációs szögének  $p(\phi)$  eloszlása látható a nyírási zónában az  $L/d$  alakparaméter több értékénél. Az ábrák nagyon szépen bemutatják, hogy az  $L/d$  elnyúltság növekedésével a Gauss eloszlások egyre keskenyebbek lesznek, amit a dolgozat szövegében is említ. A későbbiekben részletesen bemutatja, hogy az orientációs szög átlaga hogyan függ  $L/d$ -től. Vizsgálta-e, hogy a  $\phi$  orientációs szög szórása milyen alakú függvénye  $L/d$ -nek?
7. Az 5.7(b) ábrán bemutatott elemzéshez a stacionárius értékükkel normált forgatónyomaték görbékből levonta a gömbalakú szemcsékkel rendelkező mustármagra kapott, hasonlóan normált görbét. Nem lehetett volna-e ezt az elemzést elvégezni egyszerűen úgy, hogy a stacionárius értékükkel normált forgatónyomaték görbékből levonja az 1 értéket? Az 5.7(b) ábra azt bizonyítja, hogy a  $\gamma$  deformáció növelésével a forgatónyomaték stacionárius értéktől mért eltérése a  $\gamma$  exponenciális függvényeként tart nullához. Ez a viselkedés a fenti módon is kimutatható és talán a

pontok szórása az egyenesek körül, azaz az illesztések hibája kisebb lehetne. Ennél a pontnál érdemes lett volna az elemzés paramétereit egy formulával megvilágítani.

8. A másodlagos konvekció elemzésénél az 5.11 ábrán bemutatja a nyírásnak kitett szemcsés anyag felületének maximális, minimális, és átlagos értékét a deformáció függvényeként. Itt minden mennyiséget a kezdeti töltési magassághoz viszonyít? Ez az oka annak, hogy a minimális magasság negatív?
9. A 6.2 ábra egy kvázi-kétdimenziós tartályból kifolyó szemcsés anyag áramlási terének elemzését mutatja be. Az illesztéshez használt (6.1) függvény paramétereit a 6.2(b) és (c) ábrák illusztrálják a magasság függvényeként az elnyúltsági paraméter több értékénél. Látható, hogy mind a mozgó tartomány szélessége, mind a profil alakját jellemző exponens értéke nagy magasságokban konstanshoz tartanak. Meghatározta-e, hogy ezek az aszimptotikus paraméter értékek hogyan függenek a kifolyónyílás kiterjedésétől rögzített nyílásszög és szemcsealak esetén?
10. A 6.3(f) ábrán erősen elnyújtott szemcsealak esetén erős sebesség fluktuációkat tapasztal. Ha rögzített  $L/d$  szemcsealak mellett megnöveli a kifolyónyílás méretét, le lehetne-e csökkenteni a fluktuációkat, tudna-e a 6.3(e)-hez hasonló profilokat kapni?

Összefoglalva, a dolgozat egy magas színvonalú, gazdag kutatói munkásságot mutat be. A jelölt a szemcsés anyagok fizikájának ismert, a nemzetközi közösség által elismert kutatója, akinek ezen a több évtizede művelt, érett szakterületen is sikerült jelentős érdeklődést kiváltó eredményeket elérnie. Vizsgálatai során több olyan kérdésre kereste a választ, amelyekre a szakirodalomban az elmúlt évtizedek során olykor ellentmondásos eredmények születtek. Kísérleteivel egyedülálló részletességgel tudta tanulmányozni szemcsés anyagok folyási jelenségeit, tisztázta az anizometrikus részecske-alak hatását a folyás dinamika jellemzőire és az áramlási tér szerkezetére. Eredményeivel jelentősen kiterjesztette a szemcsés folyásról alkotott képünket és kísérleti megerősítést adta elméleti jóslatoknak. A publikációs impakt faktora és idézettsége alapján az eredményei komoly nemzetközi visszhangot váltottak ki. A tézispontok tömören, lényegretörően fogalmazzák meg a szerző eredményeit, amelyet a dolgozat részletesebb kifejtése, valamint a megadott 18 közlemény megfelelően alátámaszt.

A fentiek alapján a doktori munka tudományos eredményeit elegendőnek tartom az MTA doktori cím megszerzéséhez és a nyilvános védés kitűzését javaslom.

Debrecen, 2020. május 21.



Dr. Kun Ferenc  
egyetemi tanár

## A lényegét nem érintő, kisebb elírások

- 10.oldal: az ábra és a szöveg jelölése nem egyezik meg ( $h_s \rightarrow h_{stop}$ )
- 17.oldal, felülről második sor: „illusztrációként”
- 32.oldal, felülről a második sor: „ellipszisekkel”
- 87. oldal második bekezdés eleje: „Az nyírási”. Szintén ebben a mondatban „irány szerint”-> „irány szerinti”.
- 112. oldal, ábra fölötti 3. sor: „ábázoltuk”
- 113. oldal, legalsó sor: „a egyszerű”
- 114. oldal: az ábra aláírásában a 6.7-es ábrára hivatkozik 6.6(a) helyett
- 117. oldal, felülről 6. sor: „gerjeszik”
- 118. oldal, első sor: „készítetett”