

UNIVERZITET U PRIŠTINI

FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA  
KOSOVSKA MITROVICA

INŽENJERSTVO ZAŠTITE ŽIVOTNE  
SREDINE I ZAŠTITE NA RADU

# Upravljanje vodnim resursima

## Fizičke osobine vode

dr Nataša Elezović

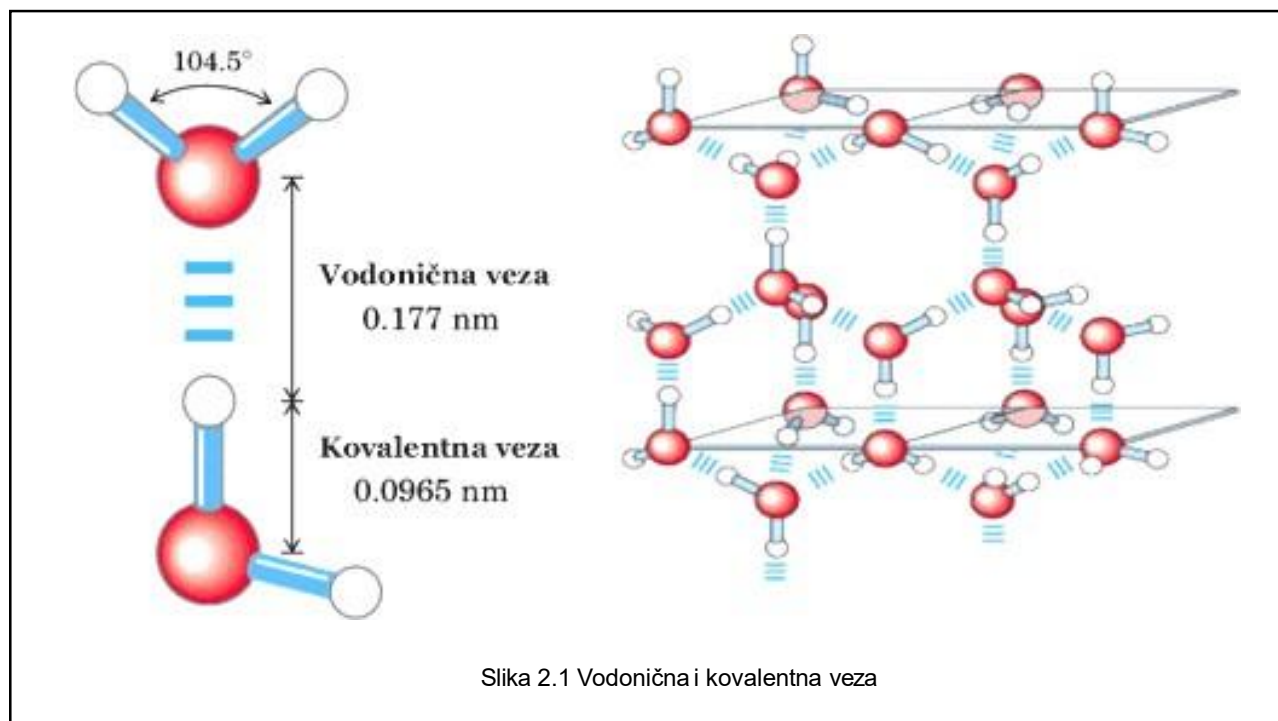
## 2. OSOBINE, KVALITET VODE I OSNOVNI PROCESI U PRIRODI

Prema stepenu proučenosti određenih svojstava, voda znatno prevazilazi druge supstance. Ipak mnoge osnovne karakteristike građe i osobina vode još nisu razjašnjene. Otkrivaju se razna nova svojstva vode. Ona nisu bila poznata ranije i ne mogu da se objasne na osnovu ranijih predstava onjenoj unutrašnjoj građi.

Jedna od specifičnosti građe molekula vode jeste asimetričan raspored atoma vodonika oko atoma kiseonika, centri jezgra atoma vodonika nalaze se na udaljenosti od  $0,95 \times 10^{-10}$  m od centra atoma kiseonika.

Oni su raspoređeni ne po pravoj koja prolazi kroz centar atoma kiseonika, već pod uglom. Ugao između linija koje spajaju centre atoma kiseonika i vodonika iznosi  $104,5^\circ$ .

Veza između atoma kiseonika i vodonika u molekulu vode ostvaruje se pomoću elektrona. Pošto kiseonikov atom ima veću elektronegativnost (težnju za privlačenjem elektrona) od vodonikovog O-H veze su polarne, pri čemu kiseonik nosi parcijalno negativno naelektrisanje ( $\delta^-$ ), a vodonikovi atomi imaju parcijalno pozitivno naelektrisanje ( $\delta^+$ ).



Svaki par tačaka predstavlja par slobodnih (usamljenih) elektrona. Ovakva elektronska struktura dovodi do stvaranja vodonične veze kod koje je pozitivan (parcijalno) vodonikov atom iz jednog molekula privučen ka jednom od usamljenih elektronskih parova na kiseonikovom atomu drugog molekula.

Svaki molekul vode može da obrazuje četiri vodonične veze od čega dve nastaju pri interakciji elektronskih parova atoma kiseonika sa atomima vodonika susednih molekula, a druge dve daju atomi vodonika koji interaguju sa atomima kiseonika druga dva molekula vode.

Dužina vodonične veze O-H menja se u intervalu od 0,14 do 0,20 nm ( $1\text{nm}=10^{-7}\text{cm}$ ), a energija iznosi 17-33 kJ/mol.

Pored količine vode koja je čoveku dostupna važan je i njen kvalitet. Pod kvalitetom vode podrazumeva se stanje vodenog sistema vodnih resursa, izraženo preko niza parametara koji mogu biti fizičko, hemijskih i bioloških, kako u vodi tako i u sedimentu (talogu).

## 1 FIZIČKE OSOBINE VODE

Fizičke osobine vode su karakteristike koje se mogu registrovati čulima (boja, miris) ili izmeriti bez promena njenih osobina. Čista voda nema boju, ukus ni miris. Gustina vode je  $1000 \text{ kg/m}^3$  i ova vrednost se uzima kao standard za određivanje gustine drugih supstanci.

U narednom delu teksta definisane su važnije fizičke osobine vode koje se koriste prilikom proaruna u problemima koji se odnose na upravljane vodama.

**Gustina vode** je najveća pri  $+4^\circ\text{C}$ . To znači, da pri toj temperaturi ista masa vode ima najmanju zapreminu, odnosno ista zapremina vode pri toj temepraturi ima najveću težinu. Kod drugih materija gustina stalno raste s hlađenjem.

Opadanje gustine vode ide postepeno od  $4^\circ\text{C}$  do  $0^\circ\text{C}$ , a onda pri istoj temperaturi gustina skokovito pada za nekoliko procenata. Zbog toga led pliva na vodi. Ako se gustina vode na  $+4^\circ\text{C}$  obeleži sa 1 (jedinica) tada se voda ponaša prema (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 Gustina vode u zavisnosti od temperature

Temperatura $^\circ\text{C}$	Gustina vode	Zapremina u $\text{cm}^3$ za težinu vode od 1g
+4	1,00000	1,00000
+150	0,9173	1,0902
+100	0,95838	1,04343
+80	0,97183	1,02899
+60	0,98324	1,01705
+40	0,99224	1,00782
+20	0,99823	1,00177
(+) 0 (вода)	0,99987	1,00013
- 0 (лед)	0,91673	1,09083
-188,7	0,92999	1,07528
-273	0,9368	1,0675

Pre svega, upadljiv je skok prelaza voda-led: gram vode od  $0^\circ$  ima zapreminu od  $1,00013 \text{ cm}^3$ , a taj isti gram, kad se smrzne ostajući pri tome na toj istoj temperaturi od  $0^\circ\text{C}$ , povećava svoju zapreminu na  $1,09083 \text{ cm}^3$  ili okruglo za 1/11 deo.

Gustinu tečnosti predstavlja masa njene jedinične zapremine(x), može se izraziti u obliku:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

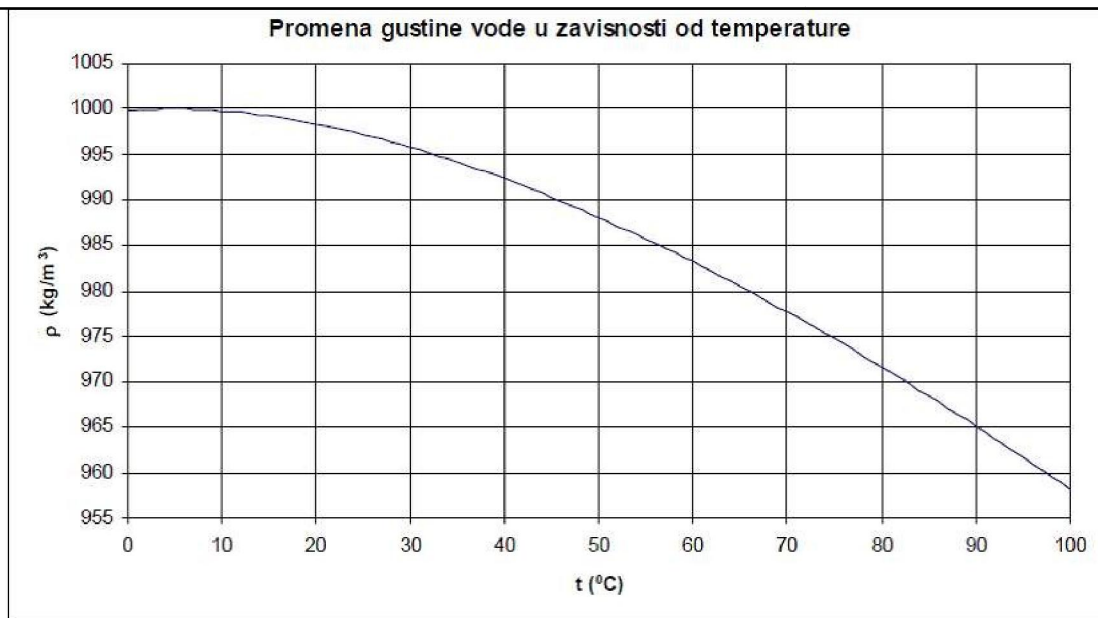
gde je:

$\rho$  - gustina tečnosti, ( $\text{kg/m}^3$ )

$m$  - masa tečnosti, (kg),

$V$  - zapremina tečnosti, ( $\text{m}^3$ )

Gustina vode se menja relativno malo i to u zavisnosti od promene pritiska i temperature.



Slika 2.2 Grafički prikaz promene gustine tečnosti u zavisnosti od temperature

**Mržnjenje i ključanje vode** - pri normalnom pritisku voda mrzne, odnosno prelazi u led, na temperaturi od  $0^{\circ}\text{C}$ , a ključa, tj. prelazi u vodenu paru na  $100^{\circ}\text{C}$ . Ukoliko se pritisak menja, menja se i temperatura prelaska vode u drugo agregatno stanje. Tako na primer, voda na vrhu Mont Everesta ključa na samo  $68^{\circ}\text{C}$ .

Ključanje, kao intenzivno isparavanje, nije moguće na svakoj temperaturi i na svakom pritisku i ono obuhvata molekule celog suda u kome se nalazi tečnost. Za ovaj fazni prelaz tečnost uzima latentnu toplotu od nekog izvora energije. Koliko je danas poznato, glavnu ulogu u ovom procesu imaju mehurići zasićene pare koji se hvataju za zidove suda - za primese. Kada pritisak gasa u mehurićima postane veći od visinskog (hidrostatičkog) pritiska tečnosti i pritiska gasa iznad tečnosti, mehurići izranjaju i rasprskavaju se - dobijamo ključanje.

Karakteristično vrenje vode kada dostigne temperaturu ključanja je posledica rasprskavanja mehurića zasićene pare. Znači, kada se napon pare izjednači sa pritiskom koji spolja deluje na površinu, mehurići pare kao lakši penju se ka površini i napuštaju tečnu fazu sistema. Daljim zagrevanjem sistema, tečnost isparava, dok sva ne pređe u parnu fazu.

Pri tome se ne menja napon pare niti temperatura – tečnost ključa. Data temperatura se naziva temperatura ključanja tečnosti –  $T_k$ . Temperatura ključanja je temperatura pri kojoj se napon pare tečnosti izjednači sa vrednošću ukupnog pritiska gasova koji su u dodiru sa površinom tečnosti.

Prelazak vode iz jedno u drugo agregatno stanje se objašnjava energijom kretanja čestica. Što je temperatura vode viša, energija molekula postaje veća, sile privlačenja između molekula postaju sve slabije, a rezultat je njihovo međusobno udaljavanje. U tački vrenja dolazi do promene agregatnog stanja. Voda iz tekućeg stanja prelazi u vodenu paru.

Molekuli su u pari tako razređeni da se voda ponaša kao gasovita supstanca. Smanjenjem temperature smanjuje se energija kretanja molekula, pa se smanjuje i njihova međusobna udaljenost, a međumolekulske veze postaju sve delotvornije. Konačno, kada molekuli prestanu da se kreću dolazi do formiranja kristalne rešetke, odnosno kristala vode (Slika 2.3).



Slika 2.3 Primeri kristalne rešetke vode

### **Latentna toplota isparavanja tečnosti**

Toplota isparavanja tečnosti je količina toplote potrebna da bi 1g tečnosti prešao iz tečne u parnu fazu, na temperaturi ključanja tečnosti. Različite supstance karakterišu različite jačine međumolekulskih sila i različite toplote isparavanja.

**Trojna tačka vode** – Na trojnoj tački u ravnoteži se nalaze sve tri faze, čvrsta, tečna i gasovita. Ona se postiže pri kombinaciji pritiska i temperature jedinstvenoj za svaku supstanciju (stabilnu pod tim uslovima) pa je zgodna za kalibraciju temperaturske skale. Trojnu tačku vode je lako reprodukovati pa se ona uzima za kalibraciju temperaturske skale.

Po konvenciji, trojna tačka vode je na 273,16 K (0,01 °C) i na pritisku od 611,73 Pa. To je relativno nizak pritisak, približno 1/166 od normalnog barometarskog pritiska na morskome nivou (101.325 Pa).

**Stišljivost** - je svojstvo fluida da menja zapreminu pod dejstvom spoljašnjih sila. Stišljivost vode pokazuje izmenu njene zapremine pod dejstvom pritiska. Stepem stišljivosti vode zavisi od količine rastvorenih gasova u njoj, temperature i hemijskog sastava.

U dubljim vodonosnim horizontima visoki pritisci utiču na umanjene, a rastvoreni gasovi i povećane temperature utiču na uvećanje njene zapremine. Stišljivost se izražava preko koeficijenta stišljivosti [ $\text{Pa}^{-1}$ ]:

$$s = \frac{1}{V} \frac{dV}{dp} = - \frac{\Delta V}{V_0 \Delta p}$$

gde su:

$$\Delta V = V_0 - V [\text{m}^3]$$

$$\Delta p = p_0 - p_1 [\text{Pa}]$$

$V_0$  – početna zapremina [ $\text{m}^3$ ]

$p_0$  – početni pritisak [ $\text{Pa}$ ];

$s$  – moduo elastičnosti – [ $\text{Pa}$ ,  $\text{N}/\text{m}^2$ ,  $\text{kgm}/\text{s}^2\text{m}^2$ ]

Za vodu koja je pod pritiskom do 50 000 Pa (500 bar)  $s_v \sim 2 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$

Recipročna vrednost modula elastičnosti se naziva koeficijent zapreminske stišljivosti ( $\beta$ ):

$$\beta = \frac{1}{s}$$

Većina problema se rešava uz pretpostavku da je voda nestišljiva. Posledica ove pretpostavke je da je i gustina konstantna ( $\rho = \text{Const.}$ ).

**Viskoznost** je svojstvo tečnosti da pruža otpor relativnom kretanju svojih čestica, odnosno svojstvo koje uslovljava pojavu tangencijalnih napona ("unutrašnjeg trenja") pri strujanju tečnosti. Pri kretanju tečnosti dolazi do trenja između njenih susednih slojeva. Isto tako dolazi do trenja između tečnosti i površine u kojoj se ta tečnost kreće (dno i strane korita reke, cevi i sl.). Usled otpora, koji se pojavljuje pri tom klizanju jednog sloja tečnosti po drugome (sloj koji se brže kreće "vuče" susedni sloj koji se kreće sporije), nastaje sila unutrašnjeg trenja koja se zove viskoznost tečnosti. Pri tome se mehaničko kretanje pretvara u toplotnu energiju.



Reč viskoznost dolazi od engleske reči „viscosity“ što znači lepljivost, a uveo ju je W. Thomson (1865.).

Merilo viskoznosti fluida je koeficijent dinamičke viskoznosti  $\mu$  ili koeficijent kinematske viskoznosti  $\nu = \mu / \rho$ . Viskoznost vode zavisi od temperature i mineralizacije. Sa povećanjem temperature umanjuje se, a sa uvećanjem mineralizacije uvećava se viskoznost. Dinamičku viskoznost definisao je Njutn kao koeficijent srazmernosti između tangentskog napona i promene brzine u pravcu normale na pravac strujanja:

$$T = \mu A \frac{dv}{dy}$$

gde su:

$T$  - sila unutrašnjeg trenja, [N],

$\mu$  - koeficijent dinamičkog (apsolutnog) viskoziteta tečnosti, zavisi od gustine tečnosti, [Pa·s],

$A$  - površina dodira laminarnih slojeva tečnosti, [m<sup>2</sup>],

$dv/dy$  - gradijent brzine upravan na pravac strujanja (s<sup>-1</sup>)

Tangencijalni napon, sila unutrašnjeg trenja na jedinicu površine ( $\tau$ ) je:

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

$\tau$  - [Pa] tangencijalni napon,

$\mu$  - [Pa·s] - dinamička viskoznost,

$\frac{dv}{dy}$  - promena brzine  $v$  fluida u pravcu normalnom na strujanje ( $v=f(y)$ ).



Tabela 2.2 Dinamička viskoznost u zavisnosti od temperature pojedinih fluida

Fluid	Voda (20°C)	Voda (100°C)	Etanol (20°C)	Krv (37°C)	Mot. ulje SAE30 (0°C)	Mot. ulje SAE30 (20°C)	Benzin (20°C)	Vazduh (20°C)	Vazduh (70°C)	Vodonik (20°C)
$\mu$ [Pa·s]	1	0,28	0,11	4	110	30	0,29	0,018	0,0195	0,0009

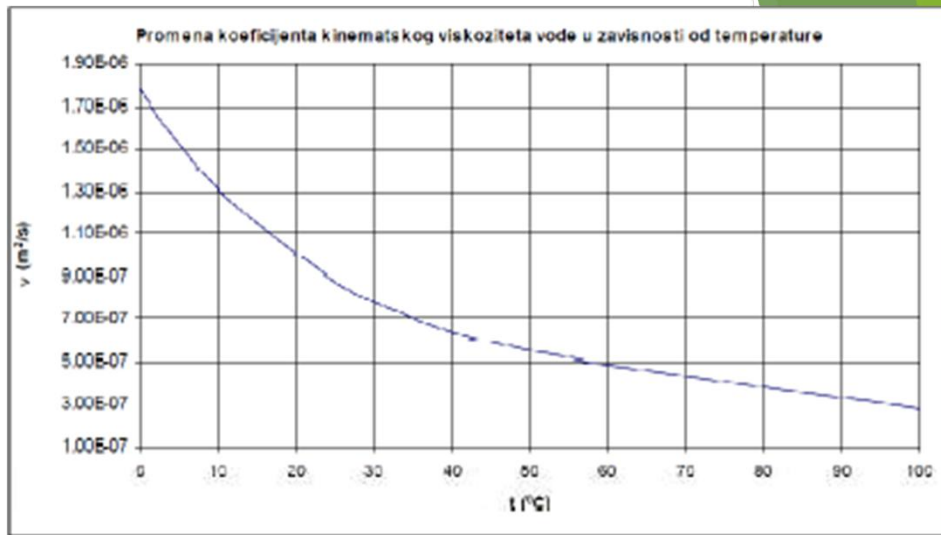
Dinamička viskoznost (njutnovskih fluida) podeljena sa gustinom fluida naziva se kinematska viskoznost [ $m^2/s$ ]:

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

**Specifični toplotni indeks** - Voda ima visok specifični indeks toplote. Konkretno to znači da voda može da apsorbuje mnogo toplote. Ova njena osobina utiče i na regulaciju promena temperature vazduha.

Specifična toplota vode – jeste količina toplote potrebna za zagrevanje jednog grama vode za 1° C, a meri se kalorijama i za vodu iznosi okruglo 1 kalorija. Specifična toplota vode je veća od specifične toplote ostalih čvrstih materija.

Drugim rečima, voda se pri zagrevanju najteže zagreva, ona oduzima najveće količine toplote toplotnom izvoru za svoje zagrevanje do neke temperature, a pri hladenju otpušta najveće količine oslobođene toplote. Radi ilustracije se navode određeni podaci o specifičnoj toploti materijala.



Slika 2.4 Grafik promene kinematskog koeficijenta viskoziteta vode u zavisnosti od temperature

Tabela 2.3 Specifični toplotni indeks pojedinih materija (Cal/gK)

Voda (+ 16° C)	<b>1,00</b>	Led (- 10° C)	<b>0,53</b>
Granit	<b>0,19</b>	Bukovo drvo	<b>0,57</b>
Peščar	<b>0,17</b>	Vazduh	<b>0,24</b>
Glina	<b>0,22</b>	Etar (+30° C)	<b>0,547</b>
Beton	<b>0,21</b>	Etilalkohol (+25° C)	<b>0,581</b>
Čelik (+20° C)	<b>0,11</b>	Silicijum (+14° C)	<b>0,16C</b>
Zlato (+20° C)	<b>0,03</b>	Kalcijum (+24° C)	<b>0,168</b>
Aluminijum (+20° C)	<b>0,214</b>	Kalcijumkarbonat (0° C)	<b>0,203</b>
Aluminijumoksid (+20°C)	<b>0,177</b>		

1 Cal/gK = 4,1858 J/gK

Visoka specifična toplota vode i njena velika rasprostranjenost su joj obezbedili posebno mesto u tehnici grejanja i hlađenja. Na primer, voda za hlađenje aluminijumskih delova (motori) se ugrije za 1° C, a rashladi za istu vrednost pri masi aluminijuma od 1/0,214 = 4,7 grama, tj. skoro pet puta veću. Kako je voda lako pokretljiva tečnost, to je njena izvanredna sposobnost u tehnici hlađenja i zagrevanja očigledna. Isto tako, ako se 1 gram vode ohladi za 1° C, on zagreje 4 grama okolnog vazduha; 300 grama za 1° C rashlađene vode zagreje 1m<sup>3</sup> okolnog vazduha za 1° C.

Relacija koja definiše toplotni kapacitet glasi:

$$c = \frac{Q}{\Delta T}$$

gde je:

**Q** – toplota koja je dovedena sistemu

**T** - povećanje temperature posmatrane supstance

Vrednost toplotnog kapaciteta supstance uvek je pozitivna. Ukoliko je određenoj supstanci potrebno dodati veliku količinu toplote za malo povećanje temperature, takva supstanca ima veliki toplotni kapacitet. Jedinica toplotnog kapaciteta je [JK<sup>-1</sup>].

Toplotni kapacitet se može izraziti na dva načina: toplotni kapacitet pri konstantnoj zapremini,  $C_v$ , i toplotni kapacitet pri konstantnom pritisku,  $C_p$

Kako je  $Q_v \approx \Delta U$ , a  $Q_p \approx \Delta H$ , važi:

$$c_v = \frac{\Delta U}{\Delta T} \quad c_p = \frac{\Delta H}{\Delta T}$$

Toplotni kapacitet zavisi od mase supstance. Količina toplote koja je potrebna da podigne temperaturu jednog *grama* supstance za 1 K (ili 1° C) naziva se *specifični toplotni kapacitet* ili *specifična toplota supstance*.

Specifična toplota vode na 288 K (15°C) iznosi 4,184 J/K.g [JK<sup>-1</sup>g<sup>-1</sup>], dok na drugim temperaturama varira od 4,178 do 4,218 J/Kg. Toplotni kapacitet koji je izražen po jedinici količine supstance se naziva molarni toplotni kapacitet.

Molarni toplotni kapacitet je količina toplote potrebna da podigne temperaturu jednog *mola* supstance za 1 K i izražava se u jedinicama J/K mol.

Molarni toplotni kapacitet se najčešće označava sa Cp ili Cv, u zavisnosti od toga da li se zagrevanje supstance vrši pri konstantnom pritisku ili pri konstantnoj zapremini. Zbog toga su temperaturne promene pri prelasku jednog godišnjeg doba u drugo postepene, naročito u blizini velikih vodenih površina, odnosno okeana. Voda ima veoma visok površinski napon. Drugim rečima, voda je lepljiva i elastična i pre teži da formira kapi nego da se širi u tankom filmu.

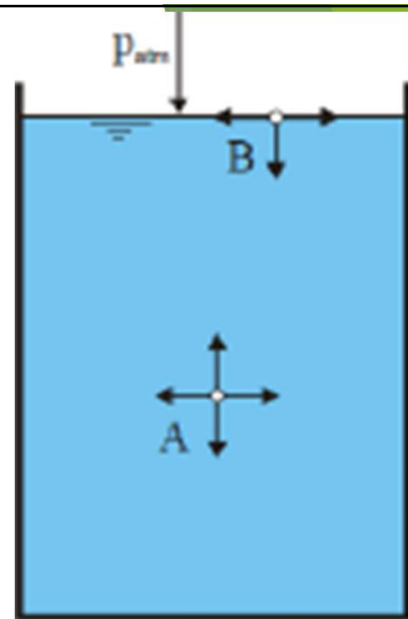
**Površinski napon** je odgovoran za kapilarna svojstva koja omogućavaju da se voda (i u njoj rastvorene supstance) kreću kroz korenje biljaka i kroz krvne sudove u telima životinja. Efekat koji se javlja u površinskom sloju tečnosti. Sloj ima osobine "napete" (zategnute) površine. Izjednačeno privlačenje između molekula tečnosti narušeno je na površini između tečnosti i gasa. Molekuli sa površine trpe intenzivnije privlačenje unutrašnjih molekula. Posledica je smanjenje površine i nastajanje zategnute "membrane" [N/m].

Za tečnost je karakteristično da ispoljava površinski napon, koji je pored napona pare još jedno od merila za jačinu međumolekulskih sila. Zbog toga vrlo mala kap tečnosti ima oblik kugle, jer je u tom geometrijskom obliku odnos između površine i zapremine tečnosti najmanji. Usled toga, da bi se promenio oblik kapi tečnosti, neophodno ke utrošiti određeni rad, čija veličina zavisi od jačine međumolekulskih sila u tečnosti. Rad, neophodan da se po jedinici površine raširi sloj tečnosti, odnosno da tečnost "ukvasi" površinu, predstavlja površinski napon.

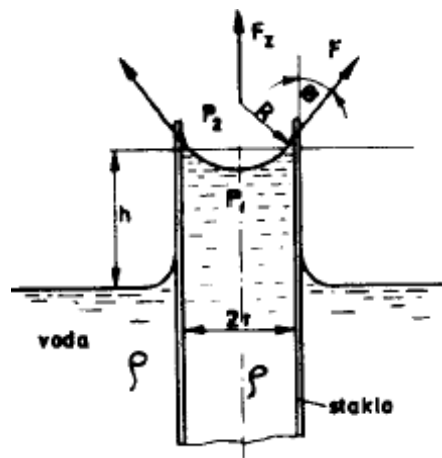
$$\gamma = \frac{F}{l}$$

Do površinskog napona dolazi usled međusobnog delovanja molekula tečnosti. Ako se tečnost nalazi u stanju ravnoteže (miruje), onda se sve sile koje deluju u tački A poništavaju jednakim i suprotnim silama iz susednih čestica tečnosti (Slika 2.5). Prema istom principu, u ravnoteži su (ponišavaju se, kao jednake i suprotne) samo horizontalne sile u tački B na površini tečnosti. Ove horizontalne sile deluju samo duž površine i nazivamo ih silama površinskog napona.

Pored toga, u tački B deluje i vertikalna sila, zajedno sa silom gravitacije. Ova sila se naziva sila unutrašnjeg pritiska tečnosti, ili molekularni pritisak.



Slika 2.5 Ravnoteža sile u uslovima mirovanja tečnosti



Slika 2.6 Kapilarnost vode u staklenoj cevi

Ako se uroni staklena cev malog prečnika (kapilara) u vodu, ona će se u njoj podići i stvoriti se konkavni meniskus, zakrivljena površina tečnosti (Slika 2.6).

Visina dizanja vode u cevi,  $h$ , izražava se jednačinom:

$$h = \frac{2\gamma \cos\theta}{\rho g r}$$

gde je:

$\gamma$  - površinski napon vode, [N/m<sup>2</sup>],

$\theta$  - ugao zakrivljenosti meniskusa, za vodu je  $\theta = 0$ .

$\rho$  - gustina, kg/m<sup>3</sup>,

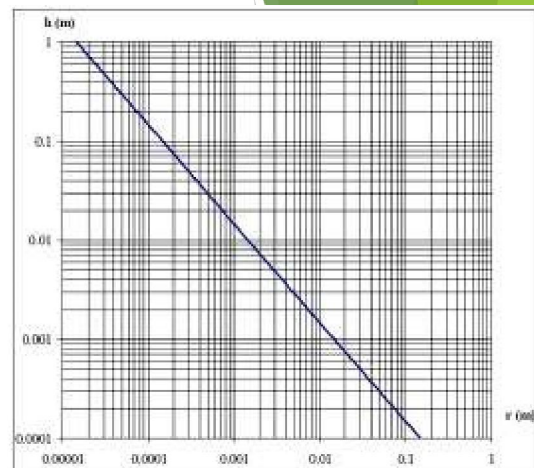
$g$  - gravitacija, [m/s<sup>2</sup>],

$r$  - radijus cevi, [m].

Zavisi od:

- Temperature (temp ↑,  $\gamma$  ↓),
- Koncentracije rastvorene supstance,
- Neorganske soli,  $\gamma$  ↑
- Alkoholi,  $\gamma$  ↓
- Surfaktanti (površinski aktivne supstance),  $\gamma$  ↓

U daljem tekstu neće biti detaljnije objašnjene opšte poznate fizičke osobine prirodnih voda, reka, jezera, mora, okeana: **boja, miris, providnost, mutnoća, svetlosni režim i pokreti vode.**



Slika 2.7 Visina dizanja vode u kapilari u zavisnosti od njenog prečnika