

Univerzitet u Beogradu
Građevinski fakultet

**Poglavlje o podzemnim vodama,
deo koji se predaje na predmetu
Mehanika fluida, akreditacija 2021,
je preuzeto uz odobrenje autora knjige!**

OSNOVE EKOLOŠKOG INŽENJERSTVA

Zorana Naunović

Nenad Jaćimović

Dušan Kostić

Marko Ivetić

Beograd, 2014

Zorana Naunović, Nenad Jaćimović, Dušan Kostić, Marko Ivetić
OSNOVE EKOLOŠKOG INŽENJERSTVA

Recenzenti

Prof. dr Dejan Ljubisavljević

Prof. dr Aleksandar Jovović

Odobreno za štampu odlukom Nastavno-naučnog veća Građevinskog
fakulteta Univerziteta u Beogradu, 10.4.2014. godine

Lektor

Svetlana Ćirković

Izdavač

Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet

Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd

Glavni i odgovorni urednik

Prof. dr Dušan Najdanović, dekan

Štampa i povez

DEDRAPLAST, Ljube Davidovića 12, Beograd

Sadržaj

1	Ekološki otisak.....	1
1.1.	Metodologija računanja ekološkog otiska.....	2
1.1.1.	Otisak emisije ugljen-dioksida.....	3
1.1.2.	Otisak ishrane.....	4
1.1.3.	Otisak stanovanja.....	5
1.1.4.	Potrošački otisak.....	6
1.2.	Koliko planeta nam je potrebno?.....	6
1.3.	Kako živeti od resursa jedne planete.....	12
1.3.1.	Povećanje ili održavanje biokapaciteta.....	12
1.3.2.	Poboljšanje efikasnosti upotrebe resursa.....	12
1.3.3.	Smanjenje potrošnje resursa po osobi.....	12
1.3.4.	Smanjenje globalne populacije.....	13
1.4.	Koračaj lagano.....	13
1.5.	Literatura.....	13
2	Vodni resursi	15
2.1.	Hidrološki ciklus	17
2.2.	Upotreba vode	19
2.3.	Voda i biljke	23
2.4.	Literatura	26
3	Mehanika fluida, akreditacija 2021,	27
3.1.	Materije koje troše kiseonik	29
3.2.	Nutrijenti	30
3.3.	Patogeni organizmi	31
3.4.	Suspendovane materije	31
3.5.	Soli	33
3.6.	Prioritetne zagađujuće supstance	33
3.6.1.	Teški metali	33
3.6.2.	Organska jedinjenja	34
3.6.3.	Pesticidi	36
3.7.	Hormonski aktivne supstance	36
3.8.	Farmaceutski proizvodi i proizvodi za ličnu negu	39
3.9.	Toplota	39
3.10.	pH vrednost	39

3.11.	Literatura.....	40
4	Ekološki, hemijski i trofički status površinskih voda.....	45
4.1.	Ekološki status površinskih voda.....	45
4.2.	Hemijski status površinskih voda.....	48
4.3.	Trofički status površinskih voda.....	54
4.3.1.	Opis klasa površinskih voda.....	54
4.4.	Trofički status površinskih voda.....	55
4.4.1.	Indeks trofičkog statusa – Karlsonov indeks trofičnosti.....	57
4.5.	Rezultati naučnog projekta.....	59
4.6.	Merenje kvaliteta vode u akumulaciji „Čelije“.....	61
4.7.	Mulj i akumulacija mulja u akumulaciji.....	65
4.8.	Matematičko modeliranje pokazatelja kvaliteta vode.....	67
4.9.	Literatura.....	69
5	Podzemne vode.....	73
5.1.	Karakteristike porozne sredine i pojava podzemne vode.....	74
5.2.	Raspored podzemne vode.....	76
5.3.	Strujanje podzemne vode.....	77
5.4.	Bunari.....	83
5.5.	Izvori zagađenja podzemnih voda.....	87
5.6.	Mehanizmi transporta zagađujućih materija u podzemnim vodama.....	91
5.7.	Zaštita izvorišta podzemnih voda.....	97
5.8.	Literatura.....	99
6	Priprema vode za piće.....	101
6.1.	Kvalitet prirodnih vodnih resursa.....	101
6.2.	Tehnološki procesi pripreme vode za piće.....	103
6.2.1.	Površinske vode.....	103
6.2.2.	Podzemne vode.....	108
6.3.	Literatura.....	109
7	Prečišćavanje otpadnih voda.....	111
7.1.	Literatura.....	118
8	Aerozagađenje.....	119
8.1.	Sumpor-dioksid i oksidi azota.....	120
8.2.	Suspendovane čestice.....	122
8.3.	Ugljen-monoksid.....	123

Poglavlje o podzemnim vodama, deo koji se predaje na predmetu Mehanika fluida, akreditacija 2021, je preuzeto uz odobrenje autora knjige!

8.4.	Benzen i benzo(a)piren	123
8.5.	Prizemni ozon	124
8.6.	Teški metali.....	125
8.7.	Supstance koje oštećuju ozonski omotač.....	126
8.8.	Gasovi sa efektom staklene kuće.....	126
8.9.	Kontrola zagađenja vazduha	128
8.10.	Literatura	131
9	Energetski resursi.....	133
9.1.	Fosilna goriva.....	133
9.2.	Obnovljivi izvori energije.....	135
9.3.	Potrošnja energije.....	139
9.4.	Čišćenje.....	141
10	Upravljanje čvrstim otpadom	143
10.1.	Reciklaža komunalnog otpada	146
10.2.	Insineracija komunalnog otpada	148
10.3.	Biološki tretman komunalnog otpada	150
10.4.	Deponovanje komunalnog otpada.....	151
10.5.	Literatura	154

Poglavlje o podzemnim vodama,

deo koji se predaje na predmetu

Mehanika fluida, akreditacija 2021,

je preuzeto uz odobrenje autora knjige!

Osnove ekološkog inženjerstva

Predgovor

Knjiga „Osnove ekološkog inženjerstva“ nastala je iz potrebe za udžbenikom koji predstavlja osnovu istoimenog predmeta na prvoj godini Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. U knjizi se razmatraju osnovne teme iz oblasti zaštite životne sredine. Posebna pažnja je posvećena negativnim uticajima čovekovih aktivnosti na prirodno okruženje, a među merama za ublažavanje nepovoljnih posledica promovisu se one koje su usklađene sa principima održivog razvoja. Sve teme obrađene u knjizi stavljene su u kontekst domaćeg i evropskog zakonodavstva.

U četvrtom poglavlju knjige opisani su rezultati naučnog projekta TR37009 „Merenje i modeliranje fizičkih, hemijskih, bioloških i morfodinamičkih parametara reka i vodnih akumulacija“, koji je finasiran od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije i čiji je nosilac Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu. Projekat obezbeđuje sistematsko praćenje parametara kvaliteta vode u akumulacijama „Ćelije“ i „Gruža“, koje su glavna izvorišta kruševačkog i kragujevačkog vodovoda, kao i modeliranje uticaja zagađujućih materija koje se nekontrolisano ispuštaju u ove dve akumulacije. Pisanje knjige završava se neposredno nakon cvetanja populacija cijanobakterije *Planktothrix rubescens* u akumulaciji „Vrutci“, zbog čega građani Užica nisu imali vodu za piće više od 40 dana. Značaj projekta se svakim danom potvrđuje brojnim vestima o ekološkim incidentima u zemlji i inostranstvu, a u najvećem broju slučajeva uzrok je čovekov nemaran odnos prema životnoj sredini.

Autori

Februar 2014.

Osnove ekološkog inženjerstva

5 Podzemne vode

Podzemna voda, kao resurs koristi se za potrebe svakodnevnog života od najranijih vremena. Sasvim je sigurno da dugo nije postojalo razumevanje i svest o tome kako voda dospeva pod zemlju i na osnovu kojih zakonitosti se strujanje podzemne vode može opisati. Naime, smatra se da su prva namenska istraživanja i fizičke interpretacije zakonitosti strujanja vode u poroznoj sredini započeta tek polovinom 19. veka. Ipak, to nije bila prepreka da se i pre toga razviju efikasni sistemi da se podzemna voda transportuje na površinu i koristi.

O značaju podzemne vode u vodnom bilansu dovoljno govori činjenica da se od ukupne količine raspoložive slatke vode na Zemlji, čak 97% nalazi u rezervoarima podzemne vode, dok se preostala 3% uglavnom odnosi na reke i jezera (UNESCO, 2006). U mnogim zemljama podzemna voda je osnovni izvor vodosnabdevanja. Smatra se da preko 75% stanovništva u Evropi koristi podzemnu vodu. U Srbiji je taj udeo takođe preko 80%, pri čemu se u Vojvodini, na primer, podzemna voda gotovo isključivo koristi za vodosnabdevanje stanovništva i industrije. Na tom području se u proseku crpi 6,8 m³/s podzemne vode (Vodoprivredna osnova Rep. Srbije, 2002). Istovremeno, merenja nivoa podzemnih voda ukazuju da navedena eksploatacija predstavlja „rudarenje“ ovog resursa, odnosno, predstavlja veću količinu u odnosu na prirodnu moć prihranjivanja rezervi podzemne vode na ovom području. To se ogleda kroz trajno sniženje nivoa podzemnih voda, i do 35 m u odnosu na prirodne nivoe.

Prema Vodoprivrednoj osnovi Republike Srbije, potencijalni kapacitet podzemnih voda za vodosnabdevanje u Srbiji iznosi oko 67 m³/s, odnosno 108 m³/s zajedno sa veštačkim prihranjivanjem, pri čemu se trenutno koristi oko 23 m³/s. Ono što daje prednost podzemnoj vodi u odnosu na druge izvore vodosnabdevanja je njena dostupnost, kvalitet vode koji često ne zahteva nikakav ili ograničen dodatni tretman da bi mogla da se koristi za potrebe stanovništva, temperatura vode koja je povoljna i uniformna u toku cele godine, kao i povoljniji uslovi zaštite izvorišta. Značajna uloga podzemne vode kao resursa zahteva posebnu pažnju kada je reč o gazdovanju podzemnim vodama, kao i zaštiti kvaliteta podzemnih voda. Tome u prilog ide i činjenica da je nakon eventualnog zagađenja, izuzetno teško vratiti kvalitet podzemne vode u prvobitno stanje. Radi se o procesu koji može da traje desetinama, pa i stotinama godina.

Podzemna voda se već dugo ne posmatra samo kao resurs. Ona predstavlja značajan element hidrološkog ciklusa kruženja vode u prirodi, pa

time predstavlja i značajan ekološki faktor. Takođe, praktično svi inženjerski izazovi vezani za geotehničke fenomene imaju veze sa strujanjem podzemne vode, ili su direktna posledica tog strujanja. Kao primeri navode se problemi nosivosti i sleganja terena, stabilnosti kosina, zemljotresa i sl.

5.1. Karakteristike porozne sredine i pojava podzemne vode

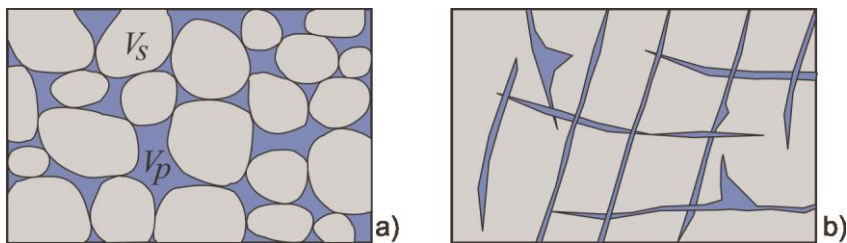
Praktično svi površinski slojevi Zemljine kore, bez obzira na to kako su nastali ili koliko su stari, sadrže određen procenat šupljina, odnosno pora. Te pore mogu biti delimično ili potpuno ispunjene vodom, kada se govori da je porozna sredina zasićena.

Iako se pod terminom *podzemna voda* podrazumeva sva voda koja se nalazi ispod površine zemlje, sa stanovišta korišćenja podzemnih voda uglavnom se podrazumevaju takve geološke formacije čije su pore potpuno ispunjene vodom (zasićene) i koje su tako povezane da omogućavaju značajnije kretanje podzemne vode. Takva geološka formacija se naziva *izdan* ili *akvifer*. Ovde je važno je istaći razliku između pojma *poroznost*, koji označava prisustvo pora u nekoj stenskoj masi, i pojma *vodopropusnost*, koji označava karakteristiku stenskih masa da mogu da propuste vodu. Naime, velika poroznost ne podrazumeva i veliku vodopropusnost, kao što je to slučaj kod zemljišta sa visokim sadržajem glinovitog materijala. Ukratko, da bi stena bila vodopropusna, potrebno je da pore budu i dovoljno povezane, pri čemu u kvalitativnom smislu veća vodopropusnost podrazumeva intenzivnija strujanja pri istim uslovima.

Razlikuju se dve osnovne vrste poroznosti:

- međuzrnska (intergranularna) poroznost, karakteristična za nevezane ili slabo vezane sedimentne stene, kao što su peskovi ili šljunkovi;
- pukotinska poroznost, kod koje su pore obično male u jednom pravcu, a izražene u druga dva pravca i koja se javlja kod čvrstih i koherentnih tipova stena.

Neke stene mogu da sadrže oba navedena oblika poroznosti i tada se govori o dvojnjoj poroznosti. Poseban oblik poroznosti čine pojave koje se javljaju u karbonatnim stenama (dolomiti, krečnjaci) ili sulfatnim stenama, gde voda vremenom rastvara stensku masu i formira provodnike i forme izuzetno velikih dimenzija u vidu različitih karstnih fenomena.



Slika 5.1. Dva tipa poroznosti: a) intergranularna i b) pukotinska poroznost

Ako ukupnu zapreminu uzorka porozne sredine (V) čini zbir zapremine pora (V_p) i zapremine čvrste faze (zrna tla – V_s), poroznost (n) se kvantifikuje odnosom zapremine pora po jedinici ukupne zapremine uzorka:

$$n = \frac{V_p}{V}$$

U zavisnosti od krupnoće i zastupljenosti pojedinih frakcija, poroznost kod šljunka iznosi između 25 i 40%, kod peska u intervalu 25-50%, dok kod glina varira između 40 i 70%.

Sadržaj vlage predstavlja odnos zapremine vode u odnosu na zapreminu uzorka:

$$\theta = \frac{V_v}{V}$$

Maksimalna vrednost sadržaja vlage u tom slučaju ne može imati veću vrednost od poroznosti:

$$0 \leq \theta \leq n$$

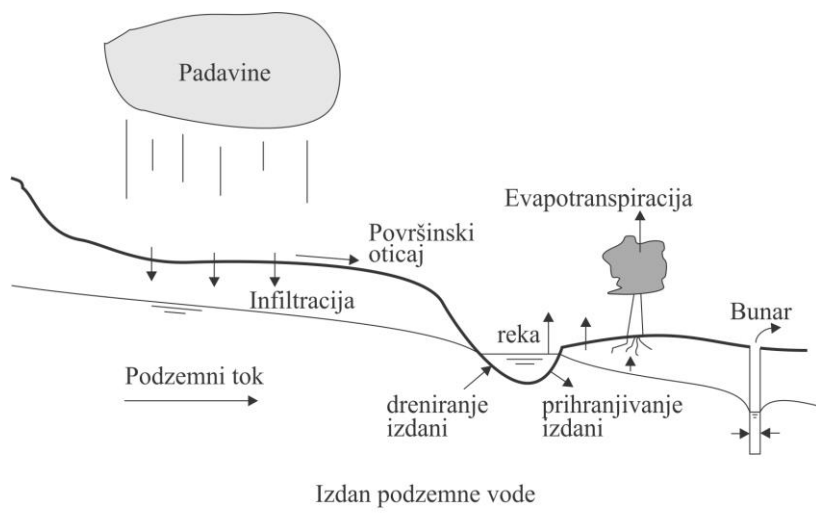
Sadržaj vlage se može izraziti i preko zasićenosti, što predstavlja odnos zapremine vode i zapremine pora u uzorku:

$$S = \frac{V_v}{V_p}$$

Zasićenost može da ima vrednost između nula i jedan ($0 \leq S \leq 1$).

Kao što je već navedeno, podzemna voda predstavlja deo hidrološkog ciklusa neprestanog kretanja vode između okeana, atmosfere i zemljišta. Na zemlju voda dospeva u vidu padavina, gde se delom odmah formira površinski oticaj (npr. rečni tok), delom se voda zadrži na površini terena pre nego što se vrati u atmosferu putem evapotranspiracije (isparavanja i transpiracije biljaka), a delom infiltrira pod zemlju usled dejstva gravitacije i kapilarnih sila. Tu se voda akumulira i u dugotrajnom procesu ispunjava

raspoloživi porni prostor. U poroznoj sredini se takođe formira tok pod uticajem gravitacije, a koji u zavisnosti od hidrogeoloških uslova i karakteristika zemljišta može da prihranjuje površinske tokove. Upravo je i u tome izuzetan značaj podzemnih voda kao elementa životne sredine, kada u sušnim periodima praktično predstavljaju jedini izvor vode za površinske tokove.



Slika 5.2. Shematski prikaz podzemne vode kao elementa hidrološkog ciklusa

5.2. Raspored podzemne vode

Ukoliko se posmatra raspored podzemne vode po vertikalnoj osi, mogu se uočiti dve osnovne zone: zasićena zona, gde su pore zemljišta potpuno ispunjene vodom, i nezasićena zona koja se nalazi iznad zone zasićenja i gde su pore zemljišta samo delimično ispunjene vodom. Ne postoji oštra granica između ove dve zone, već je promena sadržaja vode u tlu kontinualna. Usled efekta površinskog napona, postoji i kapilarna zona koja, u zavisnosti od strukture zemljišta, može da varira od nekoliko centimetara (šljunak) do više od deset metara (gline).

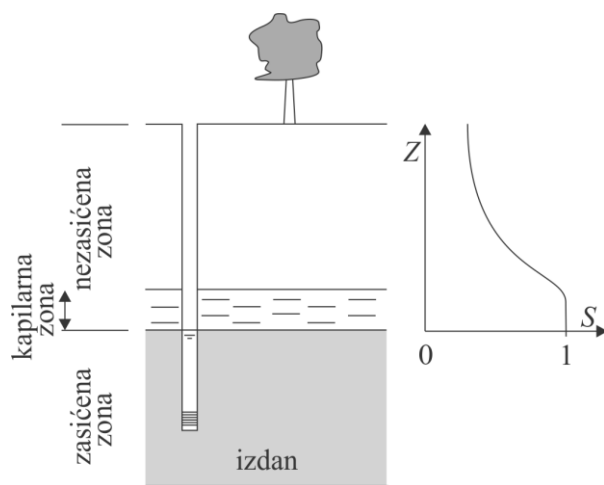
Za izdan se kaže da je pod pritiskom, ukoliko je sa donje i gornje strane ograničena slabije propusnim slojem (akvitard), dok je *izdan sa slobodnim nivoom* ona koja sa gornje strane nije ograničena, odnosno gornja granica izdani odgovara pijeziometarskom nivou. Za izdan pod pritiskom moguće je da se pijeziometarski nivo nalazi iznad površine terena, kada se govori o *artesknoj izdani*. Pridev *arteska* potiče od imena provincije u južnoj

Francuskoj – Artoa (Artois), gde su početkom 12. veka izrađeni prvi bunari koji su davali vodu na površini terena.

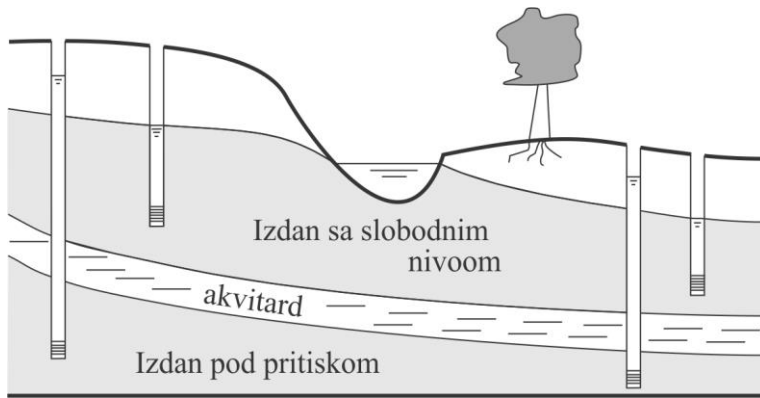
U slučaju da se nivo izdani pod pritiskom nalazi ispod površine terena, govori se o *subarteskoj izdani*.

5.3. Strujanje podzemne vode

Uslovi strujanja i mirovanja podzemne vode podležu istim fizičkim zakonitostima kao i za bilo koju drugu materiju na zemlji. Razlika se odnosi na konturne uslove koje nameće porozna sredina, a koju je teško ili nemoguće matematički opisati u mikro-razmeri. Zbog toga se kod strujanja podzemnih voda primenjuje makro-pristup, gde se sve promenljive od interesa na odgovarajući način osrednjavaju po prostoru i na taj način postaju kontinualne veličine na koje je moguće primeniti tradicionalne matematičke alate (npr. diferencijalni račun).



Slika 5.3. Shematski prikaz rasporeda podzemne vode i dijagram zasićenosti. Treba naglasiti da je zasićenost promenljiva veličina i da zavisi od padavina/infiltracije, evapotranspiracije, promena nivoa podzemne vode, itd.



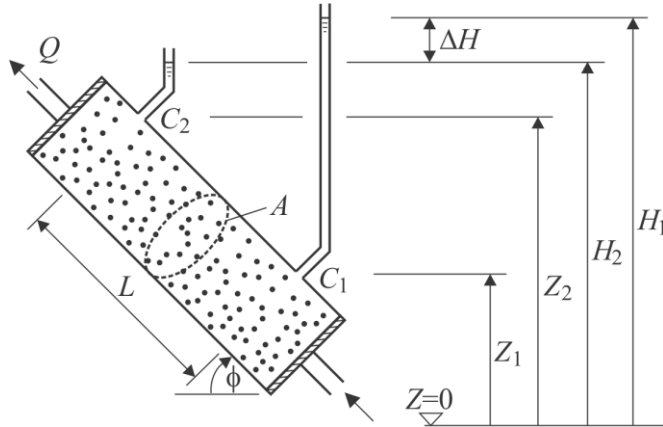
Slika 5.4. Izdan sa slobodnim nivoom i izdan pod pritiskom razdvojene slabopropusnim slojem (akvitard). S obzirom na to da su nivoui u izdani pod pritiskom viši u odnosu na slobodnu izdan, prihranjivanje gornje izdani se vrši i kroz slabopropusni sloj.

Pionirskim korakom u izučavanju i interpretaciji uslova strujanja vode u poroznoj sredini smatraju se eksperimentalna istraživanja francuskog istraživača Darsija. Zakonitost do koje je Darsi došao kroz rezultate eksperimenata i danas najčešće predstavlja polaznu tačku kod izučavanja i najstroženijih uslova strujanja fluida (voda, nafta, gas) u poroznoj sredini. Strujanje vode u zasićenoj poroznoj sredini se često naziva *filtracija*.

Posmatra se eksperimentalna instalacija prikazana na slici 5.5, koja se sastoji od uzorka porozne sredine (na primer, peska) koji je smešten u sud cilindričnog oblika čiji poprečni presek ima površinu A . Kroz uzorak se propušta konstantan (ustaljen) protok fluida, u ovom slučaju vode, intenziteta Q izraženog kao protekla zapremina fluida u jedinici vremena. Cilindar je moguće rotirati i tako menjati ugao ϕ u odnosu na horizontalnu ravan. Duž cilindra, u dva preseka (C_1 i C_2) koji se nalaze na položajnim kotama Z_1 i Z_2 , na rastojanju L postavljene su providne cevčice, otvorene sa gornje strane, na kojima je moguće očitati nivo vode u njima (H_1 , odnosno H_2) u odnosu na referentnu ravan $Z=0$.

Variranjem intenziteta protoka kroz instalaciju i smeru strujanja fluida moguće je ustanoviti sledeće zakonitosti (za pozitivan protok usvojen je smer od C_1 ka C_2):

- kada je protok pozitivan ($Q > 0$), nivo H_1 je veći od H_2 ($H_1 > H_2$);
- kada je protok negativan ($Q < 0$), nivo H_1 je manji od H_2 ($H_1 < H_2$);
- kada je protok jednak nuli ($Q = 0$), nivo H_1 je jednak nivou H_2 ($H_1 = H_2$).



Slika 5.5. Eksperimentalna instalacija za ispitivanje filtracionih karakteristika porozne sredine

Takođe, variranjem protoka ustanovljeno je da je protok linearno proporcionalan razlici nivoa H_1 i H_2 :

$$Q \sim (H_1 - H_2)$$

Važno je istaći nekoliko osobina strujanja u opisanom sistemu, a koje se lako mogu proveriti izvođenjem eksperimenta:

- za isti material, veći protok odgovara većoj razlici nivoa H_1 i H_2 ;
- nagib instalacije, odnosno ugao ϕ , pri istom protoku nema uticaja na izmerene nivoe H_1 i H_2 ;
- ukoliko bi se cilindar sa uzorkom podužno podelio na dva jednaka dela umetanjem ravne nepropusne ploče duž ose cilindra, tako da oba dela imaju površinu poprečnog preseka jednaku polovini površine A , čime bi i protok u obe polovine cilindra bio jednak $Q/2$, nivoi H_1 i H_2 se ne bi promenili. Ovo upućuje da je zapravo jedinični protok, odnosno protok po jedinici površine poprečnog preseka, veličina koja utiče na čitanja nivoa H_1 i H_2 . Ovako definisan specifičan protok se zove *Darsijeva brzina filtracije* („Darsijeva“ se često izostavlja):

$$v = \frac{Q}{A}$$

- promena rastojanja L , pri istom protoku, linearno utiče na razliku nivoa H_1 i H_2 , pri čemu je koeficijent proporcionalnosti 1. Drugim rečima, odnos $(H_1 - H_2)/L$ je konstantan pri istom protoku, bez obzira na kom rastojanju se nalaze tačke C_1 i C_2 .

Uzimajući u obzir navedene osobine, može se uspostaviti sledeća zakonitost koja se, prema autoru, u stručnoj literaturi naziva *Darsijev zakon*:

$$v = -K \frac{\Delta H}{L}$$

Znak '-' označava da je smer toka (filtracije) u smeru pada nivoa H . Uvedeni koeficijent proporcionalnosti (K) između brzine filtracije i pada nivoa se zove *koeficijent filtracije* i predstavlja meru vodopropusnosti porozne sredine.

Treba istaći da koeficijent filtracije sadrži i uticaj fluida koji struji kroz poroznu sredinu. Naime, i intuitivno je jasno da pri istim uslovima (na primer, pri istoj razlici nivoa ΔH), neće biti ista brzina filtracije za dva fluida različitih viskoznosti. Razumno je očekivati da će kroz isti materijal i pri istoj razlici nivoa, voda imati veću brzinu filtracije u odnosu na naftu.

Prema autoru, navedena zakonitost ne važi za brzine filtracije veće od 10 do 11 cm/s. Objašnjenje granice važenja Darsijevog zakona zahteva analizu koja prevazilazi potrebe ove knjige, pa se ovde neće navoditi. Ovaj uslov nije toliko restriktivan te u najvećem delu inženjerske prakse nije narušen.

Prethodno opisano zahteva objašnjenje merenog nivoa H , koji očigledno ima ključnu ulogu u odnosu na smer i brzinu filtracije podzemne vode. Napisani Darsijev zakon jako podseća na Ohmov zakon za jačinu struje kroz provodnik, gde je otpor provodnika analogan koeficijentu filtracije (obrnuto proporcionalan). Prema analogiji, nivo H predstavlja potencijal vode, a brzina filtracije je proporcionalna razlici potencijala, odnosno naponu. Ovo upućuje da H predstavlja nekakav potencijal fluida u smislu strujanja kroz poroznu sredinu, a iz opisanog eksperimenta može se videti da se taj potencijal troši u pravcu kretanja.

H predstavlja mehaničku energiju po jedinici težine fluida. Tu energiju čini zbir potencijalne i kinetičke energije po jedinici težine fluida:

$$H = \Pi + \frac{v^2}{2g}$$

gde je Π *pijezometarska kota* ili *pijezometarski nivo*, mera potencijalne energije fluida koju čine položajna kota i hidrostatički pritisak.

S obzirom na to da se kod filtracije kroz poroznu sredinu uglavnom radi o veoma malim brzinama, drugi član u gornjem izrazu je obično zanemarljivo mali, zbog čega nivo H odgovara pijezometarskoj koti fluida.

Filtracija fluida kroz porni prostor je mehanički proces uz prisustvo i dominantnu ulogu trenja. Zbog toga se mehanička energija fluida nepovratno troši prilikom kretanja/filtracije. Darsijev zakon to opisuje, ali iz jednačine možda nije toliko očigledno: filtracija je uvek usmerena od lokacije sa većim pijezometarskim nivoom ka lokaciji sa nižim pijezometarskim nivoom.

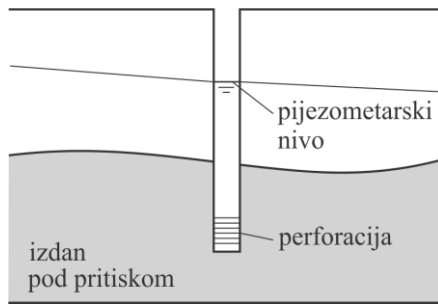
Darsijev zakon se može generalizovati za bilo koji pravac u proizvoljnom koordinatnom sistemu. Za Dekartov koordinatni sistem (x_1, x_2, x_3), u diferencijalnom obliku može se napisati za izotropnu poroznu sredinu (sredina u kojoj koeficijent filtracije ima istu vrednost u svim pravcima):

$$v_i = -K \frac{\partial \Pi}{\partial x_i}, i = 1, 2, 3$$

Darsijeva brzina je fiktivna (računska) brzina strujanja podzemne vode. Predstavlja protok podeljen sa ukupnom površinom poprečnog preseka porozne sredine. Imajući u vidu da voda struji samo kroz pore sredine, jasno je da stvarna (efektivna) brzina mora da bude veća od Darsijeve, u zavisnosti od poroznosti sredine:

$$v_{stvarno} = \frac{v}{n}$$

Kako je brzinu vode u poroznoj sredini izuzetno teško meriti direktno, preostaje da se mere pijezometarski nivoi, a da se brzine određuju posredno, na osnovu Darsijevog zakona. Pijezometar je osnovni uređaj za merenje pijezometarskog nivoa podzemne vode, odnosno za osmatranje režima podzemnih voda. Radi se o cevi, najčešće prečnika 50 ili 75 mm, koja se postavlja u bušotinu i koja je perforirana na mestu gde se želi izmeriti pijezometarski nivo (Slika 5.6). Merenjem vrednosti kote nivoa u cevi određen je i pijezometarski nivo, dok je formiranjem mreže pijezometara na nekom području moguće dobiti prostorni raspored pijezometarskog nivoa, a time i sliku strujanja podzemnih voda (strujnu sliku). Pijezometri se takođe koriste za uzorkovanje podzemne vode i ispitivanje njenih mikrobioloških i fizičko-hemijskih karakteristika.



Slika 5.6. Pijezometar i pijezometarski nivo

Porozna sredina se može deliti prema vodopropusnosti, izraženu preko koeficijenta filtracije, na sredinu visoke vodopropusnosti, sredinu srednje vodopropusnosti i praktično vodonepropusnu sredinu. Sredina kod koje koeficijent filtracije ima vrednost veću od $1 \cdot 10^{-5}$ m/s, smatra se sredinom visoke vodopropusnosti (pesak, šljunak). Sredina srednje vodopropusnosti ima vrednost koeficijenta filtracije od $1 \cdot 10^{-5}$ do $1 \cdot 10^{-8}$ m/s, dok se sredine sa koeficijentom filtracije manjim od $1 \cdot 10^{-8}$ m/s mogu smatrati praktično vodonepropusnim (gline i neispucane čvrste stene).

5.4. Bunari

Osnovna namena bunara je eksploatacija podzemnih voda. Bunari se mogu koristiti i za druge namene, kao što je zaštita objekata od podzemnih voda, privremeno snižavanje nivoa podzemnih voda u cilju obezbeđenja izvođenja građevinskih ili drugih radova, ispitivanje karakteristika izdani, remedijacija podzemnih voda i sl. Postoji nekoliko tipova bunara (kopani, bunari sa horizontalnim drenovima, utisnuti bunari, bušeni cevasti bunari), međutim, najčešće se izvode takozvani cevasti bunari, o kojima će dalje biti reči.

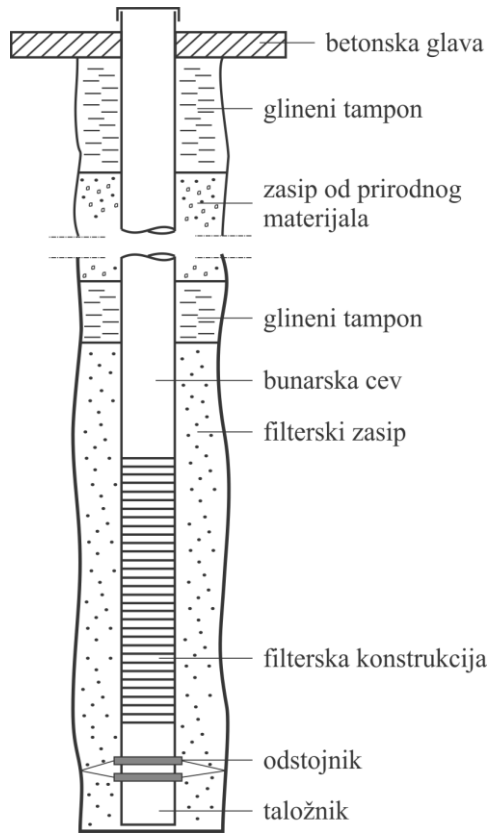
Bez obzira na namenu većinu cevastih bunara čini bunarska garnitura koja se postavlja u prethodno napravljenu bušotinu, a koja se obično formira do donje granice izdani ili nekoliko metara niže. Bunarsku garnituru čine (Slika 5.7):

- ploča prečnika nešto manjeg od prečnika bušotine koja se postavlja na dno bušotine i koja služi za oslanjanje bunarske garniture;
- taložnice dužine nekoliko metara, koju čini neperforirana cev i koja služi za prikupljanje čestica materijala koje dospevaju u bunar iz okolne sredine;

- filterska konstrukcija, koju čini perforirana cev, obično izrađena od nerđajućeg čelika ili PVC-a, i koja predstavlja osnovni deo bunara kroz koji voda iz okolne sredine ulazi u bunar;
- nastavak cevi punog zida do površine terena. Bunar se na površini završava tzv. bunarskom glavom.

Prostor između filterske konstrukcije i zida bušotine se ispunjava filterskim zasipom, koga čini nevezani materijal propisane granulacije, a čija je uloga najpre da spreči prodor čestica sredine u bunarsku konstrukciju, a zatim i da omogući nesmetanu filtraciju vode ka bunaru. Bunarska pumpa kojom se voda potiskuje ka površini terena obično se smešta u sam bunar, mada je ponekad moguća i tzv. suva izvedba, ukoliko to hidraulički uslovi dozvoljavaju, kada se pumpa sa horizontalnom osovinom nalazi na površini terena. Prostor između bunarske garniture i zida bušotine bliže površini terena se ispunjava glinovitim materijalom ili betonom, kako bi se sprečio eventualni prodor površinskih voda ka izdani.

Svi pobrojani elementi bunara se pažljivo projektuju u zavisnosti od lokalnih hidrogeoloških uslova, kako bi se obezbedila trajnost rada bunara u smislu obezbeđenja zahtevane količine vode u što dužem vremenskom periodu, a da se pri tome ne naruši stabilnost skeleta sredine (što bi moglo, na primer, da dovede do sleganja terena).



Slika 5.7. Tipiska konstrukcija cevastog bunara

Uticaj rada bunara na nivo podzemne vode može se odrediti primenom Darsijevog zakona i jednačine održanja mase. Ako se posmatra ustaljeno strujanje ka bunaru u izdani pod pritiskom, koeficijenta filtracije K i debljine izdani M , na osnovu principa održanja mase može se zaključiti da je protok kroz fiktivni omotač cilindra čiji je radijus r jednak protoku koji se crpi iz bunara (Slika 5.8):

$$Q_b = v \cdot 2r\pi M = K \frac{d\Pi}{dr} 2r\pi M$$

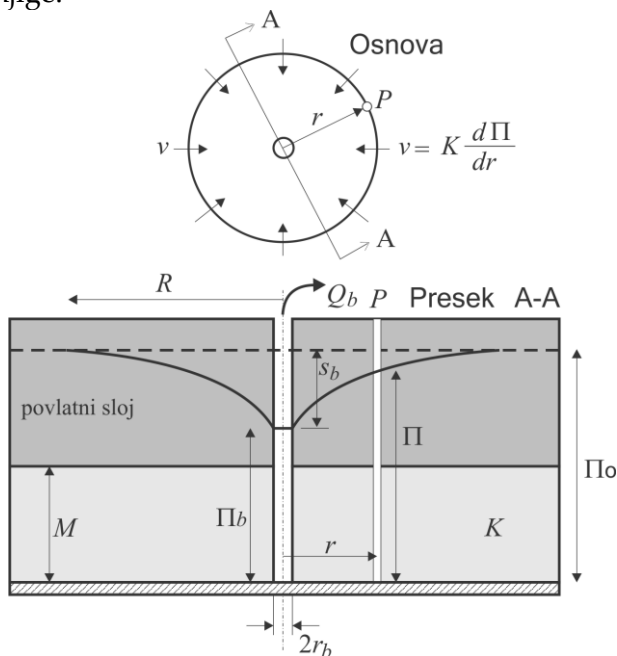
gde je iskorišćen Darsijev zakon u izrazu za brzinu filtracije. Integracijom prethodnog izraza u granicama između r , gde je pijezometarski nivo Π , i $r=R$, gde je neporemećeni pijezometarski nivo Π_0 , dobija se izraz za sniženje pijezometarskog nivoa, kao razlike neporemećenog nivoa i nivoa u uslovima rada bunara:

$$s = \Pi_0 - \Pi = \frac{Q_b}{2\pi KM} \ln\left(\frac{R}{r}\right)$$

Navedeni izraz daje veličinu sniženja pijezometarskog nivoa u izdani pod pritiskom na rastojanju r od bunara usled crpljenja protokom Q_b , u odnosu na početni, statički nivo. Na isti način može se izračunati koliko će biti sniženje u samom bunaru:

$$s_b = \Pi_0 - \Pi_b = \frac{Q_b}{2\pi KM} \ln\left(\frac{R}{r_b}\right)$$

Prilikom izvođenja prethodnih izraza za sniženje nivoa usled rada bunara, usvojeno je nekoliko bitnih pretpostavki: izdan pod pritiskom je homogena i konstantne debljine, kao i da postoji konačno rastojanje R , na kome je nivo neporemećen. Ovo rastojanje se naziva *radijus dejstva bunara* i obično se daje u formi empirijskih izraza u zavisnosti od koeficijenta filtracije K , debljine izdani M , i protoka koji se crpi na bunaru. Pretpostavljeno je takođe da se vertikalna komponenta brzine može zanemariti, odnosno da se radi o horizontalnom, ravanskom strujanju. U slučaju da neka od ovih pretpostavki nije ispunjena u konkretnom slučaju, potrebno je koristiti složenije matematičke alate za rešavanje takvih problema, a koji prevazilaze namenu ove knjige.



Slika 5.8. Ustaljeno strujanje ka bunaru u izdani pod pritiskom

Sa praktičnog stanovišta veoma je korisno primetiti da ukoliko postoje merenja nivoa na dva pijezometra (Π_1 i Π_2), koja se nalaze na rastojanjima od bunara r_1 , odnosno r_2 , iz prethodnih izraza je moguće odrediti proizvod koeficijenta filtracije i debljine izdani pod pritiskom (KM). Oduzimanjem izraza za sniženje u jednom, odnosno drugom pijezometru, dobija se:

$$\Pi_1 - \Pi_2 = \frac{Q_b}{2\pi KM} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)$$

odnosno:

$$T = KM = \frac{Q_b}{2\pi(\Pi_1 - \Pi_2)} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)$$

Ova veličina se zove *transmisivnost* ($T=KM$) i ima dimenziju L^2/t (dužina na kvadrat kroz vreme).

Jednačina sniženja nivoa usled crpljenja vode na bunaru je linearna. Zahvaljujući tome, moguće je primeniti *princip superpozicije*, kada se traži rešenje za sniženje nivoa u slučaju rada više bunara. Drugim rečima, sniženje nivoa u nekoj tački će biti suma pojedinačnih sniženja svakog od bunara. Na primer, sniženje nivoa u proizvoljnoj tački A , koja se nalazi na rastojanju od bunara „ i “ r_{Ai} , pri čemu je $i=1, \dots, N$, a N ukupan broj bunara će biti:

$$s_A = \sum_i s_i = \sum_i \frac{Q_{bi}}{2\pi T} \ln\left(\frac{R}{r_{Ai}}\right)$$

Istim postupkom moguće je dobiti i izraz za strujanje ka bunaru u izdani sa slobodnim nivoom. Osnovna razlika je u tome što u tom slučaju debljina izdani nije konstantna, pa se dobija izraz u obliku:

$$\Pi_0^2 - \Pi^2 = \frac{Q_b}{\pi \cdot T} \ln\left(\frac{R}{r}\right)$$