

Zaboravljena zrnca ili fizika granularnih materijala

Davor Kirin¹

Klasična podjela agregatnih stanja materije na tri osnovna stanja kruto, tekuće i plinovito, koja je vrijedila kroz stoljeća u mnogome je dovedena u pitanje razvojem novih materijala i preciznih tehnika za određivanje njihovih struktura. Standardni opis “klasičnih” agregatnih stanja je vezan uz činjenicu da je u plinu međudjelovanje molekula (atoma) slabo i da se molekule slobodno gibaju. Tekućina je neuređeno stanje u kome je interakcija među molekulama jaka, dok je u kristalu međudjelovanje između atoma (molekula) jako, a položaj atoma je dobro definiran u prostoru. Uz agregatna stanja su vezana i karakteristična makroskopska svojstva. Plinovi su lako stlačivi i popunjavaju volumen u kojem se nalaze. Tekućine poprimaju oblik posude u kojoj se nalaze i mijenjaju ga pod utjecajem vanjskih sila. Kruta tijela su elastična i vraćaju se u prvobitni položaj nakon prestanka djelovanja sila.

Niz sistema ne podliježe ovako uprošćenoj klasifikaciji i zadnjih nekoliko desetljeća fizika i kemija materijala bave se nizom “graničnih” sistema u koji vrlo često izmiču ovako pojednostavnjenoj klasifikaciji. Niz sistema ima svojstva nekoliko gore navedenih faza i nemoguće ih je uklopiti u ovako jednostavnu klasifikaciju. Jedan od najboljih primjera su tzv. “tekući kristali” koji se nalaze kao pokazivači ili ekrani u gotovo svakom digitalnom satu, mobitelu ili “laptop” računalu. To su molekulski sustavi sastavljeni od duguljastih molekula koji su tekućine (teku), no za razliku od izotropnih tekućina u njima je orijentacija molekula dobro definirana kao i u kristalima. Na taj način imamo sistem koji posjeduje i svojstva tekućina (tečenje), ali i svojstva kristala, tj. molekule imaju dobro definiranu orijentaciju. Vanjsko električno polje utječe na orijentaciju molekula i na taj način je moguće kontrolirati prolaz svjetla kroz sloj tekućih kristala. Ovi egzotični sistemi imaju vrlo veliku upotrebu u svim područjima “display” tehnologije.

U svijetu oko nas postoji niz sistema koji izmiču standardnoj klasifikaciji agregatnih stanja (plinovi, tekućine, kruta tijela). Najvažnije pri tome je da neki od tih sistema posjeduju svojstva vrlo interesantna za primjenu (električnu vodljivost, tvrdoću i sl.).

Jedan od takvih “nestandardnih” sistema koji teško podliježu klasifikaciji su i zrnati (granularni) materijali koji nas okružuju u svakodnevnom životu. Sol, šećer, riža, pijesak, brašno, cement i pšenica pokazuju ovisno o prilici svojstva tekućina, čvrstih tijela pa čak i plinova.

Svi ovi materijali su sastavljeni od malih i makroskopskih čestica (zrnaca, granula) koje same po sebi mogu biti kristali, amorfni komadići i sl.

Veličina zrnaca u granularnim materijalima seže od mikronske za fine prahove do milimetarske za pijesak ili šljunak. Pšenica, cementni prah ili šećer koji “teku” kroz cijevi iz silosa ili spremnika, na podlozi stvaraju hrpu na koju slobodno možemo stati. Dvorac sagrađen od pijeska na plaži neće promijeniti oblik do prve kiše ili prve plime.

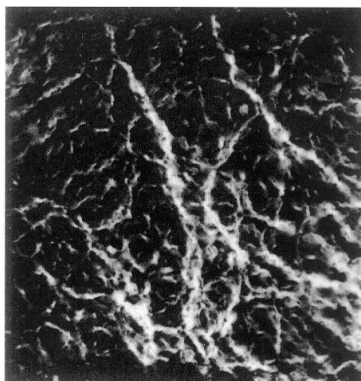
Počeci istraživanja i razumijevanja svojstava granularnih materijala datiraju još iz 18. stoljeća. C. A. Coulomb (1773.) je bio prvi koji se bavio problemom potpornih zidova na koje djeluju sile sloja zemlje. Tokom 19. i prve polovice 20. stoljeća svojstva rastresitih materijala bili su domena istraživanja mehanike tla kojom su se bavili pretežno

¹ Autor je znanstveni savjetnik Instituta Ruđera Boškovića, bavi se molekulskom fizikom, Ramanovom spektroskopijom i vibracijama molekula i kristala, e-pošta: kirin@rudjer.irb.hr. Članak je objavljen šk. god. 2000/01.

građevinari. Razumijevanje ovih materijala je bilo na razini empirijskih zakona koji su zadovoljavali praktične potrebe.

Osnovno svojstvo ovih sistema je da su *atermalni*, tj. svojstva im ne ovise značajno o temperaturi. Hrpa suhog pijeska će se ponašati jednako pri najjačoj zimi kao i na ljetnoj vrućini. Statička, ali i dinamička svojstva neovisna su o količini “unutrašnje” kinetičke energije (topline!) unutar svake pojedine čestice. Promatrano za svako zrno posebno, karakteristična potencijalna energija (vezana uz tipičan pomak u sistemu) je mgd gdje je m masa, g gravitacijska konstanta, a d promjer zrna. U usporedbi s toplinskom energijom kT svako zrno pijeska na sobnoj temperaturi ima najmanje 10^{12} puta veću “karakterističnu” potencijalnu energiju čestica. Svako zrno za sebe predstavlja makroskopski sistem i tek gibanje zrnaca kao cjeline utječe na makroskopska svojstva sistema.

Današnje stanje fizike granularnih materijala karakterizirano je velikim brojem eksperimentalnih podataka dobivenim na model-sistemima (čelične, staklene ili pleksiglas kuglice i sl.), ali i na realnim sistemima (suhi pijesak, šljunak). Osim toga niz kompjutorskih simulacija baziranih na klasičnim jednadžbama gibanja, daje dublji uvid u ponašanje granularnih sistema, posebno njihovih dinamičkih svojstava.

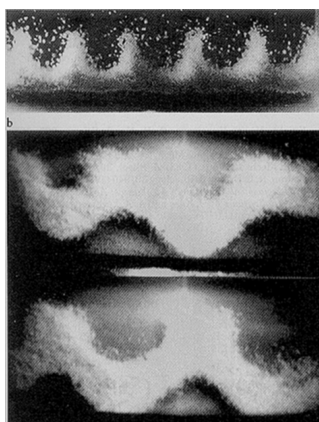


Slika 1.

Osnovna postavka za razumijevanje *statičkih* svojstava granularnih materijala je činjenica da u nakupini granula samo neke čestice prenose vanjsku silu. To znači da se zrna organiziraju u “mrežu” nosivih čestica i ostatak nenosivih “promatrača” tj. čestica koje ne prenose silu. Ovaj efekt potvrđen je nizom eksperimenata s prozirnim (pleksiglas) kuglama (slika 1). Na slici je prikazana posuda u kojoj su pleksiglas kugle u vodenoj otopini, a sve se nalazi između prekriženih polarizatora. U slučaju da ne djeluje vanjska sila cijelo vidno polje je zacrnjeno zbog optičke izotropnosti sistema koji se nalazi između prekriženih polarizatora. Kada na sistem djeluje vanjska sila (kao na slici 1, gdje sila djeluje s gornje strane tj. s vrha slike) pleksiglas kuglice mijenjaju svoja optička svojstva i prestaju biti optički izotropne. Pod utjecajem sile nosive kuglice zakreću ravninu polarizacije i na slici su bijele (za njih polarizator i analizator nisu više prekriženi, pa dio svjetlosti prolazi).

Stvaranje “nosivih” struktura unutar granularnih materijala ima i niz praktičkih posljedica. U visokim kolonama (silosi i sl.) tlak na dno dostiže neku graničnu vrijednost bez obzira na visinu spremnika. Jedna od posljedica toga je i da je u pješčanom satu količina zrnaca koji istječu u jedinici vremena praktički neovisna o visini stupca pijeska.

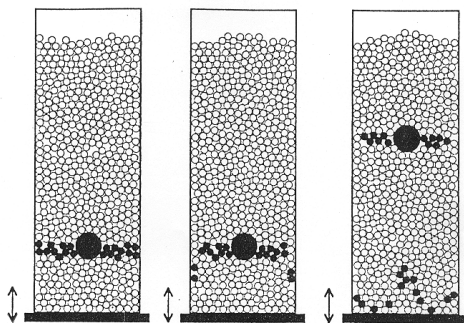
Drugo važno svojstvo granularnih materijala je da “*pamte*” svoju prošlost. Posuda puna vode ne pamti što joj se sve desilo u prošlosti, da li je bila uzburkana, zaleđena ili sl. Posuda s pijeskom “pamti” da li smo je kompaktificirali (smanjili volumen) tlakom, vibracijama ili sl. Za dinamička svojstva zrnatih materijala najvažnija je činjenica da je svako gibanje unutar ovih materijala vrlo jako *gušeno*, tj. da je visoko disipativno. Čelična kuglica bačena na elastičnu podlogu izvodi dugotrajno prigušeno titranje (giba se sa sve manjom amplitudom); skup čeličnih kuglica (10 – 20) unutar staklene cijevi na čijem kraju je elastična podloga, vrlo brzo će prestati izvoditi prigušene oscilacije zbog sudara među kuglicama i izuzetno brze disipacije energije unutar sistema.



Slika 2.

Ekperimenti na zrnatih materijalima (obično čelične kuglice) koji su podvrgnuti *vibracijama* pokazuju niz novih fenomena kao što su pojava stojnih valova, uređenih struktura na površini posude na koju djeluje periodička sila. Na slici 2 prikazani su stojni valovi u tankom sloju zrnatog materijala pod utjecajem vanjske periodičke sile. Na površini granularnog sustava koji vibrira javlja se čitavo bogatstvo novih fenomena tj. periodičkih struktura. Ovisno o amplitudi i frekvenciji pobudne sile javlja se niz statičkih struktura, ali i novi tip lokalnog pobuđenja koje se naziva “*oscilon*” (vrlo mala skupina granularnih čestica se giba s dobro definiranom frekvencijom i amplitudom neovisno o ostatku granularnog sistema).

Titranje zrnatih materijala dovodi i do separacije čestica po veličini; velike čestice vremenom dođu na površinu, a male ostaju na dnu posude (slika 3).



Slika 3.

Jedan od najvažnijih pojmova vezanih uz granularne materijale je začepeljivanje, zaglavljivanje (jamming). Iz iskustva znamo da će se sol ili brašno, koji istječu iz spremnika iz naoko neobjašnjivog razloga prestati istjecati, tj. začepit će se otvor. Problem zaglavljivanja ili začepeljivanja univerzalni je problem kojeg susrećemo u prometu, gibanju molekula u staklastoj fazi i nizu drugih fizikalnih sistema.

Glavno pitanje fizike granularnih (zrnatih) materijala je kako opisati ove sisteme. Fizika ima dobro razvijene "alate" za opis tekućina, plinova i krutih tijela svakih za sebe, no ne uvijek i za granične sisteme koji posjeduju svojstva nekoliko od navedenih sistema. Kako napisati (ako možemo) jednadžbe gibanja; i možemo li primijeniti standardnu statističku fiziku? Možemo li napisati jednadžbe stanja (nešto kao $pV = nRT$)? Granularni materijali predstavljaju izazov jer od nas zahtijevaju da ponovo preispitamo osnovne postavke (prije svega statističke) fizike.

Jesu li uobičajene fizikalne veličine dobro definirane (temperatura, tlak, naprezanje i sl.) i jesu li one prikladne za opis ovih sistema? Trebamo li nove veličine za opis statike i dinamike granularnih sistema (oblik zrnaca, trenje među zrnima, elastičnost zrnaca i sl.).

Pojmove kao što su temperatura pokušava se nadomjestiti analognim pojmovima kao što je kompaktnost, tj. omjer volumena zrna prema ukupnom volumenu (zrnca i prostor oko njih obično ispunjen zrakom).

Potrebe za dubljim razumijevanjem ponašanja granularnih materijala proizlazi iz činjenice da su oni vrlo važni i sveprisutni u građevinskoj, kemijskoj i farmaceutskoj industriji i rudarstvu. Smatra se da su kapaciteti za transport zrnatih i praškastih materijala u industriji 40 % predimenzionirani da bi se izbjeglo začepeljivanje. Ako uzmemo u obzir činjenicu da se godišnje na svijetu barata milijunima tona zrnatih materijala uštede zbog boljeg skladištenja ili lakšeg transporta su vrlo značajne. Glavni alat za rješavanje ovih problema je dugo bio veliki drveni bat koji pospješuje "odčepeljivanje" zaglavljenih tokova zrnatih i praškastih materijala. Nadajmo se da će intenzivna istraživanja u fizici granularnih materijala donijeti u budućnosti novo razumijevanje fizike granularnih materijala, a time i modernije "alate" koji će unaprijediti transport i skladištenje ovih materijala. Dublje razumijevanje mehanizama urušavanja i gibanja rastresitih materijala u prirodi od velike je važnosti u nizu aktivnosti (rudarstvo, građevinarstvo, geologija i sl.). Razumijevanje procesa nastajanja lavina i pješćanih dina kao i stabilnosti obične hrpe pijeska je značajno uznapredovalo u zadnjih dvadesetak godina, no još je uvijek daleko od potpunog. Niz modernih ideja u znanosti kao što je samoorganiziranost, povezani su s procesima u granularnim materijalima kao što je nastanak lavina na hrpi granularnog materijala.

Kako znamo da stvaranje svijeta nije određeno padajućim zrnima pijeska?

V. Hugo, Jadnici

Vidjeti svijet u zrnu pijeska. . .

W. Blake

Literatura

- [1] C. H. LIU I SURADNICI, *Science* 269, 513 (1995).
- [2] S. DOUADY, S. FAUVE I C. LAROC HE, *Europhys. Lett.* 8, 621 (1989).
- [3] H. K. PAK I R. P. BEHRINGER, *Phys. Rev. Lett.* 71, 1832 (1993).
- [4] J. B. KNIGHT, H. M. JAEGER I S. R. NAGEL, *Phys. Rev. Lett.* 70, 3728 (1993).