



UNIVERZITET U TUZLI
RUDARSKO-GEOLOŠKO-GRAĐEVINSKI FAKULTET

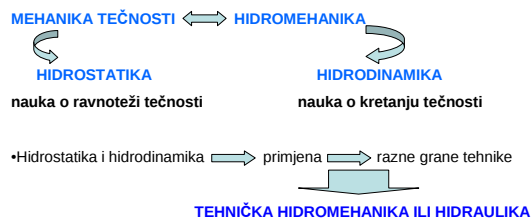


HIDROMEHANIKA

Prof. dr. sc. NEDIM SULJIĆ, dipl.ing.građ.

1

PODJELA MEHANIKE FLUIDA I OSOBINE TEČNOSTI



•HIDROMEHANIKA:

- Proučava opšte zakone mehaničkog kretanja i mirovanja tečnosti

2

•HIDRAULIKA:

- Poseban dio *Mehanike fluida*
- Grčke riječi (*hydor* = voda; *eulos* = cijev)
- Proučava: zadatke ravnoteže i kretanje tečnosti (fluida)
- Fluid = materija koja se kontinuirano deformiše (teče pod dejstvom tangen. napona)
- Podjela na: a) **HIDROSTATIKA**
b) **HIDRODINAMIKA**

-**HIDROSTATIKA**: zakoni mirovanja i ravnoteže tečnosti

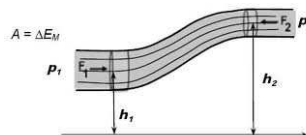
-**HIDRODINAMIKA**: zakoni kretanja tečnosti i zakoni kretanja čvrstih tijela u tečnosti

3

•**HIDRAULIKA** → rješava praktične zadatke iz ravnoteže i kretanja tečnosti

veliki značaj u građevinarstvu i mašinstvu

rješava zadatke o iskorištenju vodne energije
projektovanje vodnih turbina
projektovanje pumpi i drugih hidrauličkih mašina
zadaci vodoopskrbe vodom, navodnjavanja i vodnog prometa



$$p = \frac{F}{A}$$

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$

4

MEĐUNARODNI SISTEM MJERNIH JEDINICA

OSNOVNE SI JEDINICE:

Fizička veličina	Naziv	Oznaka
Duljina	<u>metar</u>	m
Masa	<u>kilogram</u>	kg
Vrijeme	<u>sekunda</u>	s
Jakost električne struje	<u>amper</u> (ampere)	A
Termodinamička temperatura	<u>kelvin</u>	K
Količina tvari	<u>mol</u>	mol
Svjetlosna jakost	<u>kandela</u> (candela)	cd

5

IZVEDENE SI JEDINICE

Fizička veličina	Naziv	Oznaka	Definicija
Frekvencija	hertz (hertz)	Hz	s ⁻¹
Sila	newton (newton)	N	m kg s ⁻²
Tlak	pascal (pascal)	Pa	N m ⁻²
Energija	džul (joule)	J	N m
Snaga	vat (watt)	W	J s ⁻¹
Količina elektriciteta	kulon (coulomb)	C	s A
Električni napon	volt	V	W A ⁻¹
Električni kapacitet	farad	F	C V ⁻¹
Električni otpor	ohm (ohm)	Ω	V A ⁻¹
Električna vodljivost	siemens (siemens)	S	A V ⁻¹
Magnetski tok	veber (weber)	Wb	V s
Magnetska indukcija	tesla	T	Wb m ⁻²
Induktivnost	henri (henry)	H	Wb A ⁻¹
Celsiusova temperatura	stupanj Celciusov	°C	K
Svjetlosni tok	lumen	lm	cd sr
Osvjetljenost	luk (lux)	lx	lm m ⁻²
Aktivnost radionuklida	bekerel (becquerel)	Bq	s ⁻¹
Apsorpcijska doza	gray (gray)	Gy	J kg ⁻¹
Ekvivalentna doza	sievert	Sv	J kg ⁻¹

6

DOPUŠTENE JEDINICE IZVAN SI

Fizička veličina	Naziv	Oznaka	Definicija
Duljina	morska milja	-	1852 m
Masa	karat	-	0.0002 kg
	tona	t	1000 kg
Volumen	litra	l, L	1.000028 dm ³
Vrijeme	sat	h	3 600 s
	minuta	min	60 s
Brzina	čvor	-	milja h ⁻¹
Tlak	bar	bar	100 000 Pa
Energija	elektronvolt	eV	1.60 × 10 ⁻¹⁹ J

7

• Agregatna stanja tečnosti → **TEKUĆE, ČVRSTO I GASOVITO**

danas → 4 agregatno stanje → **PLAZMA**

PLAZMA → materija u gasovitom stanju pod tako visokom temp da je nastupila ionizacija i disocijacija

PLAZMA → sastav → slobodni elektroni i od ioni

• Čvrsta tijela → zadržavaju svoj oblik → promjena oblika nailazi na otpor

• Fluid → poprima oblik posude u kojoj se nalazi → oblik **V** fluida po volji mijenjamo

mijenjanje oblika fluida → nastaju sile otpora deformacije

proporcionalne v deformacije

8

SVOJSTVA VODE:

- Složena supstanca
- Hemijski čista: bezbojna, bez mirisa
- U tankom sloju=bezbojna ➡ u debljem sloju=plavo-zelena
- Mrzne na 0 C (273,15 K)
- Vrije na 100 C (373,15 K) ako je pod stand. $p=101,325 \text{ kPa}$

• Anomalije vode:

- Kod zagrijavanja 0 do 4 C V vode se ne povećava već se smanjuje; max. gustina pri 4 C; V smrznute vode veća za 10%
- Prilikom mržnjenja se širi (ostala tijela se skupljaju) te joj se p smanjuje; Tačka leđišta sa povećanjem p ne raste
- Specifična toplota vode najveća u odnosu na druge materije
- Velika dielektrična const. (sposobnost rastvaranja)
- Od svih tečnosti ima najveći površinski napon (osim žive)

9

OSNOVNE FIZIČKE OSOBINE TEČNOSTI

- Fizičke osobine tečnosti:

- 1) GUSTINA
- 2) TEŽINA
- 3) STIŠLJIVOST (KOMPRESIBILNOST)
- 4) UNUTARNJE TRENJE (VISKOZNOST)
- 5) PRITISAK PARA
- 6) POVRŠINSKI NAPON
- 7) KAPILARNOST



10

- Fizičke osobine fluida možemo vezati za:

- a) konačnu količinu fluida
- b) jednu tačku unutar fluida

- Najpoznatije osobine konačne količine fluida ➡ **MASA I ZAPREMINA**

primjer: možemo izmjeriti m vode u čaši

- Osobine fluida vezane za jednu tačku ne zavise od ukupne količine fluida

primjer: temperatura vode u čaši mjeri se u jednoj tački
neće se promijeniti ako odlijemo određenu količinu fluida iz čaše
ako dolijemo količinu vode ➡ temp. se možda promijeni

razlog promjene temp. ➡ proces difuzije i konvekcije

11

- Većina slučajeva u hidrodinamici ➡ radimo sa veličinama vezanim za 1 tačku

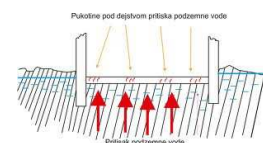
jednostavniji proračun

- Osnovni zadatak Mehanika fluida ➡ poznavati vrijednosti osobina fluida

p , ρ , temperatura . . .

poznavati ih u svakoj tački u svakom periodu t

$$P = \rho gh + P_a$$



12

1) GUSTINA

- Oznaka ρ (kg/m^3)
- Pokazuje raspodjelu mase tečnosti u zapremini
- Matematska definicija:

Granična vrijednost odnosa mase Δm (kg) i zapremine ΔV (m^3), koji u sebi sadrži ovu masu kada posmatrana V teži 0.

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}$$

Gustina tečnosti u svim tačkama V tokom vremena ista $\Rightarrow$ **HOMOGENA TEČNOST**

Gustina tečnosti: f-ja (p , t)

Voda: $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ (za $t = 4^\circ\text{C}$ i normalni atmosferski pritisak)

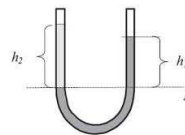
($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ uzimamo u hidrauličkim proračunima)

13

Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Gustoća (kg/m^3)
100	958,4
80	971,8
60	983,2
40	992,2
30	995,6502
25	997,0479
22	997,7735
20	998,2071
15	999,1026
10	999,7026
4	999,9720
0	999,8395
-10	998,117
-20	993,547
-30	983,854

Vrijednosti ispod 0°C se odnose na [pufilačnu](#) vodu.

Gustina vode kod $p = 1 \text{ atm}$ u f-ji od t



14

Mjerenje gustine fluida može se obaviti na različite načine:

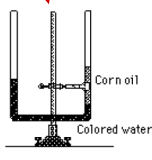
- mjenjem mase poznate zapremine (piknometri)
- hidrostatičkim mjerenjima (Vestfalova vaga i sl)
- pomoću U-cevi,
- hidrometrom i dr.



Hidrometar



Vestfalova (Westphal) vaga



U cijev

15

2) TEŽINA

Dejstvo sile teže na određenu V predstavlja težinu te V tečnosti:

$$\vec{F}_G = \int_V \rho \vec{g} dV$$

$\vec{g}$ = vektor ubrzanja polja sile teže (m/s^2)

Uzimamo $\vec{g} = 9,81 \text{ m/s}^2$ (homogena tečnost, const. ubrzanje polja sile teže unutar V)

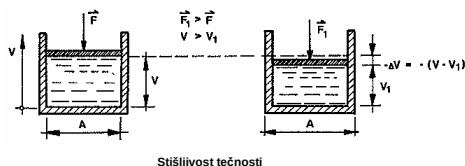
Težina $\Rightarrow$ sila jednaka proizvodu mase krutog tijela i ubrzanja zemljine teže

$$G = m \cdot g$$

16

3) STIŠLJIVOST

- Pod dejstvom okomite sile F , tečnost mijenja svoju V
- Nakon prestanka dejstva sile F , posmatrana V poprima prvobitnu vrijednost



17

- Stišljivost tečnosti izražava se koeficijentom stišljivosti (kompresibilnosti) – K_s (m^2/N)
- K_s = granična vrijednost odnosa promjene V tečnosti ($\Delta V / V$) i promjene p (Δp) koji tu promjenu V uzrokuje, kada posmatrana ΔV teži 0:

$$K_s = - \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta V / V}{\Delta p} = - \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} = - \frac{1}{V} \frac{dV}{dp}$$

- Predznak (-) : znači da povećanje p odgovara smanjenju V i obratno
- Prema zakonu održanja mase: ΔV uzrokuje Δp , i iz uslova $m = \rho V = \text{const.}$ $\Rightarrow$

$$dm = \rho dV + V d\rho = 0$$

odnosno: $-\frac{dV}{V} = \frac{d\rho}{\rho}$

dobijamo: $K_s = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp}$

18

- Recipročna vrijednost K_s označava se sa E (N/m^2) i zove se PROSTORNI ILI ZAPREMINSKI MODUL ELASTIČNOSTI

$$E = \frac{1}{K_s} = -V \frac{dp}{dV} = \rho \frac{dp}{d\rho}$$

- E predstavlja i promjenu p tečnosti usljed promjene normalne sile
- Stišljivost vode veoma mala (ipak, 100 x veća nego kod čelika)
- U praksi se stišljivost vode može zanemariti (jednostavniji proračuni; dobri rezultati)
- Kod vodnog udara (znatno povećanje p) voditi računa o stišljivosti

- I druge tečnosti su uglavnom nestišljive
- Gasovi vrlo stišljivi



19

4) UNUTARNJE TRENJE

- Osobina tečnosti da pruža otpor promjeni oblika

- Veoma važna osobina (unutarmolekularne sile u tečnosti)

- Pri kretanju slojeva tečnosti prema susjednim slojevima, u tečnosti nastaju sile trenja

- Sloj tečnosti koji se pomiče brže, povlači susjedni sloj koji se sporije pomiče

- Zbog sile trenja dolazi do promjene mehaničke energije tečnosti u toplinsku energiju

20

$\tau = \mu \frac{dv}{dy}$

Moving Surface

Fixed Surface

Area A

Force F

$\tau = \frac{F}{A}$

Slika gore (eksperiment):

- tečnost između dvije beskonačne i paralelne i bliske ploče
- donja ploča miruje, gornja usljed dejstva smičuće sile F hor. se kreće brzinom $v=v_0$
- Zbog viskoznosti: v djelića tečnosti u dodiru sa pločama = v ploča (djelići fluida u donjoj ploči miruju ($v=0$), a uz gornju ploču kreću se $v=v_0$ kao i ploča
- Ako L između ploča nije prevelika ili ako v_0 nije prevelika, imamo linearni profil v
- Ograničenje L između ploča i v osigurava slojevito strujanje (laminarno strujanje)
- Linearni profil $v \Rightarrow$ gradijent v je const. u svim tačkama presjeka (dolazi do istog smičućeg naprezanja):

21

- Koeficijent ν (m^2/s) nazvan zbog svoje dimenzije (ulaze samo kinematičke veličine)
- Vrijednost ν mijenja se promjenom t tečnosti

•Tečnost kod koje se usljed dejstva vanjskih sila ne javljaju smičući naponi zovemo

IDEALNE TEČNOSTI

- U prirodi imamo tzv. **REALNE TEČNOSTI** (imaju smičuća naprezanja)
- Nekad zbog pojednostavljenja možemo uzeti da tečnost ima osobine idealne tečn.

•Slučaj tečenja oko nekog tijela ili kretanje tijela kroz tečnost

javlja se sila tečnosti na tijelo i obratno

sila $\Rightarrow$ posljedica viskoznosti tj. unutarnjeg trenja

- U tehnici $\Rightarrow$ trenje vrlo bitan segment u analizi tečenja tečnosti
- trenje $\Rightarrow$ uzročnik nastalih gubitaka mehaničke energije

22

$\tau = \mu \frac{dv}{dz}$

τ – smičući napon (N/m^2)

μ – dinamički koef. unutarnjeg trenja (dinamički koef. viskoznosti) (Ns/m^2)

dv/dz - gradijent brzine ($1/s$)

Gradijent brzine pokazuje koliko se gornji sloj brzo pomiče u odnosu na donji

•Količnik između din. koeficijenta unutarnjeg trenja μ i ρ zove se

KINEMATIČKI KOEFICIJENT UNUTARNJEG TRENTA:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

23

5) PRITISAK PARA

Tečnosti isparavaju (f-ja p i t) radi izmjene kinetičke energije molekula

•Iznad površine tečnosti stvara se karakterističan **TLAK (PRITISAK) PARA**

•Kod vode: **TLAK (PRITISAK) VODENIH PARA** p_{vp} (N/m^2)

- Lokalno isparavanje vode: kod toka vode pritisak padne na p vodenih para
- Mjehurići vodene pare nošeni tokom dođu do mjesta većih p i dolazi do njihovog naglog kondenzovanja i javlja se nagla promjena p i veliki udar pritiska (ova pojava se zove **KAVITACIJA**)
- KAVITACIJA** $\Rightarrow$ mehanički oštećuje hidrotehničku opremu (pumpe, turbine ...)

24

•**KAVITACIJA** ➡ objašnjenje kroz primjer:

- u određenim uslovima toka vode **p** u nekoj tački padne na **p** vodene pare
- dolazi do isparavanja vode na tom mjestu
- mjehurić pare nošen tokom vode dolazi u područje većih **p**
- tu se naglo zgušnjava (pretvara u tečnost)

➡
nagla promjena **p** i vrlo velike i nagle promjene **p**

➡
udar **p** i do **10⁴ bara**

➡
tlačni udar oštećuje i najčvršće metale

➡
pojava malih udubljenja u metalima

KAVITACIJA

25



Uticaj kavitacije na Francisovoj turbini

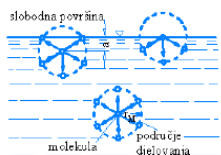
Oštećenje od kavitacije na ploči ventila (hidraulična pumpa sa aksijalnim klipom)

26

6) POVRŠINSKI NAPON

- Javlja se na slobodnoj površini tečnosti
- Slobodna površina tečnosti ponaša se kao zategnuta i razapeta membrana
- Sila po jedinici **L** na zamišljenom presjeku po površini tečnosti = **POVRŠ. NAPON**
- Površinski napon = masi po jedinici vremena na kvadrat**

$$\sigma = M T^{-2}$$



-razlog postojanja σ

znatna razlika u intenzitetu međumolekularnih sila između molekula unutar tečnosti (sile kohezije) i između molekula tečnosti u površinskom sloju i molekula spoljnog fluida (gas ili druga tečnost)

Djelovanje molekularnih privlačnih sila pri slobodnom vodnom licu

27

POVRŠINSKI NAPON:

- slobodna povr. tečnosti u dodiru sa gasom ili granica dvije tečnosti (ne miješaju se)

➡
u stanju jednakog površinskog napona

- na spoju dvije tečnosti ➡ poseban slučaj ravnoteže kohezijskih sila

- Površinski napon (σ) određuje se silom zatezanja

➡
 σ zavisi od prirode tečnosti i njene temperature

- Povećanje temperature ➡ σ se smanjuje

28

-Rad koji vrši sila površinskog napona pri kretanju površinskih molekula je:

$$\Delta A = -\Delta E_p = \alpha \Delta S \Rightarrow \alpha = \frac{\Delta A}{\Delta S} = \frac{J}{m^2} = \frac{Nm}{m^2} = \frac{N}{m}$$

$$\alpha = \frac{\Delta A}{\Delta S} = \frac{F \cdot \Delta s}{\Delta s \cdot l} = \frac{F}{l},$$

gde je;

$\Delta S = \Delta s \cdot l$ promjena površine,
 Δs dimenzija površine koja se mijenja,
 F sila površinskog napona,
 l dužina linije razgraničenja fluida,
 α koeficijent proporcionalnosti

Sila površinskog napona uvijek je:

- 1) tangencijalna na slobodnu površinu tečnosti
- 2) normalna na liniju razgraničenja (ili tangentu na liniju razgraničenja) u tački djelovanja.

29

7) KAPILARNOST

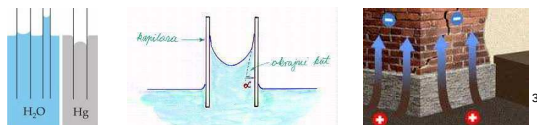
•Sposobnost tečnosti da u cijevima malog d ili u procjepima se podiže ili spušta

uzrok $\Rightarrow$ djelovanje sile površinskog napona (σ)

•Pri 20°C h dizanja za vodu u staklenoj cijevi prečnika d iznosi:

$$h d = \frac{4\sigma}{\rho g} = \frac{4 \cdot 0.0726}{1000 \cdot 9.81} = 3.0 \cdot 10^{-5} \quad h = \frac{30}{d} \text{ (mm)}$$

Kapilarnost $\Rightarrow$ zbog različitih sila **adhezije** između tekućine i površine posude, odnosno σ tekućine, dolazi do toga da površina tekućine nije potpuno vodoravna, već se uz rubove posude zakrivljuje da bi sa zidom posude zatvorila dodirni ugao

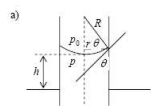


30

KAPILARNE POJAVE:



- a) nivo tečnosti u kapilari veći od nivoa tečnosti u koju je kapilara uronjena i
- b) nivo tečnosti u kapilari manji nego nivo tečnosti u koju je kapilara uronjena



-Nivo tečnosti u kapilari je na visini h iznad slobodne površine tečnosti.
 -Poluprečnik kapilare r i poluprečnik meniskusa R zaklapaju ugao θ , što je ujedno i ugao kvašenja tečnosti (ugao koji meniskus zaklapa sa zidom kapilare).

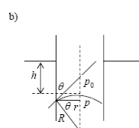
$$R = r / \cos \theta.$$

-Obrazovana površina tečnosti u kapilari naziva se **meniskus**.

$$p_0 = p + \rho g h.$$

p_0 vrijednost pritiska iznad meniskusa, a takođe i iznad slobodne površine tečnosti.
 p je pritisak neposredno ispod meniskusa.

31



-Nivo tečnosti u kapilari je na visini h ispod slobodne površine tečnosti.
 -Poluprečnici kapilare i meniskusa su u relaciji kao i u prethodnom slučaju.

$$p - p_0 = 2\gamma / R.$$

p_0 vrijednost pritiska iznad meniskusa, a takođe i iznad slobodne površine tečnosti.

p je pritisak neposredno ispod meniskusa.

Veza između pritisaka p i p_0 je slijedećeg oblika:

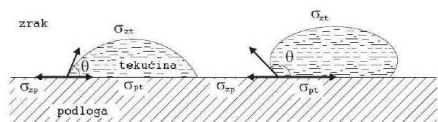
$$p = p_0 + \rho g h.$$

-Kapilara je svaka cijev poluprečnika manjeg od 1mm.

-U njoj se tečnost ne ponaša po zakonu spojenih sudova, odnosno nivo tečnosti u kapilari nije isti kao u slobodnoj površini tečnosti u koju je kapilara uronjena.

32

KAPILARNOST:



kohezija < adhezije
tekućina kvasi podlogu

kohezija > adhezije
tekućina ne kvasi podlogu

- Granica tečnosti i čvrstog tijela
- Odnos kohezionih i adhezionih sila

33

TEMPERATURA VODE		GUSTOĆA	KINEMATIČKA VISKOZNOST	DINAMIČKA VISKOZNOST	TLAK VOĐENIH PARA	POVRŠINSKA NAPETOST	MODUL ELASTIČNOSTI	BRZINA ZVUKA
t	t _{sp}	ρ	ν	μ	p _s	σ	E	c
°C	K	kg/m ³	10 ⁻⁶ m ² /s	10 ⁻³ kg/ms	Pa=N/m ²	N/m	10 ⁹ Pa	m/s
0	273,15	999,8	1,78	1,78	610	0,0761	1,95	1397
4	277,15	1000	1,564	1,564	806	0,075	1,99	1412
10	283,15	999,6	1,31	1,31	1220	0,074	2,04	1429
20	293,15	998,1	1,01	1,01	2340	0,073	2,10	1451
30	303,15	995,5	0,81	0,81	4220	0,071	2,15	1468
40	313,15	992	0,67	0,66	7350	0,069	2,18	1482
50	323,15	998	0,56	0,55	12400	0,068	2,20	1492
60	333,15	983	0,48	0,47	20100	0,066	2,21	1500
70	343,15	978	0,42	0,41	31500	0,064	-2,21	-1506
80	353,15	972	0,36	0,35	47900	0,063	-2,21	-1510
90	363,15	966	0,32	0,31	70500	0,061	-2,2	-1512
100	373,15	958	0,29	0,28	101000	0,059	-2,2	-1512

Fizičke osobine vode

34