NENAD JAĆIMOVIĆ



# HIDRAULIKA PODZEMNIH VODA

Univerzitet u Beogradu
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Nenad Jaćimović

# HIDRAULIKA PODZEMNIH VODA

Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet

# Sadržaj

**Predgovor** **xiii**

**1 Podzemna voda kao resurs** **1**
1.1 Uvod . . . . . 1
1.2 Izdan podzemne vode . . . . . 3

**2 Fizičke karakteristike** **7**
2.1 Porozna sredina . . . . . 7
2.1.1 Granulometrijski sastav tla . . . . . 7
2.1.2 Poroznost . . . . . 10
2.2 Voda . . . . . 12
2.2.1 Gustina . . . . . 12
2.2.2 Viskoznost . . . . . 13
2.3 Reprezentativna elementarna zapremina . . . . . 14

**3 Osnovne jednačine** **17**
3.1 Darsijev zakon . . . . . 20
3.2 Koeficijent filtracije . . . . . 24
3.3 Interpretacija koeficijenta filtracije . . . . . 25
3.4 Oblast važenja Darsijevog zakona . . . . . 28
3.5 Heterogenost i anizotropija sredine . . . . . 29
3.6 Jednačina održanja mase . . . . . 32
3.7 Početni i granični uslovi . . . . . 36
3.8 Ravansko strujanje . . . . . 39
3.8.1 Ravansko strujanje u izdani pod pritiskom . . . . . 39
3.8.2 Ravansko strujanje u izdani sa slobodnim nivoom . . 42
3.9 Računski primeri . . . . . 48

**4 Hidraulika bunara** **55**
4.1 Uvod . . . 55
4.2 Ustaljeno strujanje ka bunaru . . . 56
4.3 Neustaljeno strujanje ka bunaru . . . 59
4.3.1 Bunarska funkcija . . . 61
4.3.2 Radijus dejstva bunara . . . 62
4.4 Superpozicija strujanja . . . 65
4.5 Granice u strujmom domenu . . . 67
4.6 Opit probnog crpljenja . . . 72
4.6.1 Parazitski gubici na bunaru . . . 74
4.6.2 Analiza osmotrenih podataka o neustaljenom strujanju ka bunaru . . . 81
4.7 Nepotpuni bunari . . . 96
4.8 Računski primeri . . . 99

**5 Potencijalno strujanje** **105**
5.1 Funkcija potencijala . . . 105
5.2 Strujna funkcija . . . 107
5.3 Primena potencijalnog strujanja . . . 109
5.4 Računski primeri . . . 110

**6 Transport rastvorene materije** **117**
6.1 Izvori zagađenja podzemnih voda . . . 117
6.2 Osnovne jednačine transporta . . . 120
6.3 Mehanizmi transporta . . . 121
6.4 Disperzivnost sredine . . . 129
6.5 Sorpcija i biohemijska razgradnja . . . 134
6.6 Računski primeri . . . 140

**7 Numerički modeli** **145**
7.1 Metoda konačnih razlika . . . 146
7.1.1 Primena metode konačnih razlika za rešavanje jednačine ravanskog strujanja podzemnih voda . . . 149
7.1.2 Primena metode konačnih razlika za rešavanje jednačine linijskog transporta rastvorene materije . . . 152
7.2 Metoda konačnih zapremina . . . 156
7.2.1 Primena metode konačnih zapremina za rešavanje jednačine linijskog transporta rastvorene materije . . . 158

**8 Nezasićena sredina** **169**
8.1 Kapilarni pritisak i kapilarni potencijal . . . . . 170
8.2 Darsijev zakon u nezasićenoj sredini . . . . . 172
8.3 Primena jednačine održanja mase . . . . . 173
8.4 Funkcionalne zavisnosti . . . . . 176
8.5 Početni i granični uslovi . . . . . 177
8.6 Numerički model . . . . . 179
8.7 Pojednostavljeni modeli infiltracije . . . . . 183
8.7.1 Grin-Ampt model infiltracije . . . . . 184
8.7.2 Horton-ov model infiltracije . . . . . 186

# Predgovor

Knjiga je prvenstveno namenjena studentima na predmetu "Eksploatacija i zaštita podzemnih voda"koji se izlaže na master studijama Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Verujem da može biti od koristi i studentima drugih fakulteta i predmeta na kojima su neophodna osnovna znanja iz oblasti hidraulike podzemnih voda, ali i kao podsetnik u svakodnevnoj inženjerskoj praksi. Činjenica je da su studentima, u današnje vreme razvijenih računarskih i internet tehnologija, lako dostupne informacije iz bilo koje oblasti, gotovi softverski paketi za rešavanje inženjerskih problema, primeri praktičnih problema, itd. Međutim, sasvim je sigurno da racionalno i pravilno korišćenje ovih informacija i alata, posebno primena gotovih programskih paketa, zahteva poznavanje teorije koja stoji iza njih. Zbog toga, osnovni cilj ove knjige je da se studenti upoznaju sa zakonitostima kretanja podzemnih voda na prijemčiv, ali i dovoljno detaljan način da mogu sa razumevanjem da koriste softverske alate i pristupe rešavanju inženjerskih problema. Pod razumevanjem podrazumeva se najpre teorijsko znanje koje će studentima omogućiti da alate koriste na teorijski opravdan i inženjerski racionalan način, uz sagledavanje pouzdanosti dobijenih rezultata. Takođe, s obzirom da svaki konkretan problem zahteva poznavanje hidrauličkih parametara do kojih se najčešće dolazi terenskim merenjima, očekujem da će studenti na osnovu stečenog znanja biti u mogućnosti da racionalno predvide neophodne aktivnosti za njihovo pouzdano određivanje. Autoru je posebno važno da materiju koja se izlaže u ovoj knjizi studenti funkcionalno povežu sa znanjem koje su stekli iz predmeta koje su prethodno slušali: Mehanika fluida, Hidrologija, Hidraulika i Računska hidraulika, imajući u vidu da su osnovni principi, iz kojih su izvedene praktično sve jednačine u ovoj knjizi, potpuno identični principima koje su već naučili kroz ove predmete. Drugim rečima, hidraulika podzemnih voda predstavlja samo još jedna primenu osnovnih načela na kojima su zasnovani Mehanika fluida i Hidraulika.

Knjiga je organizovana u osam povezanih poglavlja. Poglavlje 1 daje objašnjenja osnovnih pojmova od značaja za eksploataciju i zaštitu podzemnih voda, u smislu izuzetno važnog prirodnog resursa, sa naglaskom na značaj u vodosnabdevanju.
Poglavlje 2 objašnjava osnovne fizičke veličine kojima se kvantifikuju karakteristike porozne sredine i vode. Imajući u vidu da se radi o višefaznoj sredini, koja se sastoji od čvrste faze, vode i vazduha, objašnjen je način prevazilaženja problema diskontinuiteta, u cilju primene matematičkog aparata za matematičko modeliranje strujanja.
U Poglavlju 3 formulišu se osnovne jednačine kojima se opisuje strujanje vode u poroznoj sredini primenom osnovnih načela održanja mase i količine kretanja. Takođe, obrazlažu se mogućnosti za pojednostavljenje osnovnih jednačina, kako bi se izvedeni matematički model strujanja lakše primenio u inženjerskoj praksi, što je ilustrovano kroz nekoliko praktičnih primera.
U Poglavlju 4 se izvedene jednačine prilagođavaju problemu radijalnog strujanja ka bunaru. Objašnjena je primena principa superpozicije, što, između ostalog, omogućava određivanje hidrauličkih karakterstika izdani primenom testa probnog crpljenja. Kroz računske primere na kraju poglavlja prikazana je metodologija projektovanja bunara.
Poglavlje 5 opisuje relativno jednostavnu metodu za rešavanje pojednostavljenih jednačina strujanja u poroznoj sredini, zasnovanu na principima potencijalnog strujanja, čija je praktična primena takođe prikazana kroz nekoliko primera.
Poglavlje 6 se odnosi na problematiku transporta rastvorene materije u podzemnoj vodi, gde se, kroz formulaciju nekoliko ključnih mehanizama transporta, dolazi do opšteg matematičkog aparata kojima se takav transport može numerički modelirati.
S obzirom da se pomenuti matematički modeli strujanja i transporta rastvorene materije formulišu parcijalnim diferencijalnim jednačinama, koje u opštem slučaju nije moguće direktno rešavati, u Poglavlju 7 se objašnjavaju osnovne numeričke metode za njihovo rešavanje.
Poglavlje 8 se odnosi na matematički opis strujanja u nezasićenoj sredini i problema infiltracije sa površine terena. Pored opšteg modela strujana u nezasićenoj sredini, daje se i prikaz nekoliko pojednostavljenih matematičkih modela infiltracije.

*Autor*