

# EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE KAPILARNOSTI POJEDINIH KAPLJEVINA

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF CAPILLARITY OF CERTAIN LIQUIDS

Marin Petrović\*, Elvis Žic\*

### Sažetak

*U radu su opisane osnovne karakteristike kapilarnosti kao jedne od osnovnih svojstva kapljevina. Definiran je pojam površinskog napreznja, značajke kohezijskih i adhezijskih sila unutar kapljevine, način određivanja visine kapilarnog dizanja te najznačajnije metode za mjerenje kapilarnosti u praksi. Drugi dio rada baziran je na izradi eksperimentalnih pokusa u hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Rijeci. Prvi pokus je obuhvatio eksperimentalna mjerenja visina kapilarnog dizanja kapljevine između dviju staklenih pločica, a drugi određivanje visina kapilarnog dizanja kapljevine u malim uskim cjevčicama različitih promjera za četiri različite vrste kapljevina pri njihovim različitim temperaturama.*

**Ključne riječi:** kapilarnost, površinsko napreznje, kohezija, adhezija, eksperimentalno istraživanje, temperatura

### Abstract

*The paper describes the basic characteristics of capillarity as one of the basic properties of liquids. The concept of surface tension, the characteristics of cohesion and adhesion forces, the method of determining the height of capillary rise and the most important methods for measuring capillarity in practice are defined. The second part of the paper is based on the creation of an experiments in the Hydrotechnical laboratory of the Faculty of Civil Engineering in Rijeka. The first experiment included experimental measurements of liquid rise heights between two glass plates and the second one was determination of liquid rise heights in small narrow tubes of different diameters for four different types of liquids at their different temperatures.*

**Key words:** capillarity, surface tension, cohesion, adhesion, experimental research, temperature

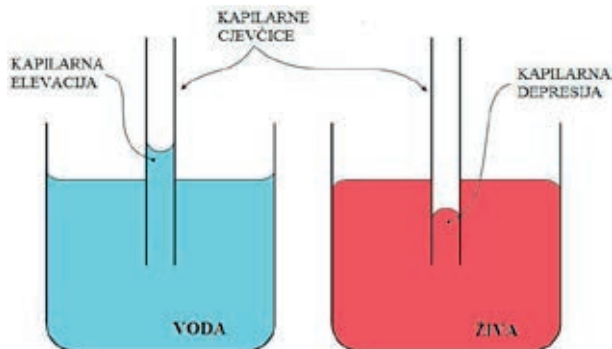
---

\* Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka

E-mail: mpetrovic@student.uniri.hr ; elvis.zic@uniri.hr

## 1. Uvod

Kapilarnost je pojam kojim se govori o spontanom kapilarnom dizanju i spuštanju razine vode u uskoj cjevčici koja se naziva kapilara ili u šupljem poroznom materijalu [1]. Kapilarna radnja se često naziva kapilarnost, kapilarno gibanje, kapilarno dizanje, kapilarni učinak ili fijenje i predstavlja proces kretanja kapljevine u suprotnom smjeru od smjera djelovanja gravitacije. Pojava je uzrokovana silama adhezije i kohezije. U kapilarama gdje je površina kapljevine velika obujmom dolazi do uspoređivanja površinskih sila i gravitacije te se razina vode može dizati (kapilarna elevacija) ili spuštati (kapilarna depresija) (Slika 1). U slučaju kada kapljevina „moći“ stijenske kapilare kapljevina će se dizati i sila adhezije je veća od sile kohezije (primjer vode), a kada kapljevina „ne moći“ stijenske kapilare onda je kohezija veća od adhezije (primjer žive) [2].



*Slika 1.* Prikaz kapilarne elevacije i kapilarne depresije [3]

Učinak se može vidjeti u uvlačenju kapljevine između dlaka kista, u tankoj cijevi, u poroznim materijalima poput papira i gipsa, u nekim neporoznim materijalima poput pijeska i ukapljenih ugljičnih vlakana ili u biološkim stanicama [1,4].

Kada je promjer cijevi dovoljno mali, tada kombinacija površinske napetosti (uzrokovana kohezijom unutar kapljevine) i adhezivnih sila između kapljevine i stijenke spremnika djeluje tako da potiče kapilarno dizanje kapljevine. Maseni tok vode od korijena do lišća djelomično je vođen kapilarnim djelovanjem, ali primarno vođen razlikama potencijala vode. Ako je potencijal vode u okolnom zraku niži od potencijala vode u zračnom prostoru lista stomatalne pore, vodena će para putovati niz gradijent i kretati se iz zračnog prostora lista u atmosferu. Ovo kretanje smanjuje potencijal vode u zračnom prostoru lista i uzrokuje isparavanje tekuće vode sa stijenki stanica mezofila. Ovo isparavanje povećava

napetost na vodenim meniskusima u staničnim stijenkama i smanjuje njihov radijus, a time i napetost koja djeluje na vodu u stanicama. Zbog kohezivnih svojstava vode, napetost se širi kroz stanice lista do ksilema lista i stabiljike gdje se stvara trenutni negativni tlak, dok se voda povlači uz ksilem iz korijena [5]. Kako se isparavanje događa na površini lista, svojstva adhezije i kohezije rade u tandemu kako bi povukli molekule vode iz korijena, kroz tkivo ksilema i iz biljke kroz puči [5].

U hidrogeologiji se kapilarno djelovanje očituje kroz privlačenje molekula vode s česticama tla. Kapilarno djelovanje odgovorno je za premještanje podzemne vode iz vlažnih područja tla u suha područja. Razlike u potencijalu tla pokreću kapilarno djelovanje u tlu. Praktična primjena kapilarnog djelovanja je kapilarni sifon. Umjesto upotrebe šuplje cijevi (kao kod većine sifona), ovaj se uređaj sastoji od užeta izrađenog od vlaknastog materijala (pamučno uže ili uzica). Nakon zasićenja kabela vodom, jedan kraj (utegnuti) se stavlja u spremnik pun vode, a drugi kraj u prihvatnu posudu, s time da spremnik mora biti viši od posude za primanje [6]. Ovaj jednostavan uređaj može se koristiti za zalijevanje sobnih biljaka.

Kapilarna vlaga karakteristična je za stare zgrade, građene u vrijeme kada graditelji nisu poznavali vodonepropusne materijale poput bitumena i sličnih materijala koji se danas koriste za hidroizolaciju. Stare zgrade gradile su se bez temelja, što je dodatno intenziviralo kapilarno dizanje [7]. Vlaga se kroz osnovne građevinske materijale kreće prema gore jer su ti materijali u većoj ili manjoj mjeri porozni, pa vlaga prolazi kroz mikrokapilare. Uzdizanje vlage događa se zbog površinske napetosti koja nastaje zbog polarizacije molekula vode, a njena izravna posljedica je kapilarnost. Kapilarnim djelovanjem voda se „penje“ uz zid, a kretanjem stvara dodatno elektromagnetsko polje u zidu, što nadalje pojačava kapilarni učinak [7].

Ukratko, dizanje kapljevine u kapilari je uzrokovano tendencijom uspostave mehaničke ravnoteže između površinske napetosti kapljevine oko opsega meniskusa i težine kapljevine u kapilari koja mora postojati preko bilo kojeg zakrivljenog sučelja. Alternativno, dizanje kapljevine u kapilari protiv gravitacije uzrokovano je razlikom u međufaznoj energiji krutina-kapljevina i krutina-para sučelja, što dovodi do smanjenja površinske napetosti [8]. Energija potrebna za uspostavljanje kapilarnog dizanja kretanja kapljevine u kapilari rezultat je smanjenja površinske napetosti koja je uravnotežena potencijalnom energijom podignute kapljevine u kapilari.

## 2. Pregled dosadašnjih istraživanja

Godine 1660. kapilarno djelovanje je još uvijek bilo novost za irskog kemičara Roberta Boylea kada je izvijestio da su „neki radoznali Francuzi“ primijetili da se, kada se kapilarna cijev uroni u vodu, voda penje do „neke visine u cijevi“ [6]. Boyle je zatim izvijestio o eksperimentu u kojem je kapilarnu cijev umočio u crno vino, a zatim je cijev podvrgao djelomičnom vakuumu. Otkrio je da vakuum nema vidljivog utjecaja na visinu kapljevine u kapilari, tako da je ponašanje kapljevina u kapilarnim cijevima uzrokovano nekim fenomenom koji se razlikuje od onoga koji vlada živinim barometrima.

Drugi su ubrzo slijedili Boyleov rad i istraživanje. Pojedini znanstvenici, npr. Honoré Fabri, Jacob Bernoulli i drugi, smatrali su da se kapljevine dižu u kapilarama zato što zrak u kapilare ne može tako lako ući kao u kapljevine, pa je tlak zraka unutar kapilara niži. Ostali znanstvenici poput Isaaca Vossiusa, Giovannia Alfonsa Borellia, Louisa Carréa, Francisa Hauksbeea i Josia Weitbrechta su smatrali da čestice kapljevine prijanjaju jedna uz drugu i uz stijenke kapilare [6].

Iako su eksperimentalne studije nastavljene tijekom 18. stoljeća, uspješan kvantitativni tretman kapilarnog djelovanja nije postignut sve do 1805. od strane dvojice istraživača. Bili su to Thomas Young iz Ujedinjenog Kraljevstva i Pierre-Simon Laplace iz Francuske. Oni su izveli Young-Laplaceovu jednadžbu kapilarnog djelovanja [1,8]. Do 1830. njemački matematičar Carl Friedrich Gauss odredio je rubne uvjete koji upravljaju kapilarnim djelovanjem, tj. uvjete na granici kapljevina-krutina. Nadalje, 1871. britanski fizičar William Thomson, prvi barun Kelvin odredio je učinak meniskusa na tlak pare kapljevine (odnos poznat kao Kelvinova jednadžba). Njemački fizičar Franz Ernst Neumann naknadno je odredio interakciju između dviju kapljevina koje se ne miješaju [6]. Prvi rad Alberta Einsteina koji je predan časopisu *Annalen der Physik* 1900. zasnivao se na kapilarnosti [9].

Prema Ehlersu i Gossu [10], sile adhezije i kohezije uzrokuju kapilarno dizanje vode u staklenoj cijevi i u porama tla. Adhezijske sile pričvršćuju molekule vode na čvrstu površinu i uzrokuju dizanje kapilare, a kohezijske sile tjeraju sve molekule vode da se drže zajedno i prate povlačenje prema gore. Zakrivljenost od konkavnog prema zraku u kapilarnoj cijevi pokazuje da je tlak ispod površine vode (ispod sučelja zrak-voda) manji od okolnog normalnog, atmosferskog tlaka. Drugim riječima, on označava subatmosferski ili „negativan“ tlak u vodi.

Godine 2001. Bowden i Tabor u svom radu [6] eksperimentalno su primijetili da se isti rezultat može dobiti u kapilari s bazom stožastog

oblika. Situacija u stožastoj ili kapilari drugog oblika je stabilna samo ako se kapljevina najprije usisava do visine  $h$ , a zatim se ukloni sredstvo za usisavanje jer kapljevina ne bi mogla proći kroz šire konične dijelove ili drugi oblik kapilare.

Prema radu Sophocleousa [11] uzima se u obzir samo radijus preko meniska da bi se odredila visina podignute kapljevine koja se može podržati u kapilari. McCaughan u svom radu [12] daje daljnja objašnjenja o kapilarnom dizanju kako slijedi. U kapilari je tlak ispod zakrivljene površine niži od tlaka iznad zakrivljene površine. Kad je kapilara uronjena u veliki spremnik kapljevine, kapljevina neposredno ispod zakrivljene površine u kapilari je isprva na istoj razini, ali nižeg tlaka u odnosu na kapljevinu na ravnoj površini spremnika koja ima tlak jednak onom neposredno iznad zakrivljene površine u kapilari. Kao rezultat ovog vanjskog gradijenta tlaka, kapljevina se povlači kroz kapilaru i stupac kapljevine se gura prema gore [11].

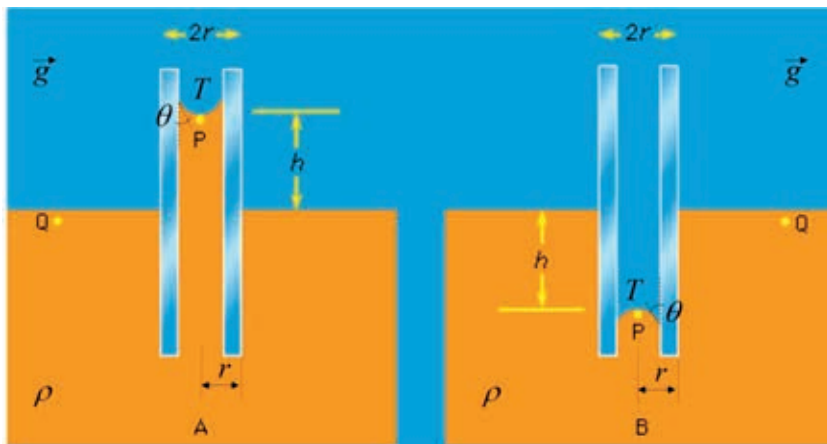
Sophocleous je u svom radu predložio kvalitativno objašnjenje kapilarnog dizanja na temelju fenomena površinske napetosti. Prema njegovim riječima, kada je kapilara uronjena u posudu s kapljevinom koja ima tendenciju smočiti čvrstu površinu i prijanjati na čvrste stijenke kapilare, molekule pare, izlazeći iz kapljevine, adsorbirat će se na površine čvrste stijenke, razvijajući na čvrstoj površini neposredno iznad sučelja kapljevine i pare iznimno tanki film te kapljevine poznat kao kapilarni film. Skupna kapljevina nastoji se povezati s ovim kapilarnim filmom. Kohezijske sile između molekula kapljevine i molekula tankog kapilarnog sloja stvaraju uzdignut menisk na obje strane stijenki cijevi. Uzdignuti menisk stvara veću međufaznu površinu kapljevina-para koja ima relativno visoku energiju. Sustav pokušava prijeći u stanje niže potencijalne energije kroz smanjenje površine sučelja kapljevine i pare [4,13].

### 3. Površinska napetost i visina kapilarnog dizanja

Kapilarnost je jedna od najznačajnijih hidrostatskih pojava u kojoj površinska napetost ima ulogu. Kada se unutar cijevi formira konkavni meniskus, to znači da kapljevina „moči” cijev te je taj meniskus gotovo sferna površina istog polumjera  $r$  kao i unutrašnjost cijevi. U cijevi se manifestira sila prema dolje, veličine  $2\pi r d \sigma$ , pri čemu je  $\sigma$  površinska napetost kapljevine, dok se kod kapljevine manifestira reakcija jednake veličine koja podiže meniskus za visinu  $h$ , tako da vrijedi:

$$2\pi r \sigma = \pi r^2 h \rho g \quad (1)$$

Ako kapljevina „ne moči“ cijev, meniskus je konveksan i udubljen na istu udaljenost  $h$  (Slika 2).



**Slika 2.** Prikaz udaljenosti  $h$  za konkavni (lijevo) i konveksni (desno) oblik, modificirano prema [2]

Jednostavna metoda za određivanje površinske napetosti uključuje mjerenje udaljenosti  $h$  u konveksnoj ili konkavnoj situaciji i nakon toga korištenje jednadžbe. Iz prikazane jednadžbe (1) tlak se javlja u stacionarnoj kapljevini gdje su gustoća kapljevine  $\rho$  i ubrzanja polja sile teže  $g$  neovisne fizikalne veličine o visini  $z$  (kao što je slučaj u jezerima) koja je dana izrazom:

$$\frac{d\rho}{dz} = -\rho g \quad (2)$$

Druga jednadžba koja se koristi je ona koja služi za određivanje visine  $h$  te iz dvije jednadžbe (1) i (2) slijedi da se tlak u točki P neposredno ispod meniskusa razlikuje od tlaka u točki Q za iznos:

$$\rho g h = \frac{2\sigma}{r} \quad (3)$$

Za iznos zadan formulom (3) tlak u točki P manji je od tlaka u točki Q u slučaju sa Slike 2 (lijevo) i veći od tlaka u točki Q u drugom slučaju (Slika 2, desno). Budući da je tlak u točki Q samo atmosferski tlak, jednak je tlaku u točki neposredno iznad meniskusa. Dakle, u oba slučaja postoji razlika tlaka  $2\sigma/r$  između dviju strana zakrivljenog meniskusa, a u oba je veći tlak na unutarnjoj strani krivulje. Takva razlika tlaka uvjet je ravnoteže gdje god je površina kapljevine zakrivljena (ali nije sferna). Jednadžba preko koje se izračunava površinska napetost dana je u nastavku:

$$T = \frac{hr\rho g}{2\cos\theta} \quad (4)$$

pri čemu je  $h$  visina dizanja (uzdizanja) ili spuštanja razine kapljevine u kapilari [mm],  $T$  površinska napetost [Pa],  $\rho$  gustoća kapljevine [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $r$  polumjer kapilarne cijevi [m],  $g$  ubrzanje polja sile teže [ $\text{m}/\text{s}^2$ ], te  $\theta$  kut kontrakcije [°].

Površinska napetost je svojstvo površine kapljevine, a uzrokuje da površinski dio kapljevine bude privučen drugom površinom, kao što je ona drugog dijela kapljevine (kao u spajanju komadića vode ili kao u kapi žive koja tvori kohezivnu kuglu) [13]. Površinska napetost se definira kao vlačna sila koja djeluje na površinu kapljevine u kontaktu s plinom ili na površinu između dvije kapljevine koje se ne miješaju, tako da se kontaktna površina ponaša kao membrana izvrgnuta naprezanjima.

Površinska napetost je uzrokovana kohezijom (privlačenjem istovjetnih molekula). Budući da molekule na površini kapljevine nisu okružene istim silama sa svih strana, one su više privučene svojim susjednim molekulama na površini [5]. Primjena Newtonove fizike na sile koje nastaju zbog površinske napetosti točno predviđa ponašanje mnogih kapljevina. Primjena termodinamike na te iste sile dalje predviđa druga suptilnija ponašanja kapljevina. Površinska napetost ima dimenziju sile po jedinici duljine ili energije po jedinici površine. Kao rezultat minimiziranja površine, površina će poprimiti najgladi mogući oblik (matematički dokaz da „glatki“ oblici minimiziraju površinu oslanja se na korištenje Euler-Lagrangeove jednadžbe). Budući da svaka zakrivljenost oblika površine rezultira većom površinom, rezultirat će i većom energijom. Posljedično, površina će se gurnuti unatrag prema bilo kojoj zakrivljenosti na sličan način kao što će se lopta gurnuta uzbrdo gurnuti unatrag kako bi smanjila svoju gravitacijsku potencijalnu energiju [13]. Zbog relativno velikog međusobnog privlačenja molekula vode kroz mrežu vodikovih veza, voda ima višu površinsku napetost (72,8 milinjutna (mN) po metru na 20 °C) od većine drugih kapljevina.

Cilj ovoga rada je da se kroz eksperimentalna mjerenja za četiri različite vrste kapljevina pri njihovim različitim temperaturama odrede visine uzdizanja kapljevine između dviju staklenih pločica (Pokus 1) te malih uskih cjevčica različitih promjera (Pokus 2).

#### 4. Mjerne tehnike i metode za određivanje kapilarnosti

Većina metoda za mjerenje kapilarnosti može se grupirati u tri metode, a to su: 1. Metoda žive, 2. Metode poroznih ploča te 3. Metoda centrifuge. U praksi postoje i metode tlaka pare i metode gravitacijske ravnoteže, ali se o njima u ovom radu ne govori.

U metodi žive, uzorak stijene se isprazni i mjeri se volumen žive koja ulazi u uzorak pri rastućim tlakovima. Metode žive posebno su prikladne za uzorke nepravilnog oblika poput onih koji se nalaze u bušotinama. Živine metode korisne su za ispitivanje porozne strukture uzorka. Potpune krivulje kapilarnog tlaka žive mogu se odrediti u roku od jednog sata, ovisno o propusnosti uzorka [14]. Da bi se primijenilo odgovarajuće naprezanje preopterećenja, cilindrični uzorak može se montirati u graničnu čahuru u varijanti aparata. Neki komercijalni laboratoriji nude mjerenja žive s naprezanjem preopterećenja. U literaturi o nafti prvi je puta upotrebu žive u svome radu dokumentirao Purcell (1949.). Purcell je pokazao da se odnosi kapilarnog tlaka žive i kapilarnog tlaka zrak/voda mogu povezati, što su kasnije i dokazali autori Huet i sur. u svom radu [15]. Kod ove metode, testovi utiskivanja žive provode se sa maksimalnim vanjskim tlakom (*engl. maximum confining stress*) od 68,95 MPa i maksimalnim tlakom utiskivanja žive od 34,50 MPa [16]. Metoda je relativno jednostavna i vrijeme u odnosu na druge dvije spomenute metode je znatno kraće. Iako je metoda utiskivanja žive najbrža od tri navedene metode, ona je još uvijek podložna pogreškama povezanim s vremenom uravnoteženja (odgovarajuća ravnoteža može zahtijevati više od jednog dana ili čak tjedan dana za potpuno mjerenje stijena niske kvalitete).

Metoda porozne ploče može dati vrlo točne odnose kapilarnog tlaka. Metoda se može opisati na način da se razmotri cilindrični uzorak stijene koji je prvo zasićen vodom. Ravna strana uzorka zatim se pritisne na ravnu poroznu ploču (ili membranu) u komori ispunjenoj plinom. Porozna ploča je također zasićena vodom. Često se između uzorka i ploče stavlja vlažna maramica kako bi se postigao dobar kapilarni kontakt [17]. Zatim se tlak u plinskoj fazi iznad porozne ploče povećava malim korakom, tjerajući plin da istisne vodu iz uzorka kroz ploču. Kada pomak prestane, razlika u tlaku između plina koji okružuje uzorak i vode na donjoj strani ploče je kapilarni tlak koji odgovara zasićenju vode koja je ostala u uzorku. Nakon što je mjerenje završeno, tlak u plinu se ponovno povećava, tjerajući više plina u uzorak. Ovaj se proces ponavlja, povećavajući kapilarni tlak u nizu koraka, dajući odnos kapilarnog tlaka za smanjenje zasićenosti vodom.

Za mjerenje kapilarnih tlakova sve se više preferiraju metode centrifuge. Iako nisu tako brza kao mjerenja sa živom, mjerenja centrifugom mnogo su brža od metoda porozne ploče. Za mjerenje odnosa kapilarnog tlaka plina i ulja metodom centrifuge, cilindrični uzorak prvo se zasiti uljem, zatim se postavlja u centrifugu i okreće se u koracima povećavajući brzinu vrtnje. Centrifugalne sile izbacuju ulje iz uzorka dok povlače okolni plin u uzorak. Trajanje svakog koraka centrifuge mora biti dovoljno da prestane proizvodnja ulja [18]. Prosječna zasićenost uljem u



uzorku pri svakoj brzini vrtnje može se izračunati iz volumena ulja koje se proizvodi u kolektoru u odnosu na porozni volumen uzorka. Baldwin i Spinler (1995.) koristili su metodu na temelju magnetske rezonancije za dobivanje odnosa kapilarnog tlaka izravnim mjerenjem zasićenja kapljevine u uzorku stijene iz testa centrifuge [14].

## 5. Eksperimentalno određivanje kapilarnosti

### 5.1. Rezultati ispitivanja kapilarnosti između dvije ravne staklene ploče

Ispitivanje kapilarnosti između dvije ravne staklene ploče provodi se na način da se postavi okvir koji sadrži dvije staklene ploče na čvrstu i ravnu površinu [3,19]. Posuda (poželjno duguljasta i šira) se mora napuniti vodom ili nekom drugom kapljevnom. Jedan kraj staklenih ploča treba biti spojen (poželjno selotejp trakom po cijeloj visini), dok drugi kraj mora biti odmaknut (npr. papirom različite debljine ili drvenim tankim klinom). Što je veći razmak između staklenih ploča, to će kapilarnost (visina dizanja kapljevine) biti manja. U ovom radu provedeno je ispitivanje na 4 različite kapljevine (vodovodna voda, morska voda, ulje i mlijeko) te se promatralo kapilarno dizanje na stjenkama stakla kod određene kapljevine pri određenom povećanju temperature (Tablica 1).

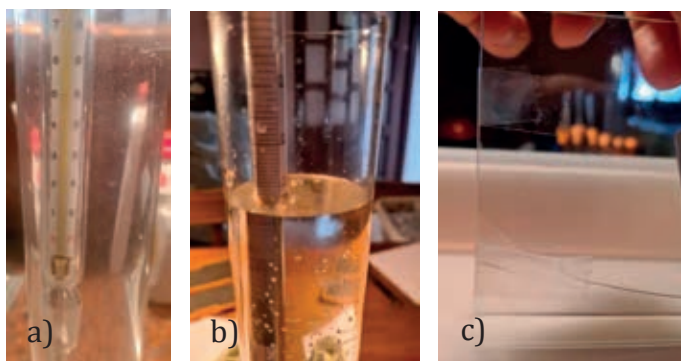
Svaka od kapljevina ispitivana je pri temperaturama od 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C i 60 °C te se opažalo kapilarno dizanje kapljevine na stjenkama staklenih ploča u slučajevima kada su se staklene ploče odvojile razmacima od 1 mm, 2 mm, 4 mm i 8 mm. Što se tiče vodovodne vode, kao i ostalih kapljevina, moglo se primijetiti kako se kapilarno dizanje između ploča smanjuje ovisno o povećanju temperature, ali ovisno i o razmaku između ploča (Slika 3). Što su razmak i temperatura bili veći, to je kapilarno dizanje bilo manje. Također, kapilarno dizanje ovisilo je i o gustoći i površinskoj napetosti samih kapljevina te se prema tim kriterijima može zaključiti kako će se vodovodna voda najviše dizati, dok je ulje imalo najmanji porast između staklenih cijevi. Svaka od kapljevina bila je ispitivana pri približno istim temperaturama i istim razmakom između ploča (Slika 4).

Na samom početku ovoga pokusa zagrijavala se voda na određenu temperaturu koja je mjerena živinim termometrom (Slika 3). Iz grafičkog prikaza može se vidjeti na koji način se vodovodna voda ponašala s obzirom na rast temperature i s obzirom na otvor između staklenih ploča (Slika 4.a). Vodovodna voda imala je najviše kapilarno dizanje jer ima relativno malu gustoću kapljevine, a s druge strane ima veliko površinsko

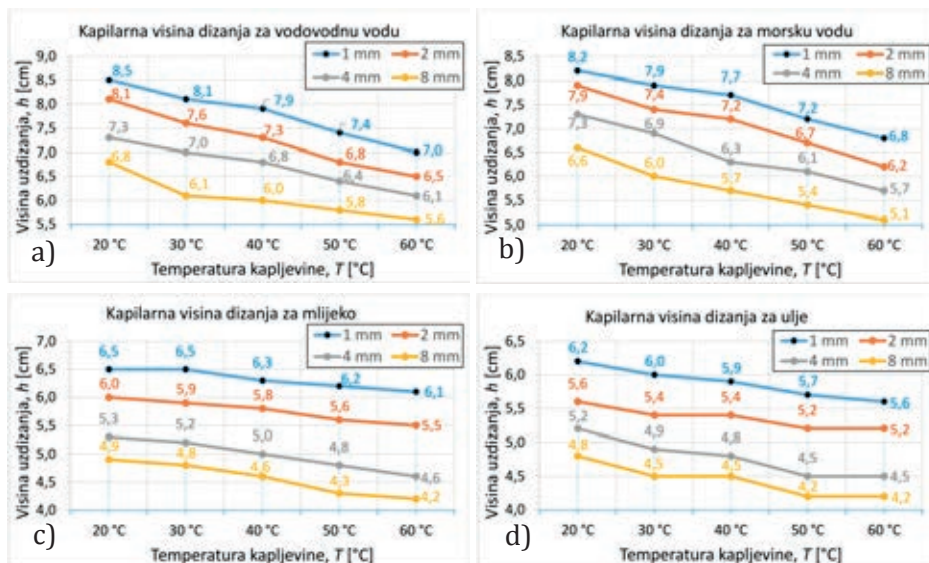
naprezanje. Vodovodna voda se pri 20 °C podigla na razinu od 8,5 cm kada je otvor između pločica bio 1 mm (Slika 4.a).

**Tablica 1.** Ulazni podaci za određivanje kapilarnog dizanja za ispitivane kapljevine

	Temperatura kapljevine [°C]				
	20	30	40	50	60
	Vodovodna voda				
Gustoća kapljevine [kg/m <sup>3</sup> ]	998,23	995,67	992,2	988,1	983,2
Površinsko naprezanje [N/m]	0,07275	0,0712	0,0696	0,06794	0,06624
	Morska voda				
Gustoća kapljevine [kg/m <sup>3</sup> ]	1027,05	1023,98	1020,19	1017,26	1013,47
Površinsko naprezanje [N/m]	0,0736	0,0723	0,0708	0,069	0,0671
	Mlijeko				
Gustoća kapljevine [kg/m <sup>3</sup> ]	1030,25	1026,32	1023,82	1020,61	1016,58
Površinsko naprezanje [N/m]	0,0462	0,0434	0,0406	0,0378	0,0350
	Ulje				
Gustoća kapljevine [kg/m <sup>3</sup> ]	921,65	916,28	912,34	908,83	902,46
Površinsko naprezanje [N/m]	0,0363	0,0354	0,0344	0,0334	0,0325



**Slika 3.** a) prikaz mjerenja temperature vodovodne vode živinim termometrom, b) prikaz mjerenja gustoće morske vode pri 20 °C pomoću hidrometra c) prikaz kapilarnog dizanja vodovodne vode između dvije staklene ploče



**Slika 4.** Grafički prikaz kapilarne visine dizanja za a) vodovodnu vodu, b) morsku vodu, c) mlijeko i d) ulje

Mlijeko ima najveću gustoću u odnosu na sve promatrane kapljevine. Iz grafičkog prikaza kapilarnog dizanja mlijeka između staklenih pločica vidi se kako kod mlijeka povećanjem temperature opada njegovo dizanje između staklenih pločica (Slika 4.c). Mlijeko je također imalo i sporije dizanje između staklenih pločica, što se vizualno moglo lako uočiti. Iz prikazanih grafičkih podataka vidi se kako mlijeko iskazuje manje intenzivno dizanje u odnosu na vodovodnu i morsku vodu (Slika 4).

Ispitivanje ulja bilo je složenije od ostalih ispitivanih kapljevina. Ulje je imalo najmanje kapilarno dizanje te je posebnom pažnjom bilo potrebno osušiti staklene pločice s ciljem dobivanja pouzdanih rezultata (Slika 4.d). Rezultati kapilarnog dizanja ulja ukazuju na manje dizanje u odnosu na rezultate vodovodne vode iako je gustoća ulja manja. Manjem kapilarnom dizanju ulja može se pripisati manjoj površinskoj napetosti ulja, koja također utječe na dizanje kapljevina između staklenih pločica, u ovom slučaju ulja (Tablica 1).

Iz prikazanih rezultata može se vidjeti kako je svako kapilarno dizanje kapljevina između staklenih ploča ovisilo o temperaturi i o otvoru staklenih pločica. Zagrijavanjem pojedinačne kapljevine njezino kapilarno dizanje bilo je sve manje, ali nije bilo linearno, već je ovisilo o površinskoj napetosti. U slučaju vodovodne vode (pri otvoru staklenih pločica od 1 mm) visina dizanja smanjila se za gotovo 18 % povećanjem temperature od 20 do 60 °C, kod morske vode za 17 %, kod mlijeka za otprilike 6 % te

za ulje 9,7 %. Ukoliko se razmotri najveći razmak staklenih pločica (8 mm), tada je kod vodovodne vode uslijed povećanja temperature postotak smanjenja visine kapilarnog dizanja 17,6 %, kod morske vode 23 %, kod mlijeka 14,3 % te kod ulja 12,5 %. Podizanje kapljevina između staklenih pločica ovisilo je i o otvoru između staklenih ploča. Što je otvor bio veći, to je kapilarno dizanje bilo manje (Slika 4). U odnosu na povećanje otvora staklenih pločica (od 1 do 8 mm pri istim temperaturama) smanjenja visina dizanja se kreću u granicama od 20,0÷24,7 % za vodovodnu vodu, 19,5÷26 % za morsku vodu, 24,4÷31,2 % za mlijeko te 22,6÷26,3 % za ulje. Gustoća kapljevine utjecala je na kapilarno dizanje te se može vidjeti kako je vodovodna voda imala najveće dizanje s obzirom da je njena gustoća relativno mala u odnosu na ostale kapljevine. Vodovodna voda je imala najveće kapilarno dizanje uslijed njene veće površinske napetosti u odnosu na druge kapljevine. Stoga se zaključuje da je u odnosu gustoće kapljevine i površinske napetosti kapilarnosti najsklonija vodovodna voda.

## 5.2. Rezultati ispitivanja kapilarnosti uz pomoć kapilarnih cjevčica

U ovom dijelu ispitivanja mjerila se visina kapilarnog dizanja kapljevine, ali ovoga puta dizanja razine kapljevine u kapilarnim cjevčicama koje su promjera 0,5, 0,8, 1,1, 1,7, 2,0 i 2,2 mm (Slika 5). Ispitalo se četiri identične kapljevine kao i u prvom eksperimentalnom pokusu [3,19]. Svaka kapljevina zagrijavala se na 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C i 60 °C te se mjerila gustoća svake kapljevine pri raznim temperaturama. Temperatura vode mjerila se živinim termometrom, dok je gustoća mjerena hidrometrom (Tablica 1). Kod ispitivanja u kapilarnim cjevčicama najprije se mjerilo kako se određena kapljevina pri određenoj temperaturi podiže u kapilarnim cjevčicama te se to uspoređivalo s visinom kapilarnog dizanja koja se dobije temeljem izraza (5). Dizanje kapljevine u kapilarnim cjevčicama promatralo se na način da su se u određenu kapljevinu pri određenoj temperaturi stavljale kapilarne cjevčice te se pratilo dizanje razine kapljevine. S druge strane, izračun za kapilarno dizanje kapljevine u kapilarnim cjevčicama određuje se prema formuli:

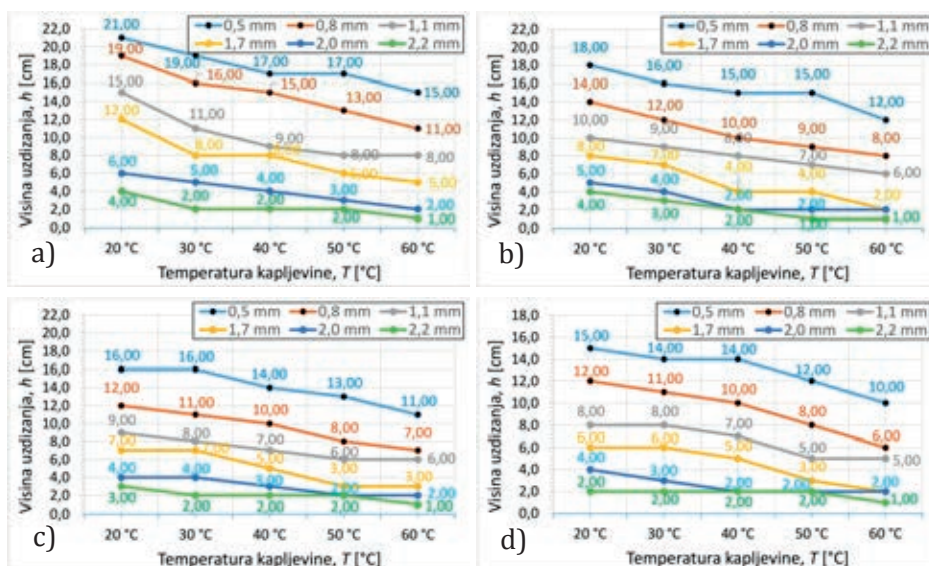
$$h = (4 \cdot \sigma) / (\rho \cdot g \cdot d) \quad (5)$$

pri čemu je  $\sigma$  površinska napetost [N/m],  $\rho$  gustoća kapljevine [kg/m<sup>3</sup>],  $g$  polje ubrzanja sile teže [m/s<sup>2</sup>], te  $d$  promjer kapilara [m]. Kapilarna visina dizanja izračunata je prema (5), iz čega se može vidjeti da ovisi o gustoći kapljevine, površinskoj napetosti te samom promjeru kapilara. Što su gustoća, promjer kapilarnih cjevčica i površinska napetost veći, to je i kapilarno dizanje pojedine kapljevine veće (Slika 5 i 6).

Vodovodna voda imala je najviše dizanje u kapilarnim cjevčicama te možemo usporediti grafičke prikaze za izmjerenu i izračunatu visinu

dizanja u kapilarama (Slike 5.a i 6.a). Iz te usporedbe može se zaključiti kako je izmjerena visina puno manja u odnosu na izračunatu, ali se također može iščitati kako visina kapilarnog dizanja u oba slučaja opada u odnosu na povećanje temperature kapljevine. Razlika između izmjerene i izračunate visine kapilarnog dizanja je 38,43 mm, što je 35 % (promjer kapilare 0,5 mm i temperatura 20 °C).

Gustoća morske vode je veća u odnosu na slatku vodu zato što soli povećavaju masu same vode, ali bez znatnog povećanja obujma (Tablica 1). To povećanje gustoće može se vidjeti i na grafičkom prikazu (Slika 5.b), gdje je jasno vidljivo smanjenje dizanja morske vode u kapilarnim ečvčicama u odnosu na vodovodnu vodu.



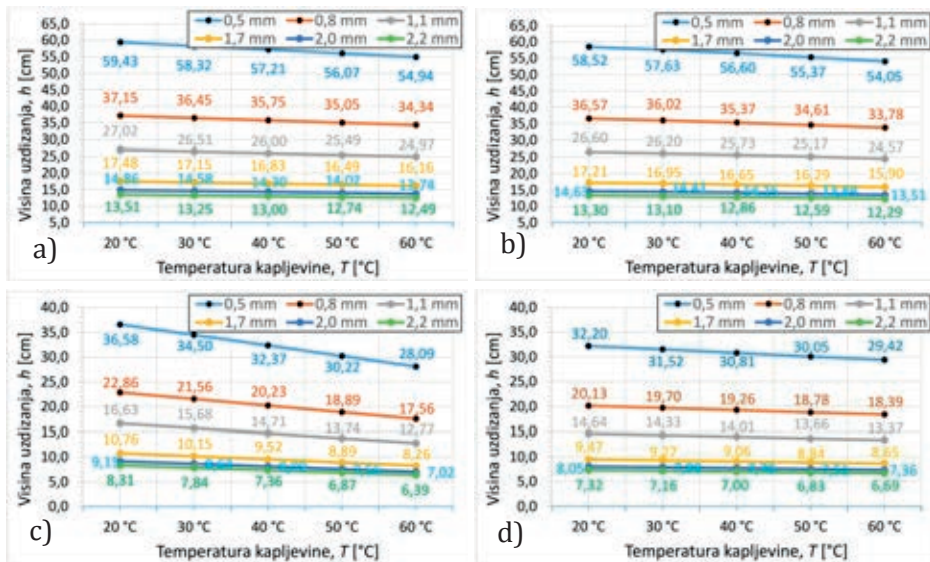
**Slika 5.** Izmjerene vrijednosti kapilarnih visina dizanja za a) vodovodnu vodu, b) morsku vodu, c) mlijeko i d) ulje

Također, može se vidjeti kako postoji znatan pad dizanja kapljevine s obzirom na promjer kapilare, tj. što je promjer kapilare veći to je dizanje manje. Kod izračunatih vrijednosti vidi se kako kod promjera kapilare od 0,5 mm dizanje kapljevine ima vidljiv pad uzdizanja u odnosu na povećanje temperature kapljevine, dok kod kapilare promjera 2,2 mm ta razlika nije toliko uočljiva (Slika 5 i 6). Razlika između izmjerene i izračunate vrijednosti dizanja morske vode u kapilari iznosi 40,52 mm tj. 31 % (promjer kapilare 0,5 mm i temperatura kapljevine 20 °C).

Mlijeko koje ima najveću gustoću u odnosu na ostale kapljevine također ima manje dizanje u kapilari. Iz grafičkih prikaza (Slika 5.c i 6.c)

vidi se kako na dizanje mlijeka u kapilari najviše utječe temperatura. U odnosu na druge kapljevine mlijeko ima najizraženiji pad kapilarne visine dizanja u istom promjeru kapilare, ali s povećanjem temperature. Razlika od 20,58 mm (43 %) znatno je manja razlika između izmjerene i izračunate visine dizanja u odnosu na prijašnje kapljevine koje su imale i duplo veću razliku (promjer kapilare 0,5 mm i temperatura 20 °C).

U zadnjem eksperimentalnom pokusu bilo je potrebno izmjeriti kapilarnu visinu dizanja ulja u kapilari. Ova kapljevina imala je znatno opadanje kapilarnog dizanja ovisno o temperaturi kapljevine, ali je imala i manje dizanje u odnosu na druge kapljevine, što se može pripisati znatno manjoj površinskoj napetosti naspram drugih kapljevine (Slika 5.d i 6.d). Iz grafičkih prikaza se može vidjeti kako kapilare promjera 2 mm i 2,2 mm imaju skoro pa jednake kapilarne visine dizanja, dok kapilare promjera 0,5 mm i 0,8 mm imaju jasno vidljive razlike. Razlike između izmjerene i izračunate visine su oko 47 % tj. 17 mm (promjer kapilare 0,5 mm i temperatura 20 °C).



Slika 6. Izračunate vrijednosti kapilarnih visina dizanja za a) vodovodnu vodu, b) morsku vodu, c) mlijeko i d) ulje

## 6. ZAKLJUČAK

U radu je obrađena tematika kapilarnosti pojedinih kapljevine. Kapilarnost kao pojam igra važnu ulogu u brojnim znanstvenim disciplinama (znanost o tlu, klima, biologija biljaka, površinska fizika i

drugo), kao i u kemijskoj industriji (formulacija proizvoda u farmakologiji i kućanstvu, industrija stakla, proizvodnja automobila i tekstila itd.).

Kapilarni porast vode također je vrlo važan u građevinarstvu jer temelji zgrade mogu biti iznad razine podzemne vode, ali se nalaze u zoni kapilarnog porasta vode, što dovodi do povećanja vlage u temeljima zgrade. Također je potrebno poznavati kapilarno dizanje (tzv. „kapilarni lifting“) za razne građevinske materijale. Poznavanje i određivanje vrijednosti kapilarnog dizanja vode za različite tipove tala posebno je važno kada je riječ o navodnjavanju poljoprivrednih površina, gdje kapilarno dizanje također može utjecati na slanost tla koje se koristi za poljoprivrednu proizvodnju. Zbog složenosti tla i raspodjele pora koje izgledaju neravnomjerno i nedovoljno pravilno, vrlo je teško točno predvidjeti kapilarno dizanje u tlu u prirodnim uvjetima.

Unutar ovog rada provedena su dva eksperimentalna ispitivanja u svrhu određivanja visine kapilarnog dizanja za četiri različite kapljevine uslijed promjene njihovih temperatura kod različitih otvora između staklenih pločica i različitih radijusa staklenih cjevčica. Ispitivanjima je jasno dokazana ovisnost promjene visine dizanja pojedinih kapljevina o promjeni temperature ( $20\div 60$  °C) te o varijabilnosti otvora staklenih pločica ( $1\div 8$  mm) i radijusa otvora staklenih cjevčica ( $0,5\div 2,2$  mm). Za svaku kapljevinu dani su grafički prikazi ovisnosti opadanja visina kapilarnog dizanja na temelju gore navedenih parametara. Kroz ispitivanja se pokazalo da vodovodna voda ima najveće visine kapilarnog dizanja uslijed povećanja njene temperature, dok je ulje pokazalo najmanje visine kapilarnog dizanja u odnosu na ostale kapljevine. U pogledu postotnog smanjenja visine kapilarnog dizanja (pri istim temperaturama) ispitivanja su pokazala da su ona najveća kod mlijeka (do 31,2 %) i ulja (26,3 %).

**Zahvala.** *Ovaj je članak rezultat rada u okviru projekta Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci (RC.2.2.06-0001) koji je financiran iz Europskog fonda za regionalni razvoj (EFRR) i Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta RH.*

## Literatura

- [1] Zhmud, B.V., Tiberg, F., Hallstenson, K. (2000) *Dynamics of Capillary Rise*, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 228, pp. 263-269.
- [2] Wang, K., Sanaei, P., Zhang, J., Ristroph, L. (2022) *Open Capillary Siphons*, Journal of Fluid Mechanics. Cambridge University Press
- [3] Petrović, M. (2022) *Pojam kapilarnosti i njegovo značenje u Hidromehanici*, završni rad iz kolegija Hidromehanika, Građevinski fakultet u Rijeci, Rijeka

- [4] Aung, H.H. (2012) *Estimation of the Rate of Capillary Rise in Sand and Sandy Loam Based on one Dimensional Soil Column*. M.Sc. Thesis, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima, Thailand
- [5] Bico, J., Quere, D. (2002) *Rise of Liquids and Bubbles in Angular Capillary Tubes*. *J. Colloid Interface Sci.* 247, pp. 162–166.
- [6] Bowden, F.P., Tabor, D. (2001) *The Friction and Lubrication of Solids*, Clarendon Press
- [7] Tuller, M., Or, D., Dudley, L.M. (1999) Adsorption and Capillary Condensation in Porous Media: Liquid Retention and Interfacial Configurations in Angular Pores. *Water Resour. Res.* 35, pp. 1949-1964.
- [8] Salim, R.L. (2016) *Extent of Capillary Rise in Sands and Silts*. M.Sc. Thesis, Paper 688, Western Michigan University, Michigan, USA
- [9] Einstein, A. (1901) Folgerungen aus den Capillaritätserscheinungen“, *Annalen der Physik*, 309 (3), pp. 513-523
- [10] Ehlers W. and Goss M. (2003) *Water Dynamics in Plant Production*. CABI, Cambridge, UK
- [11] Sophocleous, M. (2010) Understanding and Explaining Surface Tension and Capillarity: an introduction to fundamental physics for water professionals, *Hydrogeology Journal* (2010), Springer-Verlag, Kansas, USA, 18, pp. 811-821
- [12] McCaughan, J.B.T. (1987) Capillarity: a lesson in the epistemology of physics. *Physics Education*, 22. pp. 100-106
- [13] Bush, John W. M. (2005) *MIT Lecture Notes on Surface Tension, lecture 5*, (PDF). Massachusetts Institute of Technology
- [14] Baldwin, B.A. and Spinler, E.A. (1998) A Direct Method for Simultaneously Determining Positive and Negative Capillary Pressure Curves in Reservoir rock. *J. Pet. Sci. Eng.* 20 (3-4): pp. 161-165
- [15] Huet, C., Rushing, J., Newsham, K., Blasingame, T. (2005) *A Modified Purcell/Burdine Model for Estimating Absolute Permeability from Mercury-Injection Capillary Pressure Data*, International Petroleum Technology Conference, doi:10.2523/IPTC-10994-MS
- [16] Honarpour, M.M., Djabbarah, N.F., Kralik, J.G. (2004) *Expert-Based Methodology for Primary Drainage Capillary Pressure Measurements and Modeling*, Abu Dhabi International Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, Paper No. SPE-88709-MS, doi: <https://doi.org/10.2118/88709-MS>
- [17] Lin, Q., Bijeljić, B., Rieke, H., Blunt, M.J. (2017) *Visualization and Quantification of Capillary Drainage in the Pore Space of Laminated Sandstone by a Porous Plate Method Using Differential Imaging X-ray Microtomography*, *Water Resources Research*, 53, pp.7457–7468, doi:10.1002/2017WR021083
- [18] Chen, Z.A., Ruth, D.W. (1995) Measurement and Interpretation Of Centrifuge Capillary Pressure Curves-the Sca Survey Data. *The Log Analyst* 36 (5). SPWLA



- [19] Experiment Instruction - 008.HM2Cro (2012) Fluid Properties, Priručnik za fizikalni model 008.HM2Cro, Gunt Hamburg, Hamburg