

UNIVERZITET U NOVOM SADU
Poljoprivredni fakultet

DR MIRKO BABIĆ

DR LJILJANA BABIĆ

FIZIČKE OSOBINE
POLJOPRIVREDNIH MATERIJALA
(AUTORIZOVANA PREDAVANJA)

NOVI SAD, 2007

UVOD

Inženjerski pristup rešavanju problema u projektovanju i eksploataciji poljoprivredne tehnike zahteva poznavanje osobina poljoprivrednih materijala. Sa aspekta tehnike najvažnije je poznavanje fizičkih osobina poljoprivrednih materijala. Postoji više razloga zbog čega je to važno:

1.Kvalitetno konstruisanje uređaja ili aparata u poljoprivrednoj tehnici obavezno polazi od osobina materijala za koju je ta naprava predviđena.

2.Radni organi mašine moraju biti tako projektovani da vode računa o mogućim oštećenjima koja mogu nastati na poljoprivrednom materijalu.

3.Podešavanje nekog uređaja ili aparata za rad zavisiće od osobina materijala koji se obrađuje.

4.Merenjem neke osobine materijala, ukoliko se znaju međuzavisnosti, moguće je saznati kakvo je stanje materijala u pogledu vlažnosti ili nekog drugog pokazatelja stanja robe.

Podela:

A-Osnovne fizičke osobine,

B-Posebne fizičke osobine,

1-Mehaničke osobine,

1.1.Reološke osobine,

1.2.Osobine površinskog kontakta,

1.3.Mehanička otpornost na oštećenja,

1.4.Osobine trenja,

2-Strujne osobine (aero i hidrodinamičke osobine),

3-Termičke osobine,

4-Električne osobine,

5-Optičke osobine i

6-Akustične osobine.

1.OSNOVNE FIZIČKE OSOBINE

1.1.Dimenzije

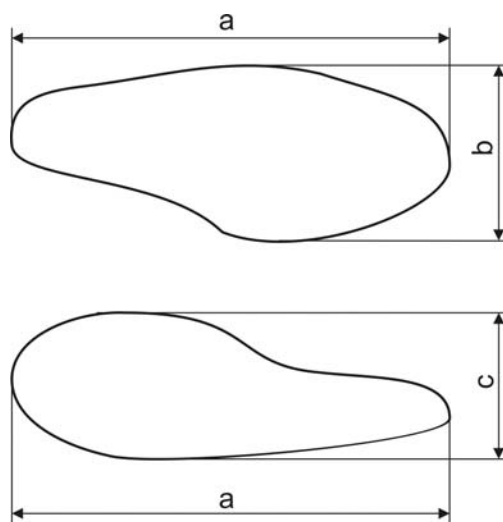
Veličina plodova, delova biljke, proizvoda stočarstva ili nekih drugih poljoprivrednih materijala može da se izrazi opisno (npr: "malo", "veliko", "dugačko", "kratko" i sl). To je kvalitativni iskaz. Inženjerski pristup u rešavanju zadataka u oblasti projektovanja ili eksploatacije zahteva kvantitativno iskazivanje (iskazivanje broječanom vrednošću) veličine objekta. Ustanovljeno je da je jednoznačno definisanje tri dimenzije najpogodniji način iskazivanja veličine objekta. U svetskoj i domaćoj literaturi prihvaćeno je determinisanje veličine objekta pomoću tri koaksijalne dimenzije (sl.1.1). One se definišu na sledeći način:

a - **dužina** - apsolutno najveća dimenzija,

b - **širina** - najveća dimenzija normalna na pravac merenja dužine i

c - **debljina** (ili visina) - najveća dimenzija normalna na pravce merenja dužine i širine.

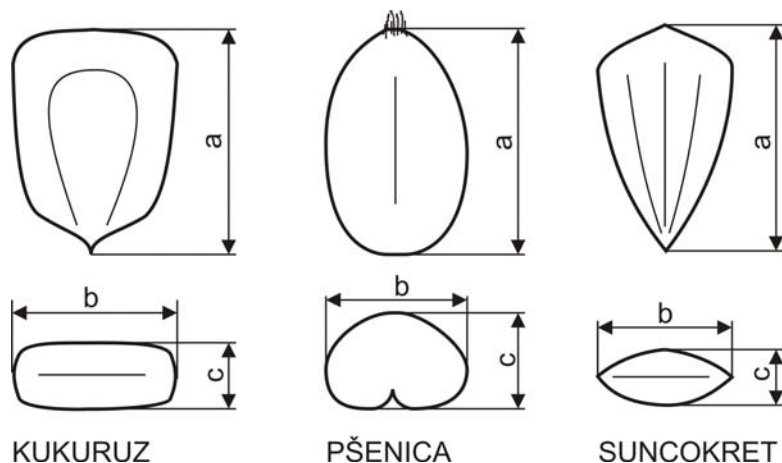
Na proizvoljnom slučaju, prikazanom na slici (sl. 1.1) dat je primer merenja sve tri koaksijalne dimenzije.



Sl.1.1. Osnovne dimenzije veličine ploda

Pojavila se potreba da se jednom dimenzijom izrazi veličina objekta. Pokazalo se da je za to najpodesnija definicija ekvivalentnog prečnika - d_e . **Ekvivalentni prečnik je prečnik kugle (sfere) koja ima istu zapreminu kao objekt.** Dakle, ekvivalentni prečnik, na određeni način, zamenjuje sve tri dimenzije.

Poznavanje dimenzija plodova, delova biljke, proizvoda stočarstva i ostalih poljoprivrednih proizvoda važno, pre svega za sortiranje, separisanje i prečišćavanje poljoprivrednih proizvoda. Razdvajanje proizvoda na bazi dimenzija je jedan od najzastupljenijih postupaka na poljoprivrednim mašinama. To je jedan od najčešće primenjivanih postupaka jer je najjednostavniji i najjeftiniji. Separacija se obavlja jednostavnim postupkom pomoću sita raznih dimenzija i oblika otvora. Noviji postupci separacije semena su zasnovani na separisanju na bazi sve tri definisane dimenzije. Primer definisanja osnovnih dimenzija za neke zrnaste proizvode dat na slici (sl. 1.2)



Sl.1.2. Osnovne dimenzije veličine ploda

1.2.Oblik

Oblik se može deskriptivno (opisno) izraziti na različite načine. To je kvalitativno iskazivanje. Može se reći da je oblik nekog objekta poljoprivrednog materijala:

- okruglast (sferičan, kuglast),
- izdužen,
- duguljast,
- koničan,
- jajast,
- eliptičan (oblik elipsoida)
- iskrivljen,
- zarubljen,
- izbrazdan itd.

Opisivanje oblika na prethodni način nije dovoljno. U tehnici se traži kvantitativno izražavanje neke osobine. Zbog toga su uvedeni pojmovi zaobljenosti i sferičnosti.

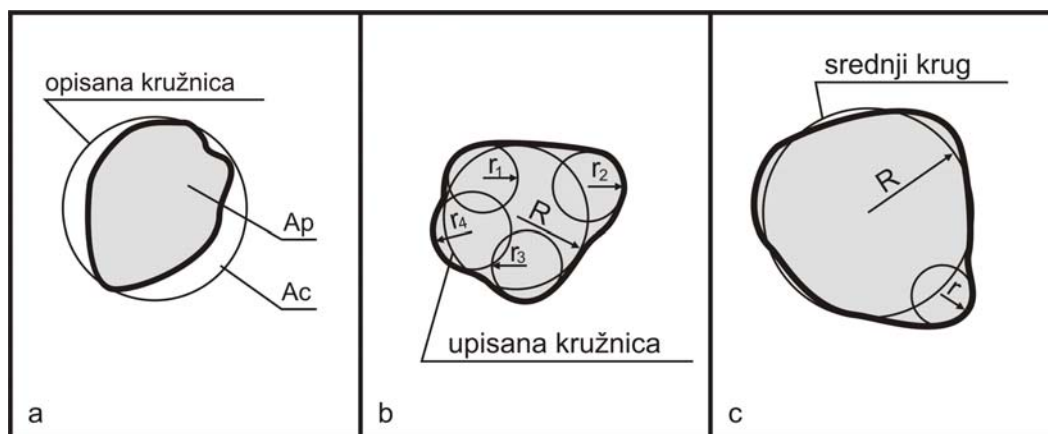
1.2.1.Zaobljenost

Currey je 1951. godine predložio tri načina definisanja zaobljenosti (σ_o - zaobljenost) poljoprivrednih proizvoda. Ove definicije su zasnovane na analizi preseka objekta. Analitički izrazi ovih definicija su:

$$\text{a) } \sigma_o = \frac{A_p}{A_c} \quad (\text{sl. 1.3a}) \quad (1.1)$$

$$\text{b) } \sigma = \frac{1}{NR} \sum_{i=1}^N r_i \quad (i = 1, 2, \dots, N), (\text{sl. 1.3b}) \quad (1.2)$$

$$\text{c) } \sigma = \frac{r}{R} \quad (\text{sl. 1.3c}) \quad (1.3)$$



Sl. 1.3. Definicije zaobljenosti

Zaobljenost po prvoj definiciji (j. 1.1) predstavlja odnos površine poprečnog preseka objekta i površine opisanog kruga oko poprečnog preseka objekta. Za izračunavanje po drugoj definiciji (j. 1.2) potrebno je napraviti poprečni presek, a potom upisati krugove u zaobljenja konture preseka kako je to pokazano primerom na slici 1.2b. Nakon toga potrebno je izmeriti sve poluprečnike tako upisanih krugova (r_1 do r_N). Potom se u konturu poprečnog preseka ucrtava najveći upisani krug, čiji se poluprečnik - R takođe izmeri. Sa ovako određenim vrednostima pristupa se izračunavanju po datom obrascu (j. 1.2). Treći način izražavanja zaobljenosti objekta zasniva se na merenju poluprečnika najmanjeg zaobljenja - r krive koja predstavlja konturu poprečnog preseka objekta. Ova vrednost se deli sa poluprečnikom srednjeg kruga (krug koji ima površinu jednaku površini poprečnog preseka objekta)

1.2.2. Sferičnost

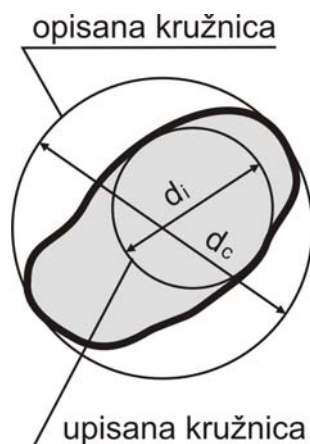
Curry je definisao i veličinu sferičnosti na dva načina. **Prvi način** je zasnovan na analizi preseka objekta (sl. 1.4.):

$$\sigma = \frac{d_e}{d_c} \quad (1.4)$$

gde je:

d_i - prečnik upisanog kruga u konturu poprečnog preseka objekta i

d_c - prečnik opisanog kruga u konturu poprečnog preseka objekta.



Sl. 1.4. Definicija sferičnosti na osnovu preseka objekta

Drugi način definisanja sferičnosti zasnovan je na posmatranju trodimenzionalnosti tela. Sferičnost se u ovom slučaju definiše kao odnos ekvivalentnog prečnika i prečnika opisane sfere oko objekta

$$\sigma = \frac{d_e}{d_c} \quad (1.5)$$

gde je:

d_e - ekvivalentni prečnik i

d_c - prečnik opisane sfere oko objekta (najveća dimenzija objekta - a).

Veliki broj plodova se aproksimativno može smatrati elipsoidom. Elipsoid je telo čiji je svaki (proizvoljan) presek ima oblik elipse (sl.1.5).

Na osnovu izraza za sferičnost (j.1.5) može se napisati:

$$\sigma = \frac{d_e}{d_c} = \frac{\sqrt[3]{\frac{6V_o}{\pi}}}{\sqrt[3]{\frac{6V_c}{\pi}}} = \frac{\sqrt[3]{V_o}}{\sqrt[3]{V_c}} \quad (1.6)$$

gde je:

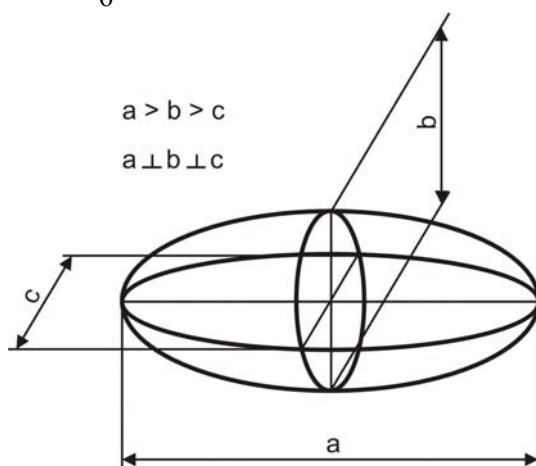
V_o - zapremina objekta i

V_c - zapremina opisane sfere.

Iskazane zapremine mogu se za izraziti na sledeći način:

za elipsoid: $V_o = \frac{abc\pi}{6}$ i

za opisanu sferu: $V_c = \frac{a^3\pi}{6}$



Sl. 1.5 Elipsoid

Zamenom ovih izraza u jednačinu 1.6 i sređivanjem dobija se:

$$\sigma = \frac{\sqrt[3]{abc}}{a} \quad (1.7)$$

Iz definicije ekvivalentnog prečnika za sferu dobija se:

$$d_e = \sqrt[3]{abc} \quad (1.8)$$

Iz ovog proističe da se sferičnost se za elipsoid može izračunati na sledeći način:

$$\sigma = \frac{d_e}{a} \quad (1.9)$$

Prethodni izraz (j. 1.9) služi za određivanje sferičnosti za veliki broj poljoprivrednih materijala, najčešće plodova. Naravno, da geometrijski definisani elipsoidi u prirodi ne postoje ali je veliki broj plodova i drugih poljoprivrednih materijala sličan obliku elipsoida te se bez velike greške izraz 1.9 može koristiti. Ovaj izraz ujedno je i najpogodniji za određivanje sferičnosti, jer je dovoljno izmeriti tri karakteristične dimenzije (a , b i c), koje su ranije definisane.

U tabeli 1.1. daje se sferičnost za nekoliko vrsta plodova, koja je određivana na prethodno opisani način:

Tabela 1.1. Sferičnost nekih plodova

Plod	Sferičnost (%)
jabuka	89 - 95
breskva	93 - 97
pšenica	54 - 68
ječam	42 - 47

Neki istraživači su uveli odnos zapremine i projekcije površine kao kvantitativni pokazatelj oblika poljoprivrednih materijala.

1.3. Zapremina

Često se ukazuje potreba poznavanja zapremine poljoprivrednih proizvoda. Zbog raznolikosti oblika i veličina poljoprivrednih materijala metode određivanja zapremine su različite. Najjednostavniji metod određivanja zapremine većih plodova i proizvoda prikazan je na slici 1.6a. Za merenje je potrebna vaga, posuda (najpodesnija je staklena) i stalak sa koncem (zbog male zapremine konca). Određivanje zapremine je jednostavno. U posudu se nalije tečnost poznate gustine. Tečnost se sipa do određenog nivoa vodeći računa o tome da, kada se zaroni uzorak, ne dođe do prelivanja tečnosti iz posude. Posuda sa tečnošću se postavi na vagu i odmeri se masa M_I . U tom momentu uzorak je u položaju - I (sl 1.6a). Nakon toga se uzorak spusti da u potpunosti bude potopljen, ali da ne dodiruje dno ili bočne strane posude, te se odmeri masa M_{II} (što odgovara položaju uzorka - II). Na bazi ta dva merenja izračunava se zapremina po sledećem obrascu (koji sledi iz *Arhimed*-ovog zakona):

$$V_m = \frac{M_{II} - M_I}{\rho_t}$$

(1.10)

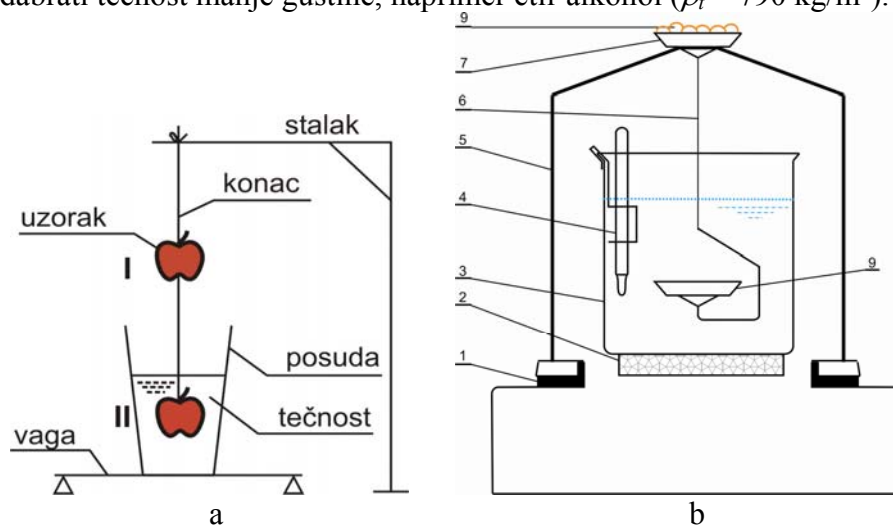
gde je:

V_m - zapremina uzorka i

ρ_t - gustina tečnosti.

Za eksperiment je potrebno imati tečnost poznate gustine. To može biti destilovana voda, ali merenje treba obaviti brzo zbog higroskopnosti poljoprivrednih materijala. Ukoliko je gustina

uzorka manja od gustine destilovane vode on će plivati pa ga treba dodatno potisnuti u vodu, vertikalnom silom naniže, da potpuno zaroni. Da se izbegle greške koje pri tome mogu nastupiti povoljnije je odabrati tečnost manje gustine, naprimer etil-alkohol ($\rho_t = 790 \text{ kg/m}^3$).



Sl. 1.6. Određivanje zapremine i gustine poljoprivrednih materijala (legenda za sliku b: 1 – vaga, 2 - postolje za čašu, 3 – čaša, 4 – termometar, 5 - ram sa platformom, 6 – žica, 7 - posuda za uzorak – tas vage, 8 – uzorak i 9 - posuda za uzorak za perforiranim dnom)

Za slučaj potrebe određivanja zapremine sitnijih proizvoda može se primeniti metod prikazan na slici 1.6b. Za merenje su potrebni analitička vaga i posuda (najbolje staklena). Poznati broj uzoraka (8) stavi se na gornji tas vage (7) i odredi se masa M_I koja, ustvari, predstavlja masu svih uzoraka. Potom se uzorci premeštaju na tas koji je zaronjen u tečnost poznate gustine ρ_t i očitava se masa M_{II} . „Razlika u masi” je posledica dejstva sile potiska naviše po Arhimedovom zakonu.

Izraz za određivanje zapremine svih uzoraka V_m :

$$V_{mbruto} = \frac{M_I - M_{II}}{\rho_t} \quad (1.11)$$

Srednja zapremina pojedinačnog uzorka izračunava se deljenjem neto zapremine svih uzoraka sa ukupnim brojem uzoraka (N):

$$V_{m1} = \frac{V_m}{N} = \frac{V_{mbruto} - V_t}{N} \quad (1.12)$$

1.4.Masa

Masa objekta (ploda i sl.) je veoma važna osnovna fizička osobina - m_1 . Za objekte veće mase ona se meri pomoću vage.

Za zrnaste poljoprivredne proizvode uveden je pojam **mase hiljadu zrna** - m_{1000} . Određuje se tako što se izbroji 1000 zrna pa se potom utvrdi njihova masa pomoću analitičke vage. Odbrojavnje zrna mora biti izvedeno što je moguće objektivnije. Preporučuje se da se radi objektivnosti zrna uzimaju redom iz odabranog uzorka. Radi ubrzavanja odbrojavnja konstruisane su različite naprave i automatski uređaji. Postoje ploče sa alveolama (udubljenjima) veličine koja je adekvatna za pojednine vrsta zrna. Zrnevlje se postavi i raširi po ploči, tako da po jedno zrno zauzme svaku alveolu. Višak zrna se skine, a zrna iz alveola se prikupe i izmeri njihova masa. Ploče se obično

izrađuju sa 100 alveola. To znači da je potrebno postupak ponoviti 10 puta i svih 1000 zrna izmeriti zajedno. Automatski uređaji rade na principu usmerenog kretanja zrna prema otvoru u koga je postavljena foto ćelija. Foto ćelija registruje prolazak svakog zrna i kumulativno ih sabira. Zrna ispadaju u ogdovarajuću posudu. Automat se sam zaustavlja kada broj zrna dostigne zadatu cifru (uobičajeno 1000). Nakon toga odmeri se masa ovako odbrojanih zrna. Ovakvi uređaju su veoma pogodni za laboratorije u kojima se odmeravanje mase 1000 zrna obavlja često. Sve je češća praksa i u Srbiji da se seme isporučuje u setvenim jedinicima odnosno tačno određenom broju komada. Za takve slučajeve veoma je važno poznavanje mase 1000 zrna.

1.5. Gustina

Zbog heterogenosti rasporeda komponenti unutar zrna, polje gustine unutar biljnog materijala je heterogeno. Srednja vrednost gustine je definisana za materijal u celini po opštem izrazu iz fizike, kao odnos mase uzorka (objekta) i njegove zapremine:

$$\rho = \frac{m_1}{V_{m1}} \text{ ili } \rho = \frac{m}{V_m} \quad (1.13)$$

gde je:

ρ - gustina,

m_1 - masa jednog objekta (zrna, ploda i sl.),

V_{m1} - zapremina jednog objekta (zrna, ploda i sl.),

m - masa uzorka i

V_m - neto zapremina mase uzorka.

Eksperiment prikazan na slici 1.5a može poslužiti i za određivanje gustine, nakon određivanja zapremine. Potrebno je samo odrediti masu uzorka na analitičkoj vagi i izračunati gustinu prema izrazu (j. 1.13).

Slično se može iskoristiti metoda prikazana na slici 1.6b, koja je namenjena sitnijim uzorcima. Na bazi merenja koja su obavljena za određivanje zapremine može se odrediti i gustina koristeći izraz (j. 1.13).

1.6. Poroznost

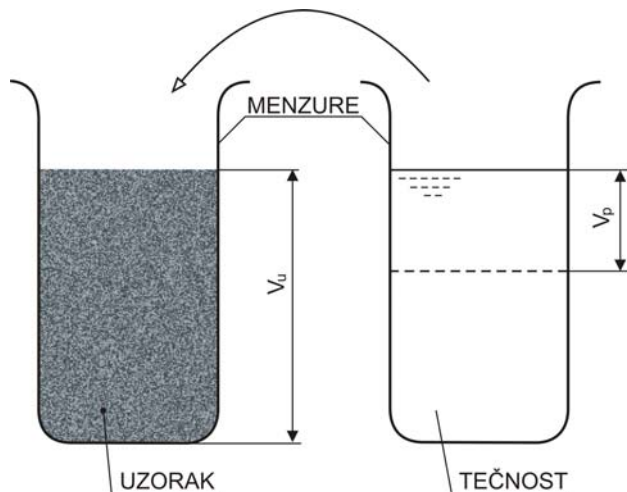
Poroznost je fizičko svojstvo nasutog materijala. Ona predstavlja odnos zapremine prostora (V_p) između čestica (plodova, biljne mase i sl.) i ukupne zapremine nasutog materijala uključujući prostor između čestica (V_u).

$$e = \frac{V_p}{V_u} \quad (1.14)$$

Poroznost je skalarna veličina. Poroznost je promenljiva unutar sloja nasutog materijala. Srednja vrednost poroznosti određuje se na reprezentativnom uzorku najčešće na dva osnovna načina: metodom nalivanja tečnosti i piknometarskim metodama. Metod nalivanja tečnosti je direktna metoda jer se pomoću nje direktno određuju zapremina prostora između čestica i ukupna zapremina uzorka, uključujući i zapreminu između čestica. Piknometarske metode su veoma različite. Kod ovih metoda poroznost se određuje indirektno. Najčešće korišćeni piknometarske metode zasnovani su na principu poznavanja izotermских promena stanja vazduha (promena stanja vazduha pri konstantnoj temperaturi).

1.6.1. Metod nalivanja tečnosti

Zapremina vazdušnog prostora unutar sloja nasutog materijala se može odrediti određivanjem zapremine nalivenog nestišljivog fluida u vazdušni prostor između čestica (sl. 1.7). Nestišljivi fluid mora imati takve osobine površinskog napona koje omogućavaju dobro istiskivanje vazduha, ali da istovremeno ne dolazi do brzog i bitnog prodiranja u makropore i mikropore nasutog materijala. Manje viskozna ulja su pogodna za ovakvu metodu. U laboratorijama se uobičajeno koristi rafinisano biljno ulje.



Sl. 1.7. Određivanje poroznosti metodom nalivanja tečnosti

Za merenje su potrebne dve menzure i pogodna tečnost. Uzorak materijala naspe se u menzuru 1 do poznate zapremine (za zrnaste materijale to može biti 1000 ml). Tečnost za merenje je nasuta u menzuru 2 do tačno poznate zapremine. Potom se tečnost iz menzure 2 brzo naliva u menzuru 1 u kojoj je uzorak, i pri tome se menzura 1 lagano protresa kako bi se istisnuo sav vazduh. Tečnost se nalije do početne zapremine uzorka - V_p . Nakon toga se očitava ukupna zapremina tečnosti koja je nalivena u menzuru 1. To je zapremina koja nedostaje u menzuri 2. Na bazi prethodnog objašnjenja i slike (sl. 1.7) može se izračunati poroznost po izrazu (j.1.14).

Metoda nalivanja tečnosti je pogodna za materijale koji nisu izrazito higroskopni (voće, određene vrste povrća, zrnasti poljoprivredni proizvodi i sl.). Treba imati u vidu da je poroznost uz granice posude veća nego u sredini te se ovakvim merenjem pravi izvesna greška. Ta greška je manja ako je zapremina posude veća. Korišćenjem cilindričnih posuda pravi se manje greška nego kada se koristi prizmatična posuda.

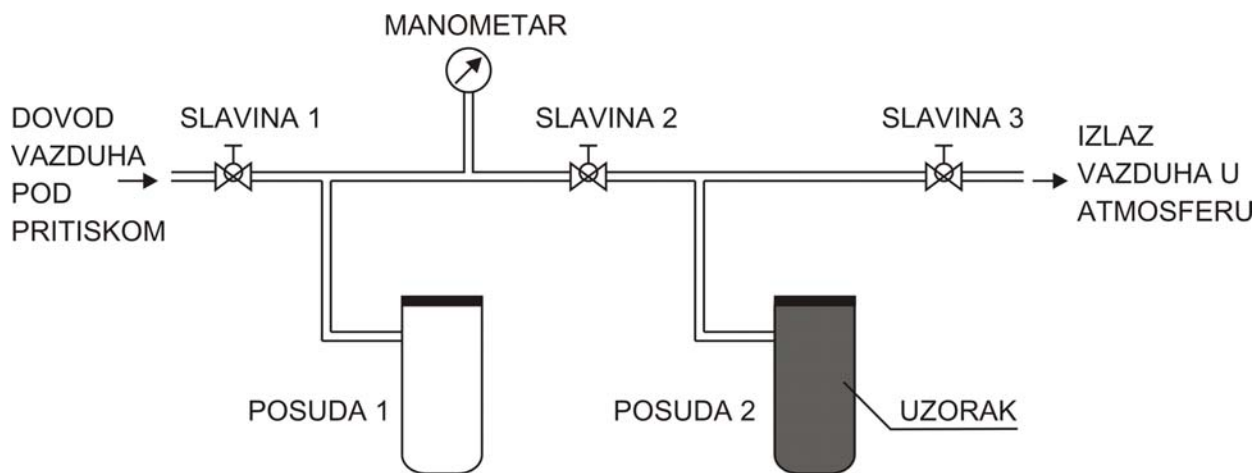
1.6.2. Piknometarski metod

Najčešći primenjivani piknometarski metod određivanja poroznosti je zasnovan na poznavanju promene stanja idealnog gasa. S obzirom na činjenicu da se vazduh, praktično, može smatrati idealnim gasom, on se i koristi u takvom merenju zapremine međučestičnog prostora.

Postoji veliki broj raznih izvedbi piknometara. Na slici (sl. 1.8) prikazan je jedan od najjednostavnijih, kako bi se shvatila metoda (Day, 1964). I ostali vazušni piknometri su zasnovani na izotermnim promenama stanja vazduha, koji se može smatrati idealnim gasom.

Uzorak se postavi u posudu 2. Vazduh pod pritiskom dovodi se sa leve strane, pri čemu je slavina 1 otvorena a slavina 2 zatvorena. Zatvori se slavina 1 i sačeka se da se temperatura sabijenog vazduha izjednači sa okolinom, nakon čega se očitava pritisak na manometru p_1 . Treba uočiti da je posmatrana masa (količina) vazduha M zauzela zapreminu posude 1 - V_1 . Zapremine

posude 1 i posude 2 su jednake. Sledeća etapa merenja je otvaranje slavine 2 pri čemu su slavine 1 i 3 zatvorene. Posmatrana masa vazduha zauzima prostor zapremine V_1 i prostor između čestica u posudi 2 - V_2 . Treba uočiti da se merenjem u ovom piknometru pravi greška pošto se zanemaruje zapremina cevnih vodova (koja je relativno mala u odnosu na posude). Greška nastaje i zbog zaostalog vazduha u prostoru između čestica pre otvaranja slavine 2. Ako se želi tačnije merenje ova sistematska greška se može eliminisati korekcionim računom. Nakon izvesnog vremena, kada se temperatura vazduha u piknometru izjednači sa okolinom (zbog ekspanzije prigušivanjem je došlo do sniženja temperature vazduha), očitava se pritisak na manometru p_2 . Nakon očitavanja ovog pritiska otvara se slavina 3 i vazduh se ispušta u atmosferu. Dakle, u ovom piknometarskom metodu očitali smo samo dve veličine pritiske p_1 i p_2 .



Sl. 1.8. Piknometar po Day-u

Ukupna masa vazduha (M) u eksperimentu je jednaka masi vazduha u posudi 1 pre otvaranja slavine 2. Nakon otvaranja slavine 2 ukupna masa vazduha se nalazi u posudi 1 (M_1) i u prostoru između čestica u posudi 2 (M_2). Sledi:

$$M = M_1 + M_2 \quad (1.15)$$

Jednačina stanja idealnog gasa glasi:

$$pV = MRT \quad (1.16)$$

gde je: R - gasana konstanta, a T - apsolutna temperatura vazduha. Iz jednačine 1.16 sledi:

$$M = pV/RT \quad (1.17)$$

Uvođenjem jednačine stanja idealnog gasa (j.1.17) u izraz j.1.15 dobija se:

$$\frac{p_1 V_1}{RT} = \frac{p_2 V_1}{RT} + \frac{p_2 V_2}{RT} \quad (1.18)$$

S obzirom da je u ovom eksperimentu:

$$V_u = V_1 ; V_p = V_2 \quad (1.19)$$

može se nakon skraćivanja (jer je $T = \text{const}$ - izotermaska promena stanja vazduha) i eksplicitnog izražavanja odnosa V_2/V_1 koji ustvari predstavlja poroznost e , dobija se:

$$e = \frac{V_p}{V_u} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1 - p_2}{p_2} \quad (1.20)$$

Dakle, na osnovu očitanih vrednosti pritiska p_1 i p_2 izračunava se poroznost.

Piknometarski metodi su pogodni za higroskopne materijale i materijale koji svojim oblikom čestica ne dozvoljavaju eliminisanje vazduha iz prostora između čestica, pri određivanju poroznosti metodom nalivanja tečnosti. To su pre svega stabljike i lišće biljaka, ali i drugi poljoprivredni materijali.

1.7. Nasipna gustina (nasipna masa)

Nasipna gustina (nasipna masa) je, takođe, fizičko svojstvo nasutog materijala. U poljoprivrednoj praksi ova veličina naziva se hektolitarska masa (ili hektolitarska težina - što je nepravilno, jer to nije težina) i izražava se masom zrna u jednom hektolitru zapremine. Radi koherentnosti jedinica pogodniji je način izražavanja kao što je to uobičajeno u fizici:

$$\rho_n = \frac{m}{V_u} \quad (1.21)$$

Pri ovakvom nazivu i ovakvom definisanju, koji su veoma slični definisanju gustine materije, ipak, treba imati u vidu izvesnu nedoslednost. Naime nasipna gustine se definiše na ukupnu zapreminu, uključujući zapreminu prostora između čestica, te reč "gustina" treba uslovno da se prihvati.

Uobičajeni način za određivanje nasipne gustine je odmeravanje mase poznate zapremine nasutog reprezentativnog uzorka. U poljoprivrednoj praksi merenje nasipne mase nekih žitarice (strna žita - pšenica, ječam, raž, ovas i sl.) se obavlja pomoću instrumenta koji se zove hektolitarska vaga. Ova metoda je i standardizovana. Hektolitarska vaga (sl. 1.9) radi na principu merenja nasute mase zrna u poznatu zapreminu, ali se pri tome nasipanje izvodi pod jednakim uslovima za sve uzorke. Pored toga, postoji korekciona tabela za eliminisanje grešaka koja nastaje zbog nešto veće poroznosti u blizini granica merne posude.

Za materijale za koje se ne može koristiti hektolitarska vaga, nasipnu gustinu treba odrediti tako što će se uzorak nasutog materijala postaviti u što veću posudu (zbog smanjenja greške merenja koja nastaje zbog povećane poroznosti u sloju uz granice posude) poznate zapremine, a potom odrediti neto masu materijala. Nakon toga nasipna masa se izračunava po poznatom izrazu (j. 1.21)

Osnovne fizičke osobine materijala: gustina - ρ , nasipna gustina - ρ_n i poroznost - e , su međusobno egzaktno povezana. Ako se jednačina 1.21 подели sa jednačinom 1.13 dobija se sledeće:

$$\frac{\rho_n}{\rho} = \frac{\frac{m}{V_u}}{\frac{m}{V_m}} = \frac{V_m}{V_u} \quad (1.22)$$

Ako se uzme u obzir da je:

$$V_u = V_m + V_p \quad \text{ili} \quad V_m = V_u - V_p \quad (1.23)$$



Sl. 1.9. Hektolitarska vaga

a koristeći izraz (j.1.14) dobija se:

$$\frac{\rho_n}{\rho} = \frac{V_u - V_p}{V_u} = 1 - \frac{V_p}{V_u} = 1 - e \quad (1.24)$$

ili:

$$\rho = \frac{\rho_n}{1 - e} \quad (1.25)$$

Ova jednačina omogućava da se, na bazi merenja bilo koje dve posmatrane veličine, treća veličina odredi računskim putem.

2. MEHANIČKE OSOBINE POLJOPRIVREDNIH MATERIJALA

2.1. Značaj

Mehaničke osobine poljoprivrednih materijala definišu se na veoma veliki broj načina. To je posledica velike raznovrsnosti geometrijskih i mehaničkih osobina materijala. Ako je reč samo o biljkama već tada se javlja ta raznolikost (plod, stabljika, list, koren i cvet), a tu su i proizvodi stočarstva (mleko, jaja), stajnjak, osoka itd. Interes za izučavanjem mehaničkih osobina potiče od sledećeg:

a) Poznavanje mehaničkih osobina je osnova konstruisanja i eksploatacije poljoprivrednih mašina i opreme. Tu je pre svega aspekt potrebe za razaranjem materijala (košenje, seckanje, mlevenje, otkidanje, trešenje, krunjenje, ljuštenje, transport fluidnih materijala, briketiranje, peletiranje, presovanje, ekstruzija itd). U svim ovim slučajevima potrebno je pouzdano znati kojim spoljnim uticajima (sile, pritisci, brzine i sl.) može da se obavi određena mehanička operacija.

b) Očuvanje poljoprivrednih materijala od oštećenja je veoma važna oblast poznavanja mehaničkih osobina poljoprivrednih materijala. Radni organi mašina su u kontaktu sa poljoprivrednim materijalima. Potrebno je tako projektovati radne organe da ne dođe do oštećenja poljoprivrednih materijala, ali isto tako podesiti mašinu da se eliminiše ili smanji moguće oštećenje (ubiranje plodova, transport i manipulacije u skladištima, dorada plodova, prikupljanje i manipulacija jajima, ubiranje cveta i lišća lekovitog bilja, separacije biljnih materijala i sl.).

c) Istraživanje građe biljke i mehanička svojstva pojedinih delova te građe mogu biti dobar uzor u pogledu razvoja konstrukcija i komponovanja materijala u svakdnevoj mašinskoj i građevinskoj praksi (primeri vlaknastih kompozitnih materijala).

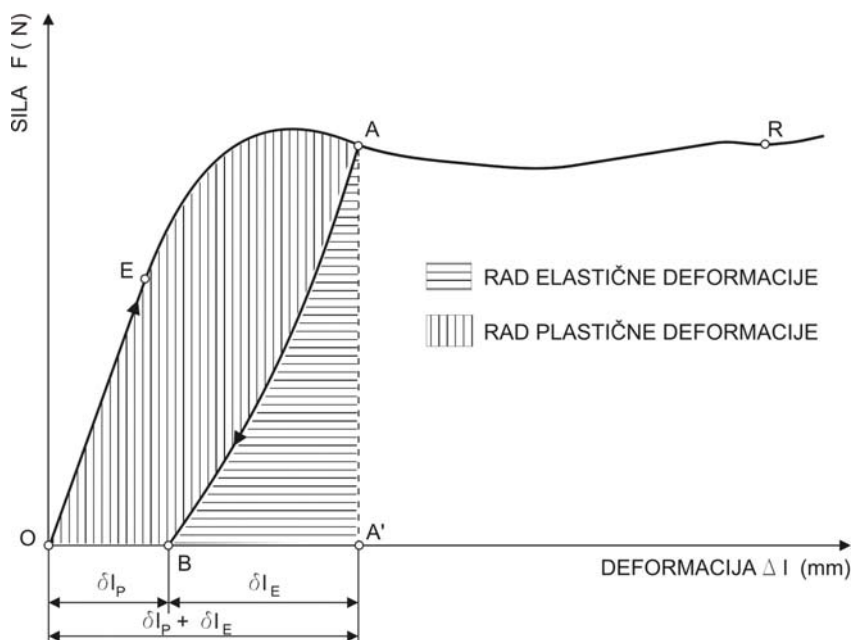
d) Izučavanje mehaničkih osobina poljoprivrednih materijala je veoma važno za genetičare, radi provere predviđenih efekata u tom pogledu. Poznato je da je jedan od zahteva pred genetičarima i selekcionarima razvijaju biljke u pravcu povećane mehaničke otpornosti na poleganje i oštećenja drugih delova biljke.

2.2. Mehanička čvrstoća biljnih materijala

Slično mašinskim i građevinskim materijalima i poljoprivredni materijali se ispituju na istezanje, pritisak, smicanje, savijanje i uvijanje. Upotreba standardne "epruvete", u slučaju poljoprivrednih materijala, je nemoguća, pa ostaje neminovnost da se ovi materijali uzimaju u izvornom obliku i dimenzijama. To, naprimer, znači, da će se mehanička čvrstoća stabljike pšenice ispitati za uzorke stabljike koji se odaberu kao reprezentativni. Ovakav prilaz zahteva specifikaciju svih relevantnih uslova (vlažnost, sorta, koji deo stabljike je uzet, dimenzije, agrotehnički i klimatski uslovi proizvodnje i sl.) i rezultati će važiti samo za te uslove. Pored toga zbog statističkog rasipanja osobina mora se uzeti dovoljan broj uzoraka, na kome se utvrđuju osobine, kako bi se smanjile greške u zaključcima (rezultatima). Pored toga, zbog različitosti dimenzija, oblika i mehaničke otpornosti materijala aparature nisu univerzalne, te se moraju tako konstruisati da budu podesne za srodnu grupu materijala.

Teorija otpornosti materijala je primenjiva i u slučaju poljoprivrednih materijala. Pri ispitivanju poljoprivrednih materijala, vrlo često, se traže zavisnosti deformacije od sile, za razliku konvencionalnih inženjerskih materijala kada se utvrđuje zavisnost deformacija-apon. Na slici 2.1. prikazan je opšti slučaj zavisnosti deformacija-sila opterećenja za poljoprivredne materijale. Za neki uzorak poljoprivrednog materijala koji se, naprimer, postavi u kidalicu, obavlja se proba i konstruiše se dijagram. Pri manjim opterećenjima dešava se nešto slično kao sa tehničkim materijalima, postoji oblast elastičnosti, materijal se elastično deformiše (nakon rasterećenja vraća mu se prvobitni oblik). Ova oblast naprezanja je do tačke E (sl. 2.1.). U ovoj oblasti važi *Hook*-ov

(Hukov) zakon. Nakon tačke E, materijal počinje da se deformiše i elastično i plastično. Ponašanje poljoprivrednih materijala kao čvrstih tela traje sve do granice A. Rasterećenjem nakon ovakve deformacije materijal ostaje izdužen za plastičnu deformaciju - δl_p (na sl.2.1. to je duž O-B). Elastična deformacija, koja je prethodila iznosila je δl_E , što odgovara duži B - A'.



Sl. 2.1. Dijagram sila - deformacija za poljoprivredni materijal

Površina ispod linije AB (površina ABA') proporcionalna je radu elastične deformacije. Da bi se izračunao rad elastične deformacije potrebno je izmeriti ovu površinu i pomnožiti je razmerom za silu i razmerom za deformaciju.

Površina definisana konturom OEAB proporcionalana je radu plastične deformacije. Pri izračunavanju ovog rada potrebno je, takođe da se izmerena površina pomnoži sa razmerama za silu i deformaciju.

Opterećeni materijal se ponaša kao čvrsto telo sve do momenta dok se ne dostigne granično stanje (napon i deformacija) koje odgovara tački A. Nakon dostizanja ove granice (odgovara granici razvlačenja kog čvrstih materijala) materijal počinje da "teče". Osobine materijala u oblasti desno od tačke A odgovaraju osobinama tečnosti. Zbog toga, u ovoj oblasti deformisanja materijala, treba poznavati reološke osobine, kao za nestišljive (tečne) fluide. U tački R dolazi do dezintegracije materijala.

U oblasti elastičnog deformisanja, dok materijal ima osobine čvrstog tela, definiše se modul elastičnosti. Modul elastičnosti je koeficijent proporcionalnosti normalnog napona i relativne deformacije. Po Hukovom zakonu on je:

$$E = \frac{\sigma}{\frac{\Delta l}{l}} \quad (\text{N/m}^2) \quad (2.1)$$

gde je:

E - modul elastičnosti,

σ - normalni napon,

Δl - izduženje pri deformisanju,

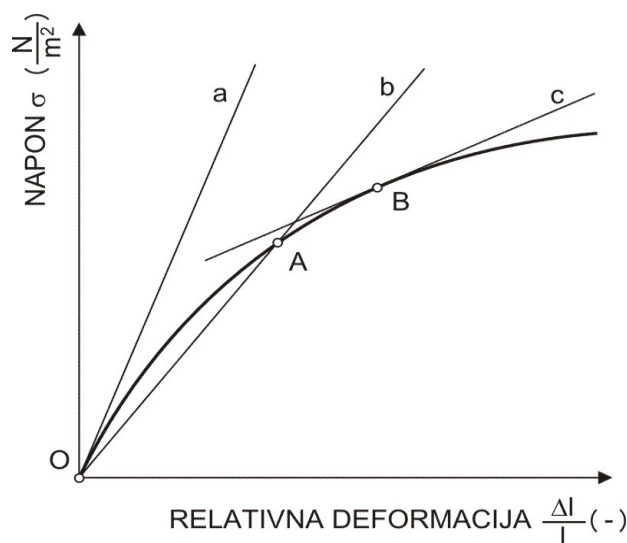
l - dužina uzorka koji se deformiše i

$\Delta l/l$ - relativna deformacija uzorka koji se deformiše.

Za poljoprivredne materijale definiše se i stepen elastičnosti (n_e):

$$n_e = \frac{\delta E}{\delta E + \delta P} \quad (\text{prema sl. 2.1.}) \quad (2.2)$$

Međutim, poljoprivredni materijali često, već na samom početku deformisanja nemaju linearnu karakteristiku. Zbog ove specifičnosti definiše se početni tangentni modul elastičnosti, sekantni modul elastičnosti i tangentni modul elastičnosti (sl. 2.2.). Modul elastičnosti u ovom dijagramu je tangens ugla nagiba između označene prave (tangenta ili sečica) i apscise. Kada se dobije dijagrama napon - relativna deformacija, za određivanje ovako definisanih modula elastičnosti, potrebno je ucrtati odgovarajuće prave (tangente ili sečice) pa nakon očitavanja tangensa ugla isti je potrebno pomnožiti sa razmerom za napon i podeliti razmerom za relativnu deformaciju. Za tako dobijenu vrednost ugla odredi se tangens ugla koji predstavlja odgovarajući modul elastičnosti. Početni tangentni modul elastičnosti ima značaj za veoma mala opterećenja materijala. Tangentni modul elastičnosti primenjiv je u neposrednoj okolini tačke za koju je određen (za slučaj na sl. 2.2 to je tačka B). Sekantni modul elastičnosti može da predstavlja prosečnu vrednost modula elastičnosti u području opterećivanja uzorka od nultog opterećenja do granične tačke (za slučaj na sl. 2.2 to je područje od nule do tačke A).



Sl. 2.2. Dijagram nelinearne zavisnosti napon-deformacija

Modul elastičnosti je osobina materijala koja karakteriše odnos normalnog napona i deformacije. S obzirom da je u opterećivanju materijala prisutno i smicanje, pri čemu se pojavljuju tangencijalni naponi, ponekad je potrebno poznavati modul klizanja - G . Slično modulu elastičnosti definiše se i modul klizanja:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (\text{N/m}^2) \quad (2.3)$$

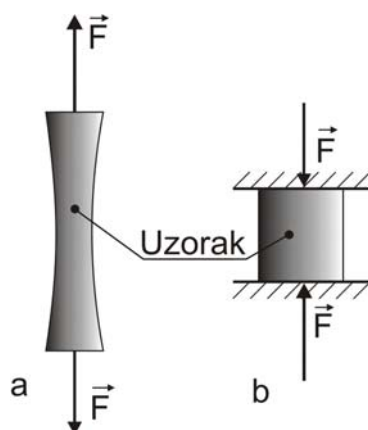
gde je:

τ - tangencijalni napon i

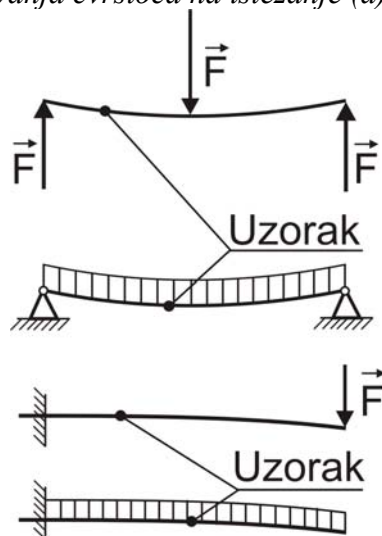
γ - ugao deformacija smicanja.

Pored poznavanja modula elastičnosti i modula klizanja postoji potreba da se saznaju naponi pri kojima dolazi do razaranja materijala. Ovaj podatak je potreban da se mogu projektovati radni organi mašina i sile potrebne za sečenje, kidanje, lomljenje, otkidanje i slično. Sa aspekta očuvanja kvaliteta proizvoda potrebno je poznavati granične napone (granična opterećenja) koja obezbeđuju da proizvod ne bude oštećen. Zbog svega ovoga se izводе eksperimenti ispitivanja materijala koji imaju zadatak da odgovore na specifična pitanja koja su potrebna za praksu. Dakle, kod poljoprivrednih materijala, za razliku od tehničkih, zbog raznolikosti oblika i ostalih osobina, postoji veoma veliki broj načina ispitivanja materijala koje su razvijali istraživači širom sveta.

Na slici 2.3. daje se skica ispitivanja čvrstoće na istezanje i pritisak. Izduženi uzorci mogu se ispitivati na istezanje, a kratki i deblji na pritisak. Na slici 2.4. prikazane su osnovne skice ispitivanja čvrstoće na savijanje. Tu su kombinacije koncentričnih sila i kontinualnih opterećenja na prostoj gredi i konzoli kao uzorcima.

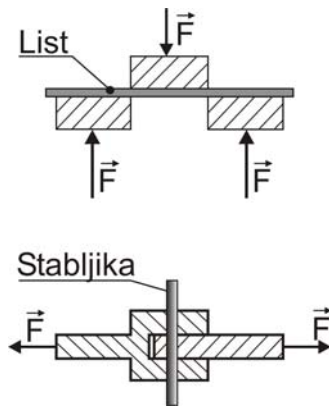


Sl.2.3. Skice ispitivanja čvrstoća na istezanje (a) i pritisak (b)

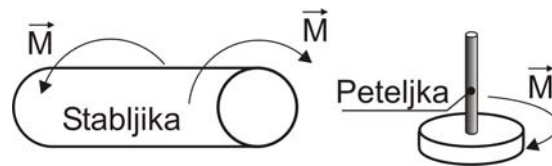


Sl.2.4. Skice ispitivanja čvrstoća na savijanje

Na slici 2.5 prikazano je ispitivanje na smicanje pljosnatih materijala (list) i stabljika. Na slici 2.6. prikazano je ispitivanje na uvijanje debljih stabljika i peteljki plodova.

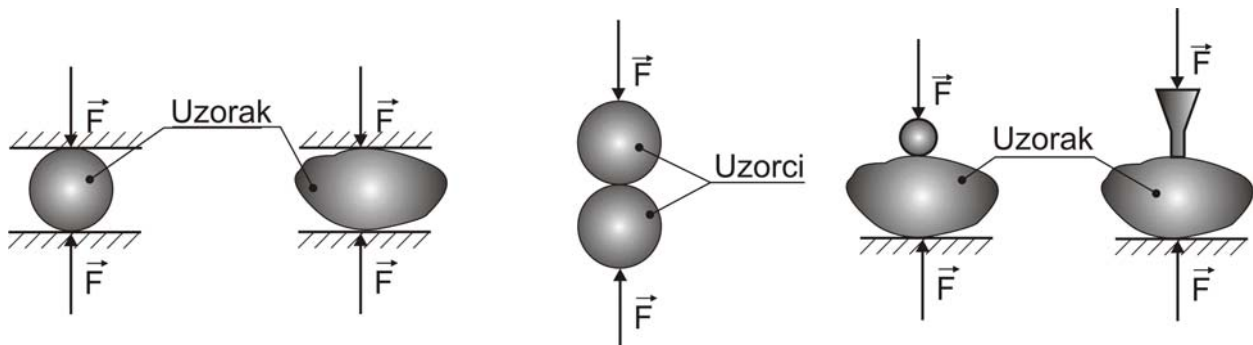


Sl.2.5. Skice ispitivanja čvrstoća na smicanje



Sl.2.6. Skica ispitivanja čvrstoća na uvijanje

Na slici 2.7 prikazani su razni načini ispitivanja površinske čvrstoće (donekle odgovara ispitivanjima tvrdoće kod tehničkih materijala) - na ovaj način se, uglavnom, ispituju plodovi i jaja.



Sl.2.7. Skica ispitivanja površinske čvrstoća (tačkasta opterećenja)

Da bi se ovakva ispitivanja ostvarila konstruisan je veliki broj različitih uređaja sa specijalnim priborima. Neki od ovih uređaja imaju izvesnu univerzalnost, ali je daleko veći broj specijalnih uređaja namenjenih samo određenoj vrsti poljoprivrednog materijala i za ispitivanje samo jedne mehaničke osobine.

2.3. REOLOŠKE OSOBINE TEČNIH POLJOPRIVREDNIH MATERIJALA

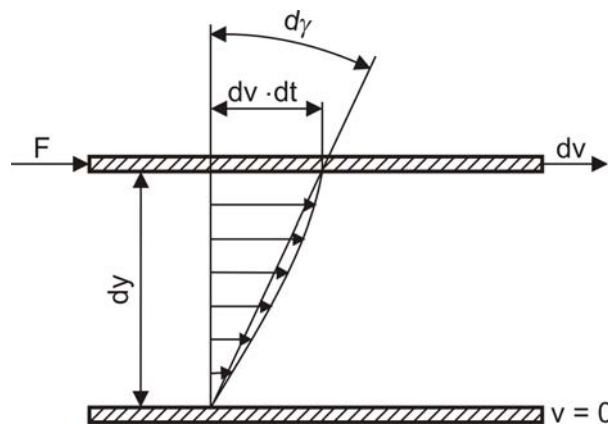
U analizi ponašanja materijala pri istezanju (sl. 2.1.) rečeno je da se, u području iznad tačke A, poljoprivredni materijali ponašaju slično tečnostima. Te tečnosti obično nisu slične vodi. One imaju drugačije osobine u pogledu odnosa sila i deformacija elementarnih delića. Pored toga u poljoprivredi se javljaju i neki drugi materijali u tečnom faznom stanju koji su dosta specifični (tečni stanjak, mleko itd.). Zbog svega toga postoji potreba da se razmotre mogući modeli tečnosti i definišu zavisnosti napona od deformacija. Ove osobine se nazivaju reološkim osobinama materijala.

Za analizu se može uzeti tečnost između dve ravne paralelne ploče (sl. 2.8.). Osa y se postavlja normalno na ploču usmerena naviše. Na gornju ploču deluje sila F , koja je pomera u horizontalnom pravcu relativnom brzinom u odnosu na donju ploču - dv . Za vreme dt gornja ploča se pomeri za odstojanje $dt dv$. Zbog pomeranja ploče javlja se deformisanje tečnosti između ploča. Tangencijalni napon koji izaziva to deformisanje posledica je tangencijalne sile F :

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.4)$$

gde je A - površina ploče (obe ploče su jednakih površina). Mera deformacije tečnosti prouzrokovana tangencijalnim naponom izražava se uglom γ , a za mali ugao važi:

$$d\gamma \approx \operatorname{tg} d\gamma = \frac{dt dv}{dy} \quad (2.5)$$



Sl.2.8. Model strujanja fluida između dve ravne paralelene ploče

Slično deformaciji čvrstog tela ova deformacija se može predstaviti i kao brzina deformisanja. Iz prethodnog izraza za diferencijalno malo vreme (j. 2.5) sledi:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{dv}{dy} \quad (2.6)$$

Veličina dv/dy naziva se gradijent brzine. U zavisnosti od toga, kakva je veza između tangencijalnog napona i gradijenta brzine (brzine deformisanja) definišu se reološki modeli tečnosti. Ukoliko je ta zavisnost linearna i bez prednapona radi se o tečnosti koju je definisao Njutr - njutnovska tečnost ili njutnovski fluid. Reološki model njutnovske tečnosti je:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (2.7)$$

gde je η (Pas) dinamička viskoznost tečnosti.

Ukoliko postoji prednapon smicanja τ_0 tada se tečnost definiše kao Bingamova plastika, a reološki model (veza napona i deformacije) je:

$$\tau - \tau_o = \eta \frac{dv}{dy} \quad (2.8)$$

Pored ovih tečnosti postoje i reološki modeli koji su nelinearni. Razni autori su na različite načine definisali te nelinearne modele, ali je u najčešćoj primeni stepeni zakon:

$$\tau - \tau_o = K \left(\frac{dv}{dy} \right)^n \quad (2.9)$$

gde su n i K konstante, kao osobine materijala.

U slučaju ovih nenjutnovskih fluida viskoznost je funkcija brzine tečnosti. Analizom prethodne jednačine (j. 2.9) ona se može izraziti na sledeći način:

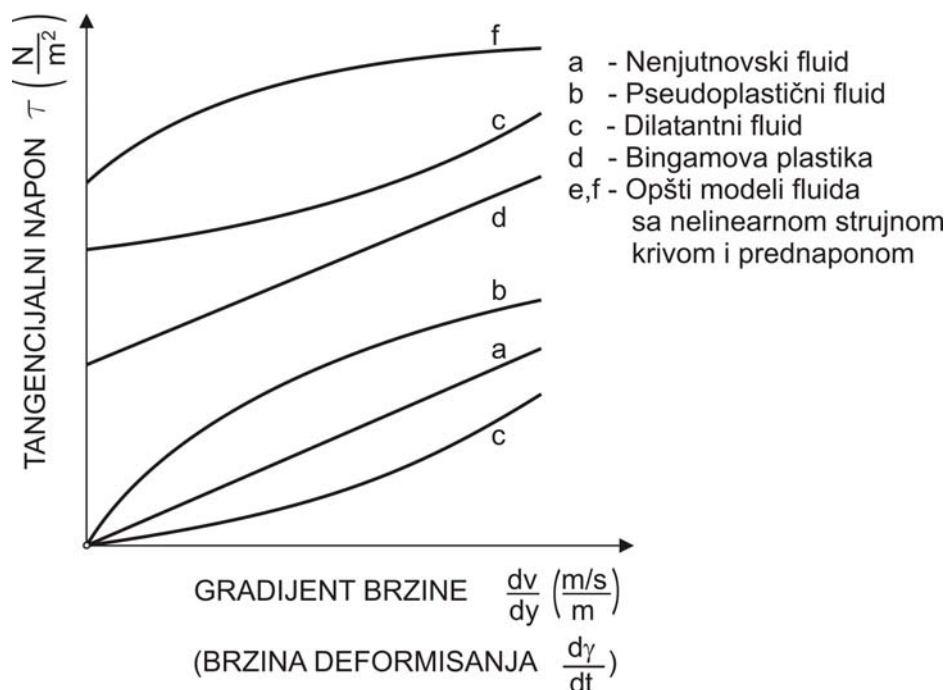
$$\eta_a = K \left(\frac{dv}{dy} \right)^{n-1} \quad (2.10)$$

pa se jednačina 2.9. može napisati i u sledećem obliku:

$$\tau - \tau_o = K \left(\frac{dv}{dy} \right)^{n-1} \frac{dv}{dy} = \eta_a \frac{dv}{dy} \quad (2.11)$$

što formalno odgovara zakonu za njutnovske fluide.

Ako je $n = 1$, a $\tau_o = 0$, dobija se j. 2.7., a to znači da je u pitanju njutnovska tečnost. Ako je $n = 1$ u pitanju je Bingamova plastika. Za slučaj $\tau_o = 0$, a $n > 1$, dobija se dilatantni fluid, a kada je $n < 1$ u pitanju je pseudoplastični fluid. Svi mogući modeli su prikazani na slici 2.10, u dijagramu zavisnosti tangencijalni napon - brzina deformisanja.



Sl.2.10. Reološki modeli fluida (tečnosti) u dijagramu tangencijalni napon - brzina deformisanja (b)

Poznavnje stepenog zakona za tečnosti omogućava proračun strujanja profila brzina u kanalima i cevima, proračun spoljnog dejstva za premeštanje materijala (pumpe i sl.) i određivanje sile za deformisanje materijala (prese, ekstruderi i sl.). Utvrđivanje viskoznosti tečnosti i njene zavisnosti od brzine deformisanja obavlja se specijalnim uređajima koji se zovu viskometri (ili viskozimetri). Postoje razne konstrukcije ovih uređaja što zavisi od vrste tečnosti. Svi ovi uređaji rade na principu određivanja tangencijalnih napona (pomoću merenja sile ili momenta) i deformacija fluida koje se tim dejstvom izazivaju.

3. STRUJNE OSOBINE POLJOPRIVREDNIH MATERIJALA

3.1. Značaj

Veliki broj tehnoloških operacija u mašinama i uređajima poljoprivredne tehnike zasniva se na prostrujavanju vazduha kroz sloj poljoprivrednog materijala. Te operacije su:

1. separacija (razdvajanje komponenti čvrste faze na osnovu različitosti strujnih osobina) - primeri:

- separacioni uređaj u kombajnu,
- separacija zrna od primesa i lomova u prečistačima,
- separacija listova od stabljika raznih kultura,
- separacija prašine iz transportnih sredstava i mašina za doradu semena,
- frakcionisanje zrna na osnovu strujnih osobina itd.

2. konvektivno sušenje poljoprivrednih proizvoda,

3. aktivna ventilacija poljoprivrednih proizvoda,

4. pneumatski transport poljoprivrednih materijala,

5. hidraulički transport i td.

Projektovanje i eksploatacija ove opreme zahteva dobro poznavanje strujnih osobina poljoprivrednih materijala. Potrebno je poznavati međuzavisnosti koje karakterišu strujanje fluida kroz sloj. Ovde se pre svega misli na zavisnost pada pritiska kroz sloj materijala od brzine strujanja fluida i na zavisnost visine sloja od brzine fluida. Isto tako važno je poznavati i granice hidrodinamičkih stanja.

3.2. Fizički prikaz prostrujavanja fluida kroz sloj nasutog materijala

Za fizički opis strujanja fluida kroz sloj nasutog materijala uobičajeno se koristi vertikalni cilindrični sud sa perforisanim dnom. U sud su nasute čestice i tako je formiran sloj nasutog materijala. Odozdo naviše struji fluid. Zbog viskoznosti fluida pojavljuje se trenje između fluida i čvrstih čestica, a samim tim i sile koje sumarno deluju naviše i teže da podignu čestice nasutog materijala. Ako je protok fluida veći (veća brzina fluida), veće su i ove sile, te je i efekat podizanja čestica sve izraženiji (sl. 3.1a). Na slici 3.1b dat je opšti dijagram zavisnosti pada pritiska fluida pri strujanju kroz sloj čvrstih čestica u zavisnosti od brzine fluida.

Prostrujavanjem fluida kroz nasuto zrno nastaju karakteristična hidromehanička stanja ove dvokomponentne i dvofazne mešavine. Literaturni izvori ukazuju na postojanje nekoliko karakterističnih hidrodinamičkih stanja.

Prvo hidrodinamičko stanje **I** koje nastaje pri prostrujavanju fluida malim brzinama od O do A se karakteriše laminarnim strujanjem (sl. 3.1b). Laminarno (ili slojevito) strujanje je takvo kod koga se čestice fluida kreću uređeno. Gornja granica ovog stanja je definisana vrednošću Reynoldsovog broja $Re = 10$. Re - broj je u ovom slučaju definisan za prividnu brzinu strujanja (brzina u slobodnom preseku ispred sloja) i srednji ekvivalentni prečnik čestice (zrna). Reynoldsov broj je bezdimenzijska veličina koja služi za definisanje režima strujanja:

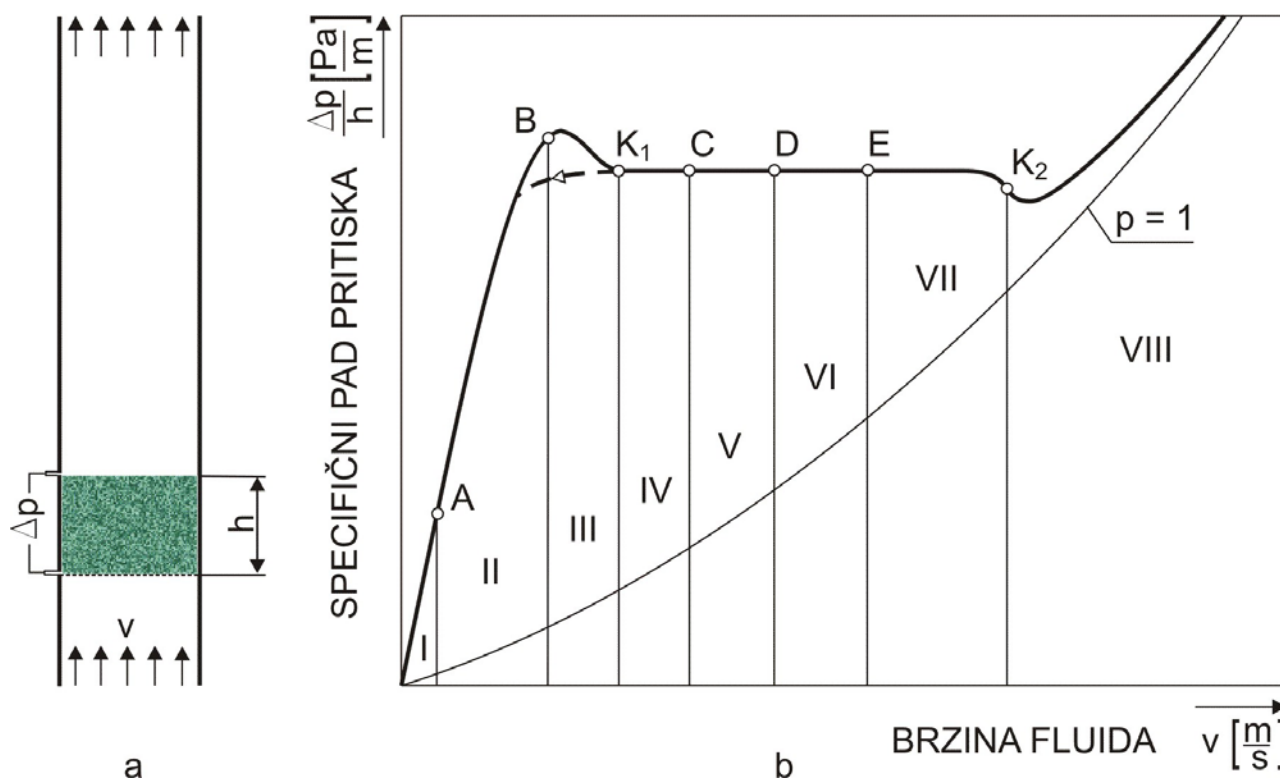
$$Re = \frac{v d_e}{\nu} \quad (-) \quad (3.1)$$

gde je:

ν - prividna brzina fluida (brzina fluida u slobodnom preseku ispred sloja) a

ν_f - kinemtska viskoznost fluida.

Povećavanjem brzine fluida preko ove granice javlja se prelazni i turbulentni režim strujanja **II**. Kod prelaznog režima strujanja je neizvesno kako će se kretati čestica, uređeno ili haotično. U turbulentnom režimu strujanja čestice se kreću turbulentno. Režimi **I** i **II** su hidromehanička stanja karakteristična za miran sloj nasutog zrna, jednake poroznosti $e = e_0$ i jednake visine sloja. Čestice se ne pomeraju sve do momenta kada dolazi do izjednačavanja sile trenja fluida o česticu i težine čestice. To stanje označeno je tačkom B.



Sl.3.1. Hidrodinamička stanja pri fluidizaciji nasutog (a - aparatura, b - zavisnost pada pritiska fluida pri strujanju kroz sloj čvrstih čestica od brzine vazduha)

Povećavanjem brzine fluida iznad tačke B dolazi do pomeranja nasutog materijala. To pomeranje zrna ima za posledicu "zauzimanje strujno povoljnijeg položaja" u odnosu na struju fluida. Nakon zauzimanja povoljnijeg položaja smanjuje se trenje fluida o zrno, te se smanjuje i pad pritiska fluida. Ovo hidrodinamičko stanje **III** se može nazvati "bubrenjem" jer dolazi do promene visine sloja. Posmatrajući sloj u celini on liči na miran sloj, ali posmatranjem pojedinačnih zrna vidi se da ona trepere u mestu. S obzirom da je debljina sloja povećana samim tim povećana je i poroznost ($e > e_0$). Režim, pri kome su zrna zauzela najpovoljniji hidrodinamički položaj, naziva se prvom kritičnom tačkom K_1 , a brzina u ovom režimu naziva se prvom kritičnom brzinom fluidizacije.

Svaki "realni" materijal koji se fluidizuje je nehomogen u pogledu osnovnih fizičkih svojstava. Kada se to ima u vidu može se zaključiti da je i polje poroznosti unutar sloja nehomogeno. Ta nehomogenost uslovljava pojavu nehomogenog polja brzina unutar sloja i nehomogenost težina pojedinačnih zrna. Kada se brzina fluida dalje povećava doći će do pojave strujnih kanala fluida kroz sloj, koji će se pojaviti na mestu gde je to najpovoljnije (tamo gde je veća poroznost i gde su štura zrna). Ovo hidrodinamičko stanje, **IV**, može se nazvati stanjem pojave strujnih kanala.

Daljim povećavanjem brzine fluida dolazi do povećavanja sile trenja fluida o zrno. U određenom momentu ponovo dolazi do izjednačenja sile otpora strujanja u sloju i težine celog uzorka. U sloju (tačka C, sl. 3.1). U tački C ceo sloj se podiže u formi "klipa" što i karakteriše naredno hidrodinamičko stanje V. U ovom režimu fluid takođe dominantno prolazi kroz sloj u formi klipova. Nastali klipovi kreću se na malom putu naviše, dok ne prođe kroz sloj zrna. Nakon toga se razrušava forma klipa i zrna padaju na dno te se ponovo stvaraju uslovi za formiranje novog klipa. Klipovi se formiraju i nestaju periodično. Ovo hidrodinamičko stanje (V) naziva se stanje vazdušnih klipova.

Daljim povećavanjem brzine fluida nestaje forma vazdušnih klipova i počinju da se stvaraju fluidni mehurovi (tačka D). To hidrodinamičko stanje VI, koje se naziva stanje vazdušnih mehurova, podseća na ključanje vode. S obzirom na statistički slučajne vremenske trenutke nastanka inicijalnih mehurova, to stanje se odlikuje stabilnijom vrednošću visine sloja u odnosu na prethodno.

Ako se brzina fluida dalje povećava fluidni mehurovi polako nestaju (tačka E) i sloj dostiže hidrodinamičko stanje ujednačenog fluidizovanog sloja VII. Zrna se kreću gore-dole. Ovo stanje je pogodno za hidraulični i pneumatski transport principom fluidnog lifta. Treba napomenuti da je ovo stanje i napovoljnije za separaciju zrna od primesa (žitni kombajn, aspiratori zrna i sl.).

Daljim povećavanjem brzine fluida štura i lakša zrna prelaze u hidrodinamičko stanje letećeg transporta (tačka K₂). To je druga kritična tačka kojoj odgovara druga kritična brzina fluida. Ukoliko se brzina dalje povećava nastaje hidrodinamički režim letećeg pneumatskog transporta VIII.

Smanjivanjem brzine fluida dobija se kriva koja je indentična u području iznad prve kritične tačke K₁. Od tačke K₁ pa do O nastaje histerezis. Uzrok pojave histerezisa je povoljnije postavljanje zrna u odnosu na strujanje fluida. Novonastala linija (crtkano predstavljena na sl. 3.1b) je ispod linije zavisnosti pada pritiska od brzine fluida pri povećavanju brzine.

Na sl. 3.1b data je i linija koja pokazuje zavisnost pada pritiska vazduha kroz cilindar (cev) kada u njemu nema zrna (pri $e = 1$).

Pri strujanju vazduha kao fluida kroz sloj zrna pšenice, hidromehanička stanja su identična prethodnom opisu.

3.3.Zavisnost pada pritiska fluida od brzine

Efekti strujanja fluida kroz sloj čvrstih žestica izučavaju se već dugo vremena. Veliki je broj autora koji su ponudili originalne matematičke izraze za izračunavanje energetske efekte strujanja u ovakvim slučajevima. Za praksu je od posebnog interesa da se sazna pogodna jednačina koja će poslužiti za izračunavanje pada pritiska kroz sloj nasutog materijala.

Kozeny je još 1927. godine predložio izraz za izračunavanje pada pritiska fluida pri strujanju kroz sloj materijala za laminarni režim:

$$\frac{\Delta p}{H_o} = \frac{36K(1-e_o)^2 \eta_f v}{e_o^3 d^2} \quad (3.2)$$

gde je η_f - dinamička viskoznost, a d - prečnik čestice.

Vrednost konstante K iz prethodne jednačine su odredili *Carman* i *Leva* i utvrdili su da ona iznosi oko 5,5 ($36K = 200$). *Carman* je ovu jednačinu uopštio za prelazni i turbulentni režim došavši do jednačine:

$$\frac{\Delta p}{H_o} = \frac{180(1-e_o)^2 \eta_f v}{e_o^3 d^2} + \frac{2(1-e_o) \rho_f v^2}{e_o^3 d} \quad (3.3)$$

Vidi se da zavisnost pada pritiska od brzine strujanja u prethodnoj jednačini nije linearna. *Ergun* i *Orning* su izveli sličnu jednačinu koju su i eksperimentalno potvrdili:

$$\frac{\Delta p}{H} = \frac{K_l(1-e)^2 \eta_f v}{e^3 d^2} + \frac{0,5K_t(1-e) \rho_f v^2}{e^3 d} \quad (3.4)$$

Ova jednačina se primenjuje za područje do druge kritične brzine pa su u njoj izostavljeni indeksi "o", koji označavaju veličine za stanje mirovanja sloja. Konstante K_l i K_t se određuju eksperimentalno za svaki materijal.

U prethodnim jednačinama režim strujanja određuje prema vrednosti Rejnoldsovog broja koji je definisan jednačinom (j.3.1). Strujanje je laminarno ako je $Re < 10$, prelazno ako je $10 < Re < 500$ i turbulentno za $Re > 500$. Primedbe koje se stavljaju na ovako definisan Rejnoldsov broj se odnose na njegov fizički smisao. Naime, dimenzija d_e figuriše u izrazu (j.3.1) nije dimenzija koja se odnosi na protočni presek. Pored toga, primedbe se stavljaju i na definisanje brzine fluida koja je upotrebljena u prethodnim izrazima. To je brzina u slobodnom preseku u cevi ispred sloja. Stvarno stanje uslovljava razumevanje strujne slike u kojoj je brzina fluida unutar sloja veća, što je uslovljeno smanjenjem protočnog preseka zbog nasutog materijala.

Postoji i drugačiji pristup analizi pada pritiska u sloju nasutog materijala. Mogu se definisati veličine koje su međuzavisne pri strujanju fluida kroz sloj materijala:

$$F(\Delta p, H, \rho_f, \varphi, d, D, v_f) = 0 \quad (3.5)$$

U ovoj jednačini uvedene su sledeće veličine: prečnik cevi - D , koeficijent protočnosti protočnog preseka - φ i stvarnu brzinu fluida unutar sloja - v_f . Koeficijent protočnosti protočnog preseka se definiše kao odnos površine protočnog preseka (A_f) i ukupne površine preseka cevi (A) u kojoj se nalazi nasuti sloj čestica:

$$\varphi = \frac{A_f}{A} \quad (3.6)$$

Može se prihvatiti da je $\varphi \approx e$. Uvedi se veličina hidrauličkog radijusa Rh koja je definisana kao:

$$Rh = \frac{\frac{d}{4} \varphi(z)}{\frac{d}{D} + [1 - \varphi(z)]} \quad (3.7)$$

Rejnoldsov broj se u ovom razmatranju definiše kao:

$$\text{Re} = \frac{4v_f Rh}{\nu_f} \quad (3.8)$$

Ovakvim razmatranjem izraz (j.3.5) koriguje se na oblik:

$$F(\Delta p/H, \rho_f, \nu_f, Rh, v_f) = 0 \quad (3.9)$$

Dimenzionom analizom, za turbulentni režim strujanja, iz ovog izraza dobija se konačna jednačina:

$$\frac{\Delta p}{H} = 8K \frac{\frac{d}{D} + [1 - \phi(z)]}{\phi(z)d} \frac{\rho_f v_f^2}{2} \quad (3.10)$$

Za $\phi = 1$ i za $d \ll D$ ovaj izraz prelazi u poznati *Darcy*-jev izraz za pad pritiska usled trenja u cevi prečnika D i dužine H .

$$\Delta p = \lambda \frac{H}{D} \frac{\rho_f v_f^2}{2} \quad (3.11)$$

gde je λ koeficijent trenja u cevi.

Sve prethodne jednačine imaju ishodište u teoriji mehanike fluida. One proizilaze i opšteg fizičkog zakona o održanju energije. Ove jednačine važe za celo područje do druge kritične tačke K_2 (sl. 3.1.).

3.4. Praktični izrazi za izračunavanje pada pritiska pri strujanju vazduha kroz miran sloj nasutog materijala

U praksi se, međutim, za strujanje vazduha kroz miran sloj nasutog zrna, dakle u području do pojave "bubrenja" sloja koriste razni poluempirijski i empirijski izrazi. *Mathies* je izveo izraz za prostrujavanje mase zrna vazduhom. Taj izraz, takođe, ima formu *Darcy*-jeve jednačine i on je:

$$\frac{\Delta p}{H} = \frac{K \xi_{ks}}{d_e^4} \frac{\rho_f v_f^2}{2} \quad (3.12)$$

gde je K - konstanta, a ξ_{ks} - koeficijent otpora.

Shedd je 1953 izveo izraz na bazi eksperimenata, a *Hukill* i *Ives* su to potvrdili 1955. godine. Ta jednačina je kasnijih godina, a i danas, najčešće korišćena za izražavanje zavisnosti pada pritiska vazduha pri strujanju kroz miran sloj materijala. Ona ima poznati oblik:

$$\frac{\Delta p}{H} = K v^n \quad (3.13)$$

gde su K i n konstante koje se eksperimentalno određuju za razne materijale.

Treba napomenuti da je za ovakvo strujanje Američko društvo inženjera poljoprivredne tehnike ASAE (American Society of Agricultural Engineers) standardizovao (preporučilo) sledeću jednačinu:

$$\frac{\Delta p}{H} = \frac{K_1 v^2}{\ln(1 + K_2 v)} \quad (3.14)$$

Kumar i *Muir* su analizirali jednačine 3.13 i 3.14 za slučaj prostrujavanja ječma vazduhom i utvrdili su da je bolje slaganje eksperimentalnih podataka sa jednačinom *Shedd*-a. Dakle, oni predlažu da se jednačina 3.13 koristi, kao opšti oblik jednačine za određivanje pada pritiska pri prostrujavanju vazduha kroz miran sloj zrnastog materijala. Naravno, ove dve poslednje jednačine u potpunosti su empirijske, te da u eventualnim analizama mogućih jednačina treba proveravati razne matematičke izraze i koristiti onaj koji ima najbolje slaganje sa rezultatima eksperimenata.

Jednačine koje su proizašle iz teorije mehanike opstrujanja fluida oko pojedinačnih čestica čvrste materije su za turbulentno područje imale uobičajeni kinetički član *Bernulijeve* - jednačine $\frac{\rho v^2}{2}$, a ispred tog člana nalazi se ili neka konstanta ili funkcija u kojoj je konstanta dominantna. Empirijske jednačine koje su polazile od potrebe dobrog slaganja eksperimentalnih rezultata postoje samo za miran sloj. One u sebi sadrže dve konstante koje objedinjavaju specifičnost čestica kroz koje struji fluid.

Ukoliko se želi pouzdano predviđanje pada pritiska i geometrijskih karakteristika sloja, mora se uzeti u obzir različitost čestica u pogledu dimenzija, oblika, poroznosti, hrapavosti i mase čestica. U razmatranju osnovnih fizičkih svojstava zrna pšenice zaključeno je da postoje razlike u pogledu ovih osobina za različite sorte. S obzirom na veliki broj sorti koje su u proizvodnji zastupljene, a s obzirom na permanentno stvaranje novih sorti, može se zaključiti da bi bilo veoma neracionalno utvrđivati matematičke korelacije za svaku sortu. Ovde se može naglasiti da, ni zrna iste sorte u različitim tehnološkim, klimatskim i pedološkim uslovima, nemaju identična osnovna fizička svojstva. Ovo ukazuje na potrebu drugačijeg pristupa određivanja konstanti bez obzira o kojoj matematičkoj relaciji je reč. S obzirom na praksu da postoji mogućnost brzog i dovoljno pouzdanog određivanja osnovnih fizičkih svojstava u prosečnom poljoprivrednom preduzeću, praktično je najprihvatljivije konstante u jednačinama izraziti preko ovih svojstava. U izabrani matematički model umesto konstanti potrebno je uvesti funkciju osnovnih fizičkih svojstava.

3.5. Zavisnost visine sloja nasutog materijala od brzine strujanja fluida

Proučavanje zavisnosti promene visine sloja od brzine fluida prilikom strujanja kroz sloj nije poznato iz dostupne literature. U jednačini (j. 3.10) pretpostavlja se poznavanje funkcije $\varphi(z)$. Može se, bez velike greške smatrati da je:

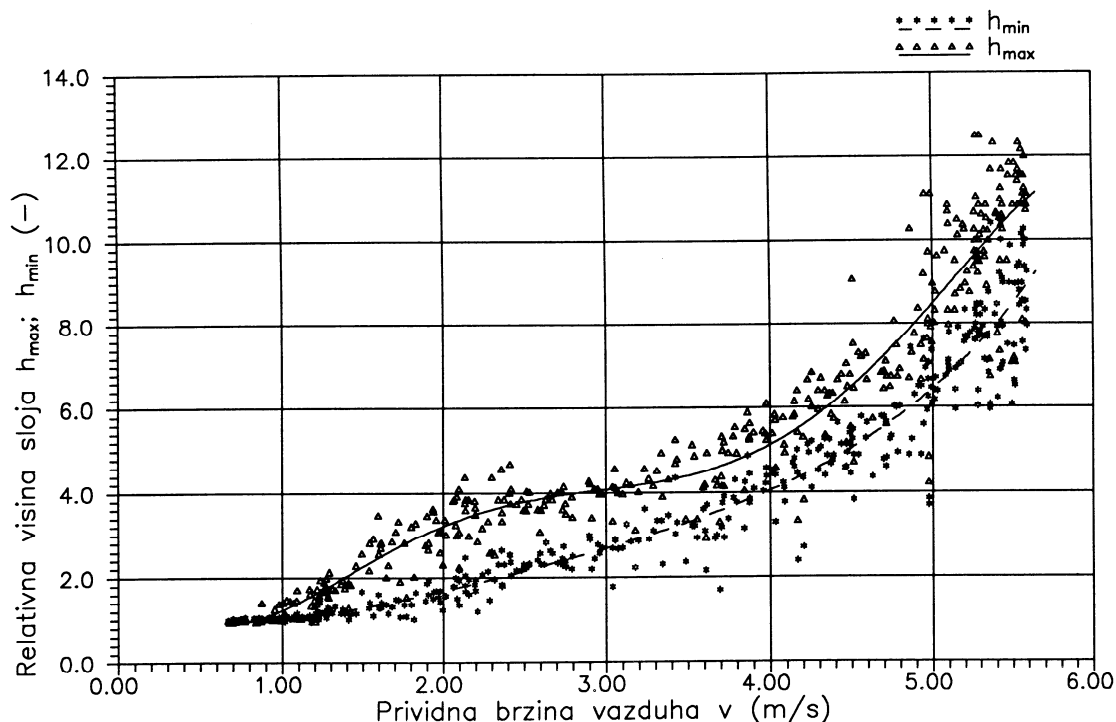
$$\varphi(z) \approx e(z) \quad (3.15)$$

Međutim, nema literaturnih izvora koji ukazuju na poznavanje funkcije $e(z)$. To je, svakako, nedostatak koji onemogućava primenu odovarajuće jednačine.

Možda se to činilo neinteresantnim, ali projektovanje prostora u uređajima u kojima je zrno fluidovano zahteva poznavanje ove zavisnosti. Ova funkcija može biti podloga daljih izučavanja fenomena fluidizacije zrna. Za praktične potrebe korisno je poznavati zavisnost visine sloja od brzine vazduha. Ukoliko je poznata funkcija $H(v)$, moguće je optimalno (kriterijum optimalnosti -

minimum utroška materijala u izradi uređaja) projektovati prostor u uređaju i pouzdanije poznavati stvarne brzine vazduha u fluidizovanom sloju materijala.

Praksa projektovanja je zasnovana na iskustvima u razvoju mašina, što nema dovolju opštost sa naučnog aspekta. Preduzeća koja projektuju uređaje za koje je potrebno poznavanje ove zavisnosti eksperimentalno proveravaju očekivane rezultate na prototipovima konkretnih mašina. Na slici 3.2. daje se eksperimentalni rezultat grafičke zavisnosti visine sloja od brzine vazduha za slučaj prostrujavanja kroz sloj zrna pšenice.



Sl. 3.2. Eksperimentalno utvrđena zavisnost relativne maksimalne i relativne minimalne visine sloja od brzine vazduha pri prostujavanju kroz fluidizovani sloj zrna pšenice (prikazana svaka treća tačka) i interpolacija polinomom šestog reda

Na datoj slici (sl. 3.2) na ordinati su vrednosti relativne maksimalne i relativne minimalne visine sloja $h_{\max}$, $h_{\min}$. Te vrednosti su definisane na sledeći način:

$$h_{\max} = \frac{H_{\max}}{H_o}; h_{\min} = \frac{H_{\min}}{H_o} \quad (3.16)$$

gde su $H_{\max}$ i $H_{\min}$ maksimalne i minimalne vrednosti visine fluidizovanog sloja koje se uočavaju kao granične vrednosti fluktuacije visine sloja pri nekoj brzini strujanja kroz sloj.

3.6. Lebdenje čestica u struji fluida

Proučavanje strujanja fluida oko čestice (ili kretanje čestice kroz fluid) spada u područje aerodinamike, odnosno hidrodinamike. Značaj poznavanja aerodinamičkih (hidrodinamičkih) osobine poljoprivrednih materijala je važan za predviđanje (projektovanje) pneumatskog i hidrauličkog transporta kao i za filtraciju taloženjem.

Za razliku od posmatranja strujanja fluida kroz mnoštvo (sloj) čestica, čija je poroznost bila $e < 1$, u slučaju pojedinačne čestice u dovoljno velikom preseku kanala $de \ll D$ (d - ekvivalentni prečnik čestice; D - poprečna dimenzija kanala), može se uzeti da je $e = 1$. Fizički smisao ove pojave se može objasniti eksperimentom prikazanom na slici 3.3.

Čestica materijala postavi se u vertikalnu cev kroz koju struji fluid naviše. Na česticu deluju tri sile. Naniže deluje težina (G), a naviše deluju potisak (P) i sila otpora strujanju fluida (F). Uslov pri kome čestica miruje se može napisati na sledeći način:

$$\begin{aligned} \sum F_i &= 0, \text{ odnosno} \\ P + F - G &= 0 \end{aligned} \quad (3.17)$$

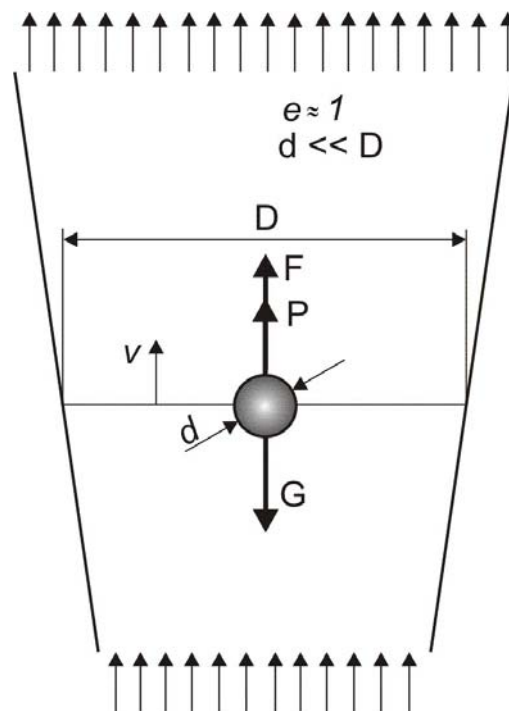
Pojedinačno, ove sile mogu se izraziti na sledeći način:

$$P = \rho_f V_{ml} g \quad (3.18)$$

$$F = \frac{\xi A \rho_f v^2}{2} \quad (3.19)$$

$$G = \rho V_{ml} g \quad (3.20)$$

gde je: G - težina čestice, P - sila potiska, m - masa čestice, g - ubrzanje zemljine teže, ρ - gustina čestice, ρ_f - gustina fluida, V_{ml} - zapremina čestice, ξ - koeficijent otpora, A - površina poprečnog preseka čestice i v - brzina fluida.



Sl. 3.3. Čestica materijala u polju strujanja fluida

Cev je promenljivog preseka te se i brzina fluida smanjuje duž strujanja. U nekom preseku prečnika D (sl.3.2.) čestica će prividno mirovati. Tada su sile u ravnoteži, pa će čestica mirovati. Brzina fluida koja odgovara stanju prividnog mirovanja čestice se naziva brzina lebdenja - v_L .

Njena vrednost se može izraziti iz uslova ravnoteže (j. 3.17), a uzimajući u obzir izraze za pojedine sile dobija se:

$$(\rho - \rho_f) V_{m1} = \frac{\xi A \rho_f v_L^2}{2} \quad (3.21)$$

Iz ove jednačine (j.3.16) može se eksplicitno izraziti brzina lebdenja:

$$v_L = \sqrt{\frac{2gV_{m1}(\rho - \rho_f)}{\xi A \rho_f}} \quad (3.22)$$

U slučaju kada je čestica sfernog oblika dobija se izraz:

$$v_{Lo} = \sqrt{\frac{4gd(\rho - \rho_f)}{3\xi\rho_f}} \quad (3.23)$$

gde je: $V_{m1} = \frac{d^3\pi}{6}$ i $A = \frac{d^2\pi}{4}$

pri čemu je za razne režime strujanja koeficijent otpora:

- laminarni režim: $\xi = 24/Re$ Re<1,
- prelazni režim: $\xi = 18.5/Re^{0,6}$ 1<Re<500
- turbulentni režim: $\xi = 0.45$ Re>500

Za slučajeve stvarnih čestica potrebno je poznavati koeficijent otpora koji se određuje na bazi eksperimenta sa česticama u aparaturi koja je izrađena na bazi slike 3.2.

U tabeli 3.1 daju se podaci o brzini lebdenja za neke poljoprivredne proizvode:

Tabela 3.1. Brzina lebdenja za neke poljoprivredne materijale

Red. br.	Kultura	Brzina lebdenja (m/s) (u vazduhu - t = 20°C)
1	kukuruz	12.5 - 14.0
2	ječam	8.5 - 10.5
3	pšenica	9.0 - 11.5
4	raž	8.5 - 10.0
5	proso	10.0 - 12.0
6	suncokret	7.0 - 9.0
7	soja	17.0 - 20.0
8	ovas	8.0 - 9.0
9	jabuka	38.1 - 41.3
10	lucerka-seme	3.1 - 3.5
11	krompir	23.0 - 35.0

4.TRENJE

4.1.Uvod

Sa pojavom većih skladišta i mehanizovanja operacija u takvim skladištima, uočena je potreba poznavanja osobina trenja poljoprivrednih materijala. Razvoj njivske mehanizacije uslovio je, takođe, potrebu da i u ovom slučaju postoji potreba dobrog poznavanja osobina trenja (krunjenje kukuruza je tipična operacija koja se zasniva na trenju).

Danas je nezamislivo projektovanje iole ozbiljnije poljoprivredne mašine ili uređaja bez dobrog poznavanja osobina trenja poljoprivrednih materijala.

4.2.Zakon trenja

Osnovni zakon trenja u matematičkom obliku formulisao je *Coulomb*:

$$\mu = \frac{F_{tr}}{F_n} \quad (4.1)$$

gde je: μ - koeficijent trenja, F_n - sila normalna na površinu dodira i F_{tr} - sila trenja.

Kolumbov zakon polazi od sledećih postulata:

1. Sila trenja zavisi od vrste materijala (osobina materijala) i od veličine sile koja je normalna na površinu kontakta i
2. Sila trenja ne zavisi od veličine površine kontakta i relativne brzine kretanja tela koja su u kontaktu.

Određivanje koeficijenta trenja μ obavlja se tako što se na neku strmu ravan (materijal 1) postavlja uzorak (materijal 2), nakon čega se naginjanjem utvrdi ugao nagiba strme ravni pri kome je došlo do kretanja uzorka. Tangens ovog ugla je koeficijent trenja. Utvrđeno je da je ovaj ugao veći ako materijal počinje da se kreće iz stanja mirovanja nego u slučaju kada je on već bio u pokretu. Ova pojava je bila razlog da se definišu statički koeficijent trenja - μ_s slučaj kada se ugao trenja definiše na bazi nepokretnog uzorka pri naginjanju) i kinetički koeficijent trenja - μ_k (slučaj kada se naginjanje strme ravni obavlja pri pokretnom uzorku).

Sherwood (*Šervud*) je sumirao novija istraživanja trenja i zaključio, da Kolumbov zakon ne može biti prihvaćen kao egzaktna. On je definisao postulate, koji su rezultati istraživanja drugih autora, a koji potpuno opisuju fizičku sliku trenja. Po ovim istraživanjima sila trenja zavisi od više faktora. Sherwood-ovi postulati su sledeći:

1. Sila trenja može se definisati kao sila koja se javlja na hrapavoj površini, a koja ima jednu ili više kontaktnih tačaka i u tom smislu ona je otpor relativnom kretanju kontaktnih površina.
2. Sila trenja se sastoji od dve glavne komponente: sile koja je potrebna da deformiše a neki put da iseče neravnine kontaktnih površina i sile potrebne da savlada adheziju ili koheziju između površina.
3. Sila trenja je direktno proporcionalna stvarnoj kontaktnoj površini.
4. Sila trenja zavisi od brzine klizanja kontaktnih (dodirnih) površina, zbog efekta brzine na porast temperature kontaktnog materijala.
5. Sila trenja zavisi od prirode materijala koji su u kontaktu.

6. Sila trenja nije zavisna od hrapavosti površine osim u ekstremnim slučajevima vrlo fine i vrlo grube površine.

Uprkos ovakvoj fizičkoj slici trenja, Coulomb-ov zakon, zbog jednostavnosti matematičke interpretacije, i dalje je osnovni zakon u analizi trenja. Ukoliko se pođe od pretpostavke jednakih uslova relativnog kretanja u odnosu na eksperiment onda se rezultati pouzdano mogu koristiti u praksi. Greške neće imati praktični značaj. Ipak treba imati u vidu da Coulomb-ov zakon, nije egzaktni zakon i da on nije odraz fizičkih mehanizama trenja. Razni uticaji na silu trenja se iskazuju uticajem na koeficijent trenja.

Pored vrste materijala na koeficijent trenja utiču:

1. Oblik i veličina neravnina na površini materijala - Na poljoprivrednom materijalu neravnine mogu imati različit oblik i veličinu (zarezi, dlačice, postojanje opne itd.). Kod velikih neravnina glavni otpor kretanju površina koje su u kontaktu nastaje usled smicanja tih neravnina. Uticaj neravnina je prisutan i u definisanju efektivne površine dodira od koje zavisi athezija. Kada ne dolazi do smicanja neravnina moguća je i pojava promenljive sile trenja zbog razmicanja i primicanja materijala ("vrh na vrh" - "vrh u podnožje"). Ako su neravnine nagnute na jednu stranu koeficijent trenja je različit za različite smerove relativnog kretanja. U ovom slučaju postoji anizotropnost materijala u pogledu koeficijenta trenja.

2. Relativna brzina kretanja materijala koji su u kontaktu - Mnogi istraživači su utvrdili da se pri malim brzinama koeficijent trenja povećava sa povećanjem brzine, dok pri velikim brzinama, zbog efekta zagrevanja, a samim tim i omekšavanja materijala, može doći i do smanjenja koeficijenta trenja.

3. Vlažnost - Vlažnost materijala i podloge utiču na veličine athezionih i kohezionih sila između materijala i podloge. Povećanjem vlažnosti poljoprivrednih materijala athezione sile rastu te dolazi i do povećanja koeficijenta trenja.

4. Stanje materijala - Utvrđeno je da na vrednost koeficijenta trenja utiče to da li je poljoprivredni materijal u koncentracionalnoj ravnoteži sa okolnim vazduhom. Koncentracionalna ravnoteža je slučaj kada ne postoji prelaz vlage iz materijala u vazduh ili obrnuto. Ukoliko postoji neravnoteža koeficijent trenja je veći. Razmena vlage sa vazduhom nepovoljno deluje na povećanje sile trenja. Dakle, ukoliko se materijal kreće u procesu sušenja treba računati sa tim da će koeficijent trenja biti nešto veći nego za taj isti materijal kada je u vazduhu sa kojim je u koncentracionalnoj ravnoteži.

5. Površinski pritisak - Površinski pritisak na kontaktnim površinama ne utiče bitno na koeficijent trenja sem u slučaju vlažnih materijala kada je uočeno sniženje koeficijenta trenja.

6. Promena stanja površine - Usled dugotrajnog trenja poljoprivrednih materijala po nekoj podlozi dolazi do promene koeficijenta trenja. Ta pojava nastaje zbog stvaranja tankog sloja organskih materija koje se izdvajaju iz poljoprivrednih materijala. Te materije su razna ulja, masne kiseline i sl. Izdvojene organske materije mogu u toku klizanja biti u tečnom i čvrstom stanju. Izuzimajući slučajeve veoma finih i veoma grubih površina, pojava ovog sloja na podlozi utiče na povećanje koeficijenta trenja. U slučaju čvrstog stanja izdvojenog materijala povećavaju se površine smicanja, a u slučaju tečnog stanja povećavaju se athezione sile.

4.3. Kotrljanje poljoprivrednih materijala

Poljoprivredni materijali, koji imaju sferičnost blisku vrednosti $\sigma = 1$, pri naginjanju strme ravni počinju da se kreću kotrljanjem. Ta pojava je navela istraživače da kod ovakvih materijala uvedu vrednost koeficijenta kotrljanja (c_0):

$$c_o = \frac{dFk}{2Fn} \quad (4.2)$$

gde je:

d - prečnik objekta (poljoprivredni materijal) normalan na osu kotrljanja,

Fk - sila otpora kotrljanjem i

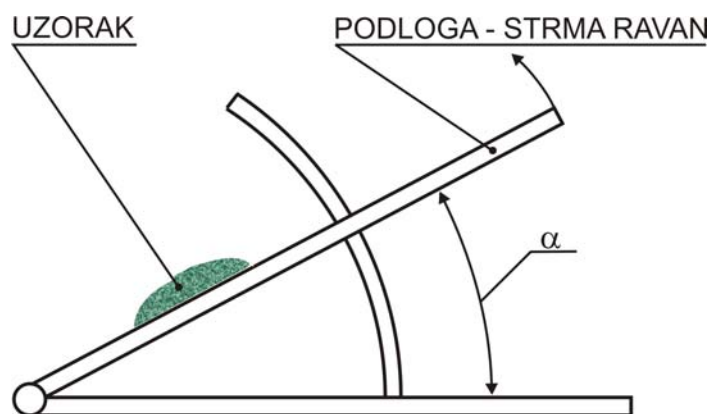
Fn - normalna sila.

Teorija kotrljanja polazi od činjenice da normalna sila na objekt izaziva elastičnu deformaciju u obliku kalote lopte. Sila otpora kotrljanjem je sila koja je potrebna za stvaranje momenta koji će izdići objekt uz nagib kalote. Kada se podloga elastično deformiše malim silama tada je i koeficijent otpora kotrljanjem veći. Dakle, materijali koji imaju veći modul elastičnosti imaju manji koeficijent kotrljanja.

4.4. Metode određivanja koeficijenta trenja

Postoje dva pristupa određivanju koeficijenta trenja. Prvi pristup zasnovan je na metodu nagnjanja ispitivane podloge na kojoj je uzorak poljoprivrednog materijala i uočavanja ugla kada nastane kretanje. Drugi pristup se zasniva na merenju sile između podloge i materijala koji su u relativnom kretanju. Prvi pristup je podesan za određivanje statičkog ugla trenja, a drugi pristup je podesan za određivanje kintičkog ugla trenja. Statički ugao trenja je veći od kinetičkog, što je posledica većih adhezionih sila u stanju relativnog mirovanja dva tela.

Na slici 4.1. dat je principijelni prikaz najjednostavnijeg uređaja za određivanje statičkog koeficijenta trenja. Uzorak poljoprivrednog materijala se postavi na podlogu. Postupnim nagnjanjem podloge uočava se položaj podloge (strme ravni) pri kome je počelo kretanje materijala. Smatra se da je materijal pokrenut kada je priližno 2/3 materijala u pokretu. Očitava se ugao α_s , koji se uobičajeno naziva uglom statičkog trenja između datih materijala (poljoprivredni materijal - podloga).



Sl.4.1. Aparatura za određivanje statičkog ugla trenja između poljoprivrednog materijala i poznate podloge

Statički koeficijent trenja se određuje iz izraza:

$$\mu_s = \operatorname{tg} \alpha_s \quad (4.3)$$

Na slici 4.2. dat je prikaz jednog od mogućih aparata pomoću kojih se određuje kinetički koeficijent trenja. Uzorak se postavlja u posebnu kutiju koja je postavljena iznad podloge. U kontaktu su samo uzorak poljoprivrednog materijala i podloga za koju se obavlja ispitivanje. Na uzorak se postavljaju tegovi koji uzrokuju silu normalnu na površinu. Podloga se kreće zadatom brzinom, pri tome se javlja sila trenja koja se prenosi na kutiju, a potom na prikazani ram. Na naznačenim mestima na ramu osetljivim senzorima se meri sila trenja F_{tr} . Kinetički koeficijent trenja se izračunava prema izrazu:

$$\mu_k = \frac{F_{tr}}{G_T + G_M + G_K} \quad (4.4)$$

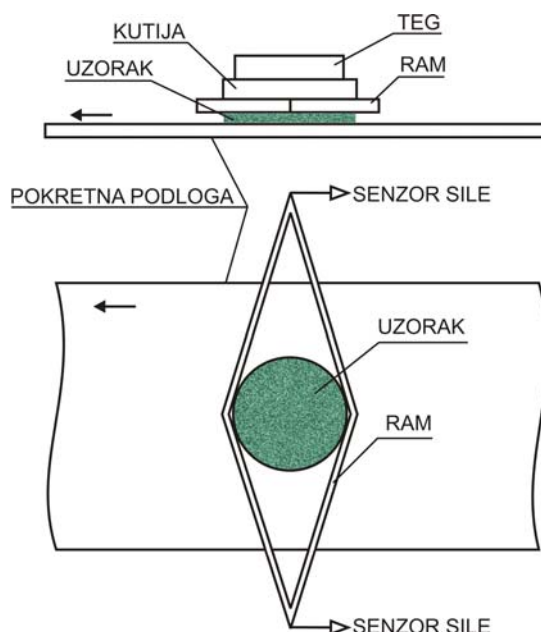
gde je:

G_T - težina tega,

G_M - težina uzorka materijala i

G_K - težina kutije i drugih delova koji deluju na podlogu

Pored prikazane aparature (sl. 4.2) postoji veliki broj različitih konstrukcionih rešenja koja su nastala zbog velike različitosti osnovnih fizičkih svojstava poljoprivrednih materijala. Naprimer, za slučaj vlaknastih materijala (seno, stabljike ratarskih kultura, vuna i sl.) uzorak materijala je pojedinačan na koga je postavljen teg, a oslanja se na bubanj koji je izrađen od podloge u odnosu na koja se ispituje koeficijent trenja. Bubanj se okreće i pri tome nastaje sila trenja, koja se meri osetljivim senzorima (*Wieneke, 1956.g.*).



Sl.4.2.Aparatura za određivanje kinematskog koeficijenta trenja između poljoprivrednih materijala i poznate podloge prema Bickert-u i Buelow-u

4.5.Unutrašnje trenje i ugao nasipanja

Osobine trenja sipkavih materijala (zrno, mleveni, granulirani, peletirani pa i seckani proizvodi) su veoma važne za projektovanje mašina namenjenih za manipulaciju tim materijalom i za njihovo skladištenje. U prethodnim razmatranjima pažnja je posvećena trenju između materijala i podloge. Za praksu je potrebno i znanje o trenju između čestica poljoprivrednih materijala. Dugo su

istraživači smatrali da su koeficijent trenja između čestica materijala i tangens ugla nasipanja jednaki. *Stewart* je prvi uočio da postoji razlika između ovih osobina.

4.5.1. Ugao nasipanja

Ugao nasipanja, kao fizička osobina materijala, je važan za transportna sredstva i uopšte za predviđanje oblika i dimenzija hrpe nasutog materijala. Koeficijent ugla nasipanja se definiše na sledeći način:

$$\mu_n = \operatorname{tg} \alpha_n \quad (4.5)$$

Postoje dva ugla nasipanja: statički i dinamički. Statički ugao nasipanja je ugao između izvodnice i osnove kupe (konusa), koja je formirana bez kretanja materijala. Dinamički ugao nasipanja je ugao između izvodnice i osnove kupe koja je formirana od materijala u pokretu. Dinamički ugao nasipanja ima mnogo veći značaj za praksu, jer su stvarne manipulacije, skoro uvek, sa nasutim materijalom koji je u pokretu. Statički ugao nasipanja je nešto veći od dinamičkog. Objašnjenje razlike je identično kao i kod koeficijenta trenja između materijala i podloge.

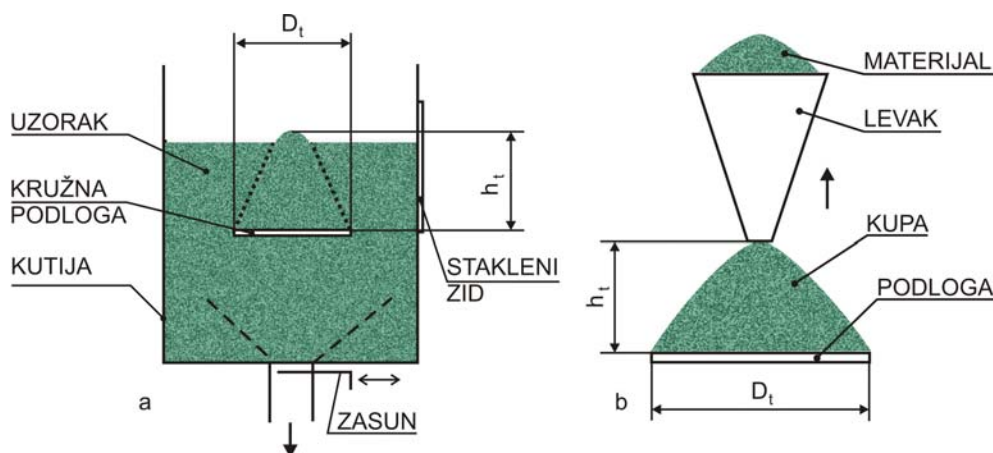
Određivanje statičkog koeficijenta trenja moguće je na aparaturama različitih konstrukcija uz uslov da je formiranje kupe nasutog uzorka materijala izvedeno pri njegovom mirovanju. Na slici 4.3.a data je aparatura (*Fowler i Wyatt*) koja se sastoji od jedne veće kutije u koju je smeštena kružna podloga. Sa strane je stakleni zid na kome je metarska skala. Kupa se formira na taj način što se zrno ispušta iz kutije do momenta kada se uoči nastanak vrha kupe. Horizontalnim čitanjem kroz stakleni zid određuje se visina kupe h_t . Prečnik okrugle podloge je konstanta aparature.

Na slici 4.3.b data je aparatura koja se najčešće sreće u praksi. U levak 2 usipa se materijal za koga se određuje statički ugao nasipanja. U momentu nasipanja levak je u donjem položaju, dodirujući podlogu (4). Podloga (4) je kružnog oblika. Potom se levak polako izdiže i pri tome nastaje kupa (3). Kada je od nasutog materijala formirana kupa jednake osnove kao što je podloga tada se levak fiksira i meri se visina h_t . U oba slučaja prikazana na slici 4.3. koeficijent statičkog ugla nasipanja se određuje iz izraza:

$$\mu_{ns} = \frac{2h_t}{D_t} \quad (4.6)$$

a sam ugao nasipanja je:

$$\alpha_{ns} = \operatorname{tg}^{-1} \mu_n \quad (4.7)$$



Sl. 4.3. Aparature za određivanje ugla nasipanja

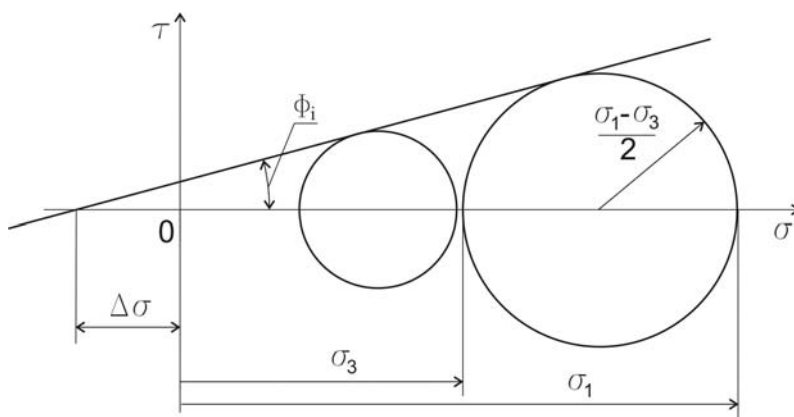
Aparatura prikazana na slici 4.3.b može biti korišćena i za određivanje dinamičkog ugla nasipanja. U tom slučaju levak je u postupku formiranja kupa stalno odvojen od kupe koja se formira nasipanjem. Pri formiranju kupe materijal se prosipa na vrh te kupe. Izračunavanje dinamičkog ugla trenja je identično kao za slučaj statičkog ugla trenja:

$$\mu_{nd} = \operatorname{tg}^{-1} \alpha_{nd} \quad (4.8)$$

4.3.2. Unutrašnje trenje

Poznavanje unutrašnjeg trenja je veoma važno za analizu sila unutar mase nasutog materijala. Unutrašnje trenje je faktor naponskog polja u masi materijala.

Slično analizi naponskog stanja u čvrstim materijalima i u slučaju nasutog materijala koristi se teorija zasnovana na Morovom (*Mohr*) krugu. Morov krug se ucrtava u dijagramu u kome je na apscisi normalni napon, a na ordinati tangencijalni napon. Pomoću Morovog kruga povezani su vertikalni normalni napon σ_1 i horizontalni normalni napon σ_3 . Ugao između envelope Morovog kruga i ose normalnog napona je ugao unutrašnjeg trenja (sl. 4.4). Na bazi ovakvog definisanja ugla unutrašnjeg trenja mogu se testom koji je principijelno prikazan na slici 4.5. odrediti normalni naponi u vertikalnom i horizontalnom pravcu. Na bazi dobijenih podataka (najmanje dve probe) konstruiše se Morov krug napona i određuje ugao envelope prema osi normalnog napona. Taj ugao je, kao što je već konstatovalo ugao unutrašnjeg trenja.



Sl. 4.4. Morovi krugovi napona i ugao unutrašnjeg trenja

Aparatura za određivanje ugla unutrašnjeg trenja prikazana je na slici (sl. 4.5). Nasuti materijal (naprimer zрно) nalazi se unutar fleksibilne membrane, koja je cilindričnog oblika. Podloga i gornja baza cilindra su kruti. Uzorak sa membranom nalazi se u hermetičkoj komori. Na gornju bazu deluje se silom, koja se meri pomoću osetljivog senzora. Pri dejstvu ove sile uzorak sa membranom zauzima buričasti oblik. Tada se dovodenjem vazduha pod pritiskom povećava pritisak u komori sve dotle dok uzorak ponovo ne poprimi cilindrični oblik. Kad je to postignuto zatvara se ventil za dovod vazduha i očitava se pritisak u komori. Očitani pritisak jednak je horizontalnom naponu u uzorku. Vertikalni napon je posledica vertikalne sile na gornju bazu. Tu silu treba podeliti za površinom baze cilindra pa dobiti vertikalni napon. Ako je konstrukcija aparature kao na datoj slici (sl. 4.4) tada ovom naponu treba pridodati i pritisak koji dejstvuje i odozgo na bazu.

Odnos normalnih napona se izražava kao:

$$k = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} \quad (4.9)$$

Odnos normalnih napona k se određuje na bazi poznavanja ugla unutrašnjeg trenja - Φ_i :

$$k = \frac{1 - \sin \Phi_i}{1 + \sin \Phi_i} \quad (4.10)$$

Horizontalni napon - pritisak na bočnu površinu skladišta za visoka skladišta (silosne ćelije) zavisi od faktora k (koji zavisi od ugla unutrašnjeg trenja) izračunava se po jednačini *Janssen*-a:

$$\sigma_3 = \frac{\rho_n g R}{\mu_s} \left(1 - e^{-k \mu_s \frac{y}{R}} \right) \quad (4.11)$$

gde je:

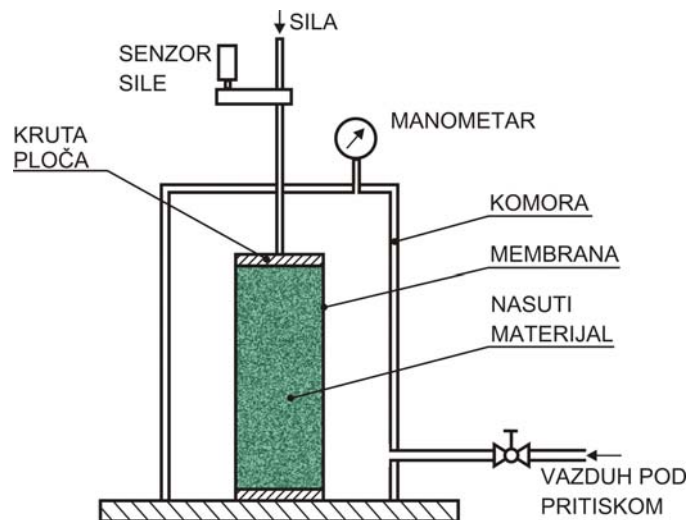
ρ_n - nasipna gustina (nasipna masa) materijala,

μ_s - statički koeficijent trenja između nasutog materijala i materijala zida skladišta,

R - odnos površine poprečnog preseka skladišta (silosa) i obima tog preseka,

g - ubrzanje zemljine teže i

y - visina nasutog materijala iznad mesta za koji se računa bočni pritisak.



Sl.4.4. Princip testa za određivanje naponskog stanja zrnastih proizvoda triaksijalnom kompresijom

U slučaju niskih skladišta (podna skladišta) za izračunavanje horizontalnog normalnog napona (bočni pritisak) koristi se *Raakin*-ova jednačina:

$$\sigma_3 = \rho_n g y \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\Phi_i}{2} \right) \quad (4.12)$$

Pritisak na dno skladišta se, u oba slučaja, može izračunati na osnovu izračunatog bočnog pritiska i poznavanja ugla unutrašnjeg trenja:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_3}{k} = \frac{\sigma_3}{\frac{1 - \sin \Phi_i}{1 + \sin \Phi_i}} \quad (4.13)$$

Unutrašnje trenje je veličina koja direktno utiče na projektovanje skladišta. Pored toga, ugao unutrašnjeg trenja je važan i za manipulaciju u skladištu, posebno je to značajno u slučaju punjenja i pražnjenja silosa. Treba ipak imati na umu da prethodne jednačine, koje se odnose na izračinavanje bočnih pritisaka na zidove skladišta nasutog materijala treba korigovati, s obzirom na činjenicu o nehomogenosti nasutog materijala, a samim tim i nehomogenosti ugla unutrašnjeg trenja. Pri projektovanju treba o tome voditi računa i uzimati odgovarajuće stepen sigurnosti pri proračunu.