

SZEGREGÁCIÓ NYÍRT, SZEMCSÉS KEVERÉKEKBEN

Gillemot Katalin, Somfai Ellák, Börzsönyi Tamás
MTA Wigner FK, Szilárdtest-fizikai és Optikai Intézet

A szemcsés anyagok szegregációs jelenségei a mindennapi életben is könnyen megfigyelhetők [1–4]. A müzlisdobozt rázogatóva a felszínre ügyeskedhetjük a kedvenc falatokat, vagy a sóderdombok alsó peremén láthatjuk a nagyobb kavicsok felhalmozódását. Az élelmiszeripari, gyógyszergyártási folyamatokban nagyon fontos, hogy az anyagok öntése, keverése során ne váljanak szét az alkotóelemek, azaz minden do-

bozba, tablettába mindegyik komponensből a megfelelő mennyiség kerüljön. Más esetekben épp a keverékek szétválasztása a feladat, amit sokkal gyorsabban érhetünk el, ha jól ismerjük az anyagban rázás vagy folyás során lejátszódó szegregációs folyamatokat. Ebben a munkában a lassú nyíró áramlás közben megfigyelhető szegregációs jelenségeket írjuk le.

Ha egy szemcsés anyagot (például a kristálycukrot a zacskóban) nyírásnak tesszük ki, akkor az anyag térfogata kicsit növekszik, amit Reynolds-tágulásnak nevezünk. Ezt szemléletesen úgy képzelhetjük el, hogy a deformáció során az egymás mellett lévő szemcsék akkor tudnak túljutni a szomszédon, ha kicsit eltávolodnak egymástól (*1.a ábra*). Az úgynevezett hengeres, osztott aljú, nyíró cellában (*1.b ábra*) a szemcsés réteg alatt egy tányér van, amelynek forgatásával az anyag – egy bizonyos tartományban – folyamatosan deformálódik, ez a pirossal/sötéttel jelölt nyírási zóna. Egy röntgentomográfias felvétel (*1.c ábra*) segítségével láthatóvá tehetjük a térkitöltés csökkenésének mértékét, ami 10% körülnek adódik [5].

A cikk az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szegedi Vándorgyűlésén, 2016. augusztus 26-án elhangzott előadás alapján készült.



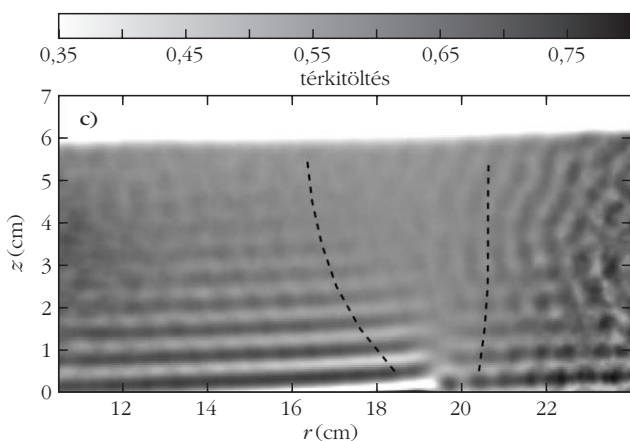
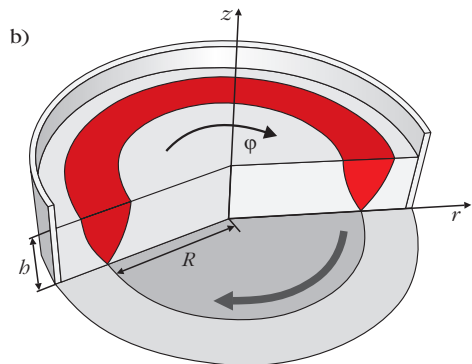
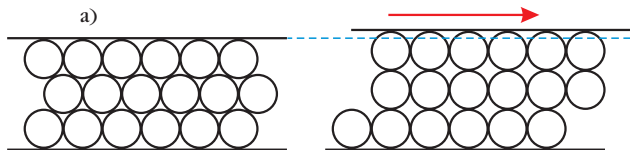
Gillemot Katalin mérnök-fizikus, poszt-doktori kutató. Diplomáját a BME-n, PhD fokozatát a Lancasteri Egyetemen szerezte. 2014 és 2016 között az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpontban MTA poszt-doktor, jelenleg a Bécsei Egyetemen poszt-doktori kutató. Érdeklődési területe a szemcsés anyagok folyási jelenségeinek numerikus vizsgálata, valamint ezek geológiai applikációja.



Somfai Ellák fizikus, az MTA doktora, tudományos tanácsadó. Diplomáját az ELTE-n, PhD fokozatát a University of Michiganen szerezte. 2013 óta dolgozik az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpontban. Érdeklődési területe a statisztikus fizikai rendszerek és komplex folyadékok numerikus modellezése, az utóbbi időben elsősorban a szemcsés anyagok vizsgálatával foglalkozik.

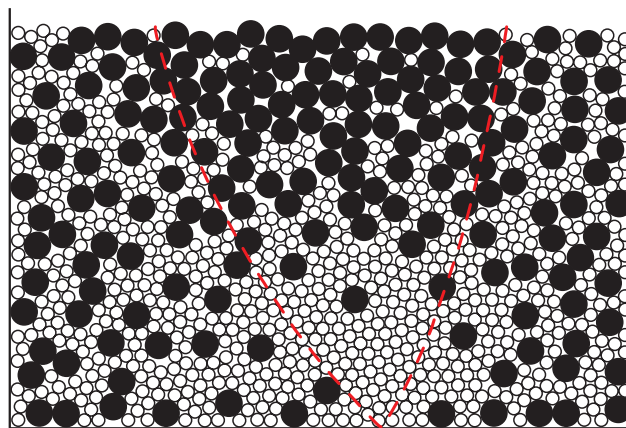
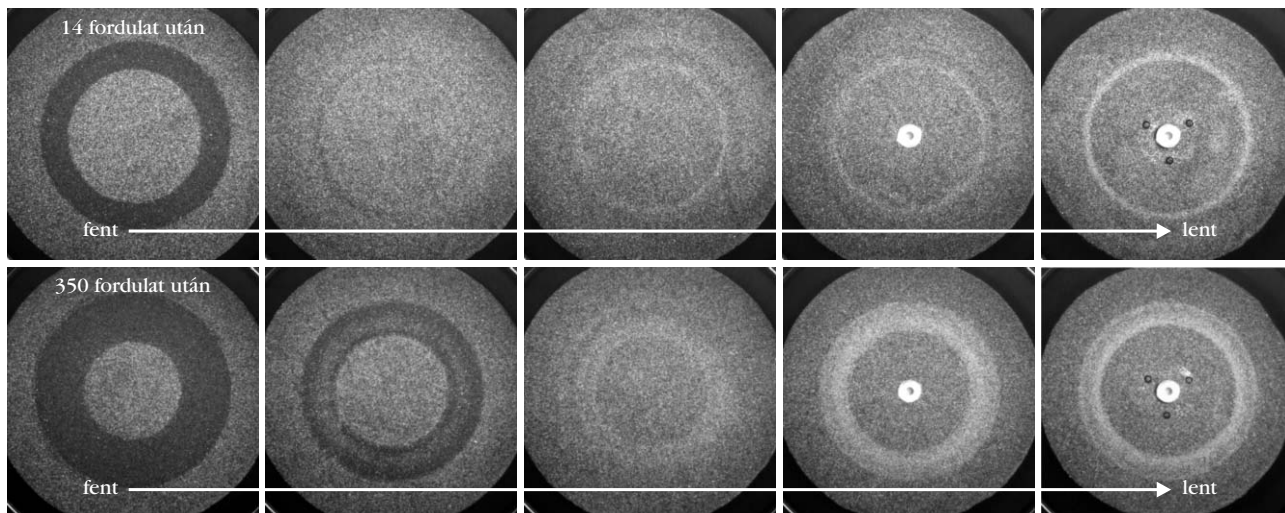


Börzsönyi Tamás fizikus, tanulmányait (diploma, PhD) az ELTE-n végezte. Jelenleg az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos főmunkatársa, a Részben Rendezett Rendszerek kutatócsoport vezetője. Kutatásaiban a szemcsés anyagok és a komplex folyadékok (szuszpenziók, folyadékkristályok) folyási jelenségeit és fázisátmeneteit vizsgálja.



1. *ábra.* a) Szemcsés anyag deformációjakor megfigyelhető Reynolds-tágulás. b) Hengeres, osztott aljú, nyíró cella, amelyben a szemcsés anyag az úgynevezett nyírási zónában (pirossal/sötéttel jelölve) folyamatosan deformálódik a minta alá helyezett tányér forgatása következtében. c) A minta térkitöltésének radiális eloszlása száraz borszszemek esetén [5]. A nyírási zónában körülbelül 10%-os sűrűségcsökkenés figyelhető meg.

3. *ábra.* Szegregáció homok-üveggolyó keverékben. Felülnézeti képek a kísérlet végén elvégzett rétegenkénti feltárásról. A hengeres cellában a minta alatti tányér lassú forgatása következtében a nyírási zóna felszínén felhalmozódik a sötétebb színű homok, míg az üveggolyók a minta aljára vándorolnak. A henger átmérője 27 cm, a minta vastagsága 2 cm (50 részecskeátmérőnyi) volt.



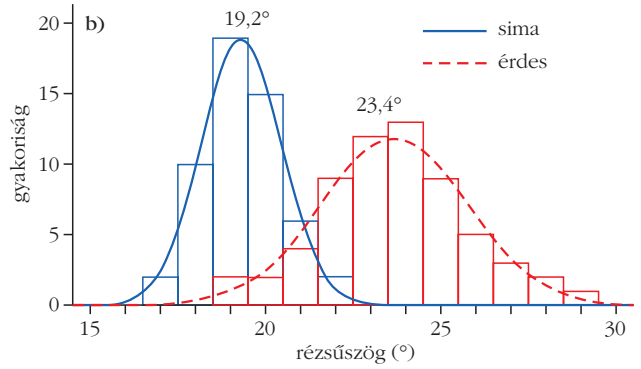
2. *ábra.* Egy kétkomponensű keverékben, amelyben a részecskék csak a méretükben különböznek, a nyírási zónában a kisebb részecskék a minta aljára vándorolnak, míg a nagyobbak a felszínen halmozódnak fel. Hasonló szétválás figyelhető meg azonos méretű, de különböző súlyú részecskék esetén, ekkor a nehezebb komponens dúsul fel a minta alján.

Képzeld el, hogy a mintánk egy olyan keverék, ami kétféle méretű szemcséből áll! A nyírás folyamata során a folyamatosan átrendeződő szerkezetben az itt ott megnyíló kicsi üres tartományokba fölülről könnyebben esik bele egy kisebb szemcse, mint egy nagyobb. Így a kisebb méretű szemcsék a réteg aljára vándorolnak, a nagyobbak pedig szép lassan a felszínre kerülnek, ahogy azt a 2. *ábra* szemlélteti. Hasonló jelenség figyelhető meg egy olyan keverékben, ahol a szemcsék mérete azonos, de a súlyuk különböző (például acél- és üveggolyók). A deformáció során a nehezebb részecskék a minta alján halmozódnak fel.

De mi történik akkor, ha a szemcséknek mind a súlyuk, mind a térfogatuk hasonló, és csupán alakjukban, vagy felületi érdességükben különböznek? Ezt kipróbálhatjuk, ha azonos méretű piciny üveggolyók és kvarchomok keverékét vizsgáljuk. Az eredményt a 3. *ábra* mutatja, ahol a sötétre színezett homok és a világos üveggolyók alkotta minta 5 rétege látható 2



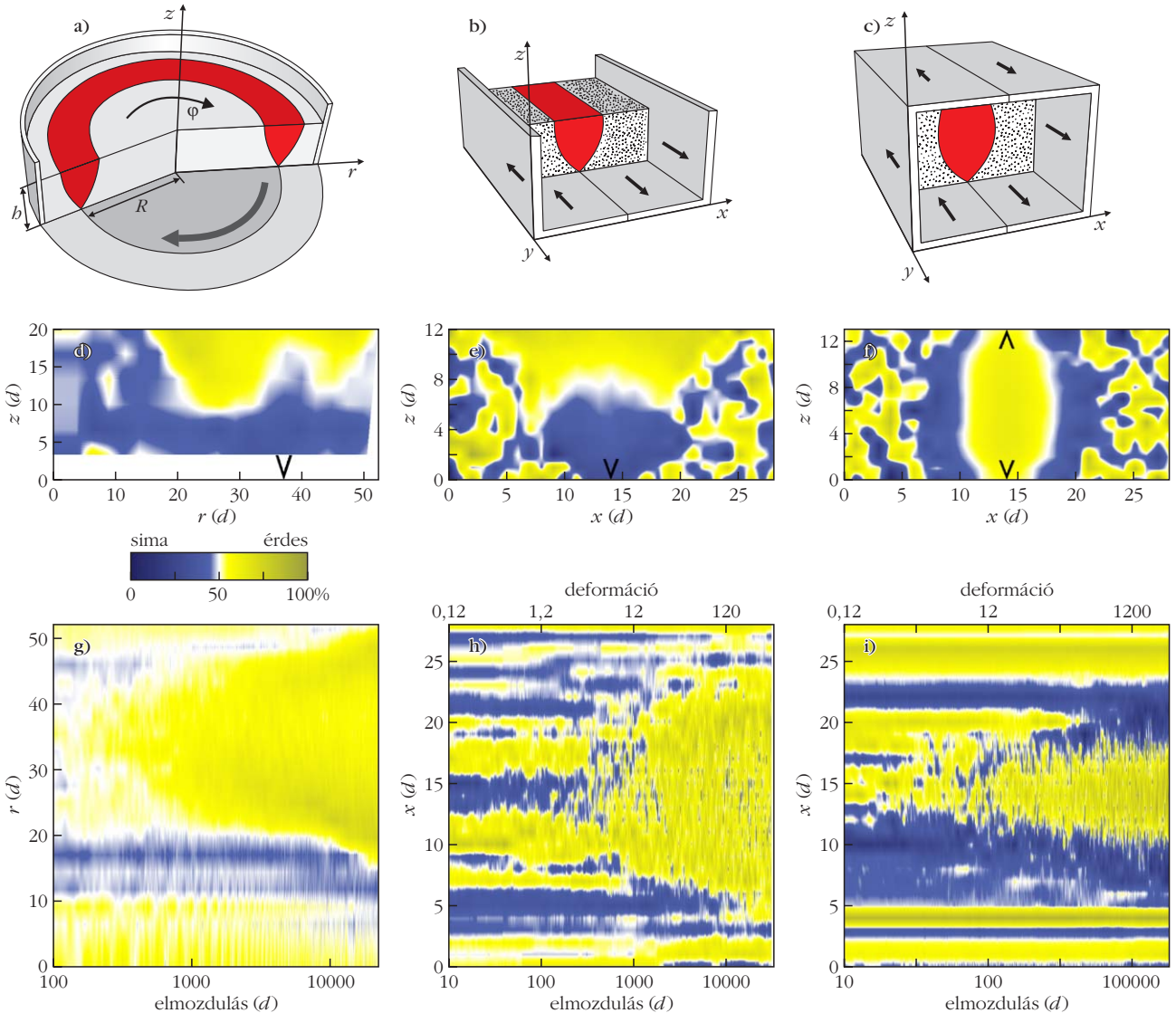
4. ábra. a) A kísérletekben használt műanyag (airsoft) golyók érdesítés előtt és után. b) Az érdes és a sima golyókból képzett „homokdomb” felületén mérhető rézsűszögek eloszlási görbéi. A két komponensre az átlagos rézsűszög $23,4^\circ$, illetve $19,2^\circ$ -nak adódik.



olyan kísérlet végén, amelyekben a forgótányér 14, illetve 350 fordulatot tett meg. A felszíni rétegben feldúsult a homok, míg az üveggolyók a minta aljára vándoroltak. A folyamat látványosan előrehaladottabb a hosszabb kísérlet végén.

Vajon a részecskék alakbeli különbsége elengedhetetlen ebben a folyamatban, vagy elég lenne egy kicsi különbség a mikroszkopikus felületi érdességben, hogy hasonló eredményre jussunk? A következőkben bemutatandó kísérleteink és numerikus szimulációink

5. ábra. a) A kísérleti rendszer, b) a gravitációs esetben vizsgált numerikus rendszer és c) gravitációmentes numerikus rendszer vázlatos rajzai. A nyírási zónát mindenhol piros színnel jelöltük. d)–f) A mintákban nyírás után kialakult összetétel keresztmetszeti képei, illetve g)–i) a felszíni (a harmadik esetben a középvonal) összetétel változása a folyamat során. Látható, hogy gravitáció jelenlétében a simább felületű részecskék a minta aljára vándorolnak, míg a gravitációmentes esetben elhagyják az intenzívebb ütközésekkel jellemzett nyírási zónát.



mulációink segítségével [6] erre a kérdésre keressük a választ.

Ahhoz, hogy a kétféle részecske között csak a felületi érdességben legyen különbség, de a részecskék mérete, tömege és alakja a lehető legjobban megegyezzen, műanyag (airsoft) golyókat választottunk, és a minta felének felületét érdessé tettük. Ez oly módon történt, hogy a golyókat két, durva csiszolóvászonnal bevont, kemény felület közé helyeztük, és e felületeket – megfelelő nyomás mellett – egymáshoz képest mozgattuk. Így a golyó gördült rajtuk, és a csiszolóvászonnal krátereket nyomott a felületére. Ezután az érdes részecskéket alkoholos filctollba való utántöltő festékkel befestettük, hogy jól látható legyen, ha a kísérletekben a nyírás hatására az egyik komponens valahol feldúsul. Az eredeti és az érdesített golyókról készült felvételeket a 4.a ábrán láthatjuk.

A szemcsés anyagok belső sűrűdését az úgynevezett effektív sűrűdési együtthatóval jellemezzük. Két szomszédos, szemcsés réteg akkor nem csúszik egymáson tovább, amikor a sűrűdési erő – ami a nyomás és az effektív sűrűdési együttható szorzata – nagyobbá válik a nyírófeszültségnél. Egy homokdomb felszínén lévő legfelső réteg esetében ez azt jelenti, hogy amikor a felszíni folyás épp megáll, akkor a felszín meredekségét jellemző θ rézsűszöget a $\tan\theta = \mu_{\text{eff}}$ reláció írja le. Vagyis a rézsűszög mérésével meghatározhatjuk az effektív sűrűdési együtthatót.

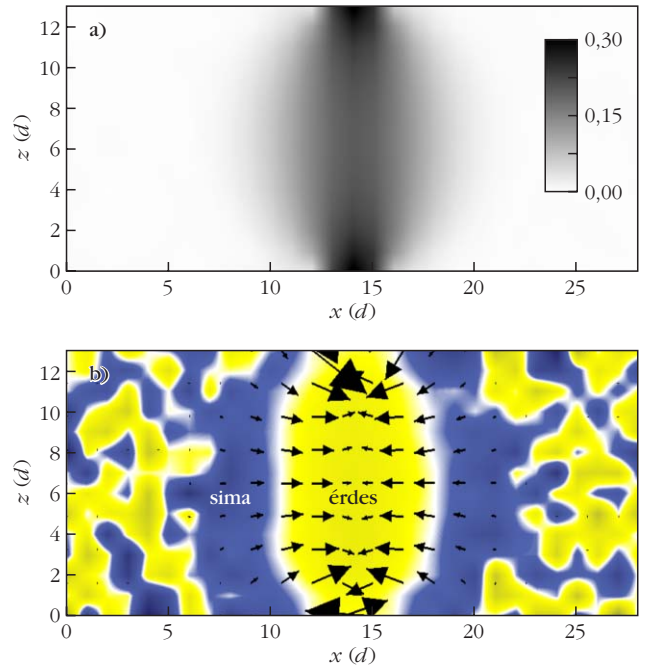
A részecskéket fentről homokóraszerűen csorgatva dombot képeztünk és a felszíni folyások megálltakor megmértük a rézsűszöget, amelyek eloszlása a durva és a sima felületű részecskékre a 4.b ábrán látható. Leolvasható, hogy az effektív sűrűdési együttható az érdesítés hatására a következőképpen változott:

$$\mu_{\text{eff}}^{\text{sima}} = \tan 19,2^\circ = 0,348, \text{ míg}$$

$$\mu_{\text{eff}}^{\text{édes}} = \tan 23,4^\circ = 0,433.$$

Ezek után a részecskéket összekeverve a fent ismertetett hengeres, osztott aljú, nyíró cellába helyezve, a tányér körülbelül 200 körbefordításával elvégeztük a kísérletet, majd fölülről indulva, a mintát rétegről rétegre feltárva fényképeket készítettünk a vízszintes metszetekről, amelyeket elemezve meghatároztuk a részecskék eloszlását a minta belsejében, és ezt az 5.d ábrán ábrázoltuk. Megfigyelhető, hogy az érdes részecskék a felszínre vándoroltak, míg a sima részecskék a minta alján halmozódtak fel. Az 5.g ábra mutatja a felszíni összetétel változását, ahol a nyírás előrehaladtát a forgó tányér peremének részecskeátmérő-egységeken (d) mért elmozdulásával mértük.

Numerikus szimulációt végeztünk a LIGGGHTS nevű, diszkrét elem-módszert alkalmazó szoftvercsomaggal. A numerikus elrendezés az 5.b ábrán látható, méretei (x, y, z) $28 \times 13 \times 12$ részecskeátmérőnyiek, és y irányban a rendszer periodikus. A részecskék közötti mikroszkopikus sűrűdési együtthatókat $\mu^{\text{éé}} = 0,6$, $\mu^{\text{ss}} = 0,4$ és $\mu^{\text{és}} = 0,5$ értékűnek választottuk (itt e = érdes és s = sima). A numerikus rendszert a két L alakú határolófal egymáshoz képesti elmozdításával a



6. ábra. a) A nyírási ráta keresztmetszeti eloszlása a gravitáció nélküli esetben, illetve b) a nyírás hatására kialakult összetétel keresztmetszeti képe a nyírási ráta gradiensét jellemző vektormezővel együtt. A simább felületű részecskék hatékonyabban hagyják el a nyírási zónát az ütközések következtében, vagyis a nyírási ráta gradiense ellenében mozognak.

kísérletihez hasonló mértékben deformáltuk. A felszíni összetétel időfejlődése az 5.b, míg a végállapot keresztmetszeti képe a 5.e ábrán látható.

A numerikus vizsgálat eredménye a kísérleti rendszerhez hasonlóan azt mutatja, hogy a deformáció következtében a sima felületű részecskék a nyírási zóna alján, míg az érdes felületűek a minta felszínén halmozódnak fel. Ez úgy történik, hogy a deformáció során a szerkezeti átrendeződések következtében megnyíló résekbe a simább részecskék nagyobb valószínűséggel csúsznak bele, így a mintában a gravitáció irányába migrálnak. A folyamat végére kialakuló 70%–30% arányú felszíni összetétel hasonló a kísérletekben és a numerikus szimulációkban.

A számítógépes szimulációkban lehetőség van a gravitációs erő kikapcsolására. Ez azért érdekes, mert egy elég nagy nyomás alá helyezett rendszerben, ahol a részecskék súlya kicsi a külső nyomóerőből származó kontakterőkhöz képest, a gravitációs effektusok földi körülmények között sem játszanak szerepet. Ezt a vizsgálatot az 5.c ábrán látható elrendezésben végeztük. A végállapotú képen (5.f ábra), és a rendszer középvonalában mérhető összetétel folyamatos változásán (5.i ábra) látható, hogy ha lényegesen (körülbelül $10\times$) lassabban is, de a gravitációs esethez hasonló mértékű szegregáció történik. A 6.a ábra a nyírási ráta keresztmetszeti eloszlását mutatja, ami a részecskék közötti ütközések gyakoriságát jellemzi. Látható, hogy a legintenzívebb tartomány a nyírási zóna közepén húzódik. A 6.b ábrán a keresztmetszeti eloszlásra rávetítettük a nyírási ráta gradiensét jellemző vektormezőt. Szépen látszik, hogy a sima részecs-

kék nagyobb valószínűséggel hagyják el az intenzív ütközésekkel jellemezhető tartományt, azaz a nyírási ráta gradienseinek ellenében mozognak. Tehát a folyamat során a sima részecskék a nyírási zónán kívül, míg az érdes részecskék a nyírási zónában halmozódnak fel, ami azt jelenti, hogy a nyírt tartományban megnövekszik a rendszer belső súrlódása, azaz a nyírással szembeni ellenállása.

Összefoglalva, kísérleti és numerikus vizsgálataink is azt mutatták, hogy egy kétkomponensű szemcsés keverékben, amelyben csak a szemcsék felületi érdessége a különböző (szemcseméret, alak és tömeg azonos), nyírás hatására a simább felületű részecskék a minta alján halmozódnak fel, mivel ezek könnyebben tudnak belecsúszni a deformáció során itt-ott megjelenő szemcsék közötti résekbe. Ha a numerikus szimulációban a gravitációt kikapcsoljuk, a szegregáció, ha

lassabban is, de továbbra is megfigyelhető. Ebben az esetben a simább felületű részecskék nagyobb valószínűséggel hagyják el az intenzív ütközésekkel jellemezhető nyírási zónát, így amellet halmozódnak fel.

Irodalom

1. Jánosi I.: Zajongó homokdombok és egyéb furcsaságok: új fejlemények a granuláris anyagok fizikájában. *Fizikai Szemle* 45 (1995) 78.
2. Jánosi I.: A homok titkai. *Természet Világa* 129 (1998) 19.
3. Vankó P.: Izgalmas mérések a mérnök-fizikus hallgatói laboratóriumban. *Fizikai Szemle* 56 (2006) 307.
4. Börzsönyi T.: Lejtőn lefolyó szemcsés anyag dinamikája: instabilitások, lavinák. *Fizikai Szemle* 57 (2007) 217.
5. S. Wegner, R. Stannarius, A. Böse, G. Rose, B. Szabó, E. Somfai, T. Börzsönyi: Effects of grain shape on packing and dilatancy of sheared granular materials. *Soft Matter* 10 (2014) 5157.
6. K. A. Gillemot, E. Somfai, T. Börzsönyi: Shear-driven segregation of dry granular materials with different friction coefficients. *Soft Matter* 13 (2017) 415.