

Svojstva tvari

1. Uvod
2. Podsjetnik iz mehanike materijalne točke
3. Osnovni pojmovi i fizikalna svojstva
4. Jednadžba stanja tvari
5. Termodinamički zakoni

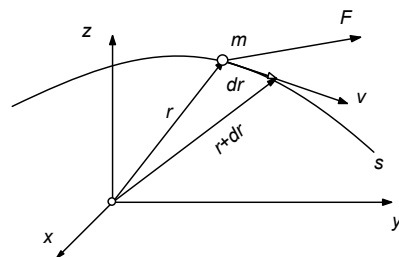
1. Uvod

U ovom će se poglavlju prikazati osnovni pojmovi koji se uče u fizici, odnosno u mehanici materijalne točke, te u otpornosti materijala i termodinamici, a potrebni su za razumijevanje gradiva mehanike tekućina. Stoga ovo poglavlje treba shvatiti kao nužan podsjetnik na prethodno svladana znanja.

2. Podsjetnik iz mehanike materijalne točke

2.1. Materijalna točka

Materijalna točka (ili čestica) je zamišljeno materijalno tijelo čija se masa m pridodaje točki. Mehanika materijalne točke promatra gibanje krutih (nestišljivih i nedeformabilnih) tijela kao gibanje točke ili sustava materijalnih točaka. Gibanje materijalne točke pod djelovanjem sile prikazano je na slici 1.1.



Slika 1.1. Gibanje materijalne točke

2.2. Brzina

Brzina je jednaka derivaciji puta po vremenu:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad [\text{m/s}]. \quad (1.1)$$

2.3. Ubrzanje

Ubrzanje je jednako derivaciji brzine po vremenu:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad [\text{m/s}^2]. \quad (1.2)$$

2.4. Drugi Newtonov zakon

Brzina promjene količine gibanja materijalne točke jednaka je zbroju svih sila koje djeluju na masu u gibanju:

$$\frac{d}{dt}(m\vec{v}) = \vec{F} \quad [\text{N}], \quad (1.3)$$

gdje je m masa u [kg], \vec{v} brzina u [m/s] i \vec{F} sila u [N]. Deriviranjem količine gibanja dobije se:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{v} \frac{dm}{dt} = \vec{F}. \quad (1.4)$$

Kako je za konstantnu masu:

$$\frac{dm}{dt} = 0, \quad (1.5)$$

u gibanju čestice konstantne mase postoji dinamička ravnoteža inercijske i vanjske sile:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}. \quad (1.6)$$

2.5. Promjena količine gibanja

Integracijom (1.3) uzduž putanje između dviju točaka dobije se zakon o promjeni količine gibanja:

$$\begin{aligned} d(m\vec{v}) &= \vec{F} dt, \\ (m\vec{v})_2 - (m\vec{v})_1 &= \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} dt \quad [\text{Ns}]. \end{aligned} \quad (1.7)$$

2.6. Promjena kinetičke energije i rad sila

Množenjem (1.6) elementom pomaka na putanji te integracijom između dviju točaka dobije se:

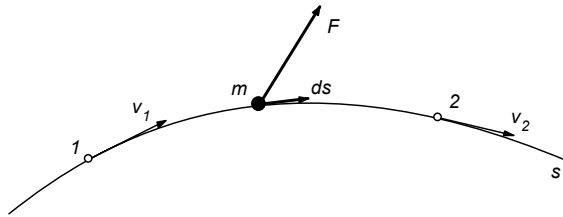
$$\frac{d}{dt}(m\vec{v}) = \vec{F} \quad | \quad \cdot \quad d\vec{s}$$

$$d(m\vec{v}) \frac{d\vec{s}}{dt} = \vec{F} \cdot d\vec{s},$$

$$d(m\vec{v})\vec{v} = \vec{F} \cdot d\vec{s}.$$

Promjena kinetičke energije jednaka je radu sile:

$$d\left(m\frac{v^2}{2}\right) = \vec{F} \cdot d\vec{s} \quad [\text{J}], [\text{Nm}]. \quad (1.8)$$



Slika 1.2. Uz rad sile na putu s

Promjena količine gibanja između dviju točaka na putanji jednaka je radu sile:

$$\left(m\frac{v^2}{2}\right)_2 - \left(m\frac{v^2}{2}\right)_1 = \int_{s_1}^{s_2} \vec{F} \cdot d\vec{s} = W(s_1, s_2) \quad [\text{J}], [\text{Nm}], \quad (1.9)$$

gdje je $W(s_1, s_2) = \int_{s_1}^{s_2} \vec{F} \cdot d\vec{s}$ [J], [Nm] izvršeni rad na putu od s_1 do s_2 .

Za masu konstantnu u gibanju vrijedi:

$$m\left(\frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2}\right) = \int_{s_1}^{s_2} \vec{F} \cdot d\vec{s} \quad [\text{J}], [\text{Nm}]. \quad (1.10)$$

2.6.1. Rad u polju sile teže, potencijalna energija

Promatra se gibanje materijalne točke pod utjecajem sile koja je jednaka težini:

$$\vec{F} = \vec{G} = m(0 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j} - g \cdot \vec{k}) = -mg\vec{k}, \quad (1.11)$$

gdje je g [m/s²] ubrzanje polja sile teže. Brojčana vrijednost ubrzanja polja sile teže ovisi o geografskoj širini i može se izračunati pomoću **međunarodne gravitacijske formule**:

$$g = 9,78049(1 + 0,0052884 \sin \gamma - 0,0000059 \sin^2 2\gamma), \quad (1.12)$$

gdje je γ geografska širina. U Hrvatskoj je uobičajeno računati s vrijednošću $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ (točnije 9,80665) bez obzira na promjenu geografske širine od jednog do drugog kraja zemlje.

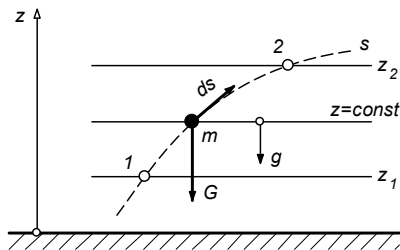
Element puta na kojem se obavlja rad:

$$d\vec{s} = dx \cdot \vec{i} + dy \cdot \vec{j} + dz \cdot \vec{k},$$

$$\vec{F} \cdot d\vec{s} = -mgdz.$$

Promjena kinetičke energije jednaka je:

$$\left(m \frac{v^2}{2}\right)_2 - \left(m \frac{v^2}{2}\right)_1 = - \int_{s_1}^{s_2} mgdz. \quad (1.13)$$



Slika 1.3. Rad u polju sile teže

Za konstantnu masu u gibanju nakon integracije dobije se:

$$\frac{v_2^2}{2} - m \frac{v_1^2}{2} = mgz_1 - mgz_2 \quad [\text{J}], \quad (1.14)$$

odnosno:

$$(mgz)_1 + \left(m \frac{v^2}{2}\right)_1 = (mgz)_2 + \left(m \frac{v^2}{2}\right)_2 = const \quad [\text{J}]. \quad (1.15)$$

To je zakon održanja mehaničke energije koji govori da zbroj potencijalne i kinetičke energije u gibanju materijalne točke ostaje konstantan.

Dijeljenjem izraza (1.15) masom dobije se izraz:

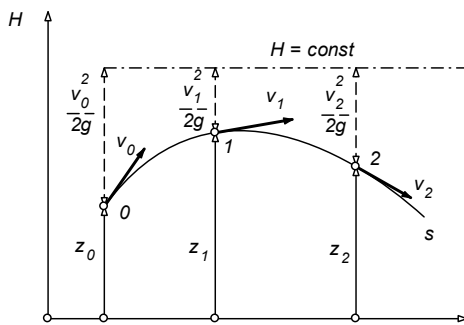
$$gz_1 + \frac{v_1^2}{2} = gz_2 + \frac{v_2^2}{2} = const \quad [\text{J/kg}], \quad (1.16)$$

koji se naziva **zakon održanja specifične mehaničke energije** e_s . Promjena specifične mehaničke energije gibanja konstantne mase jednaka je nuli:

$$d\left(gz + \frac{v^2}{2}\right) = 0. \quad (1.17)$$

Nakon dijeljenja (1.16) s g dobije se visinski oblik:

$$H = z + \frac{v^2}{2g} = const \quad [\text{m}], \quad (1.18)$$



Slika 1.4. Prikaz mehaničke energije u visinskom obliku

koji je prikladan za prikazivanje odnosa potencijalne i kinetičke energije uzduž putanje materijalne točke, vidi sliku 1.4.

2.6.2. Opće konzervativno polje sila

Konzervativno polje sila ima potencijal Ω , a ubrzanje polja \vec{b} jednako je gradijentu potencijala:

$$\vec{b} = -\text{grad } \Omega = -\vec{\nabla}\Omega, \quad (1.19)$$

tako da na masu m djeluje sila (poopćena težina):

$$\vec{F} = m\vec{b} = -m \text{grad } \Omega = -m\vec{\nabla}\Omega. \quad (1.20)$$

Promjena kinetičke energije na putu $d\vec{s}$ bit će:

$$\left(m\frac{v^2}{2}\right)_2 - \left(m\frac{v^2}{2}\right)_1 = -\int_{s_1}^{s_2} m\vec{\nabla}\Omega d\vec{s} = -\int_{s_1}^{s_2} m d\Omega, \quad (1.21)$$

gdje je na desnoj strani rad općeg konzervativnog polja sila¹. Oznake su prema slici 1.5. Ako je masa konstantna, tada se ona može izvući ispred znaka integriranja, pa se nakon integracije totalnog diferencijala, dobije:

$$\left(m\frac{v^2}{2}\right)_2 - \left(m\frac{v^2}{2}\right)_1 = m\Omega_1 - m\Omega_2, \quad (1.22)$$

odnosno, dobije se zakon održanja mehaničke energije u općem konzervativnom polju sila:

$$m\Omega_1 + \left(m\frac{v^2}{2}\right)_1 = m\Omega_2 + \left(m\frac{v^2}{2}\right)_2 = \text{const} \quad [\text{J}]. \quad (1.23)$$

Za jediničnu masu vrijedi:

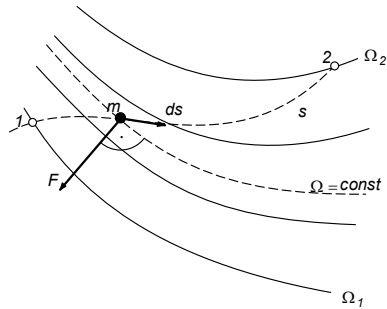
$$\begin{aligned} \Omega + \frac{v^2}{2} &= \text{const}, \\ d\left(\Omega + \frac{v^2}{2}\right) &= 0, \end{aligned} \quad (1.24)$$

tj. specifična mehanička energija u općem konzervativnom polju sila je konstantna, odnosno promjena specifične mehaničke energije uzduž gibanja jednaka je nuli.

2.6.3. Rad nekonzervativnih sila

Pretpostavit će se da u gibanju uz konzervativnu silu (težina, odnosno poopćena težina), sudjeluju još i nekonzervativne sile, npr. sila otpora (kao što su trenje tijela po podlozi, viskozno trenje itd.). Karakteristika ovih sila je da se suprotstavljaju gibanju, tj.

¹Rad sile u konzervativnom polju po zatvorenoj krivulji jednak je nuli, dakako uz pretpostavku konstantne mase. Mehanika materijalne točke bavi se gibanjem konstantne mase.



Slika 1.5. Rad u općem polju sila

djeluju suprotno od smjera brzine. Rad ovih sila po zatvorenoj krivulji nije jednak nuli. Označi li se ukupna sila otpora po jedinici mase, tj. specifične sile otpora, oznakom \vec{f}_o , tada će rad sila otpora biti jednak:

$$W_o = m \int_{s_1}^{s_2} \vec{f}_o \cdot d\vec{s} = -m \left| \int_{s_1}^{s_2} \vec{f}_o \cdot d\vec{s} \right| = -mw_o, \quad (1.25)$$

koji je uvijek negativan. Oznaka w_o predstavlja apsolutnu vrijednost rada specifične sile otpora. Promjena kinetičke energije na putu $d\vec{s}$, bit će:

$$\left(m \frac{v^2}{2} \right)_2 - \left(m \frac{v^2}{2} \right)_1 = -m \int_{s_1}^{s_2} d\Omega - mw_o, \quad (1.26)$$

odnosno, nakon izračunavanja rada konzervativne sile, može se napisati:

$$m\Omega_2 + \left(m \frac{v^2}{2} \right)_2 - m\Omega_1 - \left(m \frac{v^2}{2} \right)_1 = -mw_o \quad [\text{J}]. \quad (1.27)$$

Iz izraza (1.27) se vidi da mehanička energija, odnosno specifična mehanička energija, nije konstantna uzduž putanje, već se smanjuje. Promjena specifične energije jednaka je specifičnom radu sila otpora:

$$\begin{aligned} de_s &= -w_o, \\ de_s + w_o &= 0. \end{aligned} \quad (1.28)$$

Dobiveni se rezultat, na prvi pogled, čini nelogičnim jer proturječi zakonu održanja energije. Kako je poznato, energija izoliranog tijela u gibanju ostaje konstantna. Postaje očito da je izvršeni rad sila otpora pretvoren u neki drugi oblik energije, koji nije mehanička energija. U smislu mehaničke energije može se govoriti o gubitku (disipaciji) energije uslijed sila otpora.

Postavlja se pitanje u koji se oblik energije pretvorio mehanički rad sila otpora. Odgovor na pitanje se ne može dobiti u okviru mehanike materijalne točke (krutog tijela). Potrebno je stoga promotriti strukturu stvarnog (realnog) tijela i okoline u kojoj se gibanje zbiva, tj. proučiti nešto dublje strukturu i ponašanje tvari (materije, supstance) od koje su tijelo i okolina stvoreni.

2.7. Snaga

Brzina promjene kinetičke energije jednaka je brzini promjene rada sila, tj. snazi djelovanja sila:

$$\frac{d}{dt} \left(m \frac{v^2}{2} \right) = \vec{F} \frac{d\vec{s}}{dt}, \quad (1.29)$$

odnosno:

$$\frac{d}{dt} \left(m \frac{v^2}{2} \right) = \vec{F} \cdot \vec{v} = P \quad [\text{J/s}], \quad [\text{W}], \quad (1.30)$$

gdje je P snaga djelovanja sila. U integralnom obliku za gibanje od točke 1 do točke 2 vrijedi:

$$\int_1^2 d \left(m \frac{v^2}{2} \right) = \left(m \frac{v^2}{2} \right)_2 - \left(m \frac{v^2}{2} \right)_1 = \int_1^2 \vec{F} \cdot \vec{v} dt = \int_1^2 P dt. \quad (1.31)$$

Za konstantnu masu u gibanju vrijedi:

$$m \left(\frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} \right) = \int_1^2 \vec{F} \cdot \vec{v} dt. \quad (1.32)$$

3. Osnovni pojmovi i fizikalna svojstva

3.1. Pristup određivanju svojstava tvari

Svojstva tvari (materije, supstance) moguće je istraživati na dva načina i to koristeći:

- **Termodinamiku**, koja izučava svojstva tvari s makroskopsko-fenomenološkog gledišta te opis zasniva na parametrima mase, volumena tijela i tlaka.
- **Molekularno-kinetičku teoriju**, koja polazi od predodžbe tvari kao objekta koji se sastoji od mnoštva molekula, te svojstva tvari tumači statističkim metodama.

Neki pojmovi uvedeni u termodinamici svoje pravo tumačenje nalaze tek u molekularno-kinetičkoj teoriji. Stoga je najbolje koristiti oba pristupa.

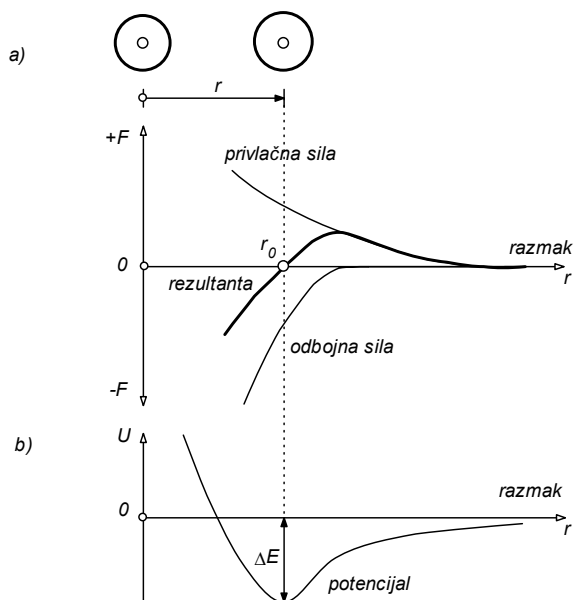
3.2. Faze tvari

Iz neposrednog je iskustva poznato da neke tvari postoje kao **plinovi** (npr. zrak, vodena para) za koje je potreban vanjski tlak kako bi tijelo ostalo na okupu, odnosno kao **kapljevine** (npr. voda, ulje) koje lako mijenjaju oblik ili pak **čvrsto** tijelo (npr. čelik, minerali, led), koje se snažno suprotstavlja mijenjanju oblika.

Isto tako, iskustveno poznajemo da se voda, ovisno o temperaturi, može pojaviti u sva tri fazna oblika (agregatna stanja). No, tek se dubljim istraživanjem može spoznati da se svaka tvar u određenim okolnostima može pojaviti u sva tri fazna oblika istodobno.

U nastavku će se prikazati osnovni pojmovi vezani za stanje tvari, na način da se lako mogu protumačiti ne samo faze tvari, već i druge pojave koje poznajemo iz makroskopsko – fenomenološkog ponašanja tvari.

Tvari su sastavljene od mnoštva atoma koji tvore molekule. Molekule nekih tvari tvori jedan atom. Molekula je najjednostavniji objekt koji određuje svojstva tvari.



Slika 1.6. Međumolekularne sile

Između molekula djeluju privlačne i odbojne sile² koje su u ravnoteži, prikazano na slici 1.6 a). Pokušaju li se molekule razdvojiti, tome će se suprotstaviti sila privlačenja i obrnuto. Ako se molekule pokušaju približiti, tome se suprotstavlja sila odbijanja. Na većim udaljenostima, npr. većim od desetak angstroma, djelovanje međumolekularnih sila postaje zanemarivo.

Međumolekularno se djelovanje također može izraziti preko *potencijalne energije* međumolekularnog djelovanja. Ravnotežno se stanje javlja kod minimuma potencijalne energije, vidi sliku 1.6 b).

Za razdvajanje molekula potrebno je uložiti energiju koja se naziva *energijom dislokacije* ΔE , a ovisna je o vrsti molekula, tj. o vrsti tvari.

Raspored molekula u nekom čvrstom tijelu nije statičan jer molekule neprekidno titraju oko ravnotežnog položaja, tj. imaju *unutarnju kinetičku energiju*.

²U svome velikom djelu Ruđer Josip Bošković (1711. – 1787.): “Philosophiae naturalis theoria redacta ad unicum legem virium in naturae existentium” (Teorija prirodne filozofije svedena na jedinstven zakon sila koje djeluju u prirodi), 1758, postavio je nov zakon sila koje djeluju među točkama što čine tijelo.

Temperatura tijela je proporcionalna srednjoj vrijednosti unutarnje kinetičke energije:

$$T \propto \frac{1}{2} \overline{m u^2} \quad [\text{K}]. \quad (1.33)$$

Apsolutna temperaturna nula odgovara stanju mirovanja molekula te iznosi $-273,15^\circ\text{C}$. Temperatura se mjeri u Kelvinima. Veza između Celzijeve temperaturne ljestvice i temperature u Kelvinima (apsolutna temperatura) je:

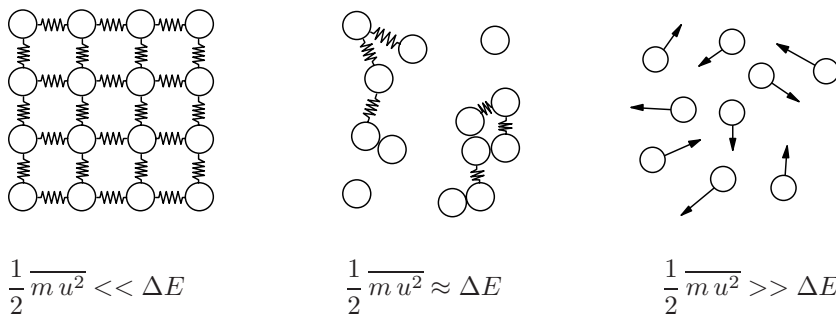
$$T = (t + 273,15) \quad [\text{K}], \quad (1.34)$$

gdje je t temperatura u $^\circ\text{C}$.

Za lakše poimanje strukture i pojava vezanih za faze tvari predočit će se kinetički simulator strukture tvari, vidi sliku 1.7. Molekule su predstavljene kuglicama međusobno povezanih oprugama. Opruge oponašaju privlačne i odbojne sile, odnosno njihova čvrstoća predstavlja energiju dislokacije. Pritom, ako se radi o čvrstom tijelu, kuglice titraju oko ravnotežnog položaja čija srednja kinetička energija predstavlja temperaturu tijela.

Unutarnja se kinetička energija može povećavati. Npr. pojačanim titranjem jedne kuglice, titranje se prenosi prvo na susjedne, zatim na sve ostale, da bi se titranje svih kuglica izjednačilo. U naravi se povećanje titranja molekula ostvaruje zagrijavanjem tvari.

Čvrsta faza tvari pojavljuje se kada je srednja kinetička energija molekula značajno ispod energije dislokacije molekula. Tvar postavljena na neku podlogu zadržava oblik pod djelovanjem težine zahvaljujući stabilnom rasporedu molekula, tj. postojanju međumolekularnih veza koje tvore kristalnu rešetku.



Slika 1.7. Čvrsta, kapljevinasta i plinovita faza tvari

Kapljevinasta faza tvari pojavljuje se kada je srednja kinetička energija molekula reda veličine energije dislokacije. Pojedine molekule postaju slobodne dok se preostale pojavljuju u skupinama sa zadržanim ili djelomično prekinutim vezama. Tvar ne može zadržati prvobitni oblik u polju sile teže, već je oko tvari potrebno postaviti zidove da se ne razlije po podlozi.

Kapljovina u posudi na slobodnom kraju izbacuje slobodne molekule koje se uslijed težine ponovno vraćaju, čineći prividno diskontinuiranu površinu s tankim slojem plinovite faze – pare.

Plinovita faza pojavljuje se kada je kinetička energija molekula značajno iznad energije dislokacije molekula. Tvar se nastoji proširiti po prostoru, pa ju je potrebno zatvoriti u posudu.

Plinovi i kapljevine mogu teći te se nazivaju **tekućine ili fluidi**. Kasnije će se točnije odrediti tekućine kojima se bavi mehanika tekućina.

3.3. Gustoća, specifični volumen i količina tvari

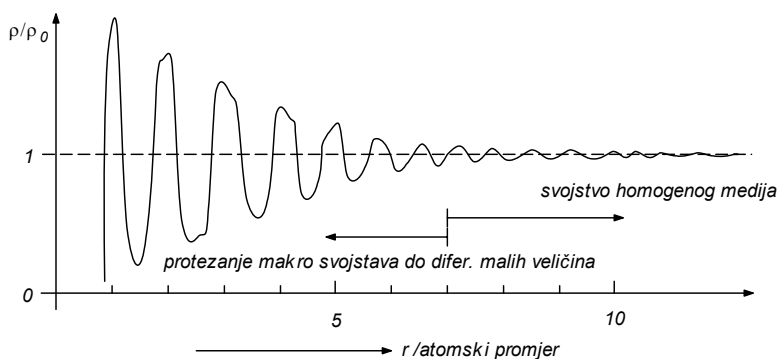
Gustoća mase je omjer mase i volumena neke tvari. Npr. jedan kubični metar vode ima masu od tisuću kilograma, jedan kubični decimetar ima masu od jednog kilograma.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]. \quad (1.35)$$

Specifični volumen je recipročna vrijednost gustoće:

$$v_s = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad [\text{m}^3/\text{kg}]. \quad (1.36)$$

Smanjivanjem volumena uzorka gustoća ostaje konstantnom sve dok volumen ne dosegne razinu razmaka molekula. Tada omjer (1.35) počinje varirati ovisno o tome koliko je molekula tvari zahvaćeno uzorkom. Razmak molekula nije beskonačno mali, npr. razmak molekula vode je cca 10^{-8} cm, te je očito da je voda sve prije nego li **kontinuum**, tj. neprekinuta sredina. Isti se zaključak može izvesti i za druge tvari.



Slika 1.8. Gustoća tekućine, proširenje makro vrijednosti do nule

U mehanici kontinuuma koristi se diferencijalni račun u kojem je potrebno poznavati vrijednosti svih polja u točkama prostora. Stoga se realna materijalna sredina zamjenjuje kontinuumom, tj. **modelom** neprekinute sredine, na način da se sva svojstva iz homogenog volumena makro dimenzija ekstrapoliraju do diferencijalno malog. Primjenom ovog

načela, masa tijela se izračunava integriranjem:

$$m = \int_V \rho dV, \quad (1.37)$$

gdje je ρ gustoća određena u svim točkama prostora koji zauzima tijelo, tj. gustoća je **polje** u materijalnom kontinuumu.

Podatci o gustoći, kao i drugi podatci o fizikalnim svojstvima vode i drugih tekućina mogu se pronaći u *Dodatku A, tablica A-1 i druge*.

Mol [mol]

Mol je jedinica mjere za **količinu tvari** u *SI* sustavu mjernih jedinica. Jedan **mol** sadrži toliko jednakih čestica – jedinki (molekula, atoma, elektrona, iona i sl.) koliko atoma ima u 12 grama izotopa ugljika $^{12}_6C$.

Treba razlikovati količinu tvari i masu jer se te dvije veličine, iako proporcionalne, bitno razlikuju. Veza između količine tvari i mase je:

$$n = \frac{m}{M} \quad [\text{mol}],$$

gdje je:

n — količina tvari u [mol]

m — masa tvari u [kg]

M — molarna ('molekularna') masa u [kg/mol]

Tako npr. količini tvari vodika od 1 mola odgovara masa vodika 0,002016 kg, dok **molarna masa vode kod 25°C iznosi 0,018015 kg/mol**.

Molarna masa izračunava se iz atomskog sastava molekula. Npr. za vodu u kojoj se molekula vode sastoji od dva atoma vodika i jednog atoma kisika, molarna je masa jednaka zbroju molarne mase dvaju atoma vodika i jednog atoma kisika: $2 \cdot 1,008 + 16,00 = 18,016$ [g/mol].

Iz definicije mola je jasno da molovi svih tvari sadrže isti broj jedinki. Pokusom je utvrđeno da broj jedinki u jednom molu iznosi N_A , koji se naziva **Avogadrovim brojem**.

A. Avogadro je 1811. g. objavio pretpostavku da je molarni volumen v_m pri istoj temperaturi i tlaku za različite plinove jednak te da sadrži jednak broj molekula. Vrijednost Avogadrovog broja je: $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

Molarni volumen

$$v_m = \frac{V}{n} \quad [\text{m}^3/\text{mol}], \quad (1.38)$$

odnosno:

$$v_m = \frac{V}{\frac{m}{M}} = \frac{M}{\rho}. \quad (1.39)$$

3.4. Prijenos sila kroz tvari. Naprezanje i tlak

3.4.1. Vrste sila

Teško je točno kazati što je to sila. Postojanje sile uočavamo u međudjelovanju tijela jer iz iskustva znamo da kad guramo ili vučemo neki predmet, ili kad rastežemo oprugu, ili kad odvajamo magnet od komada željeza, djelujemo našim mišićima, tj. upotrebljavamo silu. U iznesenim primjerima govorimo o djelovanju vanjske sile na tijelo.

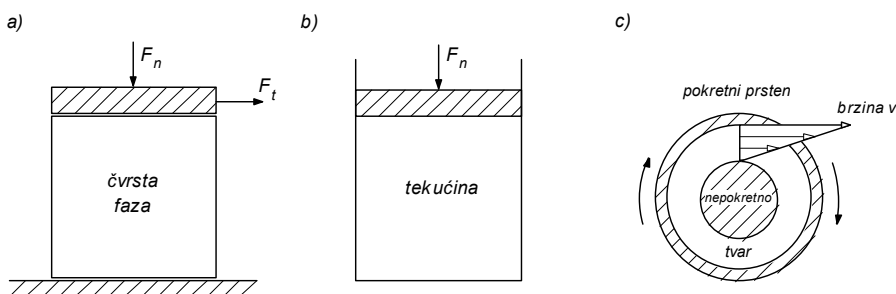
Na tijelo u polju sile teže djeluje sila koja se naziva težina. To je sila koja djeluje na masu tijela, tj. svaku jedinku u tvari. U poglavlju o hidrostatici pojam težine se poopćava na opću volumensku silu. Ubrzanje polja sile teže označavamo s g [m/s^2], tako da se težina nekog homogenog tijela izračunava umnoškom mase i ubrzanja (*Newtonov zakon*) $G = mg = \rho g V$, odnosno nehomogenog, integracijom preko volumena tijela:

$$G = \int_V \rho g dV. \quad (1.40)$$

Djelovanje sile na neko tijelo prikazujemo vektorom, tj. prikazujemo pravac i veličinu djelovanja sile. Sila ima i hvatište. Npr. djelovanje sile teže na sve masene elemente tijela zamjenjujemo silom kojoj je hvatište u težištu tijela.

3.4.2. Naprezanje

U općem je slučaju vanjska sila koso položena u odnosu na površinu plašta tijela, pa je rastavljamo na normalnu i tangencijalnu komponentu. Djelovanje sile po jedinici površine naziva se *naprezanje*. U ovom uvodnom dijelu o mehanici tekućina neće se razmatrati opći pojam naprezanja, koji dovodi do pojma *tenzora naprezanja* kao matematičkog objekta.



Slika 1.9. Uređaji za ispitivanje prijenosa sila u tvarima:
 a) uređaj za ispitivanje tlačnih i posmičnih naprezanja u čvrstoj fazi tvari
 b) uređaj za ispitivanje stišljivosti tekućina (kapljevina i plinova)
 c) uređaj za ispitivanje osobina tečenja tvari.

Prosječno djelovanje normalne sile na neku površinu naziva se **tlačno** ili **vlačno naprezanje**, ovisno o smjeru djelovanja sile:

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta A} \quad [\text{N/m}^2] \text{ ili } [\text{Pa}]. \quad (1.41)$$

Prosječno djelovanje tangencijalne sile na neku površinu naziva se **posmik** ili **posmično (tangencijalno) naprezanje**:

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_t}{\Delta A} \quad [\text{N/m}^2] \text{ ili } [\text{Pa}]. \quad (1.42)$$

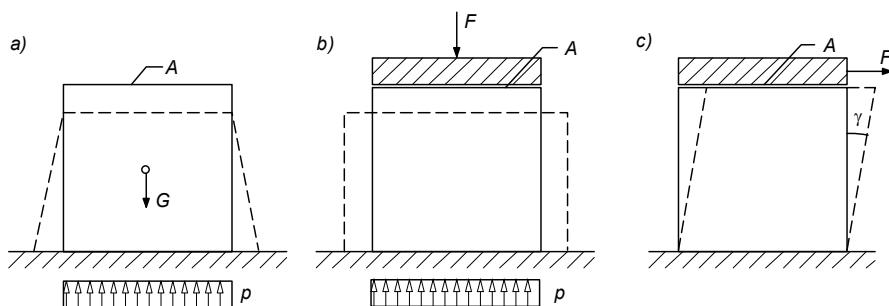
Na slici 1.9 shematski su prikazani uređaji za ispitivanje prijenosa sila kroz tijela u različitim faznim oblicima.

3.4.3. Naprezanja u čvrstoj tvari

Ponašanje čvrste tvari pri djelovanju sila može se naslutiti primjenom kinetičkog modela čvrste faze tvari. Na slici 1.10 prikazano je:

Djelovanje sile teže na čvrsto tijelo. Sila teže djeluje na svaku molekulu povlačeći je prema dolje, što se prenosi na susjedne molekule, akumulirajući djelovanje od vrha do dna. Čvrsto tijelo se postupno od vrha do dna sabija i bočno širi radi međumolekularnih sila odbijanja. Na dnu, u dodiru s podlogom se od ukupne težine javlja tlak kao normalno naprezanje, $p = G/A$.

Djelovanje vanjske normalne sile slično se prenosi kroz tijelo, s tim da je tlak jednak u svim horizontalnim presjecima. Tijelo se sabija i bočno širi. Čvrsta faza tvari može primiti i vlačno naprezanje, uslijed kojeg se tijelo rasteže u smjeru djelovanja sile i bočno sužuje. Veličina bočne deformacije određuje se **Poissonovim** brojem.



Slika 1.10. Prijenos sila kroz čvrste tvari:
 a) djelovanje sile teže, b) djelovanje vanjske normalne sile,
 c) djelovanje vanjske posmične sile.

Djelovanje posmičnih sila izaziva kutnu deformaciju kristalne rešetke, proporcionalno prosječnom posmičnom naprezanju.

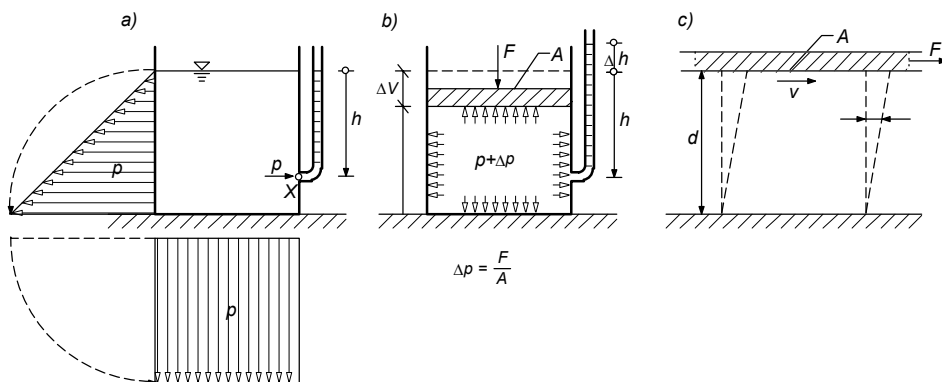
Prestankom djelovanja sile tijelo se vraća u prvobitni oblik ako pod djelovanjem sila nije došlo do promjene u strukturi međumolekularnog rasporeda. Takvo tijelo naziva se elastično tijelo. Ovdje se neće ulaziti u detaljna razmatranja ponašanja čvrstih tijela iz jednostavnog razloga što se ovo gradivo proučava u drugim disciplinama.

3.4.4. Tlak u kapljevine

U kapljevinafazi tijelo ne može zadržati svoj oblik jer se razlijeva. Razlijevanje kapljevine se sprječava stavljanjem u posudu prema slici 1.11.

Djelovanje sile teže. Sila teže djeluje na svaku molekulu, slično kao u slučaju čvrste faze, povlačeći je prema dolje, tiskajući ispod nje molekule koje se izmiču iz trenutnog položaja u svim slobodnim smjerovima.

Izbacivanje molekula je spriječeno zidom posude tako da se javlja tlak molekula jednak tlaku težine stupca kapljevine iznad promatrane točke X : $p = \rho gh$, gdje je ρ gustoća kapljevine, a g ubrzanje sile teže. Kako tlak djeluje u svim smjerovima istim intenzitetom, u priključenoj cjevčici na zidu posude podignut će kapljevinu do razine u posudi. Ovakve cjevčice nazivaju se **piezometrima** te služe za mjerenje tlaka. Ukupno tijelo kapljevine je uravnoteženo, a tlak u tekućini naziva se hidrostatički tlak.



Slika 1.11. Prijenos sila u kapljevine:

a) djelovanje sile teže, b) djelovanje vanjske normalne sile, c) tečenje kapljevine.

Djelovanje vanjskih normalnih sila. Tlak vanjskih sila se uslijed pokretljivosti molekula jednako prenosi u svim smjerovima. Uslijed djelovanja tlaka kapljevina se sabija, tj. ima volumensku deformaciju. Uspostavljeni tlak se može izmjeriti u cjevčici u kojoj se podigne kapljevina za odgovarajuću težinu stupca kapljevine $h + \Delta h = (p + \Delta p) / \rho g$.

Djelovanje posmičnih sila. Kapljevina se pod djelovanjem posmičnih sila neprekidno deformira – teče. Između slojeva kapljevine koja teče javlja se unutarnje trenje.

Vlačna naprezanja u kapljevini. Iz iskustvene činjenice da se voda može lako razdvojiti u dva dijela, moglo bi se zaključiti da voda ne može primiti nikakva vlačna napreznja. No, to ipak nije točno, što se može potvrditi jednostavnim pokusom.

Neka se staklena cijev debljih stijenki (koja je s jedne strane zatvorena, a s druge ima ventil) djelomično napuni vodom, tako da ostane stanoviti manji neispunjeni volumen iz kojeg se isiše zrak, pa se iznad vode stvori mjehur vodene pare. Zatim se cijev lagano zagrije, tako da voda proдре u cijeli volumen. Nakon hlađenja cijevi do početne temperature, mjehur pare se ne pojavljuje ponovno, a voda je u rastegnutom stanju, tako da zauzima cijelu cijev. Daljnjim hlađenjem voda naglo prelazi u mnoštvo sitnih mjehurića po cijelom volumenu cijevi, koji se uslijed uzgona počinju uzdizati i skupljati u jedan mjehur iznad vode. Negativno naprezanje koje se pojavljuje reda je veličine 10^6 Pa za tekući argon, ili 10^7 Pa za živu. Radi usporedbe veličina, čelik ima vlačnu čvrstoću oko 10^9 Pa.

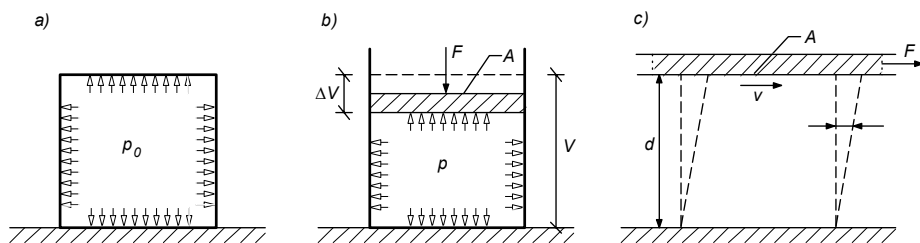
3.4.5. Tlak u plinu

Plinovitu fazu u željenom obliku može se zadržati samo potpunim zatvaranjem u spremnik jer se, uslijed potpunog kidanja međumolekularnih veza, molekule teže razbježati po cijelom prostoru.

Na stijenke posude u kojoj je zatvoren plin djeluje **tlak plina** kao rezultat sudaranja molekula sa zidom, te ima, prema molekularno–kinetičkoj teoriji, vrijednost:

$$p = \frac{1}{3} n_0 \overline{m u^2}, \quad (1.43)$$

gdje je n_0 broj molekula u jediničnom volumenu. To je unutarnji tlak koji je uzrokovan unutarnjom kinetičkom energijom plina. Dakako, djelovanje sile teže i vanjskih normalnih sila na plinovitu fazu slično je kao kod kapljevina. Sila teže povećava tlak plina za vrijednost hidrostatičkog tlaka koji je radi male gustoće često zanemariv.



Slika 1.12. Prijenos sila kroz plinove:

a) unutarnji tlak, b) djelovanje vanjskih sila, c) posmično tečenje.

Normalne sile sabijaju plin povećavajući unutarnji tlak za vrijednost prosječnog napreznja $p = F/A$. Posmične sile izazivaju tečenje plina.