

Strukturna karakterizacija dvodimenzionalnih granularnih sistema u uslovima izmenjene efektivne gravitacije

U ovom radu ispitivana je struktura pakovanja dvodimenzionalnog granularnog materijala u uslovima izmenjene efektivne gravitacije. Naš granularni materijal predstavljale su plastične kuglice prečnika 5.8 mm. One su ispuštane u posebno dizajniranu dvodimenzionalnu posudu koja je bila ispunjena fluidima različitih gustina čime su postignuti uslovi redukovane gravitacije. Nakon svakog formiranog pakovanja, koje je činio veliki broj kuglica, ona su fotografisana, a obradom fotografija uz pomoć Voronijeve teselacije vršena je strukturna analiza dobijenih pakovanja. Na osnovu dobijenih rezultata zaključili smo da su pakovanja koja su dobijena u uslovima redukovane gravitacije dosta manje uređena u odnosu na pakovanja dobijena u vazduhu.

Uvod

Mereno u tonama, materijal kojim čovek najviše manipuliše je voda. Drugo mesto zauzimaju granularni materijali. Rad sa granularnim materijalima u građevinskoj industriji je neizbežan. Većina proizvoda hemijske, prehrambene ili kozmetične industrije u nekoj fazi ima oblik granularnog materijala. Kroz proizvodni sektor u SAD prođe preko milijardu kilograma lekova, hrane i hemikalija u formi granula (Cleef 1991). Ponašanje zrnastih materijala je takođe važno i za razumevanje geoloških procesa, za predviđanje odrona ili lavina, ali i za vojnu industriju. Sve ovo ukazuje na veliku važnost granularnih materijala za čoveka, ali i pored toga naše razumevanje ponašanja ovakvih sistema je nepotpuno i nema jedinstvene teorije koja ih u potpunosti opisuje.

Pod granularnim materijalom podrazumevamo skup velikog broja makroskopskih objekata prečnika većeg od $1\text{ }\mu\text{m}$. Granule su obično okružene fluidom koji može uticati na dinamiku sistema. Granularne materijale jedinstvenim čine dve odlike: prilikom svake interakcije između granula dolazi do disipacije njihove kinetičke energije u toplotnu zbog

Marija Petrović (1994), Požega, Miloša Obilića 12, učenica 3. razreda Gimnazije „Sveti Sava” u Požegi

Ognjen Stanisavljević (1995), Požega, Učitelja Pavla Stojića 4, učenik 2. razreda Gimnazije „Sveti Sava” u Požegi

MENTORI:

Dr Slobodan Vrhovac, Institut za fiziku, Beograd

Branimir Acković, Institut za fiziku, Beograd

postojanja statičkog trenja i neelastičnosti sudara i spoljna temperatura ne utiče na svojstva sistema. Zbog ovih odlika granularne materijale ne možemo svrstati ni u kategoriju čvrstih tela, ni u kategoriju fluida.

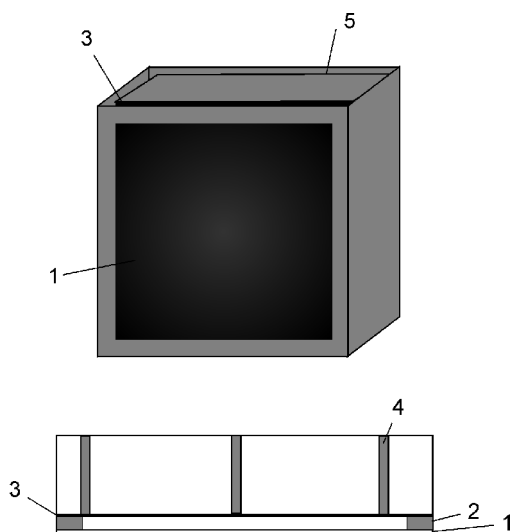
Danas, u dobu intenzivnih svemirskih istraživanja, sve više pažnje se posvećuje razumevanju osobina granularnih sistema u uslovima redukovane gravitacije. U ovom radu proučavana je struktura dvodimenzionalnih pakovanja granularnog materijala u uslovima redukovane gravitacije. Uslovi redukovane efektivne gravitacije postizani su formiranjem pakovanja u fluidima različitih gustina. Eksperimentalno je proučavana uređenost sistema i pojava velikih uređenih grupa – klastera u zavisnosti od efektivne gravitacije.

Strukturna analiza se vršila pomoću Voronijeve teselacije. Voronijeva teselacija je postupak koji dvodimenzionalni prostor koji zauzimaju diskovi (sfere u tri dimenzije) deli u skup konveksnih poligona koji se ne preklapaju. U ovom radu korišćen je koncept faktora oblika (Moucka i Nezbeda 2005) za detaljnije proučavanje topologije sistema. Faktor oblika je bezdimenzionalna veličina koja pokazuje odstupanje oblika Voronijevog dijagrama od kružnice. Ova veličina je korišćena za proučavanje uređenosti dvodimenzionalnih granularnih sistema i eksperimentalno (Moucka i Nezbeda 2005) i u simulaciji (Reis *et al.* 2006). Kako faktor oblika jasno pokazuje postojanje grupa sastavljenih od više različitih Voronijevih poligona, on daje relevantnu sliku uređenosti pakovanja (Jakšić *et al.* 2008).

Postavka eksperimenta

U eksperimentu, granularni materijal je predstavljalo nekoliko hiljada jednakih plastičnih kuglica prečnika 5.8 mm i mase 0.12 g. Da bi se omogućilo formiranje dvodimezionalnog pakovanja granularnog materijala bilo je potrebno osmisлити i napraviti aparaturu koja je predstavljena na slici 1. Na slici se može videti aluminijumska kutija dimenzija 40×30×20 centimetara. Sa prednje strane, za kutiju je pričvršćeno providno staklo koje ujedno predstavlja i jedan zid dvodimenzionalne posude u koju se ispuštaju kuglice. Crna pregrada jeste drugi zid posude. Razmak između ove dve ploče iznosio je 6 mm. On iznosi nešto više od prečnika kuglice (5.8 mm) da bi kuglice mogle slobodno da se kreću kroz prostor ispunjen fluidom. Da bi razmak između stakla i pregrade bio 6 mm, između ove dve površine postavljeni su graničnici dimenzija 40×3×0.6 cm. Uz pomoć opruga postignuto je da crna pregrada bude u potpunosti primaknuta graničnicima i na taj način je omogućeno da razmak između zidova bude jednak duž celog suda.

Aparatura je bila postavljena na stabilnoj podlozi da bi se sprečile moguće vibracije i potresi koji bi uticali na formiranje pakovanja. Kuglice su se, pre ispuštanja u posudu, nalazile na platformi odakle su jedna po

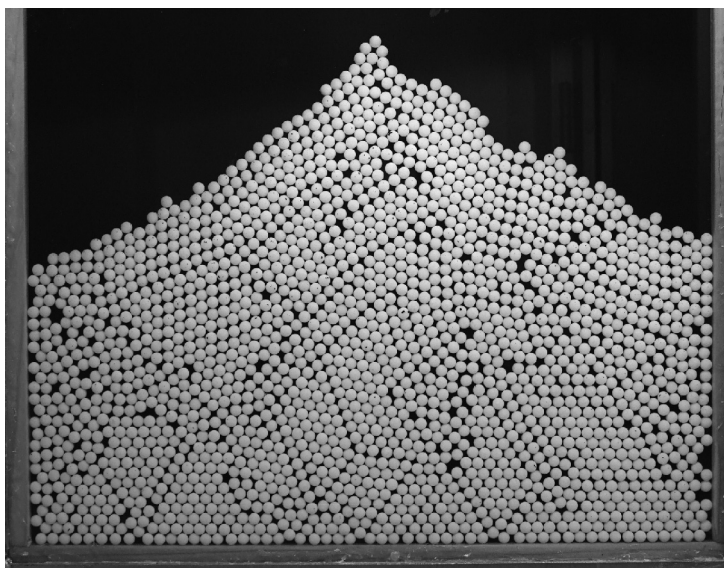


Slika 1.
Šema aparature
1 – providno staklo
2 – graničnici
3 – crna pregrada
4 – opruge
5 – platforma

Figure 1.
Scheme of the
apparatus
1 – transparent glass
2 – limiters
3 – black barrier
4 – mainsprings
5 – platform

jedna ubacivane u posudu. Vremenski razmak između ispuštanja dve kuglice nije bio tačno određen. Nakon što se jedna kuglica spusti na dno suda, ispuštana je naredna. Ovakvo pakovanje sadržalo je oko 2000 plastičnih kuglica.

Kao što je već rečeno, izučavana je struktura dvodimenzionalnog granularnog sistema u uslovima izmenjene efektivne gravitacije. Posmatrano je kakva pakovanja se dobijaju prvobitno kada kuglice ispuštamo u posudu ispunjenu vazduhom. Nakon svakog formiranog pakovanja usledilo bi fotografisanje samog pakovanja (slika 2), da bismo kasnije obradom fotografija dobili željene informacije o njegovoj strukturi. Nakon tri



Slika 2.
Primer formiranog
pakovanja

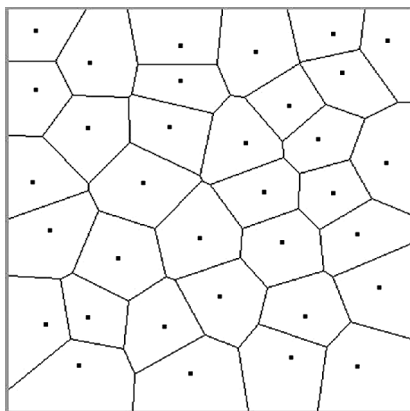
Figure 2.
Example of the
packing

merjenja za vazduh, u posudu je sipana voda i proces ubacivanja kuglica u posudu je ponovljen. Izvršeno je pet merjenja i takođe nakon svakog formiranog pakovanja ona su fotografisana. Zatim je usledilo formiranje pakovanja u rastvoru kuhinjske soli čija je gustina bila nešto veća od gustine vode, približno 1.05 g/cm^3 , i smeše alkohola i vode gustine približno 0.92 g/cm^3 . U oba slučaja merjenja su ponovljena tri puta.

Kuglice su bile žute boje a nalazile su se na crnoj podlozi i to je omogućilo dobar kontrast na fotografijama. Pakovanja su fotografisana u zamračenoj sobi, a kao izvor svetlosti korišćen je blic fotoaparata postavljen iznad same posude, na udaljenost od oko 30 cm.

Analiza granularnih pakovanja

U ovom poglavlju ćemo nešto detaljnije objasniti obradu fotografija pomoću programa koje smo koristili. Pomoću kompjuterske obrade fotografija dobili smo podatke koji su korišćeni za određivanje strukture granularnih sistema. U tu svrhu, koristili smo Voronijevu teselaciju i parametar faktor oblika na osnovu koga smo mogli da zaključimo kakva je uređenost dvodimenzionalnog granularnog sistema prilikom različitih vrednosti efektivnih gravitacija.



Slika 3.
Primer Voronijeve
teselacije

Figure 3.
Example of the
Voronoi tessellation

Zapravo, Voronijeva teselacija je vid popločavanja ravni, gde se na osnovu datih centara kuglica (granula) deli dvodimenzionalni prostor na konveksne poligone koji se ne preklapaju. U svakom poligonu nalazi se jedna granula. Voronijeva ćelija ili poligon je geometrijsko mesto tačaka u ravni koje su manje udaljene od centra diska kojeg sadrži dati poligon nego od centra bilo kog drugog diska (slika 3). Granule koje imaju zajedničku ivicu poligona jesu susedi, a svako teme poligona je jednako udaljeno od tri susedne granule. U svrhu pronalaženja ovakvih poligona u našim pakovanjima korišćen je Quickhull algoritam (Barber *et al.* 1996).

U zavisnosti od broja ivica poligona, možemo uočiti kuglice sa različitim brojem suseda. Da bismo vizuelno izdvojili kuglice sa istim brojem suseda, poligoni su podeljeni u osam grupa gde svaka grupa predstavlja određeni broj ivica poligona, odnosno broj suseda kuglica. Svakoj grupi je dodeljena boja koja je karakteriše.

Da bismo bliže odredili karakteristiku svakog Voronijevog poligona koristili smo faktor oblika. Faktor oblika govori koliko određeni poligon odstupa od kružnice. Definisan je formulom (Živković *et al.* 2011):

$$\sigma = \frac{O^2}{4\pi S}$$

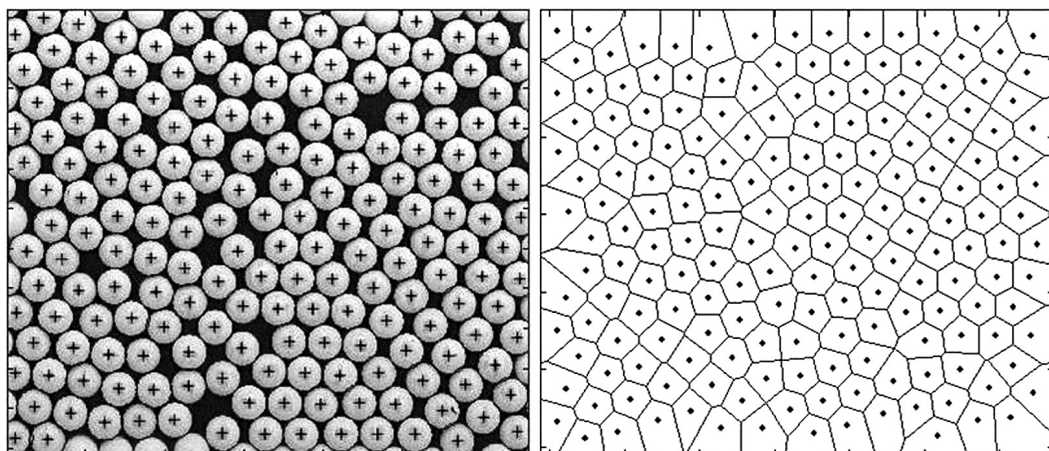
gde je O obim Voronijevog poligona, a S njegova površina. Za krug faktor oblika iznosi $\sigma = 1$ dok je za konveksne poligone on veći od jedan. Na primer, za kvadrat $\sigma = 4/\pi \approx 1.273$, za pravilan petougao $\sigma = (5/\pi) \tan(\pi/5) \approx 1.156$, a za šestougao $\sigma = 6/\sqrt{3} \approx 1.103$. Opšta formula za pravilan N -tougao je $\sigma = \frac{N}{\pi} \tan \frac{\pi}{N}$. Ovaj parameter omogućava da identifikujemo

poligone sa sličnim karakteristikama i na osnovu toga utvrdimo uređenost pakovanja. Faktor oblika je računat za svaki poligon izuzev otvorenih poligona koji su se nalazili na obodima pakovanja. Za različite intervale faktora oblika, poligoni su bojeni u različite boje. U tabeli 1 prikazani su intervali faktora oblika i boje koje karakterišu svaki pojedinačan interval. Minimalna vrednost faktora oblika je iznosila 1.07, a maksimalna 1.35.

Tabela 1. Grupe Voronijevih poligona prema vrednostima njihovih faktora oblika i boje koje predstavljaju određenu grupu

Grupa	Opseg σ	Boja
G1	$1.07 < \sigma < 1.108$	žuta
G2	$1.108 < \sigma < 1.125$	ružičasta
G3	$1.125 < \sigma < 1.130$	tirkizna
G4	$1.130 < \sigma < 1.135$	crvena
G5	$1.135 < \sigma < 1.140$	zelena
G6	$1.140 < \sigma < 1.160$	plava
G7	$1.160 < \sigma < 1.250$	bela
G8	$1.250 < \sigma < 1.35$	crna

Na slici 4 pokazano je kako je odrađena Voronijeva teselacija na fotografijama naših pakovanja. Prvobitno, program je odredio centre svake kuglice unutar pakovanja a zatim su iscrtani Voronijevi poligoni oko svake kuglice. Deo pakovanja sa detektovanim centrima granula prikazan



Slika 4. Prikaz dela pakovanja sa detektovanim centrima (levo) i odrađenom Voronijevom teselacijom (desno)

Figure 4. Portion of the packing with determined centres (left) and Voronoi tessellation on the same portion (right)

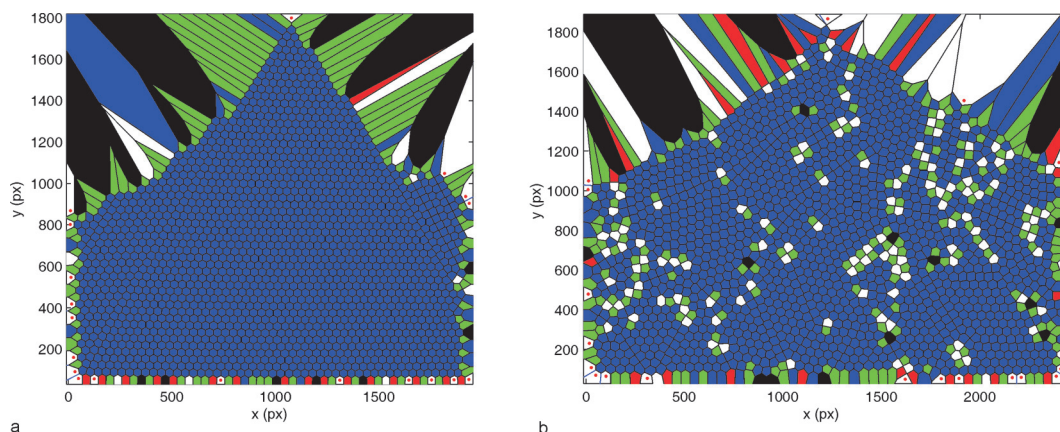
je na slici 4 levo, dok je Voronijeva teselacija, koja je odrađena na istom delu pakovanja, prikazana na slici 4 desno.

Precizna detekcija položaja svih granula bila je od osnovne važnosti za kvantitativnu obradu rezultata merenja. Pošto su eksperimentalno formirana pakovanja sadržavala veliki broj granula, detekcija je zahtevala razvoj kompjuterskog programa koji bi na osnovu prepoznavanja oblika, sa dovoljnom tačnošću, automatski određivao položaje centara svih granula. U ovom radu korišćen je već razvijen program koji je pomoću Houghove transformacije detektovao krugove i određivao njihove centre na dobijenim binarnim slikama (u 256 gray-scale bmp formatu).

Dobijeni rezultati su kvantitativno predstavljeni grafički, pomoću distribucija faktora oblika. Kako je distribucija faktora oblika za svako formirano pakovanje različita, rezultati predstavljeni u radu su dobijeni usrednjavanjem svih urađenih merenja za pakovanja formirana u određenom fluidu.

Rezultati

U narednom delu biće predstavljeni rezultati dobijeni za pakovanja formirana u vazduhu i u tečnostima različitih gustina. Na slici 5 prikazana je Voronijeva teselacija odrađena na fotografijama pakovanja formiranih u vazduhu (a) i u vodi (b), pri čemu su Voronijevi poligoni obojeni različitim bojama u zavisnosti od broja ivica. U pakovanju formiranom u vaz-

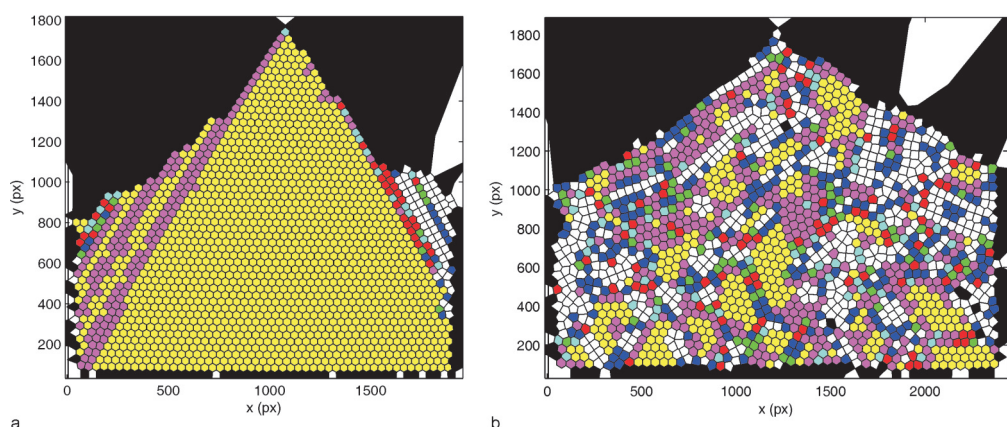


Slika 5. Prikaz Voronijeve teselacije urađene za pakovanje vazduha (a) i vode (b) sa poligonima obojenim u različite boje u zavisnosti od njihovog broja ivica: 1 – žuta, 2 – ružičasta, 3 – tirkizna, 4 – crvena, 5 – zelena, 6 – plava, 7 – bela, nedefinisani broj ivica – crna boja

Figure 5. Voronoi tessellation done for the packing formed in air (a) and in water (b) with diagrams coloured differently depending on the number of their sides: 1 – yellow, 2 – magenta, 3 – cyan, 4 – red, 5 – green, 6 – blue, 7 – white, undefined number of sides – black

duhu primećuje se da ima najviše poligona sa šest ivica, tj. najviše granula ima šest suseda. Uočava se velika uređena grupa – klaster koji čine plavi poligoni. Sa slike se vidi da se, pored plavih poligona, pri bočnim ivicama kao i na dnu suda nalaze i beli, crveni i zeleni poligoni. Na osnovu toga možemo zaključiti da zidovi suda imaju uticaj na uređenost sistema. Ipak, i pored uticaja zidova, možemo reći da su pakovanja koja su formirana u vazduhu prilično uređena zbog velikog broja granula koje imaju šest suseda. Dobijeni rezultat je u skladu sa poznatom činjenicom da granularna pakovanja u dve dimenzije imaju tendenciju da se spontano kristalizuju, tj. heksagonalno uređuju po skoro celoj svojoj zapremini. Razlog tome je translaciona invarijantnost najmanje ćelije maksimalne gustine koji čini disk okružen sa šest suseda koji ga dodiruju.

Ako posmatramo sliku 5b vidimo veliki broj poligona sa šest ivica, ali uviđamo da ne postoji veliki klaster sačinjen od plavih poligona kao što je to bio slučaj u pakovanju formiranom u vazduhu. Pri zidovima postoji još veća neuređenost a takođe imamo veći broj poligona sa sedam ivica (beli poligoni) kao i sa pet (zeleni poligoni). Ovaj rezultat je jasna indikacija da prisustvo fluida, koji redukuje vrednost efektivne gravitacije, bitno utiče na uređenost formiranih granularnih pakovanja. Za precizniji kvantitativni opis promene uređenja nije dovoljno posmatrati lokalnu organizaciju samo kroz distribuciju broja suseda Voronijevih poligona.



Slika 6. Prikaz Voronijeve teselacije urađen za pakovanje vazduha (a) i vode (b) sa poligonima obojenim u različite boje u zavisnosti od njihovog faktora oblika: $1.07 < \sigma < 1.108$ – žuta, $1.108 < \sigma < 1.125$ – ružičasta, $1.125 < \sigma < 1.130$ – tirkizna, $1.130 < \sigma < 1.135$ – crvena, $1.135 < \sigma < 1.140$ – zelena, $1.140 < \sigma < 1.160$ – plava, $1.160 < \sigma < 1.250$ – bela, $1.250 < \sigma < 1.35$ – crna

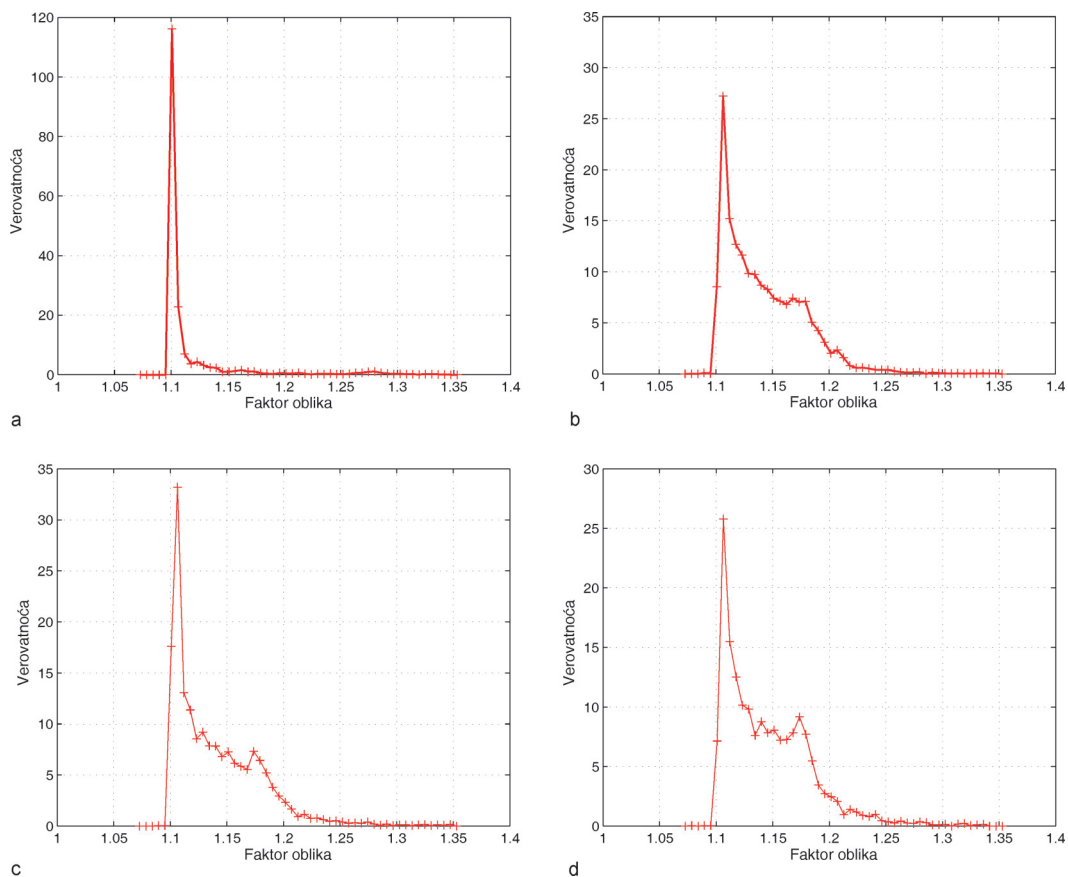
Figure 6. Voronoi tessellation done for the packings formed in air (a) and water (b) with diagrams coloured differently depending on their shape factor: $1.07 < \sigma < 1.108$ – yellow, $1.108 < \sigma < 1.125$ – magenta, $1.125 < \sigma < 1.130$ – cyan, $1.130 < \sigma < 1.135$ – red, $1.135 < \sigma < 1.140$ – green, $1.140 < \sigma < 1.160$ – blue, $1.160 < \sigma < 1.250$ – white, $1.250 < \sigma < 1.35$ – black

Zato dalju analizu vršimo pomoću distribucije faktora oblika, koja je mnogo senzibilnija na mikrostrukturalne promene granularnog sistema.

Na narednim slikama biće prikazani poligoni Voronijeve teselacije obojeni na osnovu vrednosti faktora oblika.

Na slici 6 predstavljeni su poligoni obojeni različitim bojama u zavisnosti od intervala faktora oblika za pakovanja formirana u vazduhu (a) i u vodi (b). Na slici 6a uvidamo veliki klaster sastavljen od žutih poligona čiji faktor oblika iznosi manje od 1.108. Ova vrednost faktora oblika odgovara pravilnim šestouglovima. Faktor oblika je dodatno potvrdio da je uredenost pakovanja nastalog u vazduhu jako velika.

Ako posmatramo Voronijeve poligone pakovanja formiranog u vodi primećujemo veliki broj poligona plave i bele boje koji nam govore o dosta neuređenom sistemu. Na slici 6b Voronijevi poligoni bele i plave boje su uglavnom deformisani petouglovi, odnosno šestouglovi. To znači da je većina granula raspoređena bez primetnog uređenja. Primetna su samo manja „ostrva” skoro pravilnih šestouglova koja odgovaraju manjim kristalizovanim domenima. Pažljivim posmatranjem moguće je detektovati veći broj kooperativnih struktura kao što su lukovi ili mostovi. To znači da redukovanjem efektivne gravitacije dolazi i do velike preraspodele unutrašnjih sila koje deluju između pojedinačnih granula.

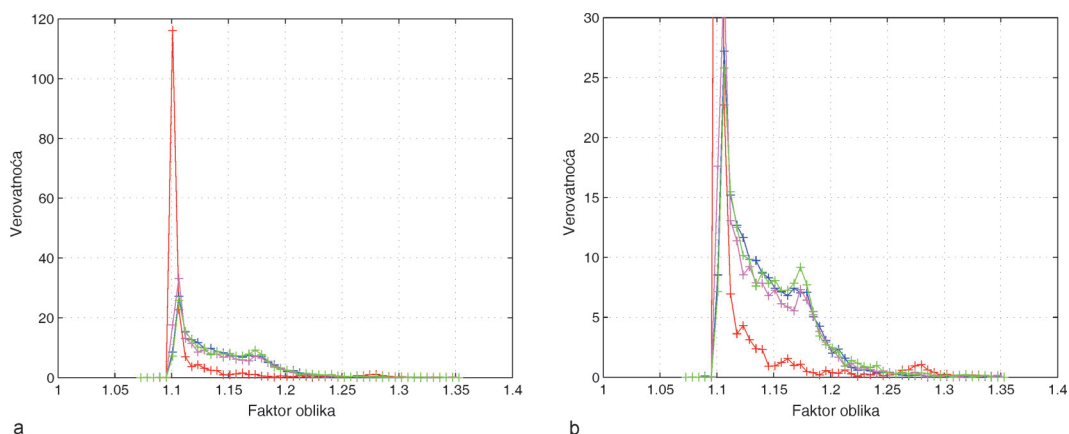


Slika 7. Distribucija verovatnoće faktora oblika za pakovanje formirano: u vazduhu (a), vodi (b), rastvoru NaCl (c) i smeši etanola i vode (d)

Figure 7. Probability distribution of the shape factor for packings formed in: air (a), water (b), water solution of NaCl (c), and mixture of ethanol and water (d)

Da bismo grafički prikazali strukturne promene u pakovanjima granularnog materijala pri različitim efektivnim gravitacijama, uvodimo veličinu koja se naziva distribucija verovatnoće $P(\sigma)$ faktora oblika σ . Distribucija verovatnoće se odnosi na mogućnost pronalaženja Voronijevog poligona sa faktorom oblika σ . Prikazane distribucije verovatnoće su normirane tako da je površina ispod svake krive jednaka jedinici.

Graficima je prikazana distribucija verovatnoće faktora oblika u pakovanjima formiranim u vazduhu i u fluidima – za svako formirano pakovanje odrađena je distribucija verovatnoće, a nakon toga distribucije su usrednjene. Kao krajnji rezultat dobijeni su grafici prikazani na slici 7.



Slika 8. Distribucije verovatnoća faktora oblika za pakovanja formirana u vazduhu, vodi, rastvoru NaCl i smeši etanola i vode, predstavljeni crvenom, plavom, ljubičastom i zelenom bojom, respektivno (a) i uvećan deo tog grafika (b)

Figure 8. Probability distributions of the shape factor for packings formed in air, water, NaCl solution, and the mixture of ethanol and water (a) and the enlarged fragment of that graph (b)

Na slici 8 prikazane su distribucije verovatnoće za sve četiri vrednosti efektivne gravitacije. Primećujemo veliku razliku distribucije verovatnoće faktora oblika između pakovanja formiranih u vazduhu i pakovanja formiranih u tečnostima.

Sve distribucije su veoma asimetrične sa dugačkim „repom” sa desne strane. Za slučaj pakovanja u vazduhu distribucija je lokalizovana oko najniže vrednosti faktora oblika za dvodimenzionalno pakovanje diskova (vrednost za pravilni šestougao, tj. 1.103). Razlog tome je činjenica da je najveći deo Voronijevih poligona veoma blizak pravilnom šestouglu. Drugim rečima, pakovanje formirano pri najvećoj vrednosti efektivne gravitacije veoma je uređeno i kompaktno. Smanjenje vrednosti efektivne gravitacije indukovalo je primetno širenje distribucija verovatnoće ka većim vrednostima faktora oblika. To širenje je nastalo kao posledica veće neuređenosti sistema i odsustva velikih domena heksagonalnog uređenja.

Važno je napomenuti da nam eksperiment nije mogao dati pouzdano poređenje distribucija u tečnostima različitih gustina. Bili smo ograničeni relativno niskom gustinom granula (1.077 g/cm^3), tako da nismo mogli značajno da variramo gustinu tečnosti i tako utvrdimo razlike u distribucijama faktora oblika koje su veće od statističke greške merenja. To bi moglo da bude prevaziđeno upotrebom granula veće gustine (na primer 1.8 g/cm^3) i rastvora cink-hlorida ZnCl_2 u vodi.

Zaključak

U ovom radu je eksperimentalno proučavana uređenost pakovanja dvodimenzionalnih granularnih sistema u zavisnosti od efektivne gravitacije. Za to je dizajnirana specijalna posuda debljine približne prečniku granula koje su korišćene u eksperimentu. Efektivna gravitacija je kontrolisana tako što su pakovanja formirana u fluidima različitih gustina. Proučavani su spori procesi formiranja granularnih pakovanja tako da je uticaj viskoznih sila fluida mogao biti zanemaren. Mikrostrukturalne promene pakovanja proučavane su metodama numeričke geometrije. Korišćena je Voronijeva teselacija, a svojstva Voronijevih poligona su dovedena u vezu sa svojstvima granularnih sistema. Pokazano je da je faktor oblika Voronijevih poligona veoma senzibilan na strukturne promene pakovanja. Analizom distribucija faktora oblika Voronijevih poligona pokazano je da su pakovanja formirana u uslovima manje efektivne gravitacije manje uređena i kompaktna. Zbog toga treba očekivati da odgovor granularnih pakovanja na spoljašnje pobude veoma zavisi od sila gravitacije, što može biti predmet novih istraživanja.

Zahvalnost. Zahvaljujemo se našim mentorima dr Slobodanu Vrhovcu i Branimiru Ackoviću na ukazanoj velikoj pomoći prilikom dizajniranja eksperimenta, kao i Aleksandru Bukvi na pomoći oko tehničkih detalja i fotografisanja. Takođe, zahvaljujemo se i Luki Petroviću na pomoći tokom pravljenja aparature.

Literatura

- Barber C. B., Dobkin D. P., Huhdanpaa H. 1996. The quickhull algorithm for convex hulls. *ACM Trans Math. Software*, **22**: 469.
- Cleef J. V. 1991. Powder Technology. *American Scientist*, 79: 304.
- Jakšić Z. M., Vrhovac S. B., Panić B. M., Nikolić Z., Jelenkovic B. M. 2008. Upward penetration of grains through a granular medium. *European Physical Journal E*, **27**: 345.
- Moucka F., Nezbeda I. 2005. Detection and characterization of structural changes in the hard-disk fluid under freezing and melting conditions. *Physical Review Letters*, **94**: 040601.
- Reis P. M., Ingale R. A., Shattuck M. D. 2006. Crystallization of a Quasi-Two-Dimensional Granular Fluid. *Physical Review Letters*, **96**: 258001.
- Živković S., Jakšić Z. M., Arsenović D., Budinski-Petković Lj., Vrhovac S. B. 2011. Structural characterization of two-dimensional granular systems during the compaction. *Granular Matter*, **13**: 493.

Structural Characterization of Two-dimensional Granular Systems Under Reduced Effective Gravity Conditions

In this paper, we present the results of a series of experiments conducted in order to study the structure of two-dimensional granular systems under conditions of reduced effective gravity.

Several thousand equal spheres, 5.8 mm in diameter, were used in the experiment as a granular material. To perform the experiment, we designed a special apparatus (Figure 1). The main part of the apparatus was an aluminum box 40×30×20 cm. Transparent glass is attached to the front of the box. The glass represents one wall of the container in which the spheres were lowered. The other wall of the container was an aluminum plate covered with a thin film of black paint, in order to make a good contrast with the yellow pallets used in the experiment. The two walls were separated by wooden planks, 6 mm thick. We used metal springs to assure that the rear wall is pressed against the planks. Spheres were lowered into the container from the platform attached to the top of the box. We controlled the value of effective gravity by changing the density of the fluid, and therefore changing the buoyancy. In our experiment, granules were emerged into water, a solution of NaCl, and a mixture of ethanol and water.

When the packings were formed, they were photographed, and the photographs were processed with a specially written program in Matlab. Firstly, the centers of the spheres (disks in two dimensions) were found using Hough transformations. Then, we used the Voronoi tessellation (Figure 3) and the novel concept of shape factor (Moucka and Nezbeda 2005) in order to closely examine the structure of the granular packings. Microstructural changes in the packings are examined by methods of numerical geometry.

Results (figures 5-8) show that all packings formed under conditions of reduced effective gravity are less arranged and less compact. Figure 5 shows Voronoi diagrams colored differently depending on the number of neighbors. The number of neighbors is equal to the number of sides of Voronoi cells. In Figure 6, Voronoi diagrams are colored depending on the value of the shape factor. If we look at the packing formed in water, we can see a great number of blue and white diagrams, which tell us about a disorganized system. We can see several small “islands” of regular hexagons, but not big clusters which we can see in packings formed in the air.

For a more precise quantitative description of the changes in organization of the packings, we used shape factor distributions. Figure 7, a-d, shows the results gathered during the experiment. While the distribution of the packings formed in the air is localized around the value for the regular hexagon (1.103), other distributions are wider, and extend to the higher values. These distributions show that packings formed under the conditions of small effective gravity are less compact, which is consistent with our previous conclusions. We showed that the response of granular material to exterior excitations is highly dependent on the gravity, and that could be the subject of further research.

