

Erőeloszlás nyugvó granuláris anyagokban

1 Bevezetés

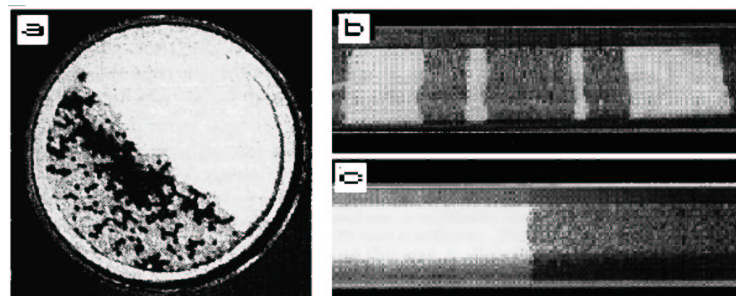
1.1 A granuláris anyagok

Granuláris vagy más néven szemcsés anyagoknak azokat a rendszereket nevezzük, amelyek nagy számú ($10^4 - 10^{15}$ db.), makroszkopikus (jellemzően $10\mu\text{m} - 10\text{m}$ közti nagyságrendű) részecskékből állnak. Ebben a mérettartományban a legjellemzőbb hatások a részecskékre ható gravitációs erő, a két részecske összenyomódásakor fellépő tasztítóerő és az érintkezési pontokban jelentkező súrlódási erő. A legegyszerűbb esetben a részecskék között vonzó kölcsönhatás nincs. A gyakorlatban ezt a viszonylag egyszerű képet számos tényező bonyolíthatja, például a részecskék közti közeg (levegő) hatása, nedvesség jelenléte esetén a felületi feszültségből vagy nagyon finom poroknál a Van der Waals kölcsönhatásból adódó vonzó kölcsönhatás, a szemcsék elektrosztatikus feltöltődéséből adódó hosszútávú hatások, stb. Ezek a járulékos hatások igen érdekes jelenségeket okoznak, azonban a szemcsés anyagok viselkedése ezek nélkül is rendkívül gazdag és összetett.

A szemcsés anyagok gyakorlati jelentősége igen nagy, szerepet játszanak a mezőgazdaság és az ipar csaknem minden területén. A gyakorlatban előforduló szemcsés anyagokat lehetetlen felsorolni: ide tartoznak a különböző építőipari alapanyagok, mint pl. a homok és a cement; az élelmiszerek, mint a cukor, a borsó, a fűszerek vagy a burgonya; a mosó- és fertőtlenítőszeresek, festékanyagok, gyógyszerek, kozmetikai cikkek, növényvédő és rovarirtó szerek, robbanóanyagok és lőszeresek, műanyagipari alapanyagok, a szén és más szilárd fűtőanyagok; de ide sorolható számos késztermék is: a műanyagárúk, a különféle elektronikai alkatrészek, a csavarárúk, stb. Ezek hatékony szállítása, tárolása, kezelése és feldolgozása kulcsfontosságú, ez magyarázza, hogy évtizedek óta folynak mérnöki kutatások a szemcsés anyagokkal kapcsolatban.

A fizikusok érdeklődésének középpontjába az 1990-es években kerültek a granuláris anyagok. Világossá vált, hogy fizikai leírásuk korántsem triviális. Mivel a részecskék átlagos helyzeti energiájához képest az egy szabadsági fokra jutó $k_B T$ termikus energia elhanyagolható, így elvesz a hőmérséklet átlagoló szerepe, amely a sokrészecske-rendszerek leírását megkönnyítette. Nem alakul ki termikus egyensúly, nincs ergodicitás, külső megzavarás nél-

kül a rendszer bármely metastabil állapota végtelen sok ideig fennmarad. Keveredés, homogén eloszlások kialakulása helyett rendeződés, szegregáció, komplex struktúrák kialakulása lép fel. Mivel hiányzik a hőmozgás által biztosított mikroszkopikus sebességskála, a granuláris anyagok folyása nem írható le a Navier Stokes egyenletekhez hasonlóan, és a kialakuló áramlási kép is gyökeresen különbözik a viszkózus folyadékoktól: általában nem folyik az anyag egésze, hanem szétválak egy nyugvó és egy mozgó fázisra, lejtőkön lavinák, csövekben visszafelé haladó sűrűség hullámok, esetleg a folyást teljesen leállító akadályok alakulnak ki.



ábra 1: Szemcsés anyagokban fellépő szegregációs effektusok. *a* Radiális szegregáció 2 dimenzióban. A fehér szemcsék 3 mm-es üveggolyók, a feketék 3 ilyen golyóból összeragasztott nagyobb szemcsék. *b, c* Axiális szegregáció 3 dimenzióban. Hosszú forgó hengerekbe kétféle szemcseméretű homok keverékét helyezték, a sötét szemcsék nagyobbak, mint a világosak. *b* Tranziens szegregációs mintázat. *c* Kb. 10^6 fordulat után kialakuló végállapot. [1].

A szemcsés anyagok különleges fizikája számos meglepő jelenséghez vezet. Ezek közül a legismertebbek a különböző szegregációs effektusok (1. ábra), a rezgéses gerjesztés hatására kialakuló konvekció és halomképződés, valamint a rezgetett vékony granuláris rétegben fellépő jelenségek: a szabályos geometriai formákba rendeződő szubharmonikus állóhullámok, és a lokalizált gerjesztések, az ún. oszcillonok (2. ábra).

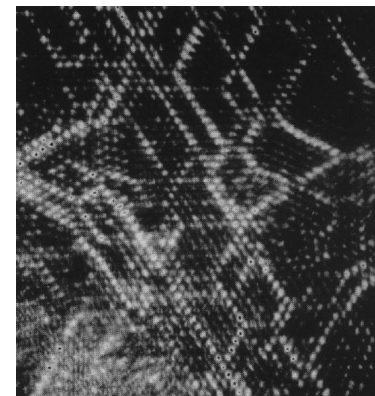


ábra 2: Rezgetett vékony granuláris rétegben kialakuló lokalizált állóhullám, úgynevezett *oszcillon*. A szemcsék $0.15 - 0.18 \text{ mm}$ -es bronzgolyók, a rétegvastagság 17 részecskényi. Az oszcillonok megjelenéséhez kísérletet vákuumban kell végrehajtani, a rezgés amplitudóját és frekvenciáját egy adott szűk tartományban kell beállítani. [2]

1.2 Nyugalmi állapot

A granuláris anyagok leírása még nyugalmi állapotban sem egyszerű. A fő nehézséget és egyben a probléma érdekességét az adja, hogy a részecskék egymással csak az érintkezési pontokban hatnak kölcsön, amelyek egy kvázivéletlenszerű hálózatot alkotnak az anyagon belül. A részecskék súlyából és az esetleges egyéb külső mechanikai hatásokból származó erők az anyagon belül csak ezen a hálózaton terjedhetnek tovább. Ezen felül az, hogy egy érintkezési pontban mekkora erő lép fel, az szintén függeni fog az adott mikroszkopikus elrendeződéstől, a részecskék pontos alakjától, felületi tulajdonságaitól; vagyis szintén véletlenszerűnek tekinthető. Mindezek következtében a mintában fellépő mechanikai feszültségek eloszlása erősen inhomogén lesz. A kísérletek tanúsága szerint a legnagyobb feszültségek láncszerű struktúrák mentén jelentkeznek, ezeket nevezzük erőláncoknak (3. ábra).

Az erőláncok lefutását az érintkezési pontok hálózata, s ezen keresztül az



ábra 3: Polarizált fény segítségével láthatóvá tett feszültségeloszlás két dimenziós granuláris anyagban. A világosabb szemcsék nagyobb feszültséget viselnek. Jól látható, hogy ezek a szemcsék láncszerű struktúrákban helyezkednek el. [3]

egyes szemcsék konkrét helyzete határozza meg. Ebből az következik, hogy egy nyugvó granuláris rendszert nem lehet egyszerűen néhány állapotjelzővel, mint például a rendszer geometriájával és a pakolás sűrűségével leírni. Látszólag azonos paraméterekkel rendelkező rendszereknek is lényegesen különböző lehet a viselkedés ha más módon készültek s emiatt más bennük az erőláncok elhelyezkedése. Azt mondhatjuk, hogy a granuláris rendszereknek "memóriája van", az érintkezési pontok hálózatában rejtetten tárolódik az információ a minta előéletéről.

Az erőláncok szerepét és a memória-effektusok fontosságát egy egyszerű példával világítjuk meg. Egy vízszintes felületen hozzunk létre homokhalmot olyan módon, hogy egy szűk tölcserén keresztül öntjük a homokszemeket a készülő halom tetejére. Ha ekkor megmérjük a halom alján fellépő függőleges erők eloszlását, arra a meglepő eredményre jutunk, hogy bár a halom közepe felé haladva a mért erő fokozatosan növekszik, közvetlenül a csúcs alatt nem maximum, hanem egy lokális minimum figyelhető meg. Ennek az a magyarázata, hogy a kialakuló erőláncok rendszere a boltívekhez hasonlóan két oldalra vezeti le a közepén lévő anyag súlyát. Ha azonban más módon,

egy szítán keresztül öntve építünk fel egy geometriailag azonos homokhalmot, akkor az erőeloszlás megváltozik, és a lokális minimum eltűnik.

A laborgyakorlat során az erőláncok hatását vizsgáljuk két egyszerű kísérletben. Az első kísérletben az erőláncok jelenlétének egy makroszkopikus következményét vizsgáljuk, a második kísérletben pedig mikroszkopikus szinten, az egyes szemcsékre ható erőket mérjük.

2 A nyomás mélységfüggése granulás oszlopban

A laborgyakorlat első mérése során magas, hengeres tartóba helyezett granulás anyag alján mérjük a függőleges irányban ható nyomóerőt. Több mint száz éve ismert tény, hogy a szemcsés anyagokban fellépő nyomás nem írható le a hidrosztatikából jól ismert $P(z) = \rho g z$ képlettel. Az oszlop magasságát növelve az oszlop alján a nyomás nem nő lineárisan a végtelenig, hanem egy adott karakterisztikus magasság fölött telítésbe megy, és végtelen magas oszlop esetén is véges nyomást mérhetünk. Ez a jelenség az anyag belsejében és a falaknál fellépő sűrűdés és a kialakuló erőláncok rendszerének közvetlen következménye: a boltívszerűen rendeződő erőláncok az edény falának közvetítik szemcsék súlyából származó erőt, és egy idő után a hozzáadott anyag teljes súlyát a falak tartják meg.

A jelenség kvantitatív leírására Janssen 1895-ben javasolt egy egyszerű modellt, amelynek feltevései szigorúan véve ugyan nem mind megalapozottak, eredményei viszont jól egyeznek a kísérletekkel. Ennek a modellnek azóta számos finomított illetve továbbfejlesztett változata látott napvilágot, és a probléma gyakorlati jelentőségéből adódóan sokan végeztek kísérleteket is. A kísérleti eredmények alapján nem lehet azonban a különböző modellek közül egyet, mint legjobbat kiválasztani, minthogy az adatok szórása igen nagy, és még azonos minta-előkészítési eljárás használatával is gyakran ellentmondó eredmények születnek. A laborgyakorlat során mi egy igen egyszerű kísérleti elrendezést használunk, és a jelenség lényegének bemutatására szorítkozunk, így eredményeink értelmezéséhez használhatjuk Janssen gondolatmenetét.

2.1 Janssen modellje

Tekintsünk egy R sugarú függőleges hengeres edényt megtöltve granulás anyaggal, melynek átlagos sűrűsége ρ . Feltesszük, hogy a függőleges nyo-

más nagysága csak a mélységtől függ, tehát $P(x, y, z) = P(z)$. Az anyag minden dz vastagságú, $S = R^2\pi$ felületű vízszintes szeletének egyensúlyban kell lennie. Erre a szeletre hat a saját tömegéből adódó gravitációs erő, a fölötte és alatta mérhető nyomás különbségéből származó erő és a falaknál fellépő súrlódási erő:

$$\rho g S dz - \frac{dP(z)}{dz} S dz - dF_{\text{frict}} = 0. \quad (1)$$

A modell lényeg hogy feltesszük, hogy a vízszintes irányban mérhető nyomás arányos a függőleges nyomással: $P_{\text{hor}}(z) = K P(z)$, ahol K egy konstans, az ún. Janssen együttható. Ezen kívül feltesszük azt is, hogy a falaknál fellépő tapadási súrlódási erők mind felfelé mutatnak, és maximális értéküket veszik fel, így :

$$dF_{\text{frict}} = \mu \cdot K P(z) \cdot 2\pi R dz, \quad (2)$$

ahol μ a fal és az anyag közti súrlódási együttható. Ezt behelyettesítve az (1) egyenletbe a következő inhomogén lineáris differenciálegyenletet kapjuk:

$$\frac{dP}{dz} + \frac{1}{\lambda} P = \rho g \quad (3)$$

ahol

$$\lambda = \frac{R}{2\mu K}. \quad (4)$$

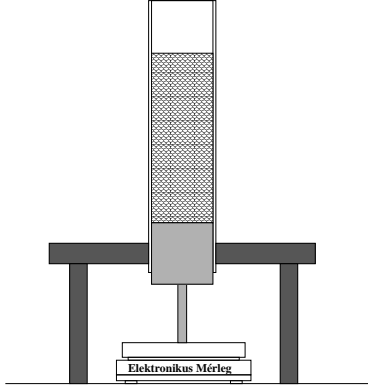
A differenciálegyenlet megoldása a $P(0) = 0$ kezdőfeltétellel:

$$P(z) = \lambda \rho g [1 - e^{-z/\lambda}], \quad (5)$$

vagyis x növelésével a nyomás exponenciálisan telítésbe megy, és a telítődés karakterisztikus távolsága λ . Ez az eredmény viszonylag jó egyezést mutat a kísérletekkel.

2.2 A mérés

A mérési összeállítás vázlatos rajza a 4. ábrán látható. A szemcsés anyag egy függőleges üveghengerben helyezkedik el, melynek átmérője $4,7 \text{ cm}$, magassága 53 cm . A henger alját egy könnyen mozgó dugattyú zárja le. A dugattyúra ható erőt elektronikus mérleggel mérjük, melynek felbontása $\pm 2g$, méréshatára $5000g$ (kerüljük a túlterhelését!). A mérlegről leolvashatjuk a



ábra 4: Mérési összeállítás a granuláris anyag alján fellépő nyomás mérésére

granuláris oszlop m_l látszólagos tömegét. A (5) egyenletből következik, hogy a látszólagos tömegnek szintén exponenciális telítődést kell mutatnia az oszlop m valódi tömegének függvényében:

$$m_l(m) = m_\infty[1 - e^{-m/m_\infty}]. \quad (6)$$

A mérés során ezt az összefüggést próbáljuk kimérni.

Számítási feladat

Igazoljuk, hogy, a (6) egyenlet valóban következik a (5) egyenletből, és adjuk meg m_∞ értékét a kísérlet paramétereivel.

Mérési feladatok

1. A mérés során az anyag fokozatos adagolását mérőkanál segítségével fogjuk végezni. Mérjük meg az egy mérőkanállal hozzáadott anyag tömegét és annak bizonytalanságát. Ha egy mérőkanálnyi anyag tömegének méréséhez a mérleg felbontása nem elegendő, akkor mérjünk 10 – 20 kanálnyi anyagot.

2. Mérjük meg üres henger esetén a dugattyú tömegét. Becsüljük meg a dugattyú sűrűlódásából származó hiba nagyságát. Tárázzuk a mérleget, így a további mérésekben a dugattyú súlya nem jelenik meg.

3. Mérjük ki a látszólagos tömeg függését a valódi tömegtől 2-3 különböző granuláris anyag esetén. Minden anyag esetén legalább 5 független mérésorozatot végezzünk, és adjunk becslést a mért adatok szórására. Mérjük az oszlop magasságát is, és becsljük meg az anyag sűrűségét. Vizsgáljunk meg több különböző töltési eljárást.

4. A mérési adatokra illesszünk a (6) egyenletnek megfelelő függvényalakot, és határozzuk meg m_∞ értékét. Elemezzük a jósolt függvényalaktól való esetleges eltéréseket. Vessük össze a mért adatok szórását a mérési pontatlanságokból és a berendezés tökéletlenségéből származó bizonytalansággal.

5. Egyszerű méréssel becsljük meg az anyag és az üvegfal közti sűrűlódási együtthatót. (Például alkalmas tárgyra ragasszunk fel szemcséket és helyezük lejtőre.) A mért m_∞ értékekből határozzuk meg a Janssen együtthatót.

3 A mikroszkopikus erőeloszlás vizsgálata

3.1 A q-modell

Mint korábban említettük az erőláncok lefutását az érintkezési pontok kvázi-véletlenszerű hálózata szabja meg, így azt pontosan nem tudjuk megjósolni. Megkísérelhetjük viszont ennek a véletlenszerű hálózatnak a statisztikus leírását, s ebből értékes információt nyerhetünk a kialakuló erőkre vonatkozóan is. C.-h. Liu és társai 1995-ben javasoltak egy egyszerű elméleti modellt, ami jóslatot ad az egyes szemcsékre ható erők eloszlására [4].

A modell feltevése szerint az erőláncok kialakításában domináns szerepet játszik az, hogy a szemcsék elhelyezkedésében mutatkozó szabálytalanságok miatt egy kiszemelt szemcsésre felülről ható erők nem egyenletesen oszlanak meg az őt tartó szemcsék között. Tekintsünk egy szabályos rácsot, melynek minden rácspontjában egy egységnyi tömegű részecske található. Minden részecske az alatta lévő rétegben lévő N másik részecskén nyugszik. Egy adott szemcsére ható összes súlyerő ennek az N részecskének továbbítottik véletlenszerű megoszlásban: az i -ik részecske által a j -ik részecskének továbbított erőt jelölje a q_{ij} véletlen változó. (Az egyszerűség kedvéért a modellben eltekintünk az N koordinációs szám változásaitól és nem foglalkozunk az erők vízszintes komponensével.) Hasonlóképpen egy adott részecskére ható súlyerő a felette lévő rétegben vele kapcsolatban lévő N darab szemcse járulékaiból adódik össze, ehhez adódik a saját súlya ($= 1$). Eszerint az M mélységben lévő i -ik részecske által megtartott súly, $w(M, i)$, a következő sztochasztikus

egyenletet kel, hogy kielégítse:

$$w(M, j) = 1 + \sum_{i=1}^N q_{ij}(M-1)w(M-1, i) \quad (7)$$

A valóságban a q_{ij} változók térben korreláltak: ha egy ponton az erők adott módon oszlanak meg, akkor annak kihatása van a pont környezetére is. A modell keretein belül figyelmen kívül hagyjuk ezeket a térbeli korrelációkat, és feltesszük, hogy a q_{ij} változók mindenütt azonos eloszlást követnek. Ez a feltevés lényegében az átlagtér-közelítésnek felel meg. A q_{ij} változók eloszlására sokféle feltevést tehetünk, az egyetlen megkötés, hogy eleget kell tennie a

$$\sum_{j=1}^N q_{ij} = 1 \quad (8)$$

kényszerfeltételnek, ami az egyes szemcsék egyensúlyát biztosítja. A legyszerűbb választás az, amikor a kényszerfeltételnek eleget tevő minden q_{ij} készlet valószínűsége azonos. Belátható, hogy ekkor az egy szemcse által megtartott redukált súly, $v = w/M$ eloszlásfüggvénye $M \rightarrow \infty$ határesetben egy adott eloszláshoz tart:

$$P_{\text{egyenletes}}(v) = \frac{N^N}{(N-1)!} v^{(N-1)} e^{-Nv}. \quad (9)$$

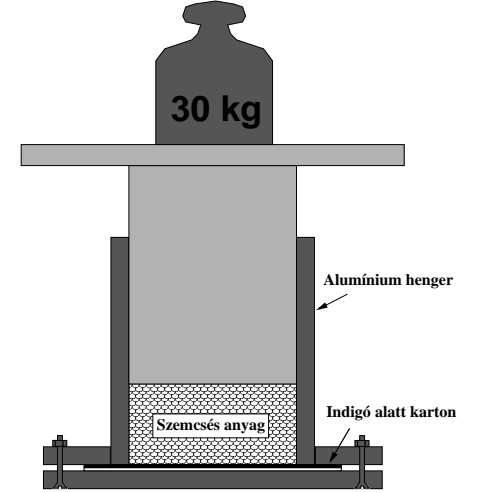
Megmutatható, hogy ha a q_{ij} -k eloszlására más feltevést teszünk, átlagtér-közelítésben akkor is hasonló eredményre jutunk, nagy v -k esetén:

$$P(v) \propto v^{N-1} e^{-av}, \quad (10)$$

ahol a konstans. Arra jutottunk, tehát, hogy a szemcséken mérhető erők eloszlása exponenciálisan cseng le. Ez jóval lassabb lecsengés, mint a Gauss eloszlásban szereplő e^{-x^2} , vagyis arra utal, hogy az átlagos erőnél lényegesen nagyobb erők súlya meglepően nagy. Ezt az eredményt fogjuk a gyakorlat során kísérletileg ellenőrizni.

3.2 A mérés

A mérést az 5. ábrán látható elrendezésben végezzük. Egy henger alakú tartó aljára kartonlapra helyezett indigót erősítünk. A tartóba szabályos üveggolyókból álló szemcsés anyagot töltünk, amelyre egy dugattyú segítségével kb.



ábra 5: Mérési összeállítás a szemcsés anyagban az egyes szemcsékre ható erők eloszlásának vizsgálatára

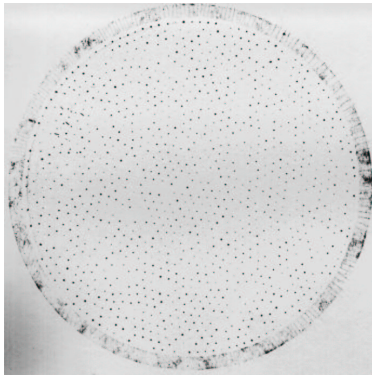
300–400 N nagyságú erővel hatunk. Az erő a szemcsés anyagban az erőláncokon keresztül továbbítódik a falaknak és az edény aljának. Az edény alján lévő szemcsék nekinyomódnak az indigónak, és a rájuk ható erővel arányos nagyságú nyomot hagynak a kartonpapíron. Így a kartonlapon lévő foltok méreteloszlásából következtethetünk az erőeloszlásra.

A kísérlet egyszerű, de odafigyelést igényel, hajtsuk végre gondosan. A kartonlapot és az indigót vágjuk méretre, és a csavarokkal erősítsük a tartó aljára. Ügyeljünk, hogy közben az indigó ne fesse meg a lapot, mert az megnehezíti az eredmény kiértékelését. Töltsünk szemcsés anyagot a tartóba. Igen fontos, hogy a töltéskor a szemcsék ne ütközzenek nagy sebességgel a tartó aljának, mert az ettől származó nyomok teljesen elmoshatják a végeredményt. Az óvatos töltésben segíthet egy, az edénybe helyezett lap, mely lefékezi a golyókat. Itt jegyezzük meg, hogy a kísérlethez használt anyag

nem olcsó, és csak külföldről szerezhető be, vigyázzunk rá, hogy ne szóródjon ki. A szemcsés anyag felszínét óvatos, vízszintes irányú rázással hozzuk vízszintesbe, ekkor ráhelyezhetjük a dugattyút. A dugattyú tetejére helyezünk ólomtéglákat, összesen 30-40 kg-ot.

Az ólomtéglák nehezek, bánjunk velük óvatosan! Vigyázzunk, hogy ne boruljon fel a berendezés a ráhelyezett súlyokkal! Ha viszont egy ólomtéglá mégis leesik, ne próbáljuk elkapni, hanem álljunk félre, mert súlyos sérüléseket okozhat!

A súlyokat néhány másodpercig hagyjuk a dugattyún, majd óvatosan vegyük le őket, és tavolítsuk el a dugattyút. (A dugattyú pontosan illeszkedik a hengerbe, ezért a levegő nehezen tud a helyére bejutni, ennek ellene szél lassan azért kiemelhető. A szemcsés anyag kiöntése és a tartó szétcsavarozása után megtekinthetjük a kapott mintázatot, ami a 6. ábrához lesz hasonló. Ezt egy scanner segítségével számítógépre vesszük, majd egy képfeldolgozó program (Matrox Inspector 3.0) segítségével meghatározzuk a foltok méreteioszlását. A képfeldolgozóhoz segítséget nyújt a Függelék, de rendelkezésre áll a program teljes dokumentációja is. A statisztikai hibák csökkentése érdekében hajtsunk végre több független mérést, és ezek együtteséből határozzuk meg az eloszlást.



ábra 6: Az indigóra nyomódó szemcsék által hagyott tipikus mintázat az erőeloszlás mérésénél.

Ahhoz, hogy a méreteioszlást erőeloszlássá transzformáljuk, meg kell be-

csülnünk, hogy egy adott foltméret mekkora erőnek felel meg. Ezt úgy tehetjük meg, hogy egy egyszerű kis eszköz segítségével ismert súlyokkal terhelünk meg egyetlen golyót, és a méréshez hasonló módon vizsgáljuk, hogy mekkora nyomot hagy az indigós papíron. Az eredményként kapott ábrában a meghatározzuk az egyes foltok méretét, és felrajzoljuk a kalibrációs görbét. Feltehetjük, hogy a foltméret – meglehetősen nagy szórással – arányos a ható erővel, és egy illesztett egyenesből csak az arányossági tényezőt kell meghatároznunk. Tartsuk észben, hogy a mérési eredmények egymással és a kalibrációval csak akkor összevethetőek, ha teljesen azonos képfeldolgozási eljárásokat hajtottunk végre rajtuk, hiszen különben azonos jeleket más nagyságúnak mérhetünk az ábrákon.

Mérési feladat

A fent ismertetett módon határozzuk meg az egyes szemcséken mérhető erő eloszlását. A kapott görbét ábrázoljuk szemilogaritmikus ábrában, ahol az exponenciális lecsengés egy egyenesként jelenik meg. Illesztünk a (10) egyenletnek megfelelő függvényalakot. Végezzünk el több mérést, vizsgáljuk meg az eloszlás függését az granuláris anyag mélységétől. Minden mért adatunkra becsljük meg a mérés hibáját is.

Függelék: A képfeldolgozás lépései

Az ábrák beszkeneléséhez kérjük a laborvezető segítségét!

1. Indítsuk el a Matrox Inspector 3.0 programot az 'Asztal'-on lévő ikon segítségével
2. Olvassuk be a megfelelő képet (**File** → **Open**)
3. Jelöljük ki az ábra értelmes tartományát
 - Állítsuk be a nagyítást úgy, hogy az egész képet lássuk (Nagyító ikon)
 - Jelöljük ki a minket érdeklő tartományt (Jobb oldalon találjuk a ROI – Region Of Interest ikonokat, a legalkalmasabb a Rotated Ellipse amelyik szaggatott kört ábrázol a közepén kereszttel)
- Mentsük el ezt a tartományt egy új ábrába (**Edit** → **Copy; Edit** → **Paste** → **Into New**)
4. Konvertáljuk a képet *8 bit Unsigned* formátumba. (**Image** → **Convert** → **8 bit Unsigned**)
5. Alkalmos küszöb alkalmazásával válasszuk szét a világos és a sötét pontokat (**Image** → **Processing** → **Threshold**). Fontos, hogy a küszöb értéke minden képre azonos legyen!

6. Határozzuk meg a foltok méretét. (**Analysis** → **Blob** → **New**, majd a menüben állítjuk be, hogy sötét foltokat keresünk (**Foreground: Black**), és a keresendő foltok minimális és maximális méretét (pl. **Min Area: 3**, **Max Area: 100**). A **Count** gomb megnyomására a gép összeszámolja a foltokat. Ellenőrizzük az ábrán, hogy csak a megfelelő pontokra talált rá a kereső, mert az apró zajszerű foltok meghamisíthatják az eredményt. A foltok adatai megjelennek egy külön ablakban (**AllRes.**).
7. Mentsük ki és dolgozzuk fel az adatokat. Az eredményeket tartalmazó ablakból közvetlenül fájlba menthetjük a kapott foltméreteket, vagy ha ebben az ablakban kijelöljük az **Area** oszlopot, akkor az **Edit** → **Export** → **Selected Features** paranccsal egy Excel táblázatba illeszthetjük őket.
8. A kalibrációs kép kiértékelésénél a 6. ponthoz nagyon hasonlóan kell eljárunk. Jelöljük ki ROI-nek egy adott erőhöz tartozó foltokat (Használjuk a jobb oldalon található ROI ikonokat). Ezek után **Analysis** → **Blob** → **New**, **Foreground: Black**; a **Min Area** és **Max Area** opciókat viszont kikapcsolhatjuk. Kattintsunk a **Segmentation** fülre és állítsuk a **Source** és a **Mask** értékét is **Last Image/ROI**-ra. Ezután már összeszámolhatjuk a foltokat (**Count**), és kiértékelhetjük a méretüket (7. pont). Ugyanígy járjunk el a többi ismert erőhöz tartozó foltcsoporttal is.

Hivatkozások

- [1] R. Chicarro, R. Peralta-Fabi, and R.M. Velasco, Segregation in dry granular systems, in *Powders & Grains 97*, Behringer and Jenkins (eds), Balkema, Rotterdam, 1997, 479-481.o.
- [2] Lásd például P.B. Umbanhowar, F. Melo, and H.L. Swinney, *Nature*, **382** 793-796.o. (1996)
- [3] G. W. Baxter, Stress distributions in a two dimensional granular material, in *Powders & Grains 97*, Behringer and Jenkins (eds), Balkema, Rotterdam, 1997, 345-348.o.

- [4] C.-h. Liu, S. R. Nagel, D. A. Szechter, S. N. Coppersmith, S. Majumdar, O. Narayan, T. A. Witten, Force fluctuations in bead packs, *Science* **269** 513-515. (1995)