

**Prof.dr. Goran Gjetvaj**

**RUKOPIS PREDAVANJA IZ PREDMETA**

# **HIDRAULIKA**



**Zagreb, 2006**

## Predgovor

Ovu rukopis sam napravio prvenstveno zbog sebe, sa ciljem da sistematiziram i zapišem prikupljena znanja kako bi ih mogao koristiti kad mi trebaju.

Ovaj rukopis može pomoći studentima Građevinskog fakulteta u Zagrebu i Rijeci pri savladavanju gradiva iz predmeta Hidraulika. Tečaj iz Hidraulike se nastavlja na tečaja iz Hidromehanike u kojem su objašnjeni osnovni zakoni (teoretske osnove) vezani za mirovanje (hidrostatika) i kretanje fluida (kinematika i dinamika). U okviru prethodnog tečaja je provedena klasifikacija (podjela) fluida a navedena su njihova svojstva te su rađene jednodimenzionalne analize stacionarnih procesa. Smatra se da su studenti savladali gradivo objašnjeno u Hidromehanici. U okviru ovog tečaja (hidraulike) će se obraditi i nestacionarna gibanja Newtonovog fluida u slučaju nepravilne geometrije te neki primjeri koji se javljaju u hidrotehničkoj praksi.

Osim ovog rukopisa predavanja izrađen je i Praktikum iz hidraulike u kojem je objašnjeno gradivo koje se obrađuje na vježbama. Oba rukopisa čine jedinstvenu cjelinu.

U okviru tečaja iz Hidraulike obrađivat će se dvo- i trodimenzionalno strujanje kao i nestacionarno strujanje fluida. Rješavanje većine inženjerskih problema zahtijeva izradu numeričkih modela u kojima se provodi diskretizacija prostora i vremena što zahtijeva veću količinu matematičkih radnji. U okviru nastave se uče zakonitosti kretanja fluida opisane odgovarajućim jednadžbama te metode rješavanja vladajućih jednadžbi. Mogućnosti rješavanja vladajućih jednadžbi za dane početne i rubne uvijete će biti prikazane na jednostavan način s osnovnim ciljem da se shvati pristup rješavanju dok će se u praksi konkretni problemi rješavati uglavnom pomoću komercijalno dostupnih programskih paketa.

Studenti se upućuju na istraživački pristup da počnu od jednostavnog i da postepeno dodaju složenost. Stoga se zainteresirani studenti mogu javiti nastavniku u slučaju da žele proširiti znanje odnosno problem riješiti sofisticiranijom metodom.

Obzirom da je ovaj rukopis predviđen kao udžbenik, neki pojmovi su ponovljeni više puta kako bi bili razumljiviji. To se prvenstveno odnosi na pronos tvari koji je opisan i u uvodu i u poglavljima u kojima se pronos efluenta iz podmorskog ispusta kao i u poglavlju o toku podzemnih voda. Iako su dominantni procesi koji uzrokuju pronos isti (konvekcija, difuzija i disperzija) te je jednadžba pronosi u suštini ista, zbog razlika u nekim specifičnostima (npr. poroznost i nehomogenost vodonosnog sloja, razlike u gustoći pri pronosu u moru, drugačije oznake koje su uobičajene u raznim granama hidrotehnike i duge) i da su praktički nekoliko puta ponovljeni izvodi jednadžbe pronosa sa malim izmjenama zbog specifičnosti pronosa u moru, podzemnim vodama i zraku.

Sam rukopis predstavlja radnu verziju budućeg udžbenika te se mole studenti da nastavniku ukažu na nejasnoće u pojedinim poglavljima rukopisa tj. na methodske jedinice koje nisu dovoljno jasno obrazložene, kako bi u konačnici skripta bila prilagođena potrebama studenata.

1. U V O D	
1.1 Fluidi i njihovo značenje	... I - 1
1.2 Fluidi i energija	... I - 1
1.3 Ograničenja transformacije oblika energije	... I - 2
1.3.1 Princip održanja energije	... I - 3
1.4. Modeliranje hidrodinamičkih procesa	... I - 5
1.4.1 Simbolički modeli	... I - 5
1.4.2 Fizikalni modeli	... I - 6
1.4.3 Analogni modeli	... I - 10
1.5 Elementi hidrodinamike	... I - 10
1.5.1 Molekularna difuzija	... I - 10
1.5.2 Osnovne karakteristike turbulentnog toka	... I - 11
1.5.3 Reynoldsovo osrednjavanje	... I - 12
1.5.4 Vrtložna – turbulentna viskoznost	... I - 14
1.6 Vladajuće jednadžbe u strujnoj cijevi	... I - 16
1.7 Primjena modela	... I - 19
2. TEČENJE U OTVORENIM KORITIMA	... II - 1
2.1 Specifična energija presjeka	... II - 2
2.1.1 Promjena protoka sa dubinom pri konstantnoj specifičnoj energiji	... II - 3
2.1.2 Rasprostiranje utjecaja	... II - 4
2.2 Nejednoliko tečenje u otvorenim koritima	... II - 6
2.2.1 Klasifikacija oblika vodnog lica	... II - 6
2.3 Nestacionarno tečenje	... II - 9
2.3.1 Jednadžbe nestacionarnog tečenja u otvorenim koritima	... II - 9
2.3.2 Postepeno promjenjivo tečenje	... II - 10
2.3.2.1 Odnos pada slobodne površine $I$ prema padu dna $I_0$	... II - 11
2.3.2.2 Brzina propagacije u slučaju kad je $I \approx I_0$	... II - 12
2.3.3 Mjerenje protoka u otvorenom vodotoku	... II - 14
2.3.4 Proračun vodnog lica u nestacionarnom režimu	... II - 16
2.3.5 Tečenje s naglim promjenama	... II - 17
2.3.5.1 Brzina vala	... II - 18
2.3.5.2 Odbijanje (refleksija) strmih valova	... II - 21
2.3.5.3 Princip superpozicije strmih valova	... II - 23
2.3.5.4 Deformacija vala	... II - 24
2.3.5.5 Pozitivni nizvodni val	... II - 26
2.3.5.6 Pozitivni uzvodni val	... II - 27
2.3.6 Lom brane	... II - 28
3. DINAMIKA MORSKIH VALOVA	... III - 1
3.1 Jednadžba vala	... III - 3
3.1.1 Raspodjela tlaka u valu	... III - 9
3.1.2 Energija vala	... III - 11
3.1.3 Strmost vala	... III - 12
3.1.4 Gibanje pojedinih čestica vala	... III - 12
3.1.5 Refleksija vala	... III - 14

4. HIDRAULIKA SISTEMA POD TLAKOM	... IV - 1
4.1 Vodovodne mreže	... IV - 1
4.1.1 Uvod	... IV - 1
4.1.2 Metoda proračuna	... IV - 2
4.1.3 Ulazni podaci	... IV - 7
4.2 Nestacionarno tečenje u cijevima	... IV - 8
4.2.1 Vodna komora	... IV - 9
4.2.1.2 Tipovi vodnih komora	... IV - 9
4.2.1.3 Jednadžba oscilacija razine u cilindričnoj vodnoj komori	... IV - 13
4.2.1.4 Stabilnost sistema vodne komore	... IV - 17
4.2.1.5 Metode numeričke simulacije oscilacija u vodnoj komori	... IV - 21
4.2.2 Zračni kotlić	... IV - 24
4.3 Vodni udar	... IV - 28
4.3.1 Jednadžba vodnog udara	... IV - 29
4.3.1.1 Brzina širenja vodnog udara	... IV - 32
4.3.1.2 Faze propagacije vodnog udara	... IV - 33
4.3.1.3 Linearni zakon promjene brzina	... IV - 37
4.3.1.4 Realni zakon promjene brzina	... IV - 38
4.3.1.5 Određivanje promjene tlaka metodom karakteristika	... IV - 40
4.3.2 Vodni udar u složenim cjevovodima	... IV - 46
4.3.3 Zakon refleksije vodnog udara	... IV - 47
4.3.4 Utjecaj otpora trenja na veličinu vodnog udara	... IV - 51
4.3.5 Naglo otvaranje cjevovoda	... IV - 53
4.3.5.1 Prekid vodnog stupca	... IV - 55
5. HIDRAULIKA PODZEMNIH VODA U SJOLEVIMA MEĐUZRNSKE POROZNOSTI	... V - 1
5.1 Shema kontinuuma	... V - 1
5.2 Osnove strujanja vode u poroznoj sredini	... V - 3
5.2.1 Darcy-ev zakon	... V - 4
5.2.2 Saturiranost	... V - 6
5.2.3 Van Genutchenov model	... V - 8
5.2.4 Anizotropija	... V - 10
5.3 Jednadžba trodimenzionalnog nestacionarnog toka	... V - 12
5.3.1 Matematički model	... V - 16
5.4 Regionalni modeli toka podzemnih voda	... V - 16
5.4.1 Metoda konačnih diferencija	... V - 19
5.4.2 Rubni uvjeti	... V - 22
5.4.3 Stacionarno strujanje	... V - 24
5.4.4 Tečenje sa slobodnim vodnim licem	... V - 26
5.4.5 Vodonosnici sa procjeđivanjem	... V - 28
5.4.6 Metoda konačnih elemenata	... V - 29
5.5 Zdenci	... V - 31
5.5.1 Analitički izrazi za sniženje u zdencu	... V - 33
5.5.2 Vrelna ploha	... V - 35
5.5.3 Radijus utjecaja zdenca	... V - 35
5.5.4 Grupe zdenaca	... V - 36

5.5.4.1 Zdenci pod tlakom	... V - 36
5.5.4.2 Zdenci sa slobodnim vodnim licem	... V - 37
5.5.4.3 Zdenac uz vodotok	... V - 38
5.5.4.4 Zdenac uz nepropusnu granicu	... V - 39
5.5.5 Nestacionarno strujanje prema zdencu	... V - 39
5.5.6 Određivanje osnovnih hidrogeoloških parametara pomoću rezultata probnog crpljenja	... V - 41
5.5.6.1 Stacionarni tok - Thiem-ova jednačba	... V - 42
5.5.6.2 Nestacionarni režim	... V - 42
5.5.6.3 Numerički model	... V - 47
<b>6. HIDRAULIKA PODZEMNIH VODA U KRŠU</b>	... VI - 1
6.1 Osnovne fizikalne karakteristike krša	... VI - 5
6.1.1 Poroznost	... VI - 5
6.1.2 Koeficijent uskladištenja	... VI - 7
6.1.3 Vodopropusnost	... VI - 7
6.2. Modeli toka u sitnim pukotinama	... VI - 8
6.2.1 Opis toka primjenom sheme kontinuuma	... VI - 8
6.2.2 Tok kroz pojedinu pukotinu	... VI - 10
6.2.2.1 Od Navier-Stokes-ove do Stokes-ove jednačbe	... VI - 10
6.2.2.2 Protok između dvije paralelne ploče	... VI - 11
6.2.2.3 Stepenasta pukotina	... VI - 14
6.2.2.4 Strujanje kroz pukotinu uz zanemarivanje efekta zavojitosti strujanja	... VI - 15
6.2.2.5 Sinusoidalne pukotine	... VI - 16
6.2.2.6 Zašiljene pukotine	... VI - 18
6.2.2.7 Trodimenzionalni opis pukotine	... VI - 18
6.2.3 Opis turbulentnog strujanja u pukotini	... VI - 19
6.3 Režim tečenja vode sistemom krupnih provodnika –kolektora	... VI - 22
6.4 Vodni objekti	... VI - 22
6.4.1 Ponori	... VI - 23
6.4.2 Estavele	... VI - 25
6.4.3 Izvori	... VI - 25
6.5 Zaslanjivanje priobalnih izvora	... VI - 27
6.6 Regionalni modeli toka u kršu	... VI - 29
6.6.1 Čelijski modeli	... VI - 29
6.6.2 Podzemne vodospreme i provodnici	... VI - 32
<b>7. PRONOS TVARI</b>	... VII - 1
7.1 Pronos tvari tokom podzemne vode	... VII - 1
7.1.1 Ciljevi modela pronosa tvari tokom podzemne vode	... VII - 1
7.1.2 Podjela modela	... VII - 2
7.1.3 Mehanizmi pronosa	... VII - 3
7.1.4 Jednačba pronosa	... VII - 8
7.1.5 Metode rješavanja jednačbe pronosa	... VII - 15
7.1.5.1 Analitička rješenja	... VII - 16
7.1.5.2 Rješenja koja ne uzimaju u obzir disperziju	... VII - 20
7.1.5.3 Numeričke metode	... VII - 22

7.2 Podmorski ispusti	... VII - 27
7.2.1 Oblak efluenta u stacionarnoj uniformnoj sredini	... VII - 31
7.2.2 Osnosimetričan mlaz	... VII - 31
7.2.3 Osnosimetrični oblak	... VII - 32
7.2.4 Perjanica	... VII - 33
7.2.5 Hidrodinamička disperzija u moru	... VII - 36
7.2.6 Numerički model širenja oblaka efluenta	... VII - 38
8. DJELOVANJA VJETRA NA GRAĐEVINSKE KONSTRUKCIJE	... VIII - 1
8.1 Karakteristike zraka	... VIII - 1
8.2 Vladajuće jednačbe	... VIII - 2
8.3 Vjetrovi	... VIII - 3
8.4 Profil brzina u graničnom sloju	... VIII - 6
8.5 Ispitivanja u vjetrovnom tunelu	... VIII - 9
8.6 Numeričko modeliranje	... VIII -10
8.7 Utjecaj vjetra na stabilnost konstrukcija	... VIII - 13
8.8 Utjecaj vjetra na sigurnost prometa	... VIII -14
8.8.1 Učinkovitost vjetrobrana - Faktor zaštite	... VIII - 15
8.8.2 Tipovi vjetrobrana	... VIII - 15