



SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET

HRVATSKO DRUŠTVO
ZA ODVODNJU I NAVODNJAVANJE
HRVATSKO HIDROLOŠKO DRUŠTVO

PRIRUČNIK ZA HIDROTEHNIČKE MELIORACIJE

III KOLO
KNJIGA 2

ELEMENTI PLANIRANJA SUSTAVA ZA NAVODNJAVANJE

Rijeka, 2005.

Sadržaj ove knjige predstavlja rezultat istraživanja u 2003. i 2004. godini, a u okviru znanstvenog projekta »Znanstvene osnove za razvoj natapanja u Republici Hrvatskoj« broj 114003, financiranog od Ministarstva znanosti i tehnologije Republike Hrvatske. Izdavanje rezultata istraživanja u vidu priručnika novčano je potpomoglo:

— Poduzeće »Hrvatske vode«

Zagreb, Ulica grada Vukovara 220

Rijeka, travanj 2005.

**Ministarstvo znanosti i tehnologije
Republike Hrvatske**

Projekt:
Znanstvene osnove za razvoj natapanja
u Republici Hrvatskoj

Šifra: **0114003**

Voditelj projekta:

prof.dr.sc. Nevenka Ožanić

Istraživači:

prof.dr.sc Nevenka Ožanić
prof.emer.dr.sc. Zorko Kos
prof.dr.sc. Čedomir Benac
mr.sc. Barbara Karleuša
mr.sc. Josip Rubinić
mr.sc. Ivica Plišić
Jasmina Orbanić, dipl.inž.građ.
Enco Žufić, dipl.inž.građ.
Elvis Žic, dipl.inž.građ.

CIP – Katalogizacija u publikaciji
SVEUČILIŠNA KNJIŽNICA RIJEKA

UDK 626.8(075.8)

PRIRUČNIK za hidrotehničke melioracije.
Rijeka: Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 1992— ; 24 cm
Na vrhu nasl. str.: Sveučilište u Rijeci.

Kolo: 3. – 2003-

Knjiga:

2: Elementi planiranja hidromelioracijskih sustava / Nevenka Ožanić
... <et al.>. – 2005

Bibliografija iza svakog poglavlja

ISBN 953-6953-11-0

1. Ožanić, Nevenka Ožanić
I. Hidrotehnika II. Navodnjavanje
110318030

Rezultati istraživanja na temi tijekom 2003. i 2004.

GRAĐEVINSKI FAKULTET
Sveučilišta u Rijeci

HRVATSKO DRUŠTVO ZA ODVODNJU I NAVODNJAVANJE
HRVATSKO HIDROLOŠKO DRUŠTVO

PRIRUČNIK ZA
HIDROTEHNIČKE
MELIORACIJE

III KOLO
KNJIGA 2

ELEMENTI PLANIRANJA
HIDROMELIORACIJSKIH SUSTAVA

Autori

prof.dr.sc. Nevenka Ožanić
mr.sc. Barbara Karleuša
prof.dr.sc. Goran Gjetvaj
Vanja Travaš, dipl.inž.građ.
prof.dr.sc. Josip Marušić
Josip Pondeljak, dipl.inž.stroj.
prof.dr.sc. Davor Romić
prof.dr.sc. Ognjen Bonacci
dr.sc. Marko Josipović
prof.dr.sc. Madjar Stjepan
dr.sc. Jasna Šoštarić
mr.sc. Josip Rubinić

Rijeka, 2005.

GRAĐEVINSKI FAKULTET Sveučilišta u Rijeci

Za izdavača:
prof.dr.sc. Nevenka Ožanić

Uredništvo:
prof.dr.sc. Nevenka Ožanić
prof.dr.sc. Čedomir Benac
doc.dr.sc. Aleksandra Deluka Tibljaš
prof.dr.sc. Ivan Vrkljan

Glavni i odgovorni urednik:
prof.dr.sc. Nevenka Ožanić

Recenzenti:
prof.emer.dr.sc. Zorko Kos
prof.dr.sc. Ognjen Bonacci
prof.dr.sc. Tanja Roje Bonacci

Kategorizacija:
Znanstvena monografija

Adresa uredništva:
Rijeka, Viktora Cara Emina 5

Tisak: LIBER d.o.o.
Naklada: 300 primjeraka
Grafička obrada i prijelom:
Natko Jakić, dipl.inf

PREDGOVOR

Nova knjige iz serije »Priručnika za hidrotehničke melioracije« održava dugogodišnji kontinuitet istraživanja i publiciranja aktualne znanstveno-stručne problematike iz domene hidrotehničkih melioracija, odnosno problematike odvodnje i navodnjavanja. Do sada je publicirano 14 publikacija, podijeljenih u tri kola.

U razdoblju 1983.—1991. publicirano je 6 knjiga I kola spomenutog priručnika u kojima je obrađena problematika odvodnjavanja sa sljedećim tematskim cjelinama: Knjiga 1 – Opći dio (1983), Knjiga 2 – Podloge (1984), Knjiga 3 – Osnovna mreža (1985), Knjiga 4 – Detaljna mreža (1987), Knjiga 5 – Građenje (1989), Knjiga 6 – Održavanje (1991).

U razdoblju 1992.—1999. objavljeno je novih 7 knjiga II kola u kojima je obrađena problematika navodnjavanja sa sljedećim tematskim cjelinama: Knjiga 1 – Opći dio (1992), Knjiga 2 – potrebe vode za navodnjavanje (1993), Knjiga 3 – Načini natapanja (1994), Knjiga 4 – Sustavi, građevine i oprema za natapanje (1994), Knjiga 5 – Planiranje, projektiranje i organizacija natapnih sustava (1996), Knjiga 6 – Kvaliteta i raspoloživost vode za natapanje (1997), Knjiga 7 – Mehanizacija i oprema za natapanje (1999).

Nakon toga, 2004. godine objavljena je prva knjiga III kola: Knjiga 1 – Suvremeni pristupi i metode planiranja i upravljanja hidromelioracijskim sustavima.

Spomenutih 14 priručnika, s preko 3300 stranica, pokrili su najveći dio problematike vezane uz teorijske i praktične aspekte hidrotehničkih melioracija, te ostvarili nužne preduvjete za implementaciju potrebnih saznanja na području Hrvatske. Kao što je u Predgovoru knjige 1 u I kolu još 1983.g. i napisano, to je bio i cilj Društva za odvodnjavanje i navodnjavanje Hrvatske koje je i pokrenulo izdavanje predmetnih priručnika. Ideja je bila, a tako je i realizirano da će »priručnik biti tako koncipiran, da će odgovarati potrebama radnih organizacija i pojedinaca koji se bave planiranjem, projektiranjem, građenjem i održavanjem hidromelioracijskih sustava... Ideja o poduzimanju tako značajnog poduhvata vremenski se podudara s pojavom određenih društveno-gospodarskih poteškoća u našoj zemlji, koje su posljedica intenzivnog rasta i razvoja u proteklom desetljećima. Namjera je Predsjedništva i svih članova Društva da ovim putem dadu djelatvoran doprinos što bržem prevladavanju naraslih proturječnosti i problema, naročito na području osiguravanja nužnih preduvjeta za intenzivniju i rentabilniju poljoprivrednu proizvodnju ...«

Publicirani priručnici prvih dvaju kola dali su velik doprinos razvoju znanstvenih i stručnih kadrova vezanih uz različite aspekte problematike hidrotehničkih melioracija. U njima je istražena, te sistematizirana i na pristupačan način obrazložena glavina tema te, za Hrvatsku izuzetno važne djelatnosti, kako u pogledu njezinog privrednog značenja, tako i njome uvjetovanih socio-ekonomskih prilika u širem okruženju. U tom smislu rijetki su primjeri postojanja dokumentiranosti tako zaokruženog ciklusa teorijsko-stručnih saznanja iz neke domene. Nažalost tijekom posljednjih desetak godina Hrvatsko

gospodarstvo, pa tako i poljoprivreda, uz spomenute poteškoće iz predgovora prve knjige 1983.g. koji su naknadno i generirani, te probleme razvoja izazvane poznatim ratnim prilikama na našim prostorima, prolazi i kroz fazu prevladavanja tranzicijskih problema. Svi su ti problemi u okruženju poljoprivrede sasvim sigurno utjecali i na ograničene mogućnosti implementacije do sada publiciranih saznanja iz prethodno objavljenih Priručnika u domaćoj praksi. Taj raskorak između obrađene teorije i njezine praktične primjene u Hrvatskoj, kao i okolnost da nova vremena postavljaju i nove izazove u kontekstu čega treba istaći i aktualnu potrebu prilagodbe razvoja poljoprivrede u Hrvatskoj u okruženju Europske unije, bili su dodatni motivi da se predvidi daljnji razvoj još pred dvadeset godina započetog predmetnog projekta, te njegovo usmjeravanje na implementaciju potrebnih saznanja iz domene hidrotehničkih melioracija na razvoj hidrotehničkim melioracija, a time i poljoprivrede u Hrvatskoj.

Razumijevanjem Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa i Hrvatskih voda, koji su i ovom prilikom sufinancirali nastavak predmetnog znanstveno-istraživačkog projekta, pred čitateljstvom je druga knjiga iz nove serije Priručnika, tj. Knjiga 2 III kola. Planirano je da bi i to III kolo imalo šest pojedinačnih knjiga – rezultata rada brojnih istraživača i suradnika na predmetnom znanstveno-istraživačkom projektu. I dok je I kolo bilo usmjereno na problematiku odvodnje, II na navodnjavanje, zamisao nositelja projekta je da bi III kolo projekta »Znanstvene osnove za razvoj natapanja u Republici Hrvatskoj«, upravo zbog problema implementacije znanstvenih i stručnih spoznaja na našim prostorima, bilo uz neizostavni znanstveno-istraživački pristup pojedinim do sada manje obrađivanim temama, ponajviše orijentirano na samu Hrvatsku, tj. prirodno, strukturalno te i društveno-ekonomsko okruženje u okviru kojeg bi se trebao ostvariti razvoj hidrotehničkih sustava za navodnjavanje.

Sadržajno i po obimu objavljenih materijala u dosadašnjim priručnicima, posebno su velik doprinos razvoju projekta dali prvi dugogodišnji voditelj spomenutog znanstvenog projekta prof.emeritus dr.sc. Z. Kos, prof.dr.sc. J. Marušić, prof.dr.sc. F. Tomić, prof.dr.sc. O. Bonacci i prof.dr.sc. D. Gereš. Uz planirano učešće spomenutih posebno zaslužnih autora, učešće većeg broja drugih autora koji su i do sada davali svoj doprinos, kao i angažmanom više autora – specijalista u pojedinim segmentima analiziranih tema nove serije priručnika, na najbolji će način biti potvrđen kontinuitet realizacije projekta u okvirima suradnje djelatnika Građevinskog fakulteta Rijeka, kao i ostalih kolega iz Hrvatskog društva za odvodnjavanje i navodnjavanje, angažiranih u brojnim institucijama – ponajviše u okvirima Građevinskih fakulteta u Zagrebu, Splitu i Osijeku, Agronomskih fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i Osijeku, Poljoprivrednom institutu u Osijeku, te Hrvatskih voda.

Koristim priliku da se zahvalim svim autorima radova, recenzentima, uredništvu, kao i drugim suradnicima na projektu koji su omogućili izdavanje Knjige 2 – III kola, te Ministarstvu znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske i poduzeću Hrvatske vode na ukazanom povjerenju.

Rijeka, travanj 2005.

prof.dr.sc.
Nevenka Ožanić

SADRŽAJ

1. **Uvod**
Prof.dr.sc. Nevenka Ožanić
2. **Priprema podloga za primjenu višekriterijske analize u planiranju hidromelioracijskih sustava**
Mr.sc. Barbara Karleuša
3. **Statističke obrade velikih voda hidromelioracijskih sustava**
Prof.dr.sc. Nevenka Ožanić
4. **Nasipi u hidromelioracijskim sustavima**
Prof.dr.sc. Goran Gjetvaj — Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Vanja Travaš, dipl.inž.građ. — Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci
5. **Značenje crpnih stanica za vodni režim melioracijskih područja**
Prof.dr.sc. Josip Marušić
Josip Pondeljak, dipl.inž.stroj.
6. **Navodnjavanje u održivoj poljoprivredi**
Prof.dr.sc. Davor Romić
7. **Odvodnja polja u kršu na primjeru Vrgorskog polja**
Prof.dr.sc. Ognjen Bonacci
8. **Racionalno korištenje vode u poljoprivredi**
Dr.sc. Marko Josipović — Poljoprivredni institut Osijek
Prof.dr.sc. Madjar Stjepan — Poljoprivredni fakultet Sveučilišta u Osijeku
Dr.sc. Jasna Šoštarić — Poljoprivredni fakultet Sveučilišta u Osijeku
9. **Aktualni vodnogospodarski aspekti razvoja navodnjavanja na primjeru hidromelioracijskog sustava Čepić polja**
Mr.sc. Josip Rubinić, dipl.ing.građ.

1

UVOD

Knjiga 2 – III kola Priručnika za hidrotehničke melioracije sadrži temeljne rezultate istraživanja u okviru znanstveno-istraživačkog projekta **Znanstvene osnove za razvoj natapanja u Republici Hrvatskoj** (0114003), prihvaćenog od Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske za istraživačko razdoblje 2002.—2005., a realiziranog i uz sufinanciranje Hrvatskih voda. Obradene su teme iz šire problematike hidrotehničkih melioracija koje nisu bile uopće ili u punoj mjeri zastupljene pri objavljivanju ranijih kola Priručnika, a ocijenjene su primjerenim da se približe stručnoj i znanstvenoj javnosti u Hrvatskoj.

Pri izboru tema za Knjigu 2 zadržan je koncept usvojen kod pokretanja novoga ciklusa danog istraživačkog projekta 2002.g., a to je da će se, s obzirom na sadržaje već publiciranih radova u prva dva kola Priručnika za hidrotehničke melioracije, aktualni trenutak – očekivanu promjenu poljoprivredne politike prema razvoju navodnjavanja, kao i stručne specijalnosti koje u domeni istraživanja i gospodarenja vodama posebno razvija Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, naglasak dati na do sada manje obrađivanim temama, kao i nekim već dijelom obrađivanim temama kod kojih se je od njihovog publiciranja u prva dva kola Priručnika za hidrotehničke melioracije (Prva knjiga I kola objavljena je još 1983.g.) došlo do bitno novijih saznanja – kako u smislu metodologije, tako i koncepta planiranja i rješenja. Na taj je način izvršena aktualizacija suvremene teorije i stručnih saznanja u cilju osiguranja primjerenih znanstveno-stručnih podloga za njihovu primjenu na razvoj hidromelioracijskih sustava na području Hrvatske, a posebno u dijelu koji se odnosi na navodnjavanje.

Obradeno je više različitih tema koje se u nastavku, u sažetim crtama, uvodno predstavljaju.

U radu **Priprema podloga za primjenu višekriterijske analize u planiranju hidromelioracijskih sustava** (autorica Karleuša, B.) dan je metodološki koncept planiranja hidromelioracijskih sustava u kontekstu primjene metoda sustavne analize te izbora rješenja primjenom višekriterijske optimizacije. Poseban je naglasak dan pripremi podloga za primjenu višekriterijske optimizacije, odnosno razradi kriterija kojima se procjenjuje zadovoljavanje ciljeva-potreba.

Rad **Statističke obrade i velike vode hidromelioracijskih sustava** (autorica Ožanić, N.) sintetizira analizu problematike pojava i proračuna velikih voda u kontekstu dva najčešća prisutna hidrološka pristupa – s jedne strane s aspekta upotrebe osnovnih statističkih metoda obrade i analize vjerojatnosti njihove pojave, a s druge strane s aspekta korištenja parametarskih metoda pri proračunu – ocjeni maksimalnih protoka upravo na hidromelioracijskim sustavima.

Rad **Odvodnja polja u kršu na primjeru Vrgorskog polja** (autor Bonacci, O.) s hidrološkog aspekta, na primjeru sustava Vrgorskog polja, metodološki i upravljački aktualizira složenu problematiku zatvorenih krških polja, inače vrlo

pogodnih i zasad slabo iskorištenih poljoprivrednih površina za razvoj navodnjavanja u priobalnom, krškom području Hrvatske.

Nasipi u hidromelioracijskim sustavima (autori Gjetvaj, G. i Travaš, V.) je rad u kome je vrlo detaljno, s hidrauličkog aspekta, obrađena problematika jednog od konstruktivnih objekata hidromelioracijskih sustava – nasipa. Poseban je naglasak dan modeliranju nestacionarnog strujanja kroz nezasićeni anizotropni nasip s ciljem određivanja napredovanja vodnog, kao i modeliranja postupnog zasićenja tijela nasipa.

U radu **Značenje crpnih stanica za vodni režim melioracijskih područja** (autori Marušić, J i Pondeljak, J.) s više je vodnogospodarskih aspekata obrađena problematika uloge crpnih stanica na hidromelioracijskim sustavima. Dana je iscrpna inventarizacija i analiza stanja objekata crpnih postrojenja i sustava na području Hrvatske, kao i potrebnih podloga i elemenata za daljnja projektno-izvedbena rješenja rekonstrukcije postojećih i izgradnju novih crpnih stanica u cilju stvaranja i održavanja optimalnog vodnog režima poljoprivrednog zemljišta.

Rad **Racionalno korištenje vode u poljoprivredi** (grupe autora Josipović, M., Madjar, S. I Šošarić, J.) aktualizira, opisom i analizom najvažnijih čimbenika vezanih uz tlo i procese zadovoljavanja potreba za vodom poljoprivrednih kultura, potrebu osiguranja racionalnog pristupa navodnjavanju. Radi se o metodološkom pristupu koji uključuje sve agrotehničke i hidrotehničke mjere kojime se postiže pravilno i uspješno navodnjavanje bez neželjenih štetnih posljedica koje, zbog neracionalnog gospodarenja vodom i tlom, inače često prate navodnjavanje.

Rad **Navodnjavanje u održivoj poljoprivredi** (autor Romić, D.) nastavlja se na prethodno obrađivanu temu u smislu provedbe detaljne analize pojedinih vidova neracionalnog pristupa navodnjavanju i uz to vezanih problema oštećenja tla i poljoprivrednih kultura. Poseban je naglasak dan analizi poljoprivredne proizvodnje u uvjetima navodnjavanja zaslanjenim vodama kao jednom od najaktualnijih, a u budućnosti vjerojatno i najizraženijih problema vezanih uz navodnjavanje u priobalnim područjima.

Na kraju dan je i rad **Aktualni vodnogospodarski aspekti razvoja navodnjavanja na primjeru hidromelioracijskog sustava Čepić polja** (autor Rubinić, J.), u kome su na jednom konkretnom primjeru, na temelju konkretnog zahtjeva zainteresirane lokalne zajednice, analizirani problemi i moguća rješenja razvoja navodnjavanja jednog, moglo bio se reći čak i za sadašnji trenutak u Hrvatskoj tipičnog hidromelioracijskog sustava. U tom radu iznesene ocjene, dileme i moguće alternative su nam se učinile pogodnima da se i šire prezentiraju kao uvod u problematiku za koju će se rješenja morati tražiti u okviru budućeg koncepta vezanog za od Vlade Republike Hrvatske 2004.g. pokrenuti Nacionalni projekt »Navodnjavanje i gospodarenje poljoprivrednim zemljištem i vodama u Republici Hrvatskoj«.

2

PRIPREMA PODLOGA ZA PRIMJENU VIŠEKRITERIJSKE OPTIMIZACIJE U PLANIRANJU HIDROMELIORACIJSKIH SUSTAVA

*Mr.sc. Barbara Karleuša, dipl.ing.građ.
Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci*

1. Uvod — općenito o hidromelioracijskim sustavima	6
2. Potreba za gradnjom hidromelioracijskih sustava	7
3. Koncept planiranja hidromelioracijskih sustava	9
3.1. Tehnička dokumentacija	9
3.2. Primjena sustavne analize u planiranju hidromelioracijskih sustava	9
4. Izbor rješenja u planiranju hidromelioracijskog sustava primjenom višekriterijske optimizacije	13
5. Podloge za primjenu višekriterijske optimizacije u planiranju hidromelioracijskih sustava	14
5.1. Priprema podloga za izradu studijske i projektne dokumentacije	14
5.2.1. Kriteriji kojima se procjenjuje zadovoljenje ciljeva/potreba	
5.2.2. Ekonomski kriterij	
5.2.3. Ekološki kriterij	
5.2.4. Socijalni kriterij	
5.2. Priprema podloga za primjenu višekriterijske optimizacije	15
6. Problemi kod korištenja višekriterijske optimizacije	24
7. Zaključak	25
8. Literatura	26

1. Uvod — općenito o hidromelioracijskim sustavima

Cilj hidromelioracijskih sustava je osigurati potrebnu vlažnost koja odgovara usjevu kroz cijelo vegetacijsko razdoblje. To znači da je potrebno pravovremeno odvoditi višak vode (za vrijeme obilnih kiša) i dovoditi potrebnu vodu koja će nadoknaditi prirodni nedostatak vode (uslijed sušnog razdoblja), s ciljem udovoljenja potrebama biljke za vodom. Prevelike/premale količine vode na poljopri-

vrednim površinama (na površini i u tlu) u odnosu na potrebe biljke rezultat su neravnomjernosti oborina u toku vegetacijskog perioda.

Odvodnja poljoprivrednih površina treba osigurati odvođenje viška vode s površine tla i iz zone korijenja do onih količina koje su potrebne biljki za rast. Višak vode u tlu otežava obradu tla i stvara nepovoljne vodo-zračne odnose u tlu.

Za odvodnju suvišnih voda potrebno je osigurati:

- obranu površina od vanjskih voda (sustav vanjske odvodnje),
- odvodnju unutrašnjih voda (sustav unutrašnje odvodnje).

Odvodnja unutrašnjih voda provodi se osnovnom i detaljnom mrežom (koja može biti površinska, podzemna i kombinirana).

Navodnjavanje poljoprivrednih površina treba osigurati količine vode koje su potrebne biljki za rast, a ne može ih dobiti prirodnim putem (oborine). Provođi se u slučajevima gdje bez njega ne bi mogla niti postojati poljoprivredna proizvodnja (premao oborina) ili u slučajevima gdje postoji poljoprivredna proizvodnja, ali se navodnjavanjem može povećati prihod pojedinih poljoprivrednih usjeva (spasiti žetva u izrazito sušnim godinama). Koristi se pri uvođenju novih usjeva koji se bez navodnjavanja (u prirodnim uvjetima) ne bi mogli uzgajati na promatranoj poljoprivrednoj površini, a koji donose veću korist, time i veću dobit. Sustav za navodnjavanje sastoji se od dovodne mreže i razvodne mreže (mreže za navodnjavanje) uključujući i sve građevine koje su neophodne za rad i upravljanje sustavom.

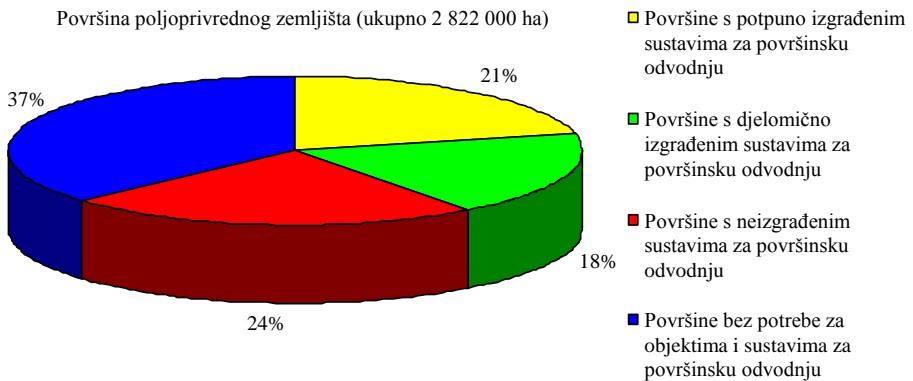
Hidromelioracijski sustavi, odnosno sustavi odvodnje i sustavi navodnjavanja imaju sličnu koncepciju i elemente. Osnovni problem odvodnje je isplanirati kako zadržati vodu prije nego dođe do poljoprivredne površine (retencije) i/ili kamo sakupljenu vodu odvesti da ne ugrožava poljoprivredne površine, dok je kod navodnjavanja najvažnije osmisliti rješenje koje će osigurati potrebne količine vode za navodnjavanje u onim periodima kada nema dovoljno oborina (npr. akumulacije). Sabirna mreža sustava za odvodnjavanje odgovara razdjelnoj mreži sustava za navodnjavanje. Oba sustava najčešće u sklopu rješenja sadržavaju gradnju akumulacija koje zadržavaju vodu da ne bi poplavlivala poljoprivredne površine odnosno “skladištila” vodu za korištenje u sušnim periodima.

Za poboljšanje uvjeta na poljoprivrednim površinama moguće je odabrati gradnju hidromelioracijskog sustava odvodnje, hidromelioracijskog sustava navodnjavanja ili kombinaciju oba navedena sustava što smanjuje rizik kod ulaganja u poljoprivredu.

2. Potreba za gradnjom hidromelioracijskih sustava

Prema podacima Hrvatskih voda [1], od ukupne površine poljoprivrednog zemljišta u Hrvatskoj koja iznosi 2 822 000 ha za 1 032 930 ha nije potrebno graditi sustave za površinsku odvodnju dok je od 1 789 070 ha kojima je potrebna odvodnja, 600 054 ha s potpuno izgrađenim sustavima za odvodnju. Poljoprivredne površine na kojima treba osigurati podzemnu odvodnju iznose 660 820 ha.

Od ukupne površine za poljoprivrednu proizvodnju 620 000 ha ima povoljne prirodne uvjete za navodnjavanje, a samo 13 290 ha izgrađene sustave za navodnjavanje.



Slika 1: Stanje poljoprivrednih zemljišta s aspekta površinske odvodnje [1]

Potreba za gradnjom hidromelioracijskih sustava proizlazi iz koncepta razvoja promatranog područja, a on je definiran u dokumentima prostornog uređenja i vodnogospodarskim osnovama/planovima koji obuhvaćaju promatrano područje.

U navedenim dokumentima ovisno o razini/razrađenosti definirana je potreba za gradnjom hidromelioracijskih sustava i osnovni podaci:

- planirana površina koji se želi koristiti za poljoprivrednu djelatnost,
- planirani usjevi,
- količine vode koju treba odvoditi,
- potrebne količine vode koju treba dovesti (ovisno o usjevu),
- izvori vode za navodnjavanje,
- vrsta hidromelioracijskog sustava (načini odvodnje i/ili navodnjavanja)
- i sl.

Prvi korak pri planiranju izgradnje hidromelioracijskih sustava je uočavanje potrebe za gradnjom takvog sustava ili interes ljudi/zadruge za unapređenje poljoprivredne proizvodnje na površinama koje već obrađuju (pojava problema).

Važan zadatak planera je uočiti na vrijeme probleme i potrebe vezane uz gradnju hidromelioracijskih sustava koji će se javiti u budućnosti tako da se do pojave stvarnog problema već naprave sve pripremne radnje planiranja i na taj način omogućiti što brže rješavanje problema.

Prema Zakonu o vodama [2] upravljanje vodama u Hrvatskoj provodi se na planskim osnovama:

- vodnogospodarska osnova Hrvatske,
- vodnogospodarske osnove i vodnogospodarski planovi slivnih područja.

Na razini države usklađuju se vodnogospodarska osnova Hrvatske, Strategija prostornog uređenja Države, Strategija zaštite okoliša, planske osnove

gospodarenja šumama na državnoj razini i planske osnove sustava unutarnje ploidbe, dok se na nižim razinama usklađuju vodnogospodarske osnove i vodnogospodarski planovi slivnih područja s vodnogospodarskom osnovom Hrvatske te programima zaštite okoliša, dokumentima prostornog uređenja i planskim dokumentima za gospodarenje šumama na slivnim područjima.

Planiranje gradnje većih sustava za hidromelioracijsko navodnjavanje i odvodnju obuhvaćeno je u navedenim dokumentima.

3. Koncept planiranja hidromelioracijskih sustava

3.1. Tehnička dokumentacija

Planiranje svih vodoprivrednih sustava, pa tako i hidromelioracijskih sustava provodi se u sljedećim fazama:

- a) idejna studija ili rješenje,
- b) idejni projekt,
- c) glavni projekt
- d) i kao završna faza – dokumentacija po kojoj se sustav izvodi – izvedbeni projekt.

Na razini idejnih studija ili rješenja neophodno je analizirati sve moguće varijante rješavanja problema odvodnje i/ili navodnjavanja. Među njima treba odabrati jednu koja predstavlja najbolje rješenje. Odabrana varijanta kasnije se detaljnije razrađuje u idejnom i glavnom projektu te gradi na osnovi izvedbenog projekta.

Faza izrade idejnih rješenja u planiranju hidromelioracijskih sustava vrlo je važna jer se u njoj treba razraditi različita rješenja u smislu:

- definiranja površina koje se želi obuhvatiti hidromelioracijskim sustavom,
- definiranja usjeva koji se žele i mogu uzgajati na odabranim površinama,
- koja su varijante rješenja moguće (osmisлити rješenja),
- koje su prednosti i nedostaci svake varijante (ocjena varijanti)
- i sl.

3.2. Primjena sustavne analize u planiranju hidromelioracijskih sustava

Za kvalitetno rješavanje problema u gospodarenju vodama pa tako i u smislu izbora najbolje varijante hidromelioracijskog sustava poželjno je primijeniti postupak sustavne analize.

Sustavna analiza (koju u literaturi možemo naći i pod drugačijim nazivima: sustavni postupak, sustavno inženjerstvo, operacijska istraživanja, operacijska analiza, upravljačke znanosti i sl.) je racionalni postupak donošenja odluka u

odnosu na neki sustav na osnovu sustavne i efikasne organizacije i analize dostupnih informacija [3].

Za rješavanje problema općenito, pa tako i u gospodarenju vodama, može se koristiti sustavni pristup koji se sastoji od sljedećih koraka i prikazan je algoritmom na slici 2. [4, 5]:

1. Uočavanje problema
2. Orijentacija
3. Definicija problema (ciljeva, kriterija, mjera, granica i plana rada)
4. Utvrđivanje stanja problema
5. Proučavanje stanja problema
6. Generiranje varijanata i izbor najpovoljnije varijante
7. Oblikovanje rješenja
8. Provedba rješenja
9. Usavršavanje postupaka rješavanja problema

Uočavanje problema

Problem je potrebno uočiti pravovremeno, prije nego se počnu pojavljivati posljedice uzrokovane njime. Zato je potrebno kontinuirano promatrati društvo i procese u njemu. Za hidromelioracijske sustave to znači planirati poljoprivrednu proizvodnju, rezervirati površine, osmisliti planove odvodnjavanja i navodnjavanja površina na vrijeme. Ako se pojavi potreba za hidromelioracijskim sustavima potrebno je određeno vrijeme da se takvi sustavi isplaniraju, projektiraju i izvedu. Stoga se rješavanje tog problema odlaže za period koji je potreban za provođenje tih radnji.

Pravovremeno uočavanje potreba za gradnjom hidromelioracijskih sustava omogućuje da se prije pojave konkretne potrebe obave sve prethodne radnje u smislu planiranja i projektiranja sustava i tada se može puno brže pristupiti izgradnji i korištenju sustava.

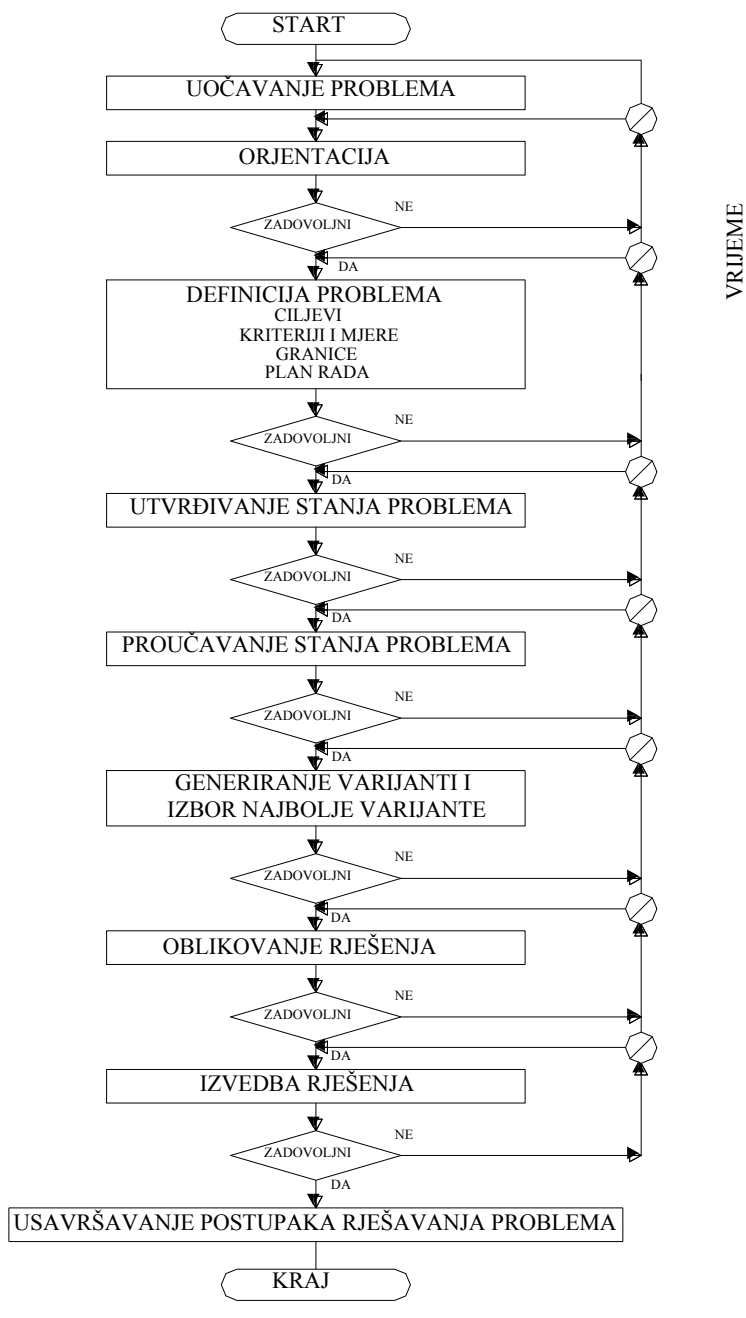
Orijentacija

U ovom koraku analiziraju se znanja koja su potrebna za rješavanje problema (problemska orijentacija) i kojima se raspolaže (osobna orijentacija). Na osnovu tih znanja provodi se bilanca znanja koja najčešće rezultira negativnim rezultatom pa je potrebno proširiti znanje. Stoga je poželjno formirati tim suradnika unutar kojeg se interakcijama među članovima koji posjeduju različita znanja omogućuje svestrano i cjelovito sagledavanje i rješavanje problema. Svakom novom problemu treba pristupiti na novi način jer novost u sagledavanju problema povećava vjerojatnost pronalaska boljeg rješenja.

Za probleme vezane uz hidromelioracijske sustave neophodna je suradnja agronoma, pedologa, hidrologa, građevinara, ekonomista i drugih stručnjaka. Jedino zajedničkim, timskim radom moguće je svestrano i cjelovito analiziranje potreba za gradnjom i oblika rješenja hidromelioracijskog sustava.

Definicija problema

Definicija problema podrazumijeva utvrđivanje ciljeva koji se žele postići gradnjom hidromelioracijskog sustava, definiranje kriterija i mjera na osnovi



Slika 2.: Algoritam koji prikazuje proces rješavanja problema [4,5]

kojih će se ocjenjivati rješenja, određivanje granica promatranja i rješavanja problema i oblikovanje plana rada.

Ciljevi se dijele na osnovne (rješavanje problema) i sporedne (koji se usput ostvaruju i ne moraju biti vezani sa osnovnim).

Osnovni cilj kojeg moraju ispuniti hidromelioracijski sustavi je osiguranje uvjeta koji su potrebni biljkama koje se uzgajaju na poljoprivrednim površinama za koje se sustavi grade da bi se na taj način osigurao veći i “sigurniji” prinos.

Uz osnovne kriterije ostvaruju se i neki sporedni kriteriji — npr. gradnjom sustava za odvodnjavanje poljoprivrednih površina može se povećati sigurnost nekih objekata građenih u promatranom području (koji mogu, ali ne moraju biti vezani uz poljoprivrednu proizvodnju).

Ostvarenje ciljeva treba omogućiti uz prihvatljive troškove, te prihvatljive ekološke i socijalne efekte.

Za ocjenu uspješnosti ostvarenja pojedinih ciljeva koriste se kriteriji ili stajališta, a stupanj ostvarenja pojedinog cilja određuje se mjerama.

Promatranje problema provodi se u granicama koje mogu biti: vremenske, prostorne i granice u znanju.

Pomoću vremenskih granica definira se koliko će se dugo rješavati problem, koliko će se daleko ići u prošlost i u budućnost pri rješavanju problema, prostorne granice definiraju područje koje ćemo promatrati (npr. slivno područje), dok granice u znanju ne bi trebalo ograničavati.

Pri planiranju hidromelioracijskih sustava vremenske granice mogu obuhvaćati analizu podataka iz prošlosti vezano na postojanje podataka kao što su: hidrološki, meteorološki i pedološki podaci koji ovise o provedenim mjerenjima, podaci koji su zabilježeni u pisanim dokumentima koji nisu u uskoj vezi s hidromelioracijskim sustavima, ali su od značaja za njihovo planiranje, usmene predaje informacija od okolnog stanovništva i niz drugih podataka. Vremenske granice vezane uz budućnost trebaju uzeti u obzir projektno razdoblje za koje se sustav gradi kao i smjernice dugogodišnjeg razvoja promatranog područja.

Prostorne granice obuhvaćaju površinu na kojoj se planira graditi hidromelioracijski sustav, ali i šire obuhvaćajući onaj prostor koji utječe na stvaranje velikih voda koje dolaze do poljoprivrednog područja s aspekta odvodnje, odnosno izvore vode i objekte koji su potrebni za osiguranje potrebne količine vode za navodnjavanje tog područja, prostor na kojem se obrađuju (npr. tvornice) kao i prostor/tržište na kojem se plasiraju poljoprivredni proizvodi.

Granice u znanju se pokušavaju proširiti formiranjem multidisciplinarnih timova i međusobnom suradnjom stručnjaka svih područja koja su vezana uz planiranje danog hidromelioracijskog sustava.

Utvrđivanje stanja problema

U ovom koraku ispituje se stvarno stanje problema u prirodi. Prikupljaju se postojeći podaci, provode se snimanja, mjerenja i istraživanja za dobivanje

novih podataka. Podaci su izuzetno važni jer o njima direktno ovisi kvaliteta planiranja i upotrebljivost rezultata. Podaci trebaju biti prihvatljivi, kvalitetni, pouzdani i svi jednako dobri [3].

Proučavanje stanja problema

U ovom koraku obrađuju se svi dostupni podaci i dovode u formu koja omogućuje njihovo korištenje i promatra problem. Problem se sagledava iz cjeline. Zatim se cjelina analizira po dijelovima. Dijelovi cjeline se klasificiraju i proučavaju se njihovi međusobni odnosi. Kada se dobro upoznaju dijelovi cjeline vrši se sinteza svih dijelova i promatra se problem opet u cjelini iz šire perspektive sa znanjem o pojedinim dijelovima.

Generiranje varijanata i odabir najbolje varijante

U ovoj fazi oblikuju se varijantna rješenja. Uz pomoć kriterija i mjera ocjenjuju se zadovoljenja pojedinih ciljeva. S obzirom da se kod rješavanja problema u vodoprivrednim sustavima teži ostvarenju više ciljeva istovremeno potrebno je odabrati takvo rješenje koje će maksimalno zadovoljiti sve ciljeve.

Generiranje varijanata je aktivnost koja traži široko znanje i naobrazbu [3]. Postupak generiranja varijanata može provesti pojedinac, ali se najčešće zbog složenosti problema formiraju timovi odnosno grupe stručnjaka (u skladu sa iskustvom i znanjem) ili se mogu koristiti odgovarajući modeli. Odabir najbolje varijante također je moguće provesti na osnovu znanja i iskustva stručnjaka, uz eventualna jednostavna proračunavanja, te vrednovanje i rangiranje varijanata u odnosu na kriterije, ili se odabir može provesti uz pomoć različitih modela za potporu u odlučivanju.

U novije vrijeme razvijeno je područje donošenja odluka (decision making) u kojem donosioci odluka (decision makers) donose odluku koje će se varijantno rješenje odabrati kao najbolje. S obzirom da su donosioci odluka osobe ili institucije koje najčešće ne posjeduju tehnička znanja vezana uz rješavanje problema pomoć u donošenju odluka pružaju stručnjaci za određena područja.

U nizu postupaka koji mogu poslužiti kao pomoćni aparat u procesu donošenju odluka nalazi se višekriterijska optimizacija. U ovom radu težište je dano na analizu pripreme podloga za primjenu višekriterijske optimalizacije u svrhu izbora najbolje varijante.

Oblikovanje rješenja

Nakon izbora optimalne varijante izrađuje se glavni projekt i nakon procesa dobivanja svih neophodnih dozvola izvedbeni projekt.

Izvedba rješenja

Prema izvedbenom projektu pristupa se izgradnji hidromelioracijskog sustava. Ako su svi koraci algoritma dobro i kvalitetno provedeni tada je ovaj korak zadnji koji može utjecati na kvalitetu rješenja, koja u tom slučaju ovisi o kvaliteti izvedenih radova. Međutim ukoliko je neki korak u provođenju cjelokupnog algoritma do ovog koraka, loše proveden te izabrano i projektirano

rješenje nije dobro niti najkvalitetnije izvedeni radovi neće moći ispraviti načinjene pogreške. S obzirom na odnos troškova planiranja i troškova izgradnje (trošak planiranja je vrlo mali u odnosu na cijenu izgradnje sustava) vrlo je važno da se planiranje i projektiranje izvede kvalitetno pa čak uz ponavljanje nekih koraka u ovom algoritmu za koje se sumnja da nisu u cijelosti ili nisu dovoljno dobro provedeni. Ispravljanje pogrešaka na već izvedenom hidromelioracijskom sustavu (pod uvjetom da je to uopće moguće) može zahtijevati vrlo velika ekonomska ulaganja koja se može kvalitetnim planiranjem izbjeći.

Usavršavanje postupaka rješavanja problema

Ovoj fazi nije svrha poboljšati rješavanje ovoga problema, ali se znanja stečena pri njegovu rješavanju mogu koristiti za unaprjeđenje postupaka rješavanja drugih problema u budućnosti.

Nakon svakog koraka u rješavanju problema potrebno je donijeti zaključak da li je rješavanje problema do tog trenutka zadovoljavajuće. Ako je odgovor pozitivan prelazi se na idući korak, u suprotnom vraća se na neki od prethodnih koraka. Moguć je povratak i na sam početak algoritma ili na neki od koraka u kojem se smatra da je nešto propušteno ili loše određeno.

4. Izbor rješenja u planiranju hidromelioracijskog sustava primjenom višekriterijske optimizacije

Kada se javi potreba za gradnjom hidromelioracijskog sustava bilo od strane države ili zainteresiranih pojedinaca i zadruga potrebno je naći rješenje za taj problem i tada se razrađuju različita rješenja problema — varijante. Ukoliko se provodi pravovremeno planiranje dio posla može već unaprijed biti obavljen (prvi korak u algoritmu rješavanja problema slika 2.)

Rješenje problema je osnovni cilj gradnje sustava, međutim najčešće postoji više načina/varijanti da se neki problem riješi. Svaka varijanta rješenja ima svoje prednosti i nedostatke.

U prošlosti se izbor rješenja svodio na analizu troškova i koristi (cost-benefit metoda) i izabiralo se ono rješenje koje je bolje s aspekta ostvarenja dobiti. Danas se provodi integralno gospodarenje vodama koje obuhvaća cjelovito i svestrano sagledavanje problema i njegovih rješenja. Stoga nije dovoljno izabrati rješenje samo na osnovi ekonomske dobiti nego se moraju analizirati i širi utjecaji rješenja na okolinu u kojoj se gradi sustav uključujući socijalni aspekt — utjecaj na ljude (pojedince i zajednicu) i ekološki aspekt — utjecaj rješenja na užu i širu okolinu u koju zadire rješenje, a koje nije moguće vrednovati samo analizom troškova i koristi [6].

Uz osnovni cilj rješenja često ispunjavaju i različite sporedne ciljeve, stupanj zadovoljenja tih ciljeva također se treba uzeti u obzir pri ocjenjivanju rješenja.

Rezultat analize rješenja daje niz kriterija na osnovi kojih treba ocijeniti rješenja. Te ocjene mogu biti iskazane kvantitativno (u novcu, povećanom

prinosu u kg , dotoku vode m^3/s , veličini poljoprivredne površine ha itd.) i kvalitativno (ocjenama po različitim skalama npr. jako dobro, dobro, loše, vrlo loše ili 1, 2, 3...).

Kriteriji koji se mogu koristiti za ocjenjivanje hidromelioracijskih sustava i način njihovog definiranja opisani su detaljnije u točki 5.2.

Velik broj kriterija koji često imaju različitu težinu/važnost zahtjeva odgovarajući matematički aparat koji bi mogao istovremeno voditi računa o svim kriterijima. Za ovakve probleme postoji niz metoda višekriterijske optimizacije koji su opisani detaljno u radu [7].

U radu [5] autor je prikazao korištenje tri različita postupka višekriterijske optimizacije na primjeru planiranja sustava za navodnjavanje:

ELECTRE metoda (ELimination and (Et) Choice Translating REality)

PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations)

AHP (Analitic Hierarchy Process)

U okviru ovoga rada bit će prodiskutirane podloge kao bitan element provedbe optimizacijskih postupaka.

5. Podloge za primjenu višekriterijske optimizacije u planiranju hidromelioracijskih sustava

5.1. Priprema podloga za izradu studijske i projektne dokumentacije

Osnovne podloge koje su potrebne za osmišljavanje rješenja hidromelioracijskih sustava su [8]:

- meteorološke i hidrološke podloge,
- pedološke podloge,
- geodetske podloge,
- određivanje potrebe primjene navodnjavanja/odvodnjavanja,
- provedba terenskih i laboratorijskih istraživanja,
- razrada elemenata doziranja vode (navodnjavanje),
- razrada elemenata odvodnje vode,
- definiranje izvorišta vode uz provjeru njezine količine i kakvoće za navodnjavanje,
- izbor metode, načina i sustava navodnjavanja/odvodnjavanja,
- obrada ostalih elemenata potrebnih za izradu projekta hidromelioracijskog sustava.

Sve podatke treba prikazati na odgovarajućim topografskim i geodetskim podlogama (topografski planovi i karte) čije mjerilo ovisi o razini tehničke dokumentacije i veličini područja na kojem se planira gradnja

hidromelioracijskog sustava. Danas praktičan pregled podataka nije više moguće zamisliti bez primjene GIS tehnologije koja povezuje karte i podatke.

5.2. Priprema podloga za primjenu višekriterijske optimizacije

U procesu rješavanja problema na razini idejne studije potrebno je uspostaviti vrijednosni sustav koji se sastoji od kriterija i mjerila na osnovu kojih se provodi vrednovanje/ocjena rješenja i bira najpovoljnije rješenje.

Kriterij je stajalište sa kojeg vrednujemo rješenja korištenjem mjerila kojima se kvantificira zadovoljenje kriterija.

Kriterije i mjerila možemo koristiti za ocjenu izbora rješenja kao i za ocjenu postojećih hidromelioracijskih sustava u smislu ocjene njihove uspješnosti.

Kod generiranja varijantnih rješenja sva rješenja trebaju se analizirati s aspekta funkcionalnosti, tehničko-tehnološke izvedivosti, ograničenja (ekološka i socijalna) i prihvatljivih ekonomskih troškova. One varijante koje zadovoljavaju po svim aspektima ulaze u uži krug potencijalnih varijanata iz kojeg se, raznim postupcima među kojima i višekriterijskom optimizacijom, odabire jedna varijanta koja predstavlja najbolje rješenje, dok se ostale varijante koja ne zadovoljavaju eliminiraju.

Generirane varijante moraju ostvariti ciljeve za koje su planirane. Pitanje je u kolikoj ih mjeri zadovoljavaju pojedine varijante stoga se uvode kriteriji kojima se procjenjuje zadovoljenje tih ciljeva.

Uz kriterije kojima se procjenjuje zadovoljenje osnovnih (u smislu osiguranja potrebnih količina vode odnosno odvodnje viška vode) i sporednih ciljeva, rješenja u području hidromelioracijskih sustava mogu se sagledavati sa još tri stajališta, odnosno kriterija:

- ekonomski kriterij,
- socijalni kriterij,
- kriterij utjecaja na životnu cjelinu (ekološki kriterij).

Svaki od navedenih kriterija može se podijeliti na manje složene kriterije, što omogućuje jednostavnije vrednovanje rješenja. Takvoj analizi kriterija treba pristupati oprezno da se ne izgubi cjelovitost u rješavanju problema. Do unazad 40-tak godina postojala je tendencija da se u procesu odlučivanja apsolutnu prednost daje ekonomskom kriteriju (odabiru najekonomičnije varijante rješenja). Takva su rješenja u većini slučajeva imala negativne socijalne i ekološke utjecaje. Porastom svjesnosti o »pravoj« vrijednosti vode kao resursa koji je izložen sve većem opadanju kvalitete i kvantiteta te o korištenju resursa u skladu s održivim razvojem, socijalni i ekološki kriteriji dobivaju sve značajniju ulogu u procesu odlučivanja [6]. Danas se za odabir najboljeg rješenja (uz kriterije koji proizlaze iz osnovnih ciljeva) koriste svi navedeni kriteriji.

Postoje dva, najčešće korištena, pristupa izboru najboljeg rješenja kod kojih se vodi računa o svim kriterijima. Prvi podrazumijeva ostvarenje osnovnih ciljeva i vrednovanje rješenja po ekonomskom kriteriju uz izrade studija socijalnih utjecaja i utjecaja na životnu sredinu. U studijama se određuju povoljni i nepovoljni utjecaji pojedinih varijanti na stanovništvo i životnu sredinu te se na osnovu njih varijanta prihvaća odnosno odbacuje. Drugi pristup podrazumijeva korištenje raznih postupaka donošenja odluke za izbor najpovoljnijeg rješenja među

kojima i višekriterijske optimizacije. Korištenjem postupaka višekriterijske optimizacije izbor optimalnog rješenja provodi se vodeći računa o svim kriterijima.

5.2.1. Kriteriji kojima se procjenjuje zadovoljenje ciljeva/potreba

Svi vodoprivredni objekti grade se u svrhu zadovoljenja ljudskih potreba.

Te potrebe predstavljaju osnovne ciljeve koje moraju ostvariti vodoprivredni objekti, a to su:

- opskrba vodom naselja i industrije,
- kontrola zagađenja voda,
- navodnjavanje,
- ribarstvo,
- zaštita biljnog i životinjskog svijeta,
- rekreacija,
- kontrola velikih voda,
- odvodnja,
- plovidba,
- hidroenergija.

Stoga rješenja problema-varijante, treba promatrati sa stajališta zadovoljenja ciljeva/potreba vezanih uz vodu odnosno kriterija kojima se procjenjuje zadovoljenje tih potreba. Generirane varijante moraju ostvariti ciljeve vezane uz vodu za koje su planirane kao i neke sporedne ciljeve, ali treba odrediti i u kojoj ih mjeri pojedine varijante ostvaruju.

Zadovoljenje tih ciljeva može se vrednovati u novcu ili u nekoj drugoj jedinici pa se tako varijante mogu ocjenjivati npr. po poljoprivrednoj površini obuhvaćaju, količini vode koju pojedina varijanata osigurava, stupnju zaštite poljoprivrednih površina, volumenu velikih voda koji pojedina varijanta može zadržati u svojim retencijama i akumulacijama i sl.

5.2.2. Ekonomski kriterij

Izbor najbolje varijante planiranja i projektiranja vodoprivrednih sustava, bio je do nedavno isključivo pod dominacijom ekonomskog kriterija. Bilo je najvažnije da je odabrano rješenje najekonomičnije.

Koristi od vodoprivrednih sustava općenito pa tako i hidromelioracijskih sustava (korist od prodaje vode, poljoprivrednih proizvoda i dr.) kao i troškovi gradnje vodoprivrednih, u ovom slučaju hidromelioracijskih, sustava nisu iste u uvjetima trenutne dostupnosti količina i dostupnosti u bližoj ili daljnjoj budućnosti pa se tada za dobivanje današnjih vrijednosti troškova i koristi odnosno dobiti može koristiti princip diskontiranja [9]. Diskontiranje pretpostavlja korištenje težinskih koeficijenata koji povećavaju ili smanjuju troškove i koristi ovisno o tome da li te vrijednosti treba svesti iz prošlosti ili iz budućnosti na današnju vrijednost.

Za dobivanje *sadašnje vrijednosti troškova* gradnje nekog vodoprivrednog sustava u prošlosti T_{sv} koristi se izraz:

$$T_{SV} = \sum_{i=0}^n T_i (1 + p)^i \quad (1)$$

gdje je: T_i trošak u godini i ($i = 0, \dots, n$)
 p diskontna stopa.

Za dobivanje *sadašnje vrijednosti neto dobiti* D_{sv} koja će se ostvariti u budućnosti koristi se izraz:

$$D_{SV} = \sum_{i=0}^n \frac{(K_i - T_i)}{(1 + p)^i} \quad (2)$$

gdje je: K_i korist
 T_i trošak u godini i ($i = 0, \dots, n$)
 p diskontna stopa.

Varijante se mogu uspoređivati i rangirati na osnovu *neto dobiti* prema izrazu (2), ali ih je korisno uspoređivati i po stopama povratka uloženi sredstava sa ciljem da se izaberu najproduktivnije varijante. U tom slučaju koriste se dva indeksa: *rentabilnost* i *interna kamatna stopa*. *Rentabilnost* predstavlja omjer koristi i troškova, K/T , dok je *interna kamatna stopa* kamata za koju neto dobit iznosi 0, odnosno rentabilnost iznosi 1.

Diskontna stopa trebala bi se određivati na razini države od strane državnih i finansijskih institucija (Ministarstvo financija) i u većini zemalja se kreće od 6 do 8% godišnje.

Usporedba varijanta može se provesti i prema planiranoj *jediničnoj cijeni vode* koja proizlazi iz uloženi sredstava potrebnih za gradnju hidromelioracijskog sustava.

Ekonomske studije podrazumijevaju sljedeće korake:

- određivanje područja koje obuhvaća projekt,
- procjena fizičkih količina proizvoda koji ulaze i izlaze iz projekta, za svaku godinu u planskom periodu,
- množenje tih količina sa cijenama,
- sumiranje diskontiranih vrijednosti koristi i troškova,
- izračunavanje ekonomskih pokazatelja vezanih za projekt: neto dobit, rentabilnost ili interna kamatna stopa.

Većina projekata sastoji se od niza podprojekata koji se vremenom postupno izgrađuju. Ti podprojekti predstavljaju faze građenja. Kroz faze postupno se zadovoljavaju potrebe koje treba ostvariti projekt. Na taj način dobiti koje slijede iz korištenja već izgrađenih faza mogu se koristiti za ulaganje u sljedeće faze gradnje.

Za navedena razmatranja pretpostavlja se da su potrebe u budućnosti poznate, što je vrlo rijetko slučaj. Neizvjesnost u pogledu potreba za vodom obično je glavni uzrok neizvjesnosti u ocjenjivanju projekta.

Zato je poželjno uzeti u obzir faktore rizika.

Vrednovanje dobiti ovisi o namjeni projekta (navodnjavanje ili odvodnja).

Navodnjavanje

Kao što je već rečeno u uvodu, navodnjavanje se provodi u slučajevima:

- gdje bez njega ne bi mogla niti postojati poljoprivredna proizvodnja (premalo oborina)
- gdje postoji poljoprivredna proizvodnja, ali se navodnjavanjem može povećati prihod pojedinih poljoprivrednih usjeva (spasiti žetva u izrazito sušnim godinama) kao i uvesti nove usjeve koji se bez navodnjavanja (u prirodnim uvjetima) ne bi mogli uzgajati na promatranoj poljoprivrednoj površini, a koji donose veću korist.

Cijena vode za navodnjavanje trebala bi obuhvatiti kompenzaciju troškova za osiguranje te vode. Sastoji se iz sljedećih troškova:

- pogonski troškovi i troškovi održavanja sustava za navodnjavanje,
- troškovi otplate investicije.

Za vrednovanje dobiti od navodnjavanja potrebno je provesti ekonomsku analizu za dva slučaja »bez projekta« i »s projektom«. Što znači provesti ekonomsku analizu koristi i troškova na poljoprivrednim površinama bez navodnjavanja, a zatim ponovnu analizu sa navodnjavanjem.

Jasno da u prvom slučaju gdje nema dovoljno oborina za postojanje poljoprivredne proizvodnje ekonomska analiza za slučaj »bez projekta« nema smisla pa se analizira samo isplativost poljoprivredne proizvodnje uz korištenje navodnjavanja, znači samo analiza koristi i troškova za slučaj »s projektom«.

Na temelju provedenih analiza jasno se može vidjeti koliko navodnjavanje povećava ili ne povećava neto dobit od proizvodnje na poljoprivrednim površinama koje se žele navodnjavati. Koristi se ne izračunavaju preko cijene vode nego preko cijene poljoprivrednih proizvoda odnosno povećane dobiti od proizvodnje u slučaju navodnjavanja.

Odvodnjavanje

Zaštitom branjenih područja od poplava nastaju sljedeće posljedice:

- štete poljoprivrednih djelatnosti na ranije plavljenim područjima se smanjuju,
- na tom području se mogu uzgajati novi usjevi (koji su osjetljiviji na veće količine vode),
- zbog prve dvije posljedice slijedi porast cijene zemlje u zaštićenom području.

Postoje dva pristupa kod određivanja dobiti od provedene zaštite od poplava.

Prvim pristupom izravno se ocjenjuju dobiti od smanjenja šteta i porast proizvodnje u smislu povećanja prinosa od postojećih vrsta usjeva kao i korist od uzgoja novih usjeva koji nisu mogli rasti u prethodnim uvjetima (bez odvodnje). Znači provodi se ekonomska analiza za slučaj »bez projekta« i nakon toga »s projektom«.

Ako se mijenja usjev tada treba uzeti u obzir samo razliku u koristi između postojećeg usjeva i novog usjeva. Vjerojatnost šteta od poplava na branjenim

područjima uglavnom je vrlo mala, ali ipak nije jednaka nuli. Znači da je moguća pojava rijetkih poplava pa se štete koje nastaju takvim rijetkim plavljenjima moraju izračunati i odbiti od dobiti projekta. Razvoj novih djelatnosti u branjenim područjima osiguravat će proizvodnju novih proizvoda pa će korist od tih proizvoda trebati pribrojiti koristi od projekta, a troškove proizvodnje dodati troškovima projekta, kao što će se koristi od proizvoda odnosno troškovi proizvodnje postojećih djelatnosti odbiti od koristi odnosno troškova projekta. Osiguranje nekog područja od poplave može ulagačima dati osjećaj sigurnosti prema kojem će oni uložiti u djelatnosti na branjenom području značajniji kapital nego što bi da područje nije branjeno, stoga da će štete uslijed pojave rijetkih, ali uvijek mogućih plavljenja, biti veće nego prije branjenja tog područja. Iz navedenog slijedi da očekivani gubici »s projektom« mogu biti veći od očekivanih gubitaka »bez projekta«. Poplava u situaciji »s projektom«, iako je njena vjerojatnost pojave manja, može rezultirati dramatičnijim posljedicama i većim štetama od poplave u situaciji »bez projekta«.

Drugi pristup kod određivanja dobiti od provedene zaštite od poplava svodi se na određivanje koristi od povećanja cijene zemlje (terena) branjenog područja. Takav pristup traži suradnju stručnjaka ekonometriste. Rizik od poplava je karakteristika zemljišta, kao što su plodnost zemljišta ili udaljenost zemljišta od glavnog puta. Kupnjom zemljišta nasljeđuje se i rizik od poplava kao i poljoprivredni potencijal. Promjenom stupnja rizičnosti mijenja se i vrijednost zemljišta. Promjena cijena zemljišta ovisit će o tržištu i tržišnoj politici zemlje. Ovakav pristup može se koristiti u zemljama koje imaju relativno otvoreno tržište. Problematika ovog pristupa vezana je na to da cijene zemljišta predstavljaju isključivo mišljenje posrednika koji trguju zemljom, koje se ponekad nakon određenog vremena može pokazati kao neosnovano. Uz to mora biti moguće odrediti razliku u cijeni između dvije parcele koje su identične, osim što se razlikuju po stupnju rizičnosti od poplave.

Ocjena hidromelioracijskih sustava sa ekonomskog stajališta detaljnije je obrađena u [10].

5.2.3. Ekološki kriterij

Degradacija životne sredine, koja se očituje u zagađivanju vode, zraka i radioaktivnom zagađivanju, neposredno utječe na ljudsko zdravlje, zdravlje kopnenih i vodenih životinja i biljaka, što je jedan od najvažnijih razloga težnji da se održi što viša kvaliteta životne sredine [9]. Hidrotehnička rješenja općenito pa stoga i rješenja za hidrotehničke melioracije mogu u životnoj sredini nekog područja izazvati pozitivne i negativne promjene (osim ako se smatra da su sve promjene loše), od kojih neke mogu biti i nepovratne. Važno je, ukoliko se neko rješenje usvoji, negativne utjecaje rješenja ublažiti, a pozitivne uvećati. Ponekad su negativni utjecaji toliko veliki da mogu uzrokovati odbacivanje nekih varijanti projekta. Utjecaj projekata na životnu sredinu treba se analizirati i s estetskog aspekta.

Promjene u životnoj sredini nastaju iz određenih izvora, prenose se medijem životne sredine i utječu na prijemnike (životinjske, biljne i ljudske vrste). Životnu sredinu čine komponente i kategorije prema tablici 1.

Kod vrednovanja rješenja treba analizirati utjecaj rješenja na elemente životne sredine navedene u tablici 2.

Tablica 1: *Komponente i kategorije životne sredine [9]*

Komponente	Kategorije vrednovanja i ocjene
Područja prirodnih ljepota i ljudskog odmora i uživanja	Otvoreni prostor i zeleni pojas Riječni tokovi i sustavi Jezera i akumulacije, obale i plaže Planinska, divlja, primitivna i prirodna sredina Ušća i plavna područja Druga područja prirodnih ljepota
Arheološka, povijesna i kulturna područja	Arheološki resursi Povijesni resursi Kulturni resursi
Biološka, geološka i ekološka komponenta	Biološki resursi (flora i fauna) Geološki resursi Ekološki resursi
Kvaliteta	Kvaliteta vode Kvaliteta zraka Kvaliteta zemljišta Estetska kvaliteta
Promatranja koja se odnose na sve grupe komponenata	Razmatranja jedinstvenosti resursa Razmatranja nepovratnih promjena

Tablica 2: *Parametri koje treba uključiti u ocjenu različitih varijanata projekta [9]*

Komponente	Kategorije vrednovanja i ocjene
1. Kvaliteta vode	Otopljeni kisik, biokemijski zahtjev za kisikom, ukupni organski ugljik, biomasa, fosfati, nitrati, salinitet, specifični загаđivači, temperatura, pH, bakterije, virusi i paraziti
2. Količina vode	Protok-vodostaj, sezonske varijacije, plavljenje
3. Rekreacija	Čista voda, turbulentnost, boja, miris, pojave na površini vode (otpaci, uljne mrlje) i parametri kvalitete vode
4. Kvaliteta zemljišta	Erozija zemljišta, zaštita plaža, odstranjivanje čvrstih otpadaka, ogoljena neuređena zemlja, kiselost tla
5. Kvaliteta zraka	Sumporni oksidi, dušični oksidi, drugi загаđivači, čestice, ugljik monoksid
6. Vodeni ekosustavi	Uzgoj, migracije, održavanje prirodnog i genetskog naslijeđa (pogotovo za rijetke vrste)
7. Ekosustavi na zemlji	Uzgoj, migracije, održavanje prirodnog i genetskog naslijeđa (pogotovo za rijetke vrste), vegetacija i vegetacijski sustavi
8. Nepoželjne i/ili nepovratne promjene	Zaslanjivanje, trovanje, eutrofikacija.
9. Izloženost prirodnim nesrećama	Potresi, poplavni valovi, uragani, geološke anomalije
10. Estetski parametri	Gubitak specifičnog i rijetkog prizora, povijesnih, kulturnih i arheoloških lokacija

11. Mikroklima	Smanjivanje mraza/leda, pojava magle, smanjivanje temperaturnih razlika
12. Buka	Aktivnost izgradnje, industrija, elektrane, saobraćaj

Za svaki hidrotehnički sustav potrebno je naći odgovore na sljedeća pitanja:

- Koje se karakteristike životne sredine mijenjaju projektom, i koje će od njih biti pozitivne, a koje negativne?
- Koje se nepovratne promjene mogu pojaviti (istrebljenje neke životinjske ili biljne vrste ili uništavanje jedinstvenih oblika prirodne ljepote)?
- Koji se koraci mogu ekonomično poduzeti za ublažavanje negativnih utjecaja na životnu sredinu?
- Kakva je priroda opće strategije gospodarenja vodama koje bi se trebalo držati u ocjeni projekta prema kriteriju zaštite životne sredine?

Neki ekološki utjecaji na životnu sredinu mogu se mjeriti kvantitativno u određenim fizičkim i ekološkim jedinicama, dok se za one utjecaje za koje nije moguće provesti takva mjerenja koriste kvalitativni (opisni) načini. Neke kvalitete životne sredine mogu biti zavisne od drugih pokazatelja pa mogu zahtijevati zajedničko vrednovanje.

Vrednovanje promjena u životnoj sredini novčanim jedinicama je relativno težak i pitanje uopće koliko izvediv zadatak. Svakako je lakše takvo vrednovanje zamijeniti opisnim vrednovanjem. Opisne ocjene su povoljne za korištenje postupaka višekriterijske optimalizacije.

Da bi se vrednovanje varijantnih rješenja provelo uspješno važno je u njega uključiti javnost.

Opisi životne sredine trebaju se pripremiti za situacije “s projektom” i “bez projekta”. Sve promjene u životnoj sredini vrednuju se i na osnovi toga se bira optimalno rješenje. Postoji nekoliko kriterija prema kojima treba vrednovati promjene u životnoj sredini:

- fizički kriterij, koji definira kritične vrijednosti određenih varijabli životne sredine, iznad/ispod kojih dolazi do problema (kiselost vode, količina nitrata u vodi...),
- kriterij strukture života, koji uključuje (ne)postojanje mješovitih vodenih i kopnenih oblika života, koji ovise o kvaliteti vode,
- standardi životne sredine, koji su u većini zemalja propisani i njihovo je praćenje obavezno, a varijante moraju zadovoljavati te standarde,
- koncept ravnoteže životne sredine u regiji, koji je vezan je na jedinstvenost resursa koji su pogođeni projektom.

Utjecaj vodoprivrednih (pa tako i hidromelioracijskih) sustava na okoliš u fazi planiranja nije moguće odrediti direktno nego se u tu svrhu koriste različiti simulacijski i optimizacijski modeli: hidrološki, hidraulički, modeli kvalitete voda, ekološki modeli i dr.

5.2.4. Socijalni kriterij

Sve vodoprivredne sustave i objekte (stoga i hidromelioracijske sustave) treba promatrati i sa socijalnog stanovišta vrednujući utjecaj rješenja na ljudski

život i zdravlje. Tradicionalni pristup vodoprivrednom planiranju pretpostavljao je da će se društvo prilagoditi projektu nakon nekog vremena, a sociološka ispitivanja koristila su se za rješavanje problema koji “eventualno” nastanu nakon izgradnje objekta. To je bilo nekorektno i loše, jer socijalna razmatranja trebaju biti dio planiranja i izvođenja objekta, tako da se problemi koji bi se mogli javiti nakon izgradnje unaprijed prepoznaju kako bi se mogli ublažiti i na vrijeme riješiti [6,9,11].

Da bi se broj problema sveo na minimum potrebno je u proces planiranja uključiti javnost. Problemi koji se javljaju uz velike hidrotehničke zahvate koji najčešće uključuju gradnju brana za akumulacije i retencije, često su: problem raseljavanja stanovništva, koji nosi sa sobom niz psihičkih problema kod stanovnika i praktičnih problema kao što su gdje smjestiti te ljude, kako organizirati nove stambene prostore, nova radna mjesta, problemi zdravlja uzrokovani promjenom mikroklima itd.

Vrednovanje hidrotehničkih rješenja sa socijalnog stanovišta može se razdijeliti na manje jedinice odnosno podkriterije:

- dobrobit pojedinca (kvaliteta života, odnosno zadovoljenje njegovih bioloških i izvedenih potreba),
- dobrobit društva (standard stanovništva, sposobnost različitih podsustava i institucija da zadovolje osnovne ljudske potrebe, društveni sustav kao cjelina).

Sa socijalnog stajališta, u odnosu na zadovoljenje potreba, promatramo dva tipa socijalnih utjecaja odluka: povoljne i nepovoljne utjecaje. Neko rješenje možemo ocijeniti na individualnoj razini, razini grupe i na razini društva.

Socijalna ocjena na individualnoj razini podrazumijeva dobrobit pojedinca (njegove obitelji), odnosno kvalitetu života. To je teško izmjeriti u konkretnim jedinicama. Obično se kao jedinica koristi pojedinac i/ili obitelj, a utjecaj rješenja se ocjenjuje kao povoljan ili nepovoljan za dobrobit pojedinca i/ili obitelji.

Socijalna ocjena na razini grupe, koju još nazivamo kvalitetom razine života, za razliku od kvalitete života, promatra utjecaj rješenja na cjelokupno stanovništvo određenog područja i to broj povoljnih i nepovoljnih socijalnih utjecaja i njihovu raspodjelu na stanovništvo koje promatramo. Jedan od načina vrednovanja danog kriterija je slijedeći: odredi se raspon razina zadovoljenja osnovnih potreba po kategorijama (ishrana, zdravlje, odijevanje, stanovanje, obrazovanje, dohodak, itd.), zatim se svaka kategorija podijeli na određeni broj podraspona (npr. kategorija ishrane se dijeli na različite grupe koje dobivaju različite količine i kvalitetu hrane) i određuje je postotak stanovništva po svakom od raspona.

Socijalna ocjena na razini društva obuhvaća razinu podsustava i institucija i razinu društvenog sustava kao cjeline. Na razini podsustava i institucija ocjenjuje se kako će rješenje utjecati na njihovo funkcioniranje. Postoji više podsustava: demografski, obrazovanje, državne službe i usluge, stanovanje, zakonodavstvo, socijalne usluge, religija, rekreacija, zaposlenost, dohodak, komunikacije, transport, itd. Na razini društvenog sustava kao cjeline ocjenjuje se utjecaj rješenja na društveni sustav kao cjelinu. Ocjenjuje se kako će analizirano rješenje utjecati na rast i razvoj društvenog sustava te na ostale potrebe tog društvenog sustava: samosvijest (sposobnost postavljanja i postizanja

određenih ciljeva), sudjelovanje stanovništva u odlučivanju, stabilnost (količina otpora promjenama), legitimnost (osiguranje lojalnosti i motiviranosti) i kompetentnost (sposobnost efikasnosti).

Navedene ocjene mogu se prikazati strukturom prema tablici 3.

Tablica 3: *Procjena varijante sa socijalnog aspekta [9]*

Dobrobit pojedinca	Dobrobit društva	
Razina pojedinca i obitelji	Razina podsustava i institucija	Razina društvenog sustava
1. Ishrana	1. Demografske karakteristike	1. Razvoj i rast sustava
2. Zdravlje	2. Obrazovanje	2. Svijest o sustavu
3. Odjeća i stanovanje	3. Državno upravljanje i usluge	3. Sudjelovanje u odlučivanju
4. Sigurnost	4. Stanovanje	4. Stabilnost
5. Socijalno-ekonomski status	5. Zakon i pravda	5. Legitimnost
6. Obrazovanje	6. Društvene/socijalne usluge	6. Kompetencije
7. Dohodak	7. Religija	
8. Zaposlenost	8. Kultura	
9. Sklonosti i interakcije	9. Rekreacija	
10. Komunikacija i transport	10. Neformalne grupe	
11. Osobno zadovoljstvo	11. Zaposlenost	
	12. Stvaran dohodak	
	13. Socijalno osiguranje i novčane naknade	
	14. Komunikacije	
	15. Transport / saobraćaj	
	16. Ekonomska podloga	

5.2.5. Formiranje tablice za primjenu višekriterijske optimizacije

Nakon analize varijanata po izabranim kriterijima može se formirati tablica u kojoj su navedene sve varijante i ocjene varijanata po svim odabranim kriterijima kao što je prikazano u tablici 4. Kriteriji se mogu podijeliti na podkriterije što olakšava vrednovanje varijanata ukoliko je riječ o složenim kriterijima koji se mogu vrednovati s više aspekata. Npr. kod ekološkog kriterija može se posebno vrednovati utjecaj rješenja na kvalitetu vodnih resursa, na biljni ili životinjski svijet, ili pak na kvalitetu zraka, stoga se svaki utjecaj može vrednovati preko zasebnog podkriterija.

Uz tablicu u kojoj su vrednovane varijante po svim kriterijima (tablica 4.) potrebno je formirati i tablicu težina kriterija (tablica 5.). Težina kriterija predstavlja važnost pojedinog kriterija.

Kod formiranja tablice težine kriterija (tablica 5.) treba pomno analizirati koje su težine pojedinih kriterija jer ovisno o težini kriterija ovisi utjecaj tog kriterija na konačan izbor optimalne varijante.

Kod određivanja težine kriterija postoji više načina:

— težine kriterija mogu se opisati ocjenama u odabranom rasponu, npr. može se ocijeniti težina kriterija skalom ocjena od 1 do 5, gdje 1 može predstavljati najmanju važnost kriterija, a 5 najveću važnost kriterija,

— ili se može uvesti relativan odnos tako da najmanje značajan kriterij ima težinu 1, a u odnosu na njega drugi kriteriji mogu imati istu težinu što znači da su jednako važni ili im težina može biti udvostručena i iznositi 2 što znači da je taj kriterij dva puta važniji od najmanje značajnog, te se postupak može nastavljati preko utrostručivanja težine kriterija itd., — i dr.

Tablica 4: *Oblik tablice kojom se prikazuje rezultat vrednovanja varijanata po izabranim kriterijima*

Varijanta	KRITERIJ											
	Kriterij ocjene zadovoljenja cilja			Ekonomski kriterij			Ekološki kriterij			Socijalni kriterij		
	C1	C2	...	E1	E2	...	O1	O2	...	S1	S2	...
	jed. mjere	jed. mjere	jed. mjere	jed. mjere	jed. mjere	jed. mjere	jed. mjere	jed. mjere	jed. mjere	jed. mjere	jed. mjere	jed. mjere
1												
2												
3												
...												
i												
...												
n-1												
n												

Tablica 5: *Oblik tablice kojom se prikazuje usvojena težina kriterija*

Kriterij	Težina kriterija
Kriterij ocjene zadovoljenja cilja	C1
	C2
	...
Ekonomski kriterij	E1
	E2
	...
Ekološki kriterij	O1
	O2

	...	
Socijalni kriterij	S1	
	S2	
	...	

Određivanje težina kriterija je u nadležnosti donosioca odluke koji će na taj način odrediti prioritete na osnovu kojih želi birati najpovoljnije rješenje odnosno za koje kriterije smatra da imaju trebaju imati veći značaj u odnosu na ostale pri provođenju izbora.

Tablice 4. i 5. su osnovni podaci koji su potrebni da bi se mogao primijeniti bilo koji postupak višekriterijske optimizacije.

6. Problemi kod korištenja višekriterijske optimizacije

Teoretski model, kada ga treba primijeniti u praksi, nailazi na niz problema. Najznačajniji je nedostatak podataka koji su neophodni za ocjenu varijanti po svim izabranim kriterijima.

Najjednostavnije je, i to iz razloga što su ti pokazatelji uvijek obrađeni, vrednovati rješenja s ekonomskog stanovišta. Da bi se uopće pristupilo izgradnji hidromelioracijskog sustava on mora biti ekonomski isplativ. Jasno da je potrebno izračunati kolika je ekonomska isplativost svake pojedine varijante.

Problem se javlja kod ocjenjivanja rješenja s ekološkog i socijalnog kriterija. Za kvalitetno vrednovanje rješenja sa ekološkog aspekta neophodno je provesti duže istraživanje okoline da bi se kao prvi korak ocijenilo početno stanje. Potrebno je analizirati pokazatelje koji su opisani točki 5.2., a nakon toga za svaku varijantu odrediti kako ona mijenja postojeće stanje, uolikoj mjeri i da li ga mijenja u pozitivnom (poboljšanje postojećeg stanja) ili negativnom smislu (pogoršanje postojećeg stanja). Ukoliko sve varijante po nekom kriteriju imaju jednak utjecaj onda se treba odrediti da li se prihvaća uopće takav utjecaj te ako je odgovor pozitivan tada se taj kriterij ne treba uzimati u obzir odnosno može ga se zanemariti. Također se za kriterije mogu postaviti granice tolerancije zadovoljenja kriterija te ukoliko neka varijanta prelazi tu granicu tada se ona može eliminirati prije pristupanja izboru na osnovi višekriterijske optimizacije. Na taj način mogu se eliminirati neke varijante koje su vrlo loše po nekim kriterijima.

Problem kod određivanja ekološkog i socijalnog utjecaja rješenja je slaba obrađenost ekoloških i socijalnih pokazatelja općenito što proizlazi iz slabijeg praćenja i analize tih pokazatelja, a rezultira nedovoljnom količinom podataka koji su potrebni da bi se rješenja mogla kvalitetno vrednovati s ekološkog i socijalnog aspekta.

7. Zaključak

Planiranje hidromelioracijskih sustava započinje pravovremenim uočavanjem potrebe za gradnjom takvog sustava. Za hidromelioracijske sustave to znači planirati poljoprivrednu proizvodnju, rezervirati površine, osmisliti planove odvodnjavanja i navodnjavanja površina na vrijeme. Pravovremeno uočavanje potrebe za gradnjom hidromelioracijskih sustava omogućuje da se prije pojave konkretne potrebe obave sve prethodne radnje u smislu planiranja i projektiranja sustava te da se u trenutku kada se ukaže potreba za hidromelioracijskim sustavom, može puno brže pristupiti izgradnji i korištenju sustava.

Planiranje hidromelioracijskih sustava treba biti obuhvaćeno vodnogospodarskim osnovama i planovima te dokumentima prostornog uređenja.

Prvi korak u planiranju hidromelioracijskih sustava je izrada idejne studije/rješenja koja obuhvaća razradu različitih varijanti sustava. Između generiranih varijanti treba izabrati najpovoljnije rješenje za koje se kasnije izrađuje glavni i izvedbeni projekt i gradi sustav. Jedan od primjenjivih postupaka izbora rješenja je višekriterijska optimizacija. Za primjenu postupaka višekriterijske optimizacije potrebno je uspostaviti vrijednosni sustav koji se sastoji od kriterija i mjera na osnovi kojih se provodi ocjenjivanje varijanti. U ovom radu sugerira se korištenje sustavne analize u procesu rješavanja problema, općenito u gospodarenju vodama pa tako i kod planiranja sustava odvodnje i navodnjavanja. Dan je pregled podloga koje su potrebne za generiranje varijanata i za vrednovanje istih. Analizirani su: kriteriji kojima se procjenjuje zadovoljenje ciljeva koji se žele ostvariti gradnjom danog sustava, ekonomski, ekološki i socijalni kriteriji te sugerirano formiranje tablica koje služe kao ulazni podaci za primjenu postupaka višekriterijske optimizacije: tablica kojom se prikazuje rezultat vrednovanja varijanata po izabranim kriterijima (tablica 4.) i tablica kojom se prikazuje usvojena težina kriterija (tablica 5.).

Primjena postupaka višekriterijske optimizacije može uvelike olakšati sâm postupak izbora rješenja iz skupa generiranih varijanata. Problem u takvom pristupu je nedostatak podataka koji bi omogućili kvalitetno vrednovanje varijanta po svim navedenim kriterijima. Najčešće su najbolje obrađeni kriteriji koji obuhvaćaju ostvarenje ciljeva koje želimo dostići gradnjom hidromelioracijskog sustava i ekonomski kriteriji dok su ekološki i socijalni puno lošije obrađeni. Ta lošija obrađenost ekoloških i socijalnih kriterija proizlazi iz nedovoljne zastupljenosti tih kriterija u prikupljanju i analizi podataka te slabijeg praćenja tih pokazatelja općenito što se onda reflektira na nedostatak podataka u trenutku kada su oni potrebni za vrednovanje rješenja. Zaključuje se da bi trebalo unaprijediti praćenje općih ekoloških i socijalnih pokazatelja što bi osiguralo kvalitetnu podlogu na kojoj bi se u slučaju potrebe moglo provoditi kvalitetnije vrednovanje varijanata s ekološkog i socijalnog aspekta. Smjerice za provođenje takvog praćenja ekoloških i socijalnih parametara već postoje u dokumentima kao što su Agenda 21 [6] i Okvirnim direktivama EU [12].

8. Literatura

- [1] *Brošura Hrvatskih voda povodom 125 godina organiziranog vodnog gospodarstva u Hrvatskoj*, Hrvatske vode, mgt-topograf d.o.o. Velika Gorica, 2001.
- [2] *Zakon o vodama*, Narodne novine RH, br. 107/1995.
- [3] Margeta, J., (1992), *Osnove gospodarenja vodama*, Građevinski fakultet, Split.
- [4] Fijan, Z., Beraković, B. i Lauc, A., (1984), *Causes of Status and Possibilities of the Development of Operational Research, X Conference IFORS (Međunarodno udruženje društava za operativna istraživanja)*, Washington, (kao saopćenje dano na XI SYM-OP-IS 84, 1984, Herceg Novi).
- [5] Karleuša, B.: *Primjena postupaka višekriterijske optimalizacije u gospodarenju vodama*, Magistarski rad, Zagreb, 2002.
- [6] UN/ECE Sustainable Development: *Agenda 21*, Konferencija o Zemlji / Earth Summit, Rio de Janeiro, Brasil, 1992.
- [7] Opricović, S., (1986), *Višekriterijumska optimizacija*, Naučna knjiga, Beograd.
- [8] Tomić, F.: *Istraživački rad i podloge za projektiranje i izvođenje sustava navodnjavanja*, Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, knjiga 1, str 113—140.
- [9] Grupa autora, (1982), *Uputstva za vrednovanje višenamenskih vodoprivrednih projekata sa ekonomskog, društvenog i aspekta zaštite životne sredine*, Ekonomska zajednica za razvoj i saradnju, Paris.
- [10] Bebek, D.: *Ekonomska vrednovanje hidromelioracijskih projekata*, Priručnik za hidrotehničke melioracije, I kolo, knjiga 2, str. 281—208.
- [11] Đorđević, B., (1990), *Vodoprivredni sustavi*, Naučna knjiga, Beograd.
- [12] *Okvirna direktiva o vodama EU / Water Framework Directive EU*, (2000), Official Journal of the European Communities, na snazi od 22. prosinca 2000.

3

STATISTIČKE OBRADJE VELIKIH VODA HIDROMELIORACIJSKIH SUSTAVA

*prof.dr.sc. Nevenka Ožanić, dipl.ing.građ.
Građevinski fakultet Rijeka Sveučilišta u Rijeci*

1. UVOD
2. NIZOVI PODATAKA
 - 2.1. Najčešći tipovi ulaznih podataka
 - 2.2. Sustavne i slučajne greške
 - 2.3. Izbor i provjera nizova podataka
3. STATISTIČKA OBRADA NIZOVA PODATAKA
 - 3.1. Osnovne statistike
 - 3.2. Reprerentativnost serije i greške procjene
4. OSNOVE VJEROJATNOSTI
 - 4.1. Empirijske funkcije raspodjele
 - 4.2. Teorijske funkcije raspodjele
 - 4.2.1. Funkcije raspodjele za diskretnu slučajnu promjenjivu
 - 4.2.2. Funkcije raspodjele za kontinuiranu slučajnu promjenjivu
 - 4.3. Testiranje dobrote prilagođavanja funkcija raspodjele
 - 4.3.1. HI -kvadrat test
 - 4.3.2. Kolmogorov-Smirovljev test
5. PRIMJER PRORAČUNA VELIKIH VODA PRIMJENOM STATISTIČKIH METODA
 - 5.1. Empirijska funkcija vjerojatnosti
 - 5.2. Određivanje osnovnih statističkih parametara
 - 5.3. Proračun vjerojatnosti pojave velikih voda izborom nekoliko teorijskih funkcija raspodjele
 - 5.3.1. Gaussova raspodjela
 - 5.3.2. Gumbelova raspodjela
 - 5.3.3. Pearson 3 raspodjela
 - 5.3.4. Logaritamska - Pearson 3 raspodjela
 - 5.3.5. Logaritamska - normalna (Galtonova) raspodjela
 - 5.3.6. Usporedba dobivenih rezultata
 - 5.4. Komentar rezultata statističkih analiza
6. REGIONALIZACIJA VELIKIH VODA
7. HIDROLOŠKI PRORAČUNI VELIKIH VODA UNUTAR HIDROMELIORACIJSKIH SUSTAVA
 - 7.1. Uvodno
 - 7.2. Proračun maksimalnih protoka melioracijskih područja po D. Srebrenoviću (1970.)
 - 7.3. Proračun maksimalnih protoka po V. T. Chowu (1960) — priredeno u Bonacci i Roglić (1985.)
 - 7.4. Proračun maksimalnih dotoka na crpne stanice po Z. Srebrenoviću (1987.)
8. ZAKLJUČAK
9. LITERATURA

1. Uvod

U danom radu proanalizirana je problematika pojava velikih voda s naoko dva različita hidrološka pristupa — s jedne strane s aspekta upotrebe osnovnih statističkih metoda obrade i analiza vjerojatnosti pojave, a s druge strane s aspekta korištenja parametarskih metoda pri proračunu — ocjeni maksimalnih protoka na hidromelioracijskim sustavima. No, iako je u slučaju proračuna maksimalnih protoka hidromelioracijskih sustava riječ o parametarskom pristupu, ni te se metode ne mogu primjenjivati bez rezultata osnovnih statističkih obrada, samo što se zbog uglavnom nemjerenih podataka o protokama analiziraju (obično u nekim separatnim prethodnim analizama) razmjerno dostupniji podaci o značajkama kratkotrajnih jakih oborina. Pri tome se primjenjuju sve postavke koje se odnose na formiranje nizova, njihovu reprezentativnost, homogenost, kao i metode neposredne obrade.

Motivi za takav pristup mogli bi se sažeti u tvrdnju da je prisutnim prestrogim podjelama na stohastičke (statističke) i parametarske metode obrade zanemarena srž hidrologije kao znanstveno-istraživačke discipline, a to su mjereni podaci koji su osnova i jednog i drugog pristupa, i kojima su i osnovne metode obrade u biti vrlo bliske. Pri odabiru teme danog rada rukovodilo se okolnošću da je seminar prije svega orijentiran na mlađe hidrologe i stručnjake koji se namjeravaju baviti hidrologijom ili im je hidrologija bliska disciplina, te da već dugo na jednom mjestu ukratko i sustavno nisu razmatrane osnove primjene matematsko-statističkih metoda. Dani rad sadrži prikaz osnovnih pojmova vezanih uz takvu obradu, primjer provedenog proračuna, kao i upute o tome gdje se u aktualnoj domaćoj literaturi iz domene hidrologije može naći više informacija o pojedinim segmentima obrade. Naime, iz vlastite pedagoške prakse uočeno je da je, unatoč dostupnosti računarskih programa s gotovim algoritmima obrade, za razumijevanje principa pojedinih hidroloških obrada nužno da korisnik, samostalno koristeći stručnu literaturu pa i klasične tablice, uđe u metodologiju proračuna na način da “pješke” prođe sve faze obrade. Kasnije proračune sasvim sigurno neće provoditi na taj način nego uglavnom koristeći neke gotove programske pakete, no ne na šablonski — mehanički način, već razumijevajući pojedine korake tako provedenih obrada.

Motiv da se kao načelna metodološka suprotnost statističkim obradama (koja, kako je to prethodno izloženo, baš i nije tako izrazita) u istom radu analiziraju parametarske metode proračuna velikih voda na hidromelioracijskim sustavima, je aktualnost problematike uređenja hidromelioracijskih sustava. Proklamirani zaokret državne politike u smislu njezinog aktivnog odnosa prema osiguranju navodnjavanja poljoprivrednih površina pretpostavlja i uređene sustave odvodnje hidromelioracijskih sustava na kojima će se vršiti navodnjavanje. U tom će smislu biti nužno preispitati takve sustave na hidrološke pojave velikih voda, pri čemu dani metodološki pristupi, na osnovu kojih je i provedeno dimenzioniranje nekih od postojećih sustava, mogu poslužiti kao polazna osnova. U radu, zbog njegovog ograničenog opsega, nije provedeno detaljnije ulaženje u pojedine elemente takvih proračuna, već su uz

uvodne metodološke napomene polaznici seminara upućeni na izvornu literaturu.

Suvremeni pristupi obradama velikih voda podrazumijevaju korištenje različitih tipova matematičkih modela. Dio problematike vezan uz analize oblika vodnih valova kao i matematičkog modeliranja velikih voda obrađen je i u radu »Hidrogrami velikih vodnih valova« (Ožanić, 2003), publiciranom u knjizi 1 — III kola Priručnika za hidrotehničke melioracije izdanog također u okviru znanstvenog projekta »Znanstvene osnove za razvoj natapanja u Republici Hrvatskoj«.

2. Nizovi podataka

2.1. Najčešći tipovi ulaznih podataka

U statističkoj se hidrologiji praktično sve analize provode na temelju slučajnog uzorka, odnosno slučajnog — kronološkog niza podataka u kojem su svi članovi međusobno neovisni, odnosno takvi bi trebali biti. Meteorološke i hidrološke podloge sačinjavaju podaci dobiveni motrenjem i mjerenjem. Od prikupljenih podataka sastavlja se slijed podataka, koji predstavlja podatke poredane redosljedom kojim su bili opaženi ili izmjereni. Primjeri nizova podataka koji se najčešće koriste pri analizi velikih voda su: oborine kratkotrajnih intenziteta, vodostaji i protoke (često i razine vodnih lica), te oblici i volumeni vodnih valova.

Formiranje nizova karakterističnih vrijednosti intenzivnih oborina za različita trajanja može se provesti na više načina (Arneell i dr., 1984. — preuzeto iz Bonacci, 1994.), i to kao:

- nizovi godišnjih ekstrema (standardni pristup izdvajanja ekstremnih godišnjih vrijednosti oborina /intenziteta/ određenih trajanja),
- nizovi prekoračenja, odnosno pikova iznad određenih pragova — POT serije (peaks over threshold),
- modelirani nizovi ekstrema (koliko je poznato u domaćoj praksi do sada nisu korišteni, a i inače se rijetko koriste zbog toga što modeli za simuliranje ekstremnih oborina nisu još u dovoljnoj mjeri pouzdani).

Podaci hidroloških opažanja vodostaja i protoka sređuju se u vremenske nizove. Serija npr. ekstremnih vrijednosti uključuje najveće ili najmanje vrijednosti od kojih je svaka izabrana iz jednakih vremenskih intervala. Obično je osnovni vremenski interval hidrološka ili kalendarska godina, pa se takva serija naziva nizom godišnjih maksimuma ili minimuma. Tada se teško može pretpostaviti da niz nije sastavljen od slučajnih varijabli. Postoji, osim toga, i formiranje niza prekoračenja u koji ulaze članovi veći (analiza velikih voda) ili manji (proučavanje malih voda) od neke osnovne vrijednosti. Kad je takva serija formirana tako da je broj podataka u nizu jednak broju godina, takva se serija naziva godišnjim nizom prekoračenja. Kada se u niz uključuju dvije ili više vrijednosti iz iste godine, odabrani podaci mogu biti opterećeni neslučajnim pojavama, jer jedan hidrološki događaj može utjecati na drugi kad on slijedi ubrzo

nakon prvog. Ispitivanje odnosa između povratnih perioda dobivenih pomoću niza godišnjih prekoračenja P_p i niza godišnjih ekstremnih vrijednosti P_e proveo je V.T. Chow, te je postavio relaciju:

$$P_p = \frac{1}{\ln P_e - \ln(P_e - 1)}$$

Dobije se da je P_p približno jednako P_e kad je povratni period dovoljno dug ($P > 10$ godina), te prema tome ne bi trebala postojati dilema pri odabiranju metode za oblikovanje nizova.

Uobičajeno je da se protoke dobivaju na osnovu podataka o vodostajima. No, u određenim je slučajevima moguće i obrnuto. Naime, riječna su korita, naročito korita bujičnih vodotoka, podložna promjenama tijekom godina. Moguće značajne promjene u koritu ili pak promjene kote nule vodokaza mogu u velikoj mjeri otežati ili čak onemogućiti analizu velikih voda preko maksimalnih vodostaja. Na to u prvom redu mogu ukazati međusobno različite protočne krivulje unutar dužeg vremenskog razdoblja. U takvim je slučajevima bolje umjesto niza maksimalnih vodostaja razmatrati niz maksimalnih protoka koji je preko odgovarajućih protočnih krivulja izveden iz maksimalnih vodostaja. Postoji li pouzdaniji način određivanja protoke (npr. preko podataka dobivenih iz rada hidroelektrana i sl.), mogu se, ukoliko se to pokaže potrebnim u pojedinim analizama, iz maksimalnih protoka odrediti maksimalni vodostaji različita reda pojavljivanja.

Moramo napomenuti da je kod formiranja nizova podataka neophodnih za analizu velikih voda potrebno ispitati i da li se unutar promatranoga vremenskog razdoblja pojavila barem jedna reprezentativna velika voda. Naime, moguće je da su unutar razdoblja motrenja bile zabilježene samo razmjerno male velike vode, a da su se izvan toga razdoblja pojavljivale znatno veće vrijednosti. Njih bi svakako trebalo uzeti u obzir, jer bi u suprotnom izračunane vrijednosti velikih voda sasvim sigurno bile preniske. Provjeru da li su u razdoblju opažanja bile zapažene dovoljno velike vrijednosti velikih voda, može se izvršiti preko odgovarajućih dijagrama na koje su nanoseni najveći opaženi specifični dotoci različitih slivova u funkciji površina slivova.

Vrlo važni i često neophodni podaci pri analizi velikih voda su oblici i volumeni vodnih valova različitih povratnih razdoblja. Na manjim bujičnim slivovima, gdje vodni valovi često nastaju kao posljedica djelovanja jakih kiša, može se kroz duži niz godina prikupiti zadovoljavajući broj vodnih valova nastalih površinskim otjecanjem. Ako su hidrogrami vodnih valova po oblicima slični, korisno je statistički obraditi njihove volumene. Naime, volumeni vodnih valova su izravno povezani s oborinama palim na sliv i oni su kao pokazatelji mnogo ilustrativniji nego sami maksimalni protoci, koji su izvedeni iz vodostaja i prikazuju zapravo trenutno djelovanje, odnosno samo veličine vrhova vodnih valova. Volumeni i oblici velikih vodnih valova puno više govore o ekstremno velikom otjecanju i njihovom se daljnjom analizom mogu dobiti glavni pokazatelji za obranu od poplave, pogotovo za dimenzioniranje akumulacijskih jezera, evakuacijskih organa i sl.

2.2. Sustavne i slučajne greške

Svako mjerenje, a posebno ono u prirodi, opterećeno je slučajnom ali i sustavnom greškom (Bonacci, 1994.). Slučajne greške uvijek imaju različite ili bolje rečeno oba predznaka i moraju biti uzete u obzir isključivo statistički. Odnose se uglavnom na greške opažača (motritelja) pri očitavanju mjerene veličine, njenom upisivanju i sl. Za procjenu slučajne greške neophodno je raspolagati s određenim većim brojem neovisnih mjerenja izvršenih odgovarajućom metodom.

Za razliku od slučajne greške, sustavna greška npr. pri mjerenju oborina uvijek nosi isti predznak. Sustavne greške nastaju pod uzajamnim utjecajem mjernog instrumenta, metode mjerenja i opažača koji mjerenje vrši. One su brojne, a vezane su i s nepravilnim instrumentom i/ili netočnim rukovanjem. Radi se npr. o oštećenjima (rupama) na kantici ili prijemnom otvoru, neispravnom odnosno kosom položaju otvora, izlivanju dijela vode pri mjerenju, i dr. Ove se greške mogu i moraju barem većim dijelom izbjeći pravilnom instalacijom instrumenata, održavanjem i rukovanjem. Tako su oborine izmjerene u točki, korištenjem mjernih instrumenata, uvijek manje od onih koje su stvarno pale na površinu tla. Naime, kut nagiba padanja oborina uglavnom je više ili manje iskošen, pa standardni Helmanovi kišomjeri ne uspijevaju izmjeriti cjelokupnu palu količinu oborina.

Sustavna greška kod mjerenja oborina u točki sa kišomjerima (osim navedenog kuta nagiba) javlja se i zbog sljedećih šest razloga (Sevruck, 1979.):

- Aerodinamičkog efekta — deformacije polja vjetra zbog položaja, oblika i dimenzija kišomjera. Radi se o najznačajnijoj greški čiji udio u ukupnoj sustavnoj greški može iznositi i do 95%.
- Vlaženja unutrašnjih stijenki instrumenata i posude za sakupljanje oborina
- Isparavanja akumulirane vode iz posude za sakupljanje oborina
- Nemogućnosti potpunog pražnjenja iste posude
- Isprskavanja kapi oborine iz instrumenta
- Otpuhivanje krutih oborina primarno snijega sa instrumenta.

Iz do sada iznesenog, vidljiv je karakter mogućih grešaka u procjeni stvarne vrijednosti neke meteorološke ili hidrološke veličine čak i u slučaju kada se neposredno mjeri taj analizirani parametar.

Slični problemi, a ponekad i veći, javljaju se kada se pojedini parametri ne mjere neposredno, već ih je potrebno odrediti na osnovu obrade rezultata mjerenja drugih parametara, a koji su često puta i međusobno uvjetovani (određivanje vrijednosti rezultata vodomjerenja na osnovu mjerenja brzine vode u pojedinim točkama vodomjernog profila i geometrije profila, npr. određivanje protoke na hidrološkoj postaji na osnovu mjerenja vodostaja i obrade podataka vodomjerenja, određivanje pronosa nanosa na osnovu i podatka o protoci i koncentracije suspendiranog nanosa u profilu i sl.).

2.3. Izbor i provjera nizova podataka

Slijed se podataka (meteoroloških ili hidroloških) može prihvatiti kao niz ili niz vrijednosti slučajne varijable, koji predstavlja podatke o nekim pojavama po redosljedu (kronološki) ili veličini i na njega se mogu primijeniti metode matematičke statistike ako su ispunjeni slijedeći uvjeti (Žugaj, 2000.):

1. Članovi niza su slučajne veličine
2. Članovi niza su međusobno neovisni
3. Niz mora biti homogen
4. Članovi niza moraju biti stacionarni
5. Niz mora biti dovoljno dug

Nastavno će biti obrazloženi navedeni uvjeti:

1. Članovi niza su slučajne veličine.

Meteorološke i hidrološke podatke možemo smatrati slučajnim veličinama zbog velikog broja različitih utjecaja o kojima oni ovise.

2. Članovi niza su međusobno neovisni.

Član kronološkoga niza ne smije utjecati na veličinu člana koji slijedi. Primjerice, za godišnje ekstremne vrijednosti u hidrološkim godinama redovito se može usvojiti da su međusobno neovisne. Pri analizi hidroloških vremenskih serija primjenom teorije matematičke statistike, neophodan uvjet je da članovi serija budu međusobno neovisni, tj. da predstavljaju slučajne veličine. Za provjeru neovisnosti može se primijeniti više testova. Slijedi prikaz nekoliko najkorištenijih:

Test kvadrata uzastopnih razlika

U uvjetima nulte hipoteze H_0 : serija je niz neovisnih elemenata, može se pokazati da je statistika:

$$u = \frac{\frac{d^2}{2} - 1}{\sqrt{\frac{n-2}{n^2-1}}}$$

približno raspodijeljena po $N(0,1)$ raspodjeli, gdje je:

$$d^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} - x_i)^2$$

Područje prihvatanja hipoteze je

$$u_{\alpha/2} < u < u_{1-\alpha/2}$$

ili za $\alpha = 0.05$, budući da \mathbf{u} ima normalnu $N(0,1)$ raspodjelu

$$-1.96 < u < 1.96$$

Test korelacije članova vremenske serije prvog reda

Ako se koreliraju uzastopni članovi vremenske serije, dobiva se statistika:

$$r_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x}_1) \cdot (x_{i+1} - \bar{x}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x}_1)^2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} - \bar{x}_2)^2}}$$

koja se naziva koeficijentom serijske korelacije prvog reda gdje je:

$$\bar{X}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} x_i}{n-1}$$

$$\bar{X}_2 = \frac{\sum_{i=2}^n x_i}{n-1}$$

Prema Andersenu, uvodi se nulta hipoteza

$$H_0 : r_1 \cong 0$$

Statistika

$$z = \frac{r_1 + \frac{1}{n-1}}{\frac{n-2}{(n-1)^{3/2}}}$$

ima $N(0,1)$ raspodjelu pa je područje prihvatanja nulte hipoteze za $\alpha = 0.05$ ako je ispunjen uvjet

$$z_{\alpha/2} = -1.96 < z < z_{1-\alpha/2} = 1.96$$

3. Niz mora biti homogen.

Uzrok nehomogenosti hidroloških nizova su česte promjene u prirodi, umjetne ili prirodne. Umjetne promjene su posljedica izgradnje hidrotehničkih objekata, navodnjavanja, protugradne obrane, sječa šuma, isušivanje močvara i sl. Prirodne promjene mogu biti lagane (topljenje glečera, lagane promjene klimatskih faktora) ili nagle (šumski požari, naglo odronjavanje zemljišta, vulkani, itd.).

Jedna često korištena metoda za prethodnu ocjenu hidrološkog niza je metoda **dvostruke sumarne količine**, a sastoji se u usporedbi suma godišnjih pro-

toka vode na analiziranoj stanici sa sumama godišnjih protoka u odgovarajućim godinama na stanicama u istom području. U koliko se na toj ovisnosti pojavi prijelom, potrebno je potražiti uzroke bilo u promjeni kote nule letve, primjeni pogrešne krivulje protoka, nasipanju riječnog korita, bilo u fizičkim uzrocima: regulaciji rijeka, izgradnji akumulacije, sjeći šuma, itd. Međutim, treba naglasiti da ova metoda predstavlja prethodnu ocjenu i ne mora da znači da je niz nehomogen. Za konačnu ocjenu služe statistički testovi homogenosti.

Homogenost se testira, ovisno o svrsi analize, najčešće na osnovu statistika ili značajki niza: srednje vrijednosti niza, koja je najznačajnija statistička karakteristika, i disperzije koja govori o varijacijama tijekom razdoblja ili na osnovu funkcija raspodjele za dva karakteristična podperioda.

Testiranje srednjih vrijednosti

Suština testiranja se sastoji u ispitivanju da li srednje vrijednosti dva uzorka i opsega n_1 i n_2 pripadaju istoj populaciji, odnosno testira se nulta hipoteza:

$$H_0: \bar{X}_1 \cong \bar{X}_2$$

Za ovu svrhu mogu se primijeniti dva testa: Normalni Z-test (ako je $n_1, n_2 > 30$) i Studentov t-test (ako je $n_1, n_2 < 30$).

Normalni Z-test

Pretpostavka je da je slučajno promjenjiva X normalno raspoređena i da su članovi serije međusobno neovisni.

Kriterij testa je statistika:

$$Z = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sigma_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}}$$

gdje je :

$$\sigma_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2} = \sqrt{\frac{\sigma_{x_1}^2}{n_1} + \frac{\sigma_{x_2}^2}{n_2}}$$

koja ima $N(0,1)$ raspodjelu, pa se nulta hipoteza prihvaća ako je:

$$Z_{\alpha/2} < Z < Z_{1-\alpha/2}$$

Studentov t-test

Pretpostavljeno je da slučajno promjenjiva $X = Q$ slijedi normalnu razdiobu i da su varijance dva uzorka jednake ($\sigma_{x_1} = \sigma_{x_2} = \sigma_x$)

Kriterij za provjeru srednjih vrijednosti je statistika:

$$t = \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 \cdot (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}} \cdot \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{n_1 \cdot \sigma_{x_1}^2 + n_2 \cdot \sigma_{x_2}^2}}$$

koja ima Studentovu $S_v(t)$ sa $v_1 = n_1 + n_2 - 2$ stupnjeva slobode. Hipoteza se prihvaća ako je

$$t_{\alpha/2} < t < t_{1-\alpha/2}$$

Kritične vrijednosti za Studentovu raspodjelu najčešće se daju u tablici.

Testiranje disperzije dva uzorka - Fischerov test

Uvjet za primjenu ovog testa je da su elementi populacije neovisni, da su dva uzorka normalno raspoređena i da parametri populacije nisu poznati.

Nulta hipoteza je

$$\sigma_{x_1} \cong \sigma_{x_2}$$

Kriterij za jednakost dviju disperzija je statistika

$$F = \frac{\sigma_{x_1}^2}{\sigma_{x_2}^2} \quad (\sigma_{x_1} > \sigma_{x_2})$$

koja ima Fischerovu raspodjelu sa $v_1 = n_1 - 1$ stupnjeva slobode. Hipoteza se prihvaća ako je:

$$F < F_{1-\alpha}(v_1, v_2)$$

Kritične vrijednosti za F- raspodjelu za $\alpha = 0.05$ u literaturi najčešće su dane u tablici.

Testiranje homogenosti funkcije raspodjele - inverzni test Wilcoxon

Ako dva uzorka opsega n_1 i n_2 pripadaju istoj nepoznatoj populaciji, nulta hipoteza je:

$$H_0 : F(X_i) = F(X_j)$$

Formira se zajednički niz obima $n = n_1 + n_2$ uređen po rastućim vrijednostima. Određuje se ukupan broj inverzija koji prethodi svakom članu jednog i drugog niza – u_1 i u_2 .

Teoretski je dokazano da je kod homogenih vremenskih serija broj inverzija približno raspoređen po normalnom zakonu sa:

— srednjom vrijednosti

$$\bar{u} = \frac{n_1 \cdot n_2}{2}$$

— i disperzijom

$$\sigma_u^2 = \frac{n_1 \cdot n_2}{12} \cdot (n_1 + n_2 + 1)$$

Nulta hipoteza se prihvaća ako je ispunjen uvjet:

$$\bar{u} - z_{\alpha} \cdot \sigma_u < u_{1,2} < \bar{u} + z_{\alpha} \cdot \sigma_u$$

4. Članovi niza moraju biti stacionarni.

Različite promjene uzrokuju nestacionarnost koja se može pokazati preko trendova, periodičnosti itd. Trend je usmjerivanje (padajuće ili rastuće) u vremenskim nizovima. On je sustavna i neprekidna pojava koja se proteže kroz cijeli vremenski niz. U sklopu vremenskoga niza periodičnost predstavljaju pravilni ili promjenjivi oblici koji se dnevno, sezonski, godišnje ili višegodišnje pravilno izmjenjuju. Ispituje se različitim testovima kao npr. Fischerovim testom.

5. Niz mora biti dovoljno dug.

Kod hidroloških obrada i analiza temeljni problem predstavlja procjenjivanje jesu li raspoloživi nizovi osnovnih podataka dovoljno dugi za donošenje pouzdanih zaključaka. U literaturi se preporučuju različita minimalna razdoblja motrenja i mjerenja (tablica 1).

Kada se primjenjuju metode matematičke statistike u hidrologiji, preporučljivo je koristiti nizove podataka od najmanje 30 godina. Kako meteorološke, a pogotovo hidrološke stanice rade najčešće kraće od 30 godina, pri korištenju kraćih nizova podataka neophodno je ispravno ocijeniti realnost rezultata i pouzdanost dobivenih zakonitosti ovisno o svrsi obrade.

Na kraju se može zaključiti da ako vremenski niz zadovoljava navedenih pet uvjeta, na njegove se podatke mogu primijeniti metode matematičke statistike. Čest je međutim slučaj da nizovi ne zadovoljavaju postavljene uvjete (npr. niz nije dovoljno dug), pa se u slučaju primjene statističkih obrada dobiveni rezultati uzimaju s rezervom.

Tablica 1: Minimalni broj godina opažanja hidroloških veličina prema različitim autorima (Žugaj, 2000.)

Autor	Minimalni broj godina motrenja	Napomena
V. Jevđević (1956.)	srednji protoci: 10 maksimalni protoci: 30	za hidrološke obrade
D. Srebrenović (1970.)	srednji protoci: 10 maksimalni protoci: 30	za hidrološke obrade
D. Srebrenović (1986.)	30	za hidrološke obrade
K.N. Mutreja (1986.)	10 ili više	za regionalne hidrološke analize
V.M. Ponce (1989.)	Obično 10 do 15, a ne manje od 5	za regionalne hidrološke analize
R.S. Gupta (1989.) prema T. Darlympleu (1960.)	5 ili više	za regionalne hidrološke analize

3. Statistička obrada nizova podataka

3.1. Osnovne statistike

Za pouzdanu analizu ponašanja nekog hidrološkog procesa neophodno je prikupiti što više hidroloških i meteoroloških podataka (mjerenja oborina, vodostaja, protoka i dr.). Iz ovoga proizlazi da se hidrološke obrade i analize zasni-
ju na velikom broju podataka, odnosno na velikim uzorcima slučajne hidrološke promjenjive. Pri tome pod hidrološkom obradom i analizom podrazumijevamo proceduru pomoću koje se iz velikog uzorka određuju neke **numeričke karakteristike slučajne promjenjive** koje ukazuju na ponašanje uzorka. U nastavku će biti spomenute najčešće korištene numeričke karakteristike uzorka.

Aritmetička sredina ili kako se često naziva srednja vrijednost je najtipičniji broj u skupu vrijednosti, što nikako ne znači da i sama srednja vrijednost mora biti jedna od vrijednosti slučajne promjenjive X.

Ako je dan niz vrijednosti slučajne promjenjive X

$$x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$$

Tada se pod srednjom vrijednošću (aritmetičkom sredinom) podrazumijeva sljedeći izraz:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_i + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

što ujedno predstavlja i prvi centralni moment.

Moment drugog reda nazivamo **varijancom**. To je suma kvadrata odstupanja svakog člana x_i od aritmetičke sredine niza \bar{x} pomnožena s odgovarajućom učestalosti, te podijeljena s brojem elemenata uzorka. Obično ju nazivamo i “srednje kvadratno odstupanje” odnosno simbolom σ^2 . Drugi korijen iz varijance tj.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n f_i (x_i - \bar{x})^2}$$

naziva se **standardna devijacija**. Iz samog je izraza evidentno da varijanca ili standardna devijacija kao njena modifikacija služe kao mjera rasprostranjenosti (disperzije ili varijabiliteta podataka) članova ili jedinica x_i od prosječne vrijednosti. Apsolutna učestalost slučajne promjenjive označena je sa f_i .

Standardna devijacija ili odstupanje može se izraziti i običnim momentom:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n f_i (x_i^2 - \bar{x}^2)}$$

dakle u obliku koji može pojednostaviti računanje.

Ponekad se u računima koristimo s pojmom srednje devijacije

$$\sigma_{sd} = \frac{\sum (x - \bar{x})}{N}$$

To je, dakle, sredina apsolutnih devijacija vrijednosti od njihove aritmetičke sredine. Ovaj parametar sve više zamjenjuje standardnu devijaciju.

Nema sumnje da standardna devijacija ima iste mjerne vrijednosti kao i veličina x_i . Želimo li tu mjeru disperzije bezdimenzionalno izraziti, tada to možemo učiniti putem novog pojma — **koeficijenta varijacije** C_v

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}}$$

Kao što se vidi koeficijent varijacije je odnos standardne devijacije i prosječne vrijednosti.

Naravno da standardna devijacija σ i koeficijent varijacije postižu identične veličine, kad se članovi x_i izražavaju modulnim koeficijentima k_i . U tom slučaju će biti:

$$\sigma = C_v = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (k_i - 1)^2}$$

Za određivanje stupnja simetričnosti i spljoštenosti krivulje učestalosti služe momenti višeg reda ili adekvatne mjere disperzije višeg reda. Tako je **koeficijent asimetrije** (moment trećeg reda):

$$C_s = \frac{\mu_3}{\sigma^3} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i (x_i - \bar{x})^3}{N \sigma^3}$$

ili izražen u modulnim koeficijentima k_i :

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (k_i - 1)^3}{N C_v^3}$$

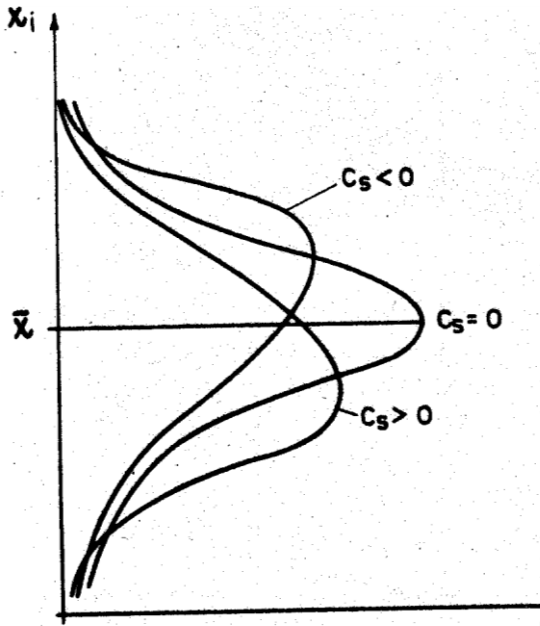
Kada je krivulja učestalosti simetrična onda je $C_s = 0$. Razumljivo je da sa porastom C_s nesimetričnost krivulje raspodjele raste. Postoje u tom smislu izvjesne klasifikacije, pa se kaže:

$0 < C_s < 0.10$	da praktično nema asimetričnosti
$0.10 < C_s < 0.25$	asimetričnost je mala,
$0.25 < C_s < 0.50$	asimetričnost je srednja,
$C_s > 0.5$	asimetričnost je velika.

U primjerima koji se javljaju u hidrologiji asimetričnost je prema toj klasifikaciji obično srednja, a veoma često velika. Nisu izuzetni slučajevi da koeficijent asimetrije dosegne i vrijednost od 2, 3 i više. No javljaju se i

negativne vrijednosti za C_s , pa taj parametar može karakterizirati krivulju učestalosti kako je to pokazano na slici 1.

Dakle ukoliko je vrijednost C_s negativna ($C_s < 0$) tada je mod veći od prosječne veličine. Za pozitivnu veličinu C_s ($C_s > 0$) vrijedi, naravno, obrnuto. Moramo naglasiti da se potonji slučaj češće javlja u hidrologiji, jer su odstupanja od prosjeka u pravcu minimuma obično manja ali zato učestalija.



Slika 1:
Prikaz koeficijenta asimetrije
(Srebrenović, D., 1970.)

3.2. Reprezentativnost serije i greške procjene

Polazeći od pretpostavke da npr. serija maksimalnih protoka predstavlja realizaciju stohastičkoga procesa, prije praktičkog korištenja iste neophodno je prethodno ispitati njenu statističku strukturu u smislu identifikacije razdoblja pojavljivanja većih ili manjih velikih voda — maksimalnih protoka.

Pri tome se koristi najjednostavnija procedura definiranja modulnih odstupanja od srednje vrijednosti, ili se praktično primjenjuje spektralna teorija slučajnih procesa. Za dužinu reprezentativne serije usvaja se ono razdoblje koje obuhvaća barem dva ili više puna ciklusa. Pri tome treba imati u vidu da jedan pun ciklus obuhvaća oba razdoblja — sušno i kišno. S druge strane reprezentativna vremenska serija mora biti takve dužine da sadrži pouzdane statističke parametre.

Neophodno je da relativna srednja kvadratna odstupanja statističkih parametara ne budu veća od 10 %, što se računa:

— za srednju vrijednost $\sigma_{\bar{Q}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} * 100$

— za koeficijent varijacije $\sigma_{c_v} = \left(\frac{c_v}{\sqrt{2(n-1)}} \sqrt{1+3c_v^2} \right) * 100$

— za koeficijent asimetrije $\sigma_{c_s} = \sqrt{\frac{\sigma}{n} (1+6c_v^2+5c_v^4)} * 100$

gdje su: \bar{Q} = srednja vrijednost serije maksimalnih godišnjih protoka
 $\sigma_{Q_{\max}}$ = standardna devijacija serija Q_{\max}
 C_v = koeficijent varijacije serija Q_{\max}
 C_s = koeficijent asimetrije serije Q_{\max}
 n = ukupan broj članova serije Q_{\max}

4. Osnove vjerojatnosti

Vjerojatnost je matematički pojam kojim se kvantitativno (brojčano) opisuje slučajnost pojavljivanja uočenog događaja. Prihvaćajući mogućnost prezentiranja hidroloških veličina slučajnim varijablama, uvodimo vjerojatnost u hidrologiju, čiji se osnovni pojmovi mogu poistovjetiti s spoznajama o statističkoj učestalosti i trajnosti.

4.1. Empirijske funkcije raspodjele

Empirijska funkcija raspodjele $P^*(x)$ slučajno promjenjive X , predstavlja zakon promjene učestalosti događaja $X > x$ u razmatranom slučajnom uzorku:

$$P^*(x) = p^*(X > x) = p^*; \quad a \quad p^* = \frac{m}{N}$$

gdje je: p^* = učestalost događaja empirijske funkcije $X > x$
 m = broj elemenata u slučajnom uzorku koji zadovoljavaju uvjet $X > x$
 N = ukupna veličina uzorka

Empirijska funkcija raspodjele računa se neposredno na osnovu kronološkog niza podataka (članova vremenske serije) koji su međusobno neovisni. U praksi je uobičajeno da se članovi vremenske serije najprije poredaju po opadajućim vrijednostima. Za proračun empirijske vjerojatnosti u hidrološkoj se praksi koriste približne formule, od kojih su u nastavku dane samo neke:

— Weibull $P_m^* = \frac{m}{N+1}$

— Hazen $P_m^* = \frac{m-0,5}{N}$

— Čegodajev $P_m^* = \frac{m-0,3}{N+0,4}$

— Gringorten $P_m^* = \frac{m-0,44}{N+0,12}$

Generalno se sve ove formule mogu izraziti preko slijedećeg obrasca:

$$P_m^* = \frac{m - a}{N + 1 - 2a}$$

gdje je: m — redni broj (položaj) slučajne promjenjive u uređenom uzorku,

N — ukupni broj elemenata uzorka,

A — korekcijski faktor koji ima svrhu omogućiti ispravniju procjenu empirijske vjerojatnosti najvećih i najmanjih vrijednosti slučajne promjenjive.

Povratni period m -tog člana u nizu izračuna se:

$$T_m = \frac{1}{P_m^*}$$

Dimenzija povratnoga razdoblja ovisi o načinu formiranja osnovne serije slučajne promjenjive. Ako je serija formirana korištenjem samo jednoga podatka u godini (npr. maksimalni godišnji protok), tada se povratno razdoblje izražava u godinama.

Povratno razdoblje označava prosječni interval vremena unutar kojega se, sa vjerojatnošću $P(x)$, ocjenjuje da će slučajna promjenjiva X biti jedanput veća od x . Tako npr. ako vjerojatnost slučajne promjenjive X , iznosi $P(x) = 0,02$, povratno razdoblje je:

$$T(x) = \frac{1}{P(x)} = \frac{1}{0,02} = 50 \text{ godina}$$

4.2. Teorijske funkcije raspodjele

Kada se pokaže da za neki empirijski uzorak vrijedi neka teorijska raspodjela, koristiti će se karakteristike te raspodjele u donošenju nekih zaključaka i za ekstrapolaciju rijetkih događaja - u pravilu rjeđih od opažanog niza. Dakle, teorijska funkcija raspodjele vjerojatnosti je najsažetije predstavljanje neke empirijske raspodjele učestalosti. Odabrana se funkcija u potpunosti ne prilagođava empirijskoj raspodjeli. Dobrota prilagodbe te funkcije ovisi o veličini uzorka, pravilnog izbora funkcije i upotrebe najboljih metoda za procjenjivanje njenih parametara.

U teorijskoj statistici postoji čitav niz funkcija gustoće raspodjele vjerojatnosti koje se koriste u modeliranju različitih procesa. Te su funkcije dobro izučene i poznate su njihove karakteristike. U hidrološkoj se praksi koriste samo neke od ovih funkcija, a budući da se obrađuju dva tipa slučajne promjenjive, tj. diskretna (prekidna) i kontinuirana, različite se funkcije primjenjuju na ove dvije vrste slučajnih promjenjivih veličina. Svrha njihove primjene je najčešće u tome da se, na osnovu hidrometeoroloških veličina opaženih u prošlosti, odrede vjerojatnosti sa kojom bi se ove pojave mogle dogoditi u budućnosti.

4.2.1. Funkcije raspodjele za diskretnu slučajnu promjenjivu

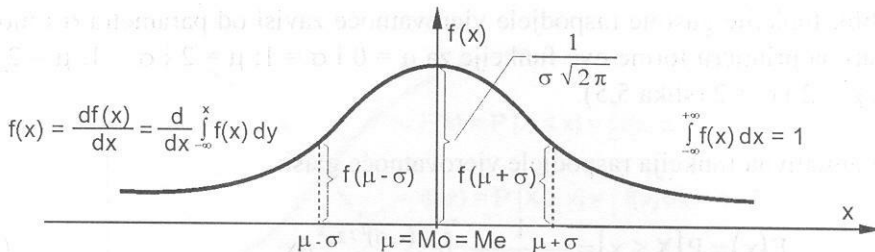
Kod rješavanja niza praktičnih problema u hidrologiji, javljaju se slučajne promjenjive koje mogu poprimiti samo cjelobrojne vrijednosti. Takve su promjenjive npr. broj dana sa kišom (ili bez kiše) u razmatranom vremenskom razdoblju, broj dana sa mrazom, broj godina u kojima dolazi do poplava (izlijevanja vode iz korita nekog vodotoka) i sl. Nastavno će biti samo spomenute neke od funkcija raspodjele koje se koriste kod analize vjerojatnosti diskretnih (prekidnih) hidroloških promjenjivih, ali ih se neće detaljnije opisivati budući da nisu tema ovog rada:

- Binomna funkcija raspodjele
- Geometrijska funkcija raspodjele
- Poissonova funkcija raspodjele

4.2.2. Funkcije raspodjele za kontinuiranu slučajnu promjenjivu

Gaussova ili Normalna funkcija raspodjele

Gaussova (normalna) funkcija (krivulja) raspodjele je karakteristično zvonolika, simetrična i dvoparameterska i vjerojatno je najuobičajenija funkcija raspodjele ne samo u hidrologiji nego i inače. Velike vode, kao i većina hidroloških pojava, redovito nemaju simetričnu raspodjelu, ali Gaussova se raspodjela, koja zauzima jedinstveno mjesto među funkcijama raspodjele, često analizira uz druge raspodjele radi njihove međusobne usporedbe. Definirana je u rasponu $-\infty < x \leq +\infty$, a zbog njene jedinstvenosti grafički je prikaz, odnosno krivulja raspodjele dana na slici 2.



Slika 2: Karakteristični izgled Gaussove krivulje raspodjele

Krivulja prikazana na slici 2 može se opisati pomoću dvoparameterske funkcije:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad -\infty < x \leq +\infty$$

To je opći oblik normalne funkcije raspodjele sa srednjom vrijednošću ($\mu = x$) i standardnom devijacijom ($\sigma_x = \sigma$).

Logaritamsko-normalna ili Galtonova funkcija raspodjele

Mnoge se hidrološke promjenjive kao npr. protoci, pronos nanosa i dr. mjere od nule i nemaju gornju granicu. One se ne mogu modelirati normalnom raspodjelom (protoke ili godišnje vrijednosti dnevnih oborina i dr.). Međutim, te se vrijednosti dobro prilagođavaju tzv. Logaritamsko-normalnoj raspodjeli odnosno Galtonovoj raspodjeli. Funkcija vjerojatnosti tada je dana izrazom:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y-\bar{y}}{\sigma_y} \right)^2}, \quad -\infty < y < +\infty$$

gdje je: $y = \ln x$ (x -varijabla)
 \bar{y} = sredina od y
 σ_y = standardna devijacija od y

Gumbelova funkcija raspodjele

Gumbelova funkcija raspodjele je nesimetrična i dvoparametarska. Ima veliku primjenu u hidrologiji kod analize slučajne promjenjive koja predstavlja neku ekstremnu vrijednost (maksimalni ili minimalni godišnji protoci). Vrlo je važna kod analize velikih voda jer serija vrijednosti od kojih svaka predstavlja maksimalni godišnji protok imati će raspodjelu prema zakonu ekstremnih vrijednosti.

Funkcija raspodjele vjerojatnosti definirana je slijedećim izrazom:

$$p(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[- (x-u)\alpha - e^{-(x-u)\alpha} \right], \quad -\infty < x < +\infty, \alpha > 0, u > 0$$

gdje je: α = parametar oblika raspodjele i ujedno vrijednost moda,
 u = parametar mjerila

Gama funkcija raspodjele

Gama razdioba je jedna od osnovnih razdioba, što proizlazi iz njene povezanosti s normalnom razdiobom. Upotreba dvo i troparametarske razdiobe u hidrologiji je isto tako uobičajena kao i upotreba log-normalne funkcije raspodjele vjerojatnosti. Nažalost, nije lako transformirati mjerilo koordinatnih osi na način da se sve kumulativne gama raspodjele mogu nanositi kao ravne linije, što njenu upotrebu u hidrološkoj praksi čini manje privlačnom. Za kontinuiranu slučajnu promjenjivu koja ima funkciju raspodjele vjerojatnosti u obliku

$$p(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}, \quad 0 \leq x \leq \infty, \alpha > 0, \beta > 0$$

gdje je: α = parametar lokacije raspodjele i ujedno vrijednost moda,
 β = parametar mjerila

kaže se da slijedi dvoparametarsku Gama raspodjelu sa parametrima α i β .

Pearsonove funkcije raspodjele vjerojatnosti

Od 14 Pearsonovih funkcija raspodjele, u hidrologiji se najčešće koristi treći tip Pearsonove funkcije. Raspodjela **Pearson 3** je nesimetrična troparameterska raspodjela. Dobije se tako da se u izraz za funkciju dvoparameterske Gama raspodjele uvede i teći parametar, tzv. Parametar položaja x_0 (udaljenost od koordinatnog početka do početka raspodjele – najmanja vrijednost analizirane hidrološke veličine), tako da je $x_0 \leq x < \infty$.

Funkcija raspodjele vjerojatnosti definirana je slijedećim izrazom:

$$p(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} (x - x_0)^{\alpha-1} e^{-\frac{x-x_0}{\beta}}, \quad x_0 < x < \infty$$

gdje je: α = parametar oblika raspodjele i ujedno vrijednost moda,
 β = parametar mjerila
 x_0 = parametar položaja

Budući da je izvorni oblik ove raspodjele, kako se vidi, dosta složen, a rad sa njime dugotrajan, u hidrološkoj praksi se upotrebljava modificirani oblik prema Foster-Ribkinu.

Ako pak logaritmi slučajne promjenjive X slijede spomenutu Pearson 3 razdiobu, tada se kaže da promjenjiva X slijedi **Log Pearson 3** razdiobu. Funkcija vjerojatnosti tada je dana izrazom:

$$p(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} (y - y_0)^{\alpha-1} e^{-\frac{y-y_0}{\beta}}, \quad y_0 < y < \infty$$

gdje je: $y = \ln x$ (x -varijabla)
 $\Gamma(\alpha)$ = kompletna gama funkcija

Primjer proračuna maksimalnih protoka različitih povratnih razdoblja prema različitim raspodjelama dani su u poglavlju 5 ovog rada.

4.3. Testiranje dobrote prilagođavanja funkcija raspodjele

Koji se od zakona raspodjele najbolje prilagođava opaženim vrijednostima, može se utvrditi usporedbom parametara raspodjele, a kao inicijalna informacija i grafički – nanošenjem na dijagram vjerojatnosti. Kada grafička metoda ne daje sigurnu smjernicu za izbor zakona razdiobe, potrebno je izvršiti razdiobu po više zakona i odabrati onu funkciju raspodjele koja testiranjem pokaže najbolju prilagodbu. Testiranje dobrote prilagođavanja teorijskih funkcija raspodjele provodi se nekim od standardnih testova – na primjer HI-kvadrat testom (χ^2) ili Kolmogorov-Smirnovljevim testom kada se raspolaze sa uzorkom čiji je opseg mali.

4.3.1. HI-kvadrat test

Za ispitivanje istinitosti pretpostavke hipoteze H o funkciji raspodjele osnovnog skupa primjenjuje se — test na osnovu uzoraka (Hrelja, 2000.).

Neka je iz osnovnog skupa slučajno izvučen uzorak od n elemenata x_1, x_2, \dots, x_n koji se grupiraju u k klasa (grupnih razreda) ($k < n$). Ako se sa f_{ei} označi broj elemenata i -te klase, onda je zbroj svih učestalosti (frekvencija).

$$f_{e1} + f_{e2} + \dots + f_{ei} + \dots + f_{ek} = n$$

Ako je n veliki broj, a hipoteza H istinita, može se očekivati da će se empirijske frekvencije f_{ei} podudarati sa teorijskim f_{ti} .

Izraz:

$$\chi_0^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(f_{ei} - f_{ti})^2}{f_{ti}}$$

predstavlja mjeru odstupanja empirijskih frekvencija f_{ei} od teoretskih f_{ti} . Što su odstupanja manja, to je i χ_0^2 manji.

Može se pokazati da slučajna promjenljiva χ_0^2 pripada χ^2 raspodjeli sa $\nu = k - \rho - 1$ stupnjeva slobode. U izrazu (k) je broj klasa u koje se grupiraju elementi uzorka, a ρ broj parametara testirane teorijske funkcije raspodjele vjerojatnosti koji se ocjenjuju na osnovu uzorka. Ne upuštajući se u matematička objašnjenja, broj stupnjeva slobode je za:

- uzorak od k klasa = $k-1$
- binomnu raspodjelu = $k-2$; ($\rho = 1$)
- Poasonovu raspodjelu = $k-2$; ($\rho = 1$)
- Normalnu raspodjelu = $k-3$; ($\rho = 2$)
- Gumbelovu raspodjelu = $k-3$; ($\rho = 2$)
- Pearson 3 raspodjelu = $k-4$; ($\rho = 3$)

gdje je (k) — broj klasa u koje se grupiraju elementi uzorka.

Za hipotezu je povoljno da je χ_0^2 što manje, tj. da je vjerojatnost za $\chi^2 > \chi_0^2$ što veća. Ova se vjerojatnost izražava površinom ispod krivulje χ^2 -kvadrat raspodjele u intervalu ($\chi_0^2, +\infty$):

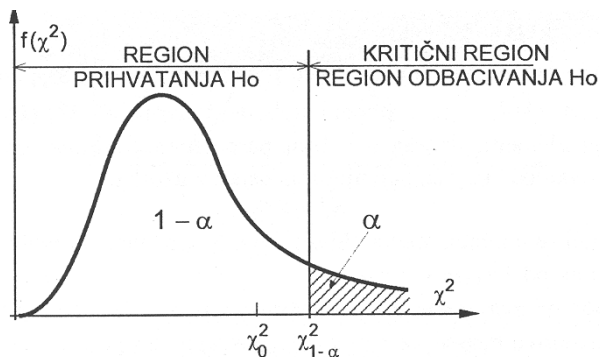
$$P_\nu(\chi^2 > \chi_0^2) = \int_{\chi_0^2}^{\infty} \varphi(\chi^2) d\chi^2 = \Phi_\nu(\chi_0^2)$$

Ako je $\Phi_\nu(\chi_0^2) > 0,05 = 5\%$ (prag značajnosti), može se sigurno zaključiti da između empirijskih i teorijskih frekvencija razlike nisu prevelike tj. da je hipoteza H točna. To znači da je

$$P[\chi^2 < \chi_0^2] < 95\%$$

tj. dobiveni χ_0^2 nalazi se u intervalu koji kod normalne funkcije raspodjele odgovara odstupanju koje nije veće od 2σ , a to se u statistici tolerira, jer χ^2 -kvadrat raspodjela teži normalnoj raspodjeli kada $n \rightarrow \infty$, tj. uzorak mora biti veliki.

Drugim riječima, ako su razlike ($f_{ei}-f_{ti}$) velike, bit će veliko i χ^2 . Uzima se da je χ^2 preveliko da bi se moglo pripisati slučaju ako padne izvan područja prihvaćanja hipoteze H_0 .



Nulta hipoteza H_0 je ovdje definirana kao tvrdnja (pretpostavka) da uzorak slijedi određenu teorijsku funkciju raspodjele.

Prema tome, ako dobivena vrijednost za χ^2 i

padne u kritično područje testa, hipoteza H_0 se odbacuje (slika 3).

Slika 3:

*Područje prihvaćanja
i odbacivanja hipoteze*

Može se napisati slijedeća relacija:

$$P[\chi^2 > \chi_{1-\alpha}^2] = \alpha$$

gdje interval $(\chi_{1-\alpha}^2, +\infty)$ predstavlja područje odbacivanja hipoteze H_0 , odnosno:

$$P[\chi^2 < \chi_{1-\alpha}^2] = 1 - \alpha$$

gdje je interval $(0, \chi_{1-\alpha}^2)$ područje prihvaćanja hipoteze H_0 .

$\chi_{1-\alpha}^2$ je dakle kritična vrijednost testa. Kao što je to već napomenuto u ovom poglavlju, u hidrološkim statističkim primjenama se obično koristi $\alpha = 0,05$ (5 %).

U mnogim statističkim udžbenicima postoje tablice u kojima su obično dane vrijednosti promjenljive χ^2 za zadanu vjerojatnost $F(\chi^2)$ ili $\Phi(\chi^2)$ i broj stupnjevi slobode ν .

Postupak proračuna je slijedeći:

1. n podataka slučajne promjenljive grupira se u k klasa (grupnih razreda), tako da svaka klasa sadrži najmanje 5 podataka i odrede empirijske frekvencije f_{ei} (broj pojavljivanja) razmatrane slučajne promjenljive u danjoj klasi. To se može odrediti grafički na dijagramu vjerojatnosti (slika 4), tako da se u svakoj klasi prebroji broj točaka (realizacija) koje predstavljaju empirijske frekvencije f_{ei} ($i = 1, 2, 3, \dots, k$).

$$f_{e1} = n_x / x \leq x_1$$

⋮

$$f_{ei} = n_x / x_{i-1} \leq x < x_i$$

⋮

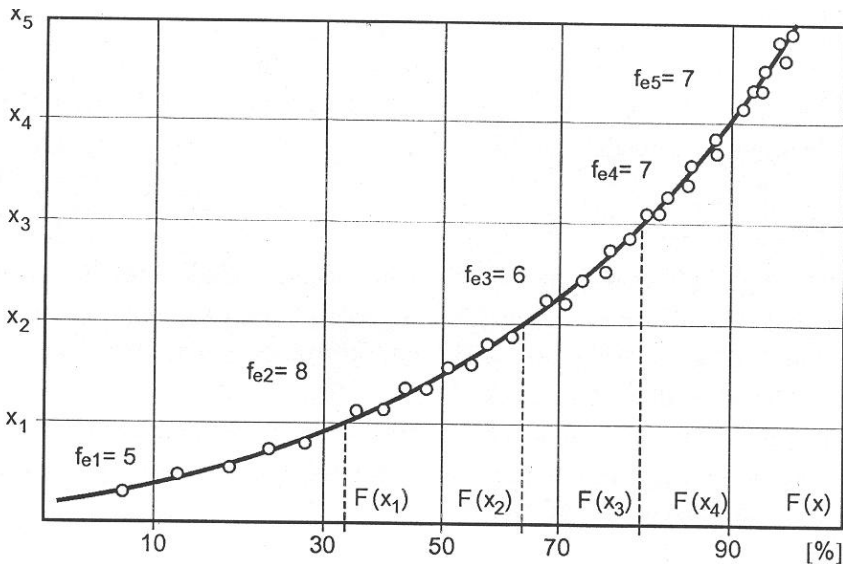
$$f_{ek} = n_x / x \geq x_{k-1}$$

2. Izračunavaju se teorijske frekvencije f_{ti} , za svaku klasu, koja zapravo predstavlja očekivani broj elemenata uzorka u svakoj klasi.

Ona se može izračunati preko testirane teorijske funkcije gustoće raspodjele vjerojatnosti $f(x)$ kao:

$$f_{ti} = n \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x) dx$$

gdje su x_{i-1} i x_i donja i gornja granica i-te klase.



Slika 4: Grafički dijagram vjerojatnosti

Obzirom da se u praksi obično računaju i crtaju kumulativne funkcije raspodjele vjerojatnosti $F(x)$, onda se teorijske frekvencije računaju kao:

$$f_{ti} = n[F(x_i) - F(x_{i-1})]$$

3. Za svaku od klasa izračunava se veličina $(f_{ei} - f_{ti})^2 / f_{ti}$, odnosno suma svih veličina za sve klase

$$\chi_0^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(f_{ei} - f_{ti})^2}{f_{ti}} \approx \chi^2(v)$$

4. Ovisno od testirane funkcije raspodjele vjerojatnosti računa se broj stupnjeva slobode $v = k - p - 1$, te za odabrani prag značajnosti α , iz tabela za χ^2 raspodjelu određuje kritična vrijednost testa, odnosno $\chi_{1-\alpha}^2$.

5. Ako je

$\chi_{1-\alpha}^2 \geq \chi_0^2$, χ_0^2 ne pada u kritično područje testa pa se hipoteza H_0 (tvrdnja da uzorak slijedi testiranu teorijsku raspodjelu) prihvaća, odnosno na razmatrani uzorak se može dobro prilagoditi pretpostavljena teorijska funkcija raspodjele sa rizikom α ,

$\chi_{1-\alpha}^2 \leq \chi_0^2$, χ_0^2 pada u kritično područje testa pa se hipoteza H_0 odbacuje, odnosno na razmatrani uzorak se ne može dobro prilagoditi pretpostavljena teorijska funkcija raspodjele.

4.3.2. Kolmogorov-Smirovljev test

Drugi tip neparametarskog testa suglasnosti empirijske funkcije raspodjele $F_e(x)$ i teorijske funkcije raspodjele $F_t(x)$ koji se često koristi u hidrološkim analizama zove se Kolmogorov-Smirovljev test.

Prethodno je razmatran χ^2 -test dobrote prilagođavanja pri čemu su brojne vrijednosti slučajne promjenljive X bile razvrstane u k intervala (klasa). Često se raspolaže uzorkom čiji je opseg mali, pa je praktično nemoguće načiniti takve intervale koji bi zadovoljavali sve potrebne uvjete za primjenu χ^2 -testa dobrote prilagođavanja. U tim slučajevima primjenjuje se Kolmogorov-Smirovljev test dobrote prilagođavanja (u daljem tekstu test Kolmogorova).

Kod primjene ovog testa ne gubi se informacija o svakom pojedinačnom članu uzorka kao što se čini pri razvrstavanju podataka u klasne intervale.

Najkraće rečeno, test se zasniva na provjeri da li je maksimalna razlika, ili maksimalno odstupanje između empirijske funkcije raspodjele $F_e(x)$ i teorijske funkcije raspodjele $F_t(x)$ dovoljno malo (naravno uz prihvatljiv stupanj rizika α), što implicira da se teorijska funkcija raspodjele $F_t(x)$ dobro prilagođava uzorku slučajne promjenljive pa se prihvata nulta hipoteza H_0 . Pri tome nulta hipoteza H_0 tvrdi da uzorak opseg n sa empirijskom funkcijom raspodjele $F_e(x)$ pripada populaciji čija je neprekidna funkcija raspodjele $F_t(x)$. Ukoliko to nije slučaj, tj. ako je ta razlika previše velika, tada se prihvaća alternativna hipoteza H_a , što znači da se teorijska funkcija raspodjele $F_t(x)$ ne prilagođava danom uzorku slučajne promjenljive. U tom slučaju može se, kao jedno od rješenja, konstruirati neki drugi tip teorijske funkcije raspodjele, pa čitav postupak testiranja ponoviti.

Kriterij suglasnosti kod testa Kolmogorova ne ovisi o broju parametara koji definiraju testiranu teorijsku funkciju raspodjele vjerojatnosti. Ovaj test u stvari,

implicitno pretpostavlja da su poznati raspodjela populacije slučajne promjenjive X i numeričke vrijednosti njenih parametara. Kako to kod hidroloških slučajnih promjenljivih nije slučaj, ova okolnost ograničava primjenu testa Kolmogorova u hidrologiji.

Kao mjeru odstupanja empirijske funkcije raspodjele $F_e(x)$, od usvojene teorijske funkcije raspodjele $F_t(x)$, Kolmogorov uzima najveću apsolutnu razliku između empirijske i teorijske funkcije raspodjele vjerojatnosti:

$$D_n = \max_{i=1,2,\dots,n} |F_e(x_i) - F_t(x_i)|$$

$$-\infty < x < \infty$$

Raspodjela veličine D_n , ako je ispunjena hipoteza H_0 (uzorak opsega n sa empirijskom funkcijom raspodjele $F_e(x)$ pripada populaciji čija je neprekidna funkcija raspodjele $F_t(x)$, i pri dovoljno velikom opsegu uzorka, ne ovisi od oblika funkcije $F_t(x)$ populacije kojoj pripada uzorak /8, 19/.

U teoriji statistike (prema Kolmogorovu) postoji teorem da vjerojatnosti slučajne promjenjive ($D_n\sqrt{n}$) neće biti veća od zadanog broja A , tj. ima graničnu funkciju raspodjele

$$\lim_{n \rightarrow \infty} F_n(\lambda) = \lim_{n \rightarrow \infty} P(D_n \sqrt{n} \leq \lambda) = F(\lambda)$$

ili

$$\lim_{n \rightarrow \infty} F_n(\lambda) = \lim_{n \rightarrow \infty} P\left(D_n \leq \frac{\lambda}{\sqrt{n}}\right) = F(\lambda)$$

za svako $\lambda > 0$, i

$$F(\lambda) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} (-1)^k e^{-2k^2\lambda^2}$$

Kod praktičnog rada, testiranja suglasnosti empirijske i teorijske funkcije raspodjele obična se uspoređuju vrijednosti $D_n = \lambda/\sqrt{n}$ i kritična vrijednost $D_0 = \lambda_0/\sqrt{n}$ tako da je:

$$P[\max |F_e(x) - F_t(x)| \geq D_0] = \alpha$$

ili

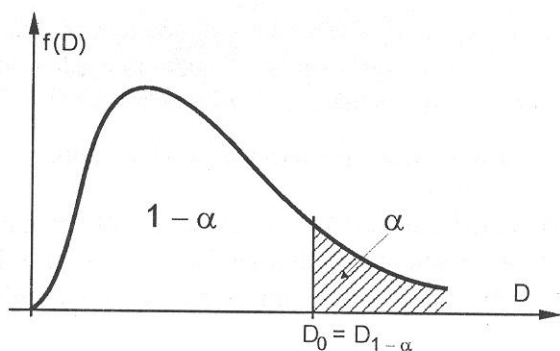
$$P[D_n \geq D_0] = \alpha$$

Odnosno, može se pisati:

$$P[D_n \leq D_0] = P[D_n \leq D_{1-\alpha}] = 1 - \alpha$$

gdje je područje prihvatanja nulte hipoteze H_0 ($D_n \leq D_{1-\alpha}$), a kritično područje ($D_n \leq D_{1-\alpha}$), odnosno područje prihvatanja hipoteze H_a .

Kada je $P[D_n \leq D_{1-\alpha}] = 1 - \alpha$, odnosno prihvaća se hipoteza H_0 , to implicira da je najveća razlika D_n relativno mala jer je manja od neke kritične vrijednosti $D_0 = D_{1-\alpha}$ za koeficijent rizika $\alpha = 5\%$ (1,2, 10, ...) (slika 5).



Slika 5:
Područje prihvatanja i
odbacivanja hipoteze

Kada je $P[D_n \geq D_{1-\alpha}] = \alpha$, odnosno prihvaća se hipoteza H_a , to implicira da je najveća razlika D_n relativno velika budući je veća od neke kritične vrijednosti $D_0 = D_{1-\alpha}$ s koeficijentom rizika α , pa se zaključuje da se slučajna promjenljiva nedovoljno dobro prilagođava pretpostavljenoj teorijskoj funkciji raspodjele vjerojatnosti $F_t(x)$.

U mnogim statističkim udžbenicima postoje tablice u kojima su obično dane vrijednosti $D_0 = D_{1-\alpha}$ u funkciji opsega uzorka n .

Postupak proračuna, kod testiranja hipoteze H_0 (uzorak opsega/dužine n sa empirijskom funkcijom raspodjele $F_e(x)$ pripada populaciji čija je neprekidna funkcija raspodjele vjerojatnosti $F_t(x)$, je slijedeća:

1. Za niz podataka slučajne promjenljive za svaki član niza izračunaju se vrijednosti empirijskih vjerojatnosti pojave:

$$F_e(x) = \begin{cases} 0, & x < x_1 \\ P_m, & x \leq x_m \\ 1, & x \geq x_n \end{cases}$$

gdje je $m = 1, 2, \dots, n$ rang vrijednosti X , a P_m se računa prema jednom od obrazaca za empirijsku vjerojatnost.

2. Za svaki član niza izračunaju se vrijednosti teorijskih vjerojatnosti

$$F_t(x) = P[X \leq x] \text{ ili } \Phi_t(x) = P[X \geq x],$$

ovisno o tome koja empirijska vjerojatnost je računata u točki 1. ($F_e(t)$ ili $\Phi_e(x)$), odnosno ovisno o tome da li je uzorak uređen tako da se dobije niz kod kojeg vrijednosti elemenata rastu ili opadaju.

3. Za svaki član niza odrediti apsolutnu vrijednost razlike $|F_e(x_i) - F_t(x_i)|$.

4. Maksimalna vrijednost razlike, tj. statistika $D_n = \max |F_e(x_i) - F_t(x_i)|$, uspoređuje se sa kritičnom vrijednošću $D_0 = D_{1-\alpha}$ koja se bira iz tablica za D_0 za usvojeni prag značajnosti (signifikantnosti) α .

5. Ako je

$D_o = D_{1-\alpha} \geq D_n$, D_n ne pada u kritično područje testa, pa se hipoteza H_o (tvrdnja da uzorak slijedi testiranu teorijsku funkciju raspodjele) prihvaća, odnosno na razmatrani uzorak se može dobro prilagoditi pretpostavljena teorijska funkcija raspodjele sa rizikom α ,

$D_o = D_{1-\alpha} \leq D_n$, D_n pada u kritično područje testa pa se hipoteza H_o odbacuje, odnosno na razmatrani uzorak se ne može dobro prilagoditi pretpostavljena teorijska funkcija raspodjele.

5. Primjer proračuna velikih voda primjenom statističkih metoda

Kao što je već ranije rečeno, proračun (procjena) velikih voda primjenom statističkih metoda predstavlja postupak određivanja mjerodavne funkcije raspodjele na temelju ulaznih podataka dobivenih hidrološkim motrenjima i mjerenjima. Funkcija raspodjele predstavlja način na koji su učestalosti članova neke cjeline raspodijeljene prema vrijednostima varijabli koje prikazuju. Nastavno je prikazan primjer proračuna velikih voda primjenom statističkih metoda pri procjeni kapaciteta poniranja Stajničkog polja.

Ulazni podaci formirani su na osnovu dinamike promjene volumena vode u ponorskoj zoni i mjerenih (ili u nekim situacijama procijenjenih) dotoka u retencijski prostor ponorske zone. Tako formirani nizovi podataka su ujedno dokaz da analizirani članovi ne moraju biti izravno opažene veličine, već i veličine koje su provedenim analizama izvedene iz nekih drugih opaženih veličina (u danom slučaju na osnovu opažanja vodostaja i mjerenja (ili procjene) dotoka).

Za proračun velikih voda na raspolaganju je bio 17-godišnji niz osmatranja razine vode u Stajničkom polju. Na osnovu tih osmatranja i na osnovu analize promjene dinamike volumena polja određene su vrijednosti maksimalnih srednje dnevnih protoka (tablica 2). Sve potrebne tablice za provedeni proračun dane su u knjizi (Žugaj, 2000.).

Godina	Q_{\max} [m ³ /s]	Padajući niz
1954	20,3	33,2
1955	20,8	26,0
1956	8,7	20,8
1957	18,9	20,3
1958	20,1	20,1
1959	26,0	19,3
1960	19,3	18,9
1961	16,7	16,7
1962	12,3	13,8
1963	33,2	12,3
1989	12,2	12,2
1990	5,7	11,7
1991	11,7	8,7
1992	13,8	8,3
1993	8,2	8,2
1997	8,3	8,2
1998	8,2	5,7

Tablica 2:
*Osnovni podaci
za statističku analizu*

Na osnovu prikazanog niza maksimalnih godišnjih vrijednosti dotoka u Stajničko polje, tj. komponente dotoka koja se retencionirala u samome polju, proveden je proračun-procjena maksimalnih vrijednosti tih protoka statističkom metodom.

5.1. Empirijska funkcija vjerojatnosti

Maksimalne su godišnje protoke poredane po veličini i definirana je empirijska vjerojatnost pojavljivanja svakog pojedinog člana. U analiziranom slučaju usvojena je vjerojatnost pojavljivanja po Čegodajevu:

$$P.P. = \frac{N + 0,4}{m - 0,3}$$

gdje su: P.P. — povratni period
 N — broj članova niza
 m — redni broj člana u nizu

Prema tome, vjerojatnost pojavljivanja prvog člana (najveće maksimalne godišnje protoke) u razmatranom nizu iznosi:

$$p = \frac{m - 0,3}{N + 0,4} = \frac{1 - 0,3}{17 + 0,4} = 0,04 = 4,0\%$$

Vjerojatnost pojavljivanja drugog člana niza:

$$p = \frac{2 - 0,3}{17 + 0,4} = 0,098 = 9,8\%$$

Članovi niza s odgovarajućim vjerojatnostima pojavljivanja prikazani su u tablici 3, a i grafički na slici 3.

Redni broj	Q_{\max} [m ³ /s]	Povratni period	Vjerojatnost pojavljivanja p [%]
1	33,2	24,9	4,0
2	26,0	10,2	9,8
3	20,8	6,4	15,5
4	20,3	4,7	21,3
5	20,1	3,7	27,0
6	19,3	3,1	32,8
7	18,9	2,6	38,5
8	16,7	2,3	44,3
9	13,8	2,0	50,0
10	12,3	1,8	55,7
11	12,2	1,6	61,5
12	11,7	1,5	67,2
13	8,7	1,4	73,0
14	8,3	1,3	78,7
15	8,2	1,2	84,5
16	8,2	1,1	90,2
17	5,7	1,0	96,0

Tablica 3:
 Vjerojatnost pojavljivanja
 članova promatranog niza

5.2. Određivanje osnovnih statističkih parametara

Prije nego se pristupi izračunavanju maksimalnih godišnjih protoka različitih povratnih razdoblja prema krivuljama raspodjele, potrebno je iz analiziranog statističkog niza podataka odrediti osnovne statističke parametre, a to su: aritmetička sredina \bar{x} , standardna devijacija σ , koeficijent varijacije c_v i koeficijent asimetrije c_s .

Dobivene su sljedeće vrijednosti:

$$\text{aritmetička sredina} \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 15,6 \text{ m}^3/\text{s}$$

gdje su: n — broj članova niza
 x_i — i -ti član niza

$$\text{standardna devijacija} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} = 7,12 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{koeficijent varijacije} \quad C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} = 0,46$$

$$\text{koeficijent asimetrije} \quad c_s = \frac{m_3}{\sigma^3} = 0,73$$

$$\text{gdje je } m_3 \text{ – moment trećeg reda: } m_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3$$

Računajući relativna srednja kvadratna odstupanja statističkih parametara (greške procjene) došlo se do zaključka da su odstupanja za srednju vrijednost i za koeficijent asimetrije daleko veća od dozvoljenih, dok se za koeficijent varijacije nalaze u granicama dozvoljenih vrijednosti. Takvi rezultati zbog relativno kratkog niza ($n = 17$) nisu neočekivani, međutim postupak proračuna je imao za svrhu prikazati način određivanja velikih voda primjenom statističkih metoda, pa je proveden do kraja bez obzira na uočena ograničenja.

5.3. Proračun vjerojatnosti pojave velikih voda izborom nekoliko teorijskih funkcija raspodjele

Proračun velikih voda, odnosno njihova procjena, provedena je korištenjem uobičajenih nesimetričnih krivulja raspodjele (Gumbel, Pearson 3, Log Pearson 3, Galton), a radi usporedbe i Gaussovom simetričnom raspodjelom.

5.3.1. Gaussova raspodjela

Veličine protoka velikih voda različitih vjerojatnosti pojavljivanja dobiju se iz izraza:

$$Q_{\max} = \bar{x} + z \cdot \sigma$$

Prikaz dobivenih rezultata dan je u tablici 4.

Tablica 4: Procjena maksimalnih godišnjih protoka različitih povratnih razdoblja prema Gaussovoj krivulji raspodjele

Povratno razdoblje [god.]	Vjerojatnost pojavljivanja p [%]	z	$z \cdot \sigma$	Q_{\max} [m ³ /s]
100	1	2,326	16,6	32,1
50	2	2,054	14,6	30,2
25	4	1,752	12,5	28,0
10	10	1,281	9,1	24,7
5	20	0,842	6,0	21,5
2	50	0	0	15,6

5.3.2. Gumbelova raspodjela

Veličine protoka velikih voda različitih vjerojatnosti pojavljivanja dobiju se iz izraza:

$$Q_{\max} = Q_m + z \cdot \frac{1}{a} = Q_m + z \cdot \frac{1}{a}$$

gdje su: Q_m – mod Gumbelove krivulje: $Q_m = \bar{x} - 0,577 \cdot \frac{1}{a}$

$\frac{1}{a}$ – parametar Gumbelove raspodjele: $\frac{1}{a} = 0,78 \cdot \sigma$

Prikaz dobivenih rezultata dan je u tablici 5.

Tablica 5: Procjena maksimalnih godišnjih protoka različitih povratnih razdoblja prema Gumbelovoj krivulji raspodjele

Povratno razdoblje [god.]	Vjerojatnost pojavljivanja p [%]	z	$z \cdot \sigma$	Q_{\max} [m ³ /s]
100	1	4,6	25,5	37,9
50	2	3,91	21,7	34,1
25	4	3,2	17,8	30,1
10	10	2,25	12,5	24,8
5	20	1,5	8,3	20,7
2	50	0,37	2,1	14,4

5.3.3. Pearson 3 raspodjela

Veličine protoka velikih voda različitih vjerojatnosti pojavljivanja dobiju se iz izraza:

$$Q_{\max} = (c_v \cdot \varphi + 1)\bar{x}$$

gdje je φ — funkcija definirana kao: $\varphi = f(c_s, p)$;
vrijednosti funkcije φ za različite vjerojatnosti pojavljivanja p i različite koeficijente asimetrije c_s određujemo iz Foster-Ribkinovih tablica.

Prikaz dobivenih rezultata dan je u tablici 6.

Tablica 6: Procjena maksimalnih godišnjih protoka različitih povratnih razdoblja prema raspodjeli Pearson 3

Povratno razdoblje [god.]	Vjerojatnost pojavljivanja p [%]	φ	Q_{\max} [m ³ /s]
100	1	2,84	35,8
50	2	2,42	32,8
25	4	1,98	29,7
10	10	1,34	25,1
5	20	0,79	21,2
2	50	-0,1	14,8

5.3.4. Logaritamska – Pearson 3 raspodjela

Kod ove raspodjele primjenjuje se logaritamska transformacija slučajne promjenjive varijable, pa su oznake za raspodjelu i njihove veličine slijedeće:

logaritam maksimalne protoke $q = \log Q_{\max}$

aritmetička sredina logaritama niza $\log Q_{\max}$ $\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q = 1,15$

standardna devijacija logaritama $\bar{\sigma} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q - \bar{q})^2}{n}} = 0,2$

koeficijent varijacije $c_v = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{q}} = -0,1$

koeficijent asimetrije $c_s = \frac{m_3}{\bar{\sigma}^3} = 0,18$

gdje je m_3 – moment trećeg reda: $m_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^3$

Vrijednosti logaritama maksimalnih protoka različita reda pojave dobiju se prema izrazu:

$$q_{\max} = (c_v * \varphi + 1)\bar{q}$$

Veličine maksimalnih protoka velikih voda različitih vjerojatnosti pojavljivanja dobiju se anti-logaritmiranjem vrijednosti logaritama maksimalnih protoka, tj. iz izraza:

$$Q_{\max} = 10^{q_{\max}}$$

Vrijednosti logaritama maksimalnih protoka prikazane su u tablici 7, a vrijednosti maksimalnih protoka velikih voda za različita povratna razdoblja u tablici 8.

5.3.5. Logaritamska - normalna (Galtonova) raspodjela

Vrijednosti logaritama maksimalnih protoka različita reda pojave dobiju se prema izrazu:

$$q_{\max} = \bar{q} + z \cdot \bar{\sigma}$$

Veličine maksimalnih protoka velikih voda različitih vjerojatnosti pojavljivanja dobiju se anti-logaritmiranjem vrijednosti logaritama maksimalnih protoka, iz izraza:

$$Q_{\max} = 10^{q_{\max}}$$

Vrijednosti maksimalnih protoka velikih voda za različita povratna razdoblja prikazani su u tablici 9.

Godina	Qmax [m ³ /s]	log Q
1954	20,3	1,31
1955	20,8	1,32
1956	8,7	0,94
1957	18,9	1,28
1958	20,1	1,30
1959	26,0	1,41
1960	19,3	1,29
1961	16,7	1,22
1962	12,3	1,09
1963	33,2	1,52
1989	12,2	1,08
1990	5,7	0,76
1991	11,7	1,07
1992	13,8	1,14
1993	8,2	0,91
1997	8,3	0,92
1998	8,2	0,91

Tablica 7:
Vrijednosti logaritama
maksimalnih protoka

Tablica 8: Procjena maksimalnih godišnjih protoka različitih povratnih razdoblja prema logaritamskoj – Pearson 3 raspodjeli

Povratno razdoblje [god.]	Vjerojatnost pojavljivanja p [%]	ϕ	Q_{\max}	Q_{\max} [m ³ /s]
100	1	2,26	1,6	40,2
50	2	2,01	1,6	35,8
25	4	1,71	1,5	31,1
10	10	1,27	1,4	25,3
5	20	0,85	1,3	20,8
2	50	0,02	1,1	14,1

Tablica 9: Procjena maksimalnih godišnjih protoka različitih povratnih razdoblja prema log – normalnoj (Galtonovoj) raspodjeli

Povratno razdoblje [god.]	Vjerojatnost pojavljivanja p [%]	z	Q_{\max}	Q_{\max} [m ³ /s]
100	1	2,326	1,6	41,5
50	2	2,054	1,6	36,6
25	4	1,752	1,5	31,7
10	10	1,281	1,4	25,5
5	20	0,842	1,3	20,7
2	50	0	1,1	14,0

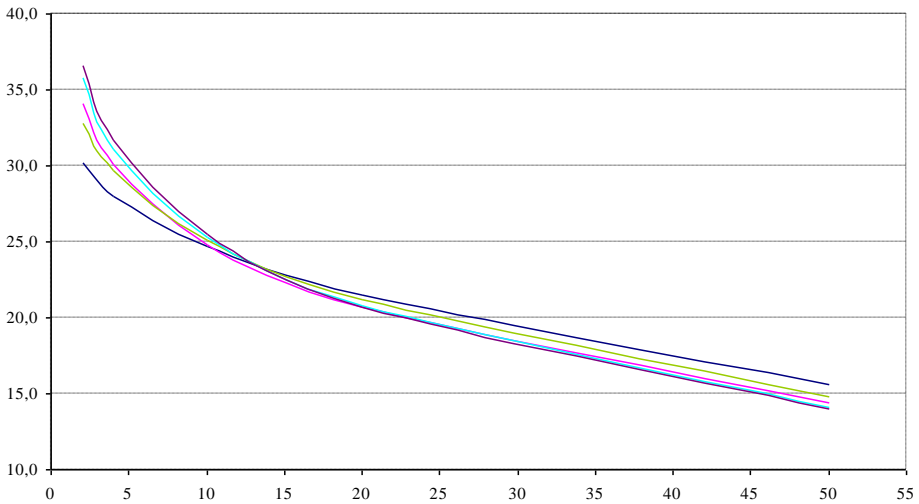
5.3.6. Usporedba dobivenih rezultata

U tablici 10 su radi usporedbe prikazane vrijednosti maksimalnih protoka za različita povratna razdoblja dobivene odabirom različitih krivulja raspodjele.

Tablica 10: Usporedna tablica dobivenih rezultata maksimalnih protoka za različita povratna razdoblja, te za različite krivulje raspodjele

Povratno razdoblje	Vjerojatnost pojavljivanja p	Gauss	Gumbel	Pearson 3	Log Pearson 3	Galton
[god.]	[%]	[m ³ /s]				
100	1	32,1	37,9	35,8	40,2	41,5
50	2	30,2	34,1	32,8	35,8	36,6
25	4	28,0	30,1	29,7	31,1	31,7
10	10	24,7	24,8	25,1	25,3	25,5
5	20	21,5	20,7	21,2	20,8	20,7
2	50	15,6	14,4	14,8	14,1	14,0

Na slici 6 su grafički prikazani dobiveni rezultati za različite krivulje raspodjele, te članovi opaženog početnog niza s odgovarajućim vjerojatnostima pojavljivanja.



Slika 6: Grafički prikaz dobivenih rezultata

5.4. Komentar rezultata statističkih analiza

Iz slike 6 je vidljivo da se ulaznim podacima najbolje prilagodila Galtonova raspodjela funkcije vjerojatnosti, posebno u domeni rijetkih događaja koja nam je i najinteresantnija pri analizi pojava velikih voda malih vjerojatnosti pojave.

Odluka o mjerodavnoj raspodjeli može se temeljiti i na primjeni ranije spomenutih testova (poglavlje 4.3), kojima se ispituje prilagodljivost teorijskih raspodjela ulaznim izračunskim podacima.

Za analizirani je slučaj korišten Kolmogorov-Smirnovljev test. Mjera odstupanja D_N empirijske raspodjele, odnosno raspodjele ulaznih podataka, od teorijske raspodjele je najveća razlika između empirijske i teorijske raspodjele. Za analizirane krivulje raspodjele dobivene su slijedeće vrijednosti D_N :

- $D_N = 15,7 \%$ ili $D_N' = 0,157$ za Gaussovu raspodjelu
- $D_N = 11,1 \%$ ili $D_N' = 0,111$ za Gumbelovu raspodjelu
- $D_N = 10,8 \%$ ili $D_N' = 0,108$ za Pearson 3 raspodjelu
- $D_N = 11,6 \%$ ili $D_N' = 0,116$ za logaritamsku - Pearson 3 raspodjelu
- $D_N = 12,7 \%$ ili $D_N' = 0,127$ za Galtonovu raspodjelu

Tablica 11: Kritične vrijednosti D_0 testa A. N. Kolmogorova za različite brojeve članova niza n kod razine povjerenja $\alpha = 0,05$ uobičajene u

N	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	$n > 50$
D_0	0,56	0,41	0,34	0,29	0,27	0,24	0,23	0,21	0,2	0,19	$1,36 / n^{1/2}$

Za razinu povjerenja $\alpha = 0,05$ (5 %) za različiti broj članova niza n dane su u tablici 11 kritične vrijednosti D_o . Najveća razlika D_N' se uspoređuje s kritičnom vrijednošću D_o , koja se uzima iz tablice br.32 u skladu s usvojenom razinom povjerenja α i na temelju broja članova niza n . Kritična vrijednost za niz od 17 članova je $D_o = 0,32$, pa po tom kriteriju svih pet raspodjela zadovoljavaju. No ipak, najbolju prilagodbu ulaznim podacima ima Galtonova raspodjela.

Radi usporedbe, prilagodljivost teorijskih raspodjela ispitana je i programom DIST preuzetim od Državnog hidrometeorološkog zavoda koji ima ugrađen Smirnov-Kolmogorovljev test (SK-test), koji je nešto kompliciranija verzija prethodnog Kolmogorovljevog testa. Dobiveni rezultati pokazali su da su sve raspodjele statistički vrlo dobre, imaju prilagodbu blizu 100 %, no što je vjerojatno numerička posljedica malog broja članova raspoloživog niza, a ne stvarno dobre prilagodbe. Prema provedenom proračunu najbolje prilagodljiva funkcija raspodjele je Pearson 3 (99,66 %), za koju je i mjera odstupanja D najmanja 9.84 %. No ipak je kao mjerodavnu funkciju raspodjele odabrana Galtonovu funkciju jer je kod nje odstupanje kod empirijskih i proračunatih vjerojatnosti kod najveće vrijednosti protoke najmanje, pa smo svakako na strani veće sigurnosti.

6. Regionalizacija velikih voda

Regionalna analiza je produblјivanje rezultata provedenih obrada i analiza podataka o nekoj regiji (području) dobivenih motrenjem i mjerenjem (Žugaj, 2003.). Cilj regionalizacije velikih voda je da se na osnovu “točkastih” podataka, izvedenih na osnovu analize vjerojatnosti mjerenih hidroloških podataka za određene lokacije, dobiju šire zakonitosti koje bi se mogle generalizirati na neko šire područje, te tako dobiti opću informaciju o karakteru pojava velikih voda i za lokacije bez raspoloživih mjerenih podataka. U regionalnim hidrološkim analizama do izražaja dolaze sva tri hidrološka usmjerenja: opisna hidrologija u proučavanju osnovnih hidroloških značajki, znanstvena hidrologija u analizama i izvođenju odgovarajućih pravila i zakonitosti, te korisnička hidrologija u primjeni tih zakonitosti u inženjerskoj praksi. Primjenom regionalnih analiza u inženjerskoj su hidrologiji obuhvaćena ispitivanja hidroloških pojava s dva osnovna cilja:

1. *definiranje matematičkih izraza koji se mogu koristiti unutar razmatrane regije. Tu su obuhvaćene informacije dovoljno dugih nizova izmjerenih hidroloških veličina, tako da su one dovoljno pouzdane za korištenje na susjednim slivnim područjima s kraćim razdobljima opažanja ili na kojima motrenja i mjerenja hidroloških veličina uopće nema;*
2. *izvođenje iskustvenih (parametarskih) izraza primjenjivih za šira geografska područja sa sličnim glavnim karakteristikama otjecanja vode. U tu se svrhu primjenjuju korelacije uz korištenje vjerojatnosti i statistike, uključivo sa složenom vjerojatnošću i analizom učestalosti.*

Prema tome, regionalne analize hidroloških parametara dio su suvremenih usmjeravanja u hidrologiji, koja pokazuju veliku povezanost s trendovima u vodnom gospodarstvu, odnosno višenamjenskom gospodarenju vodama.

Prve su regionalnih zakonitosti za slivove u Hrvatskoj (D. Srebrenović, 1970.) provedene za prosječna godišnja otjecanja, a kasnije ih je analizirao i Žugaj (1995). Nakon toga Trninić je (1997. i 1998.) izradio regionalnu analizu malih voda u Hrvatskoj.

Kao primjer rezultata najnovijih regionalnih hidroloških istraživanja velikih voda navodi se rad (Biondić i dr., 2002.), gdje su proračunate maksimalne specifične dotoke sa sliva Dunava u Hrvatskoj. Obradeni su podaci iz BHP-a prikupljeni na 100 hidroloških profila i na osnovu njih su definirane teorijske gornje anvelopne krivulje prema Creageru i Francou-Rodieru.

Rezultati takvih regionalnih zakonitosti, osim za ekstrapolaciju saznanja o velikim vodama s pojedinih hidroloških profila na šira područja, služe i za načelnu ocjenu prihvatljivosti provedenih hidroloških proračuna vjerojatnosti pojave s neke postaje čiju smo obradu izvršili. Naime, ukoliko rezultati obrada podataka s takve postaje bitnije odstupaju od regionalnih ovisnosti, ili pak od regionalno izvedenih anvelopa, nužno je izvršiti dodatne provjere nizova hidroloških podataka o velikim vodama s kojima smo ušli u proračun, kao i sam proračun vjerojatnosti.

Suvremeni pristupi obradama velikih voda podrazumijevaju korištenje ne samo osnovnih stohastičkih postupaka i analiza vjerojatnosti raspoloživih hidroloških podataka, kao i njihovu regionalizaciju, već i korištenje različitih tipova matematičkih modela. Uglavnom se radi o simulacijskim modelima koji pretvaraju oborine u otjecaj, pri čemu se koristi daleko veći broj ulaznih nego li kod regionalnih analiza — niz klimatoloških podataka, topografske podloge, podloge vezane uz hidrogeološke značajke analiziranog područja, karte pokrovnosti, pa i karte daljninskih snimaka (radarske, aviofotogrametrijske, satelitske ...). Takvi modeli u danom radu također nisu posebno analizirani već su predmet obrada dvaju drugih radova u okviru ovoga seminara i to u radovima Suvremeni sustavi predviđanja poplavnih valova (Deduš) i Mike Basin (Čajavec).

7. Hidrološki proračuni velikih voda unutar hidromelioracijskih sustava

7.1. Uvodno

Melioracijske površine, odnosno odvodnja površinskih voda sa njih je specifična jer su to zapravo mali slivovi s izuzetno malim padom, ali s relativno velikim volumenom. Hidromelioracijski su sustavi najčešće, ili gotovo u cijelosti, locirani na ravničarskim područjima te stoga odvodnu kanalsku mrežu karakteriziraju, kako je već rečeno, mali padovi, te uslijed toga i relativno velike dimenzije kanala. Jedna od njihovih značajki je i da su, u hidrološkom

pogledu, to uglavnom područja bez hidroloških osmatranja koja bi nam na standardan način mogla poslužiti za procjenu velikih voda. Hidrološka motrenja, ako i postoje, su više orijentirana na praćenja razina voda u kanalskoj mreži, ili se pak npr. radi o volumskim praćenjima crpljenih količina voda. Zbog toga će projektanti odvodnje takvih sustava vrlo rijetko doći u priliku da raspolažu s podacima o mjerenim protokama velikih voda na koje će moći primijeniti prethodno opisane metode analize vjerojatnosti pojave velikih voda, već će uglavnom morati koristiti parametarske metode hidroloških proračuna. Poseban su slučaj hidromelioracijskih područja na kojima nije moguća gravitacijska odvodnja, pa je u tom slučaju potrebno provesti i hidrološki proračun vezan uz dimenzioniranje crpnih postaja.

Prema Z. Srebrenoviću (1985.) lokacije melioracijskih područja koje zahtijevaju mehaničku odvodnju obično zauzimaju nizine uz morsko ili jezersko vodno prostranstvo, ušća rijeka, aluvijalne nizine velikih rijeka ili prostrane glacijalne površine gdje je gravitacijska odvodnja neadekvatna ili nemoguća. Katkada, je odvodnja crpljenjem praktičnija od poboljšanja i adaptiranja postojećeg gravitacijskog sustava, zbog teškoća u njegovoj realizaciji, visokih troškova izgradnje i potrebe stalnog održavanja odvodnog sustava.

Obično je mehanička odvodnja nužna samo u kratkim intervalima vremena kada nastupaju sezonski visoki podzemni i/ili površinski vodni nivoi na području evakuacije voda ili visoki vodostaji uzrokovani povodnjima u vanjskom vodnom režimu. Stoga je u nas najčešća uporaba kombiniranog gravitacijsko-mehaničkog evakuiranja vode iz melioracijskog sustava.

U nekim se slučajevima primjena mehaničke odvodnje može postupno planirati i realizirati, ako se u poprečnom smjeru riječne doline sukcesivno protežu površine pokrivene travnatim kulturama ili pašnjacima na koje se nadovezuju visokovrijedne kulture, te urbane ili industrijske aglomeracije, koje se radi zaštite od poplava postupno zatvaraju nasipima. Također, potreba za mehaničkom odvodnjom na postojećim gravitacijskim odvodnim sustavima može postati poželjna ili čak neophodna kao rezultat smanjenja prirodnih poplavnih površina na slivu. Time se povećava učestalost pojava i trajanje povodanja, a u skladu s tim se povećavaju i razdoblja zaustavljanja gravitacijske odvodnje.

Da bi se smanjio kapacitet crpke, povećala efikasnost mehaničke odvodnje, snizili troškovi izgradnje i održavanja pogona nužno je odvojiti sve površine koje se mogu gravitacijski drenirati od područja koja su namijenjena crpljenju. Gdje ovo zoniranje terena odvodnje nije moguće, što je u nas vrlo često, površinsko otjecanje, koje se javlja u fazi niskih vanjskih vodostaja, mora se odvesti gravitacijski kroz ustave u zaštitnom nasipu odvodnjavane površine, tako dugo dok to dozvoljavaju razine vanjskog režima.

Dimenzije glavnog kanala moraju, po mogućnosti, biti takve da se njegov kapacitet može održavati što više konstantnijom promjenom vodostaja kod crpne stanice. Očito je da kapacitet kanala koji vodi ka crpnoj stanici mora odgovarati potrebama crpke, a maksimalne brzine, koje se javljaju nastupanjem najniže razine kod crpne stanice (razina prestanka rada crpke), ne smiju ugrožavati njegovu stabilnost.

U nastavku je dan prikaz nekoliko u našoj praksi najčešće korištenih postupaka određivanja maksimalnih protoka hidromelioracijskih sustava.

7.2. Proračun maksimalnih protoka melioracijskih područja po D. Srebrenoviću (1970.)

Proračun maksimalnih protoka na melioracijskim područjima iziskuje poseban metodološki pristup. Poseban zbog toga što se ovdje javljaju neke nove značajke površinskog otjecanja koje imaju presudno značenje. One su uvjetovane oblikovanjem, uređenjem melioracijske površine, a daju se kao postulati temeljeni na ekonomskim aspektima. Riječ je o gustoći detaljne kanalske mreže, sistematizaciji tabele za odvodnju i njenom padu prema sabirnim kanalima. Sve se to u krajnjoj liniji može, po Srebrenoviću (1970), predstaviti parametrom: dužina dopustivog plavljenja nakon prestanka jake kiše, čime je vrijeme koncentracije voda do prvog sabirnog kanala donekle određeno. To je ono vrijeme sakupljanja (τ_1) koje se može odrediti preko egzaktnih hidrauličkih postavki.

Na melioracijskim područjima uobičajeno je računati sa 96%-tnim sigurnosti zaštite od poplava, što znači da se uzima kao mjerodavna za proračun 25-godišnja velika voda. U tom će slučaju izraz koji utvrđuje kišne intenzitete u relaciji s trajanjem kiše biti:

Koeficijent otjecanja α , koji je u ovom slučaju zapravo samo ovisan o kišnom intenzitetu i intenzitetu upijanja tla u (određuje se temeljem odgovarajućih pedoloških istražnih radova) određuje se iz:

$$\alpha = \frac{i - u}{i} \quad \text{odnosno} \quad \alpha = 1 - \frac{u_0 t^{0.76-\gamma}}{52.42 \cdot H}$$

gdje je: u_0 — upijanje u mm u prvom satu od početka kiše
 γ — eksponent koji ovisi o pedološkim kvalitetama tla

Mjerodavni otjecajni koeficijent α bit će naravno u slučaju kada je $t = \tau_1$, kao što je i mjerodavni kišni intenzitet adekvatan toj pojavi. Prema tome će specifični dotok u l/sec/ha s melioracijske površine u sabirni kanal biti (s obzirom da se daje intenzitet u mm/sat):

$$q_0 = 2.78 \frac{52.42}{\tau_1^{0.76}} \alpha H = \frac{145.7}{\tau_1^{0.76}} \alpha H \quad \text{l/sec/ha}$$

gdje je: τ_1 — u satima
 H — u metrima

Jasno se očituje koliko veliko značenje u formiranju maksimalnih protoka može imati oblik (širina) parcele i njen pad prema sabirnom kanalu. Kad se zna dopušteno vrijeme odvodnje voda T , te ostali već spomenuti fizikalni čimbenici H , u_0 i γ , tada su uz maksimalnu protoku, naravno, povezane i veličine oblika i pada parcele.

Dakle, uz prethodni izraz, uz koji je u izvornoj literaturi dan i nomogram, definirani su maksimalni specifični dotoci velikih voda na melioracijskim područjima. Ti dotoci odgovaraju 25-godišnjem povratnom periodu, a javljaju se na rubu table uz sabirni kanal. Prema tome, samo se sabirni kanali mogu dimen-

zionirati na te veličine. Međutim, kod odvodnih kanala višeg reda ti su dotoci manji, jer se radi o pojavi preklapanja vodnih valova. Svakako da je ta pojava to veća što je slivna površina izduženija.

Pojavu retardacije može se riješiti na isti način kao i kod malih slivova. Konačno melioracijske površine tj. mali slivovi s izuzetno malim padom, ali s nekim točno određenim čimbenikom, koji dopuštaju točnije prilaženje rješavanju površinske odvodnje. To se konkretno svodi na proračun vremena tečenja duž glavnih odvodnih recipijenta (τ_2), da bi se mogao postaviti konačni izraz za maksimalnu protoku:

$$Q_{\max} = 14,57H \frac{\alpha F}{\left[\tau_1 + 2,6 \left(\frac{F}{S} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{0,76}} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

gdje je: Q_{\max} — maksimalna protoka povratnog perioda $P=25$ god. [m^3/s]
 H — godišnja oborina sliva (m)
 τ_1 — vrijeme koncentracije (sati)
 F — površina sliva (km^2)
 S — prosječni pad sliva (m/km)
 α — koeficijent otjecanja

Mora se naglasiti da po ovom izrazu nije uvijek moguće odrediti maksimalni površinski dotok. U nekim slučajevima, gdje je brzina upijanja velika, potrebno je drugačije prići rješenju i to uvođenjem dodatnih parametara, a to su kapacitet tla za vodu i vlaga u tlu računata u trenutku pojave jake kiše. Naime, na većoj melioracijskoj površini dotok u kanal je manji zbog učinka zakašnjenja. Zbog toga veličina specifičnih dotoka opada s porastom veličine sliva, s umanjnjem pada sliva i s povećanjem izduženja sliva, tako da će vrijeme koncentracije (τ) biti jednako zbroju vremena tečenja po melioracijskoj površini (τ_1) i vremenu propagacije po koritu (τ_2).

7.3. Proračun maksimalnih protoka po V. T. Chowu (1960) — priređeno u Bonacci i Roglić (1985.)

U radu (Bonacci, Roglić, 1985.) je istaknuto da je problem definiranja hidroloških veličina neophodnih za definiranje i projektiranje objekata odvodnje (kanala, propusta i sl.) na malim slivovima gotovo svakodnevan inženjerski posao. Pod traženom hidrološkom veličinom najčešće se podrazumijeva protoka vrha hidrograma, a rjeđe cijeli hidrogram. U okviru rada je detaljno prikazana jedna od metoda iz literature (V.T. Chow, 1960.) koja je smatrana posebno pogodnom kao osnova za dimenzioniranje osnovne kanalske mreže površinske odvodnje, odnosno za manje prirodne slivne površine na kojima nema nikakve urbanizacije ili industrijske izgradnje. Objašnjen je samo mehanički postupak proračuna i dan numerički primjer. Metodom se dobiva samo vrh hidrograma izravnog otjecanja, pa je u okviru numeričkog primjera razrađeno nekoliko mogućih postupaka. Istaknute su sljedeće faze rada pri definiranju protoke vrha

hidrograma, s tim da se prethodno izabere povratni period na koji će se dimenzionirati kanalska mreža:

1. Iz geomehaničke i vegetacijske karte odredi se tip tla, vegetacijski pokrov i površinska obrada tla na analiziranom slivu.
2. Iz toga se proračuna broj kiše (N).
3. Izabere se trajanje kiše, a budući da se ponavlja postupak s različitim trajanjima kiše, izbor se mora kretati u granicama od 0,5 do 8 vremena koncentracije (pri tome se podrazumijeva da je vrijeme koncentracije — vrijeme potrebno da kap vode dođe iz najudaljenije točke sliva do izlaznog profila). (sati)
4. Iz ITP (intenzitet-trajanje-povratni period) krivulje za zadano se trajanje kiše očitava bruto kiša, a zatim odredi efektivna oborina. Time je ujedno definirana i veličina intenziteta efektivne oborine.
5. Na temelju prethodno provedene regionalne analize uzima se vrijednost klimatskog faktora ili se u slučaju da takve analize nema tretira da je klimatski faktor jednak jedinici.
6. Odredi se vrijeme podizanja trenutačnog hidrograma.
7. Izračuna se odnos vremena trajanja kiše i vremena podizanja trenutačnog hidrograma, te se odredi faktor redukcije vrha hidrograma.
8. Na osnovu svega prethodnog definira se maksimalna protoka.

Račun se ponavlja za razna trajanja kiše pa se tako definira krivulja odnosa protoka i vremena koja ima maksimum u određenoj točki.

$$Q = A * X * Y * Z * 16,6 \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

gdje je: A — površina sliva (km²)
 X — intenzitet kiše (mm/min)
 Z — faktor redukcije vrha hidrograma

Taj se maksimum izabire za dimenzioniranje kanala, ali mu je prethodno potrebno dodati i bazno otjecanje. Cijeli je proračun moguće ponoviti i za različite povratne periode kiša. Time se definira cijela porodica krivulja protoka vrha hidrograma izravnog otjecanja u funkciji povratnog perioda i trajanja kiše.

Metoda je preporučljiva za projektiranje odvodne mreže na malim poljoprivrednim površinama na kojima se u principu ne raspolaže s mjenim hidrometrijskim podacima već samo mjerenja kiša. Također je naglašeno da su neki predloženi izrazi preuzeti iz literature, i da se kao takvi ne mogu koristiti u našim klimatskim uvjetima, već je potrebno za naše pojedine regije mjerenjem utvrditi njihove realnije međuovisnosti.

7.4. Proračun maksimalnih dotoka na crpne stanice po Z. Srebrenoviću (1987.)

Mehanička evakuacija voda pomoću crpnog pogona, kako je već ranije rečeno, koristi se za odvodnjavanje melioracijskih površina u slučajevima kada se ne može postići potpuna, gravitacijska odvodnja zbog neadekvatnih ispusnih objekata ili zbog visokih vanjskih vodnih razina u glavnom recipijentu.

Prema (Z.Srebrenoviću, 1987) potrebni kapacitet crpnog pogona može se odrediti primjenom:

- drenažnih koeficijenata korištenih u projektiranju kanala i ostalih objekata površinske i podzemne odvodnje,
- empirijskih formula,
- studije postojećih instaliranih pogona,
- izravnom analizom korištenjem hidroloških postupaka.

Crpke se redovito dimenzioniraju na manju protoku od one koju smatramo mjerodavnom za hidrauličko dimenzioniranje gravitacijske odvodnje, jer je ekonomski nedopustivo da se crpni agregati proračunavaju na maksimalnu protoku Q_{\max} vršnog segmenta vala koji traje relativno kratko vrijeme, naročito kod malih slivova. Stupanj redukcije iznosi:

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{Q_{\max}}$$

gdje je Q_c – kapacitet crpke ovisan o mnogim činiocima: veličini i padu slivne površine, fizičkim faktorima područja, intenzitetu, veličini i trajanju oborina i otjecanja, uvjetima površinske i podzemne retardacije, veličini procjeđivanja i sl. Ti se činioci moraju poznavati, ako se kapacitet crpke određuje hidrološkim postupcima, a dobivaju se na temelju topografskih, meteoroloških i pedoloških podloga.

Za male površine veličine do 300 ha korist mehaničke odvodnje se lako postiže, te kapacitet crpke približno mora odgovarati onom koji bi zahtijevao gravitacijski ispušt.

Tamo gdje ne postoje lokalna iskustva za definiranje kapaciteta crpke, isti se može proračunati na malim površinama s površinskom odvodnjom primjenom pojednostavljenog hidrološkog proračuna. Taj proračun uvjetuje da je potreban kapacitet crpke identičan otjecanju 24-satne oborine određene frekvencije pojave, za koji se procjenjuje da će dati ekonomičan učinak zaštite od plavljenja odvodnjavanog područja. Ovoj veličini obično se dodaje i količina temeljnog podzemnog tečenja, te ju se smanjuje za veličinu raspoloživog površinskog i podzemnog akumuliranja. U razmatranju ovih potonjih faktora oborinska razdoblja duža od 24 sata se mogu također uključiti u analizu. Kod odvodnje travnatih površina obično se usvaja 2-godišnja frekvencija, za oranične kulture 3 do 5-godišnja, i za specijalne visoko vrijedne kulture (povrće) 10 do 20-godišnja frekvencija jednodnevne oborine.

Kapacitet crpne stanice namijenjene evakuaciji samo podzemnog režima tečenja, npr. na navodnjavanim površinama, može se odrediti iz projektnog kapaciteta podzemnog drenažnog sustava.

Kod velikih melioracijskih površina nužno je analizirati mnogobrojne međusobno povezane faktore površinskog i podzemnog režima tečenja u određivanju kapaciteta crpne stanice. Budući da su uključeni visoki troškovi instaliranja, funkcioniranja i održavanja velikih crpnih stanica, te se postiže nejednolikost realizacije očekivanih koristi, na velikim površinama. to je nužno kod određivanja kapaciteta primijeniti specijalne hidrološko-ekonomske analize temeljene na

odnosu troškovi — koristi (cost-benefit). Naime, povećanjem kapaciteta rastu svi troškovi crpnog agregata što je u neskladu s porastom postignutih koristi.

Preliminarni proračun potrebnog kapaciteta crpne stanice, koji ne ulazi u ekonomske aspekte, može se učiniti temeljem približnog hidrograma unutarnjih voda kod stanice, polazeći od tolerantnog vremena plavljenja t_d retencijskih površina melioracijskog područja.

Damo li vodnom valu oblik istokračnog trokuta s bazom dvostrukog vremena koncentracije t_k i s visinom Q_{\max} (za definiranje maksimalnih protoka s ravnih melioracijskih površina) (slika 7), tada se može jednostavnim računskim operacijama definirati:

— kapacitet crpke

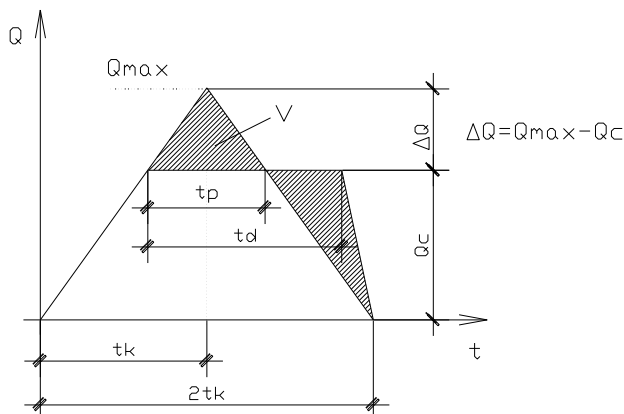
$$Q_c = Q_{\max} - \sqrt{\frac{Q_{\max} V}{t_k}}$$

— vrijeme intervencije redukcije hidrograma

$$t_p = \frac{2V}{Q_{\max} - Q_c}$$

— vrijeme tolerantnog plavljenja retencijskih površina

$$t_d = \frac{2V}{Q_c} + t_p$$



Slika 7:
Skica hidrograma
unutarnjih voda

Izraze za Q_c i t_d treba međusobno uskladiti, kako bi se za poznato vrijeme plavljenja t_d dobio kapacitet crpke Q_c i adekvatan volumen retardiranja V . Ovaj potonji bitno utječe na veličinu Q_c , također i na kolebanje unutrašnjih vodostaja kod crpne stanice. Stoga se najveći efekti postižu unutrašnjim retardiranjem vode u depresijama pod šumom, livadama ili pašnjacima, koji se očituju stabilizacijom unutrašnjih razina i smanjenjem kapaciteta crpke.

Za takve hidrološke procese, redosljed pojavljivanja vrijednosti u procesu je nepoznat i mogućnost njegovog javljanja slijedi određeni zakon vjerojatnosti u kojemu su promjenjive veličine sasvim slučajne.

8. Zaključak

Prikazana problematika proračuna velikih voda s aspekta statističke obrade osmotrenih nizova podataka i obrade njihove vjerojatnosti pojave dala je osnovni, enciklopedijski uvid u tu problematiku. Zainteresirani se upućuju da detaljnije saznaju iz naše relativno brojne literature iz tog područja, a koja nije nužno i hidrološka. To su D. Srebrenović (1970. i 1986.), Bonacci (1984.), Hrelja (2000.), Žugaj (2000.) i dr. Mogu se također koristiti i gotovi programski statistički paketi koji se nalaze u komercijalnim programima kao što su MS EXCEL, STATGRAF, ili pak najkompleksnija STATISTICA. Svaki od tih programa sadrži i iscrpan manual gdje se mogu dobiti dostatne dodatne informacije.

U domaćoj su se praksi tijekom posljednjih 10—15 godina od hidroloških matematičkih modela uglavnom samo razvijali i primjenjivali modeli vezani uz urbana otjecanja površinskih voda, jer je ta problematika bila u središtu interesa. Što se tiče modelskih metoda obrade velikih voda na hidromelioracijskim područjima, tu se mora konstatirati da, zbog dugogodišnjeg općeg zanemarivanja takvih sustava, koje se odražavalo ne samo odumiranjem poljoprivredne proizvodnje na njima, nego usporedno s tim i nedostatkom većih projektnih poslova, analiza kao i mjerenja na takvim sustavima, koji bi mogli poslužiti za kalibraciju takvih modelskih obrada. Nadajmo se da će povećanjem općega interesa za razvoj poljoprivrede doći do unapređenja metoda obrada hidroloških proračuna odvodnje.

Treba napomenuti i to da je u svijetu u kojem živimo sve problematičnije koristiti klasične probabilističke pristupe. Razlog tome su varijacije klime i antropogeni utjecaji koji su uzrokovali da danas malo gdje raspoložemo s dugim i homogenim nizovima mjerenja hidroloških i meteoroloških podataka. Time značenje statistike i probabilističkih pristupa u hidrologiji nije umanjeno već je samo izmijenjeno. Osnova svega ostaju – IZMJERENI NIZOVI HIDROLOŠKIH PODATAKA.

9. Literatura

- Abbott, M.B. i dr. (1986) An introduction to the European Hydrological System-Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: Structure of a physically-based distributed modeling system. *Jurnal of Hydrology*, 87, 61—77 str.
- Bionić, D., Barbalić, D., Petraš, J. (2002) Creager and Francou-Rodier's Envelopes of Extrem Floods in Danube River Basin in Croatia, Communications, PUB, Kick-off Workshop of the IAHS Decade on Prediction in Ungauged Basins, Brasilia.
- Bonacci, O., (1984) Meteorološke i hidrološke podloge, Priručnik za hidrotehničke melioracije I kolo — Odvodnjavanje, Društvo za odvodnjavanje i navodnjavanje Hrvatske: 39—130, Zagreb
- Bonacci, O., (1987) Karst Hydrology, Springer-Verlag, Berlin
- Bonacci, O., Roglić, S. (1981) Određivanje velikih voda na neizučenim slivovima genetskom metodom. *Vodoprivreda* 13/74:441—586.
- Bonacci, O., Roglić, S. (1985) Hidrološki proračun osnovne kanalske mreže za površinsku odvodnju. Priručnik za hidrotehničke melioracije I kolo — Odvodnjavanje, Knjiga 3. Osnovna mreža, Društvo za odvodnjavanje i navodnjavanje Hrvatske: 63—88, Zagreb.
- Brezak, S. (2000) Hidrološki modeli - danas i sutra. *Hrvatske vode* 8/32:245—251.
- Burnash, R.J.C. (1973) A Generalized Streamflow Simulation System: Conceptual Modeling for Digital Computers. National Weather Service and State of California Department of Water Resources, March.
- Cesarec, K. (1987) Hidrološka analiza velikih vodnih valova na području Gorskog kotara - Fužine—Potok pod grobljem i Crni Lug—Vela voda. Dokumentacija Hidrometeorološkog zavoda iz Zagreba, Zagreb.
- Cesarec, K. (1979) Režim Dunava i njegove reperkusije na probleme odvodnje područja Vuke, Magistarski rad, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Chow, V.T., (1964) Handbook of Applied Hydrology, New York
- Clark, C.O. (1945) Storage and the unit-hydrograph, *Amer. Soc. Civ. Engin.* 110, 1416—1446 str.
- Commons, C.G. (1942) Flood hydrographs, *Civ. Engin.* 12. 571—572 str.
- Deininger, A.R. (1969) Linear programing for hydrologic analyses. *Water resources research*, Vol 5, No. 5, 1105-1109 str.
- Harlin, J. (1991) Development of a process oriented calibration Scheme for the HBV hydrological model. *Nordic Hydrology*, 22, 13—36 str.
- Hrelja, H. (2000) Vjerovatnoća i statistika u hidrologiji, Građevinski fakultet Sarajevo, 299 str.
- Jevđević, V. (1974) Stohastički procesi u hidrologiji, Građevinski fakultet Sarajevo, 300 str.
- Jevđević, V. (1977) Vjerovatnoća i statistika u hidrologiji, Građevinski fakultet Sarajevo. 309 str.
- Jovanović, S. (1974) Parametarska hidrologija, Jugoslavensko društvo za hidrologiju, Beograd
- Leavesley, G.H. i dr. (1983) Precipitation - runoff modeling system, User manual. U.S. Geol. Surv. Water Resour. Invest. Rep. 83-4238 str.
- Linsley, R.K., Kohler, M.A., Paulhus, J.L.H., (1972) Hydrology for Engineers, McGraw-Hill, NY
- Lumb, A.M. i dr. (1990) User's manual for ANNIE, a computer program for interactive hydrologic analyses and data management, U.S.Geol.Surv. Water Resour. Invest. Rep. 89-4080, 236 str.
- Nash, J.E. (1958) Determining runoff from rainfall, *Inst.Civ.Engin. (Ireland) Proc.*10, 163—184 str.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models, Part I. A discussion of principles. *Jurnal of Hydrology*, 10, 282-290 str.
- Ožanić, N., Mičetić, G., Santin, G. (1996) Hidrološki izvještaj o pojavi velikih voda na području Velog Lošinja dana 30.10.1995.godine, Fond stručne dokumentacije Hrvatskih voda VGO Rijeka, Rijeka.
- Ožanić, N., Rubinić, J. (1994) Studija mogućnosti korištenja voda potoka Križ za vodoopskrbu, Fond stručne dokumentacije Hrvatskih voda VGO Rijeka, Rijeka.
- Reitz, W., Kreps, H. (1943) Naherungsverfahren zur Berechnung des erforderlichen Stauraumes fur Zwecke des Hochwasserschutzes, *Deutsche Wasserwirtschaft*, Vol. 38, Heft 1, 15—17 str.

- Rubinić, J. (2003) Inženjerska obrada kratkotrajnih intenziteta oborina, Seminar Praktična hidrologija, Zbornik radova, Zagreb, 20. i 21. ožujak 2003, Hrvatsko hidrološko društvo, 37—60 str.
- Sherman, L.K. (1932) Streamflow from rainfall by the unitgraph method, Eng.News Record, Vol.108.
- Singh, V.P. (1994) Computer models of watershed hydrology, Water Resours Publication, P.O.Box 260026, Highlands Ranch, Colorado 80126-0026, U.S.A.
- Snyder, F.F. (1938) Synthetic unit graphs, Amer. Geophys. Union Trans., 19 (1), 447—454 str.
- Srebrenović, D. (1960) Zapremina vodnog vala velikih voda s malih slivnih površina, Vodoprivreda Jugoslavije III/10, Organ savezne komisije za vodoprivredu, Beograd, 3—18 str.
- Srebrenović, D. (1970) Problemi velikih voda. Tehnička knjiga, Zagreb, 271—316 str.
- Srebrenović, D. (1986) Primijenjena hidrologija. Tehnička knjiga, Zagreb, 509 str.
- Srebrenović, Z. (1985) Elementi dimenzioniranja crpnih stanica. Priručnik za hidrotehničke melioracije I kolo — Odvodnjavanje, Knjiga 3. Osnovna mreža, Društvo za odvodnjavanje i navodnjavanje Hrvatske: 63—88, Zagreb.
- Sugawara, M. i dr. (1974) Tank model and its application to Bird Creek, Wollombi Brook, Bikin River, Kitsu River, Sanaga River and Nam Mune. Research note of the National Research Center for Disaster Prevention, No. 11. 1—64 str.
- Trninić, D. (1997) Regional Hydrological Analysis of Low Streamflow in the Republic of Croatia, IXth World Congress, IWRA, Canada, Proceedings, Vol.2, 359—362 str.
- Trninić, D. (1998) Regionalna analiza malih voda Hrvatske, Hrvatske vode, Vol.6, br.24, 233—245 str.
- U.S. Soil Conservation Service (1964) Hydrology, Section LV, SCS Natl. Engin. Handbook, Washington D.C.
- Zelenhasić, E., Ruski, M. (1991) Inženjerska hidrologija. Naučna knjiga, Beograd, 562 str.
- Žugaj, R., (1995) Regionalna hidrološka analiza u kršu Hrvatske, monografija, Hrvatsko hidrološko društvo, Zagreb, 139 str.
- Žugaj, R., (2000) Hidrologija, Rudarsko-geološko naftni fakultet Zagreb, Zagreb
- Žugaj, R., (2003) Regionalna hidrološka analiza, Seminar Praktična hidrologija, Zbornik radova, Zagreb, 20. i 21. ožujak 2003, Hrvatsko hidrološko društvo, 79—96 str.
- Williams, H.M. (1945) Discussion, Military airfields: Design of drainage facilities, by G.A. Hathaway. Amer. Soc. Civ. Engin. Trans. 110. 820—826 str.
- Wilson, E.M. (1974) Engineering Hydrology, The MacMillan Press Ltd., London, 232 str.
- WMO (1994) Guide to Hydrological practices. WMO-No.168 — Fifth edition.

4

NASIPI U HIDROMELIRACIONIM SUSTAVIMA

Hidraulička analiza nestacionarnog tečenja kroz hidromeliracione nasipe

Prof. dr. Goran Gjetvaj
Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Vanja Travaš, dipl. ing. Građ
Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci

1. Uvod
2. Osnovne jednadžbe nestacionarne filtracije
3. Opis strujanja kroz anizotropnu nezasićenu poroznu sredinu
 - 3.1 Strujanje kroz anizotropnu poroznu sredinu
 - 3.2 Tekuća i kruta faze
 - 3.3 Energija dodirnih točaka dviju različitih faza
 - 3.4 Apsorbirana voda
 - 3.5 Zasićenost tla
 - 3.6 Stupanj zasićenosti tla
 - 3.7 Strujanje vode kroz djelomično zasićeno porozno tlo
 - 3.8 Kapilarni tlak
 - 3.9 Makroskopsko promatranje kapilarnog tlaka
 - 3.10 Kapilarni tlak i krivulja retencije
 - 3.11 Učinak zarobljenog zraka
 - 3.12 Histereza krivulje retencije
 - 3.13 Raspodjela vertikalne zasićenosti vodonosnika
 - 3.14 Ovisnost koeficijenta filtracije o stupnju zasićenosti tla
 - 3.15 Van Genutchenov model
 - 3.16 Van Genutchenovi parametri
4. Model toka vode kroz tijelo nasipa
 - 4.1 Svrha numeričkog modela toka vode kroz tijelo nasipa
 - 4.2 Nestacionarno strujanje kroz nasipe
 - 4.3 Diskretizacija prostora
 - 4.4 Diskretizacija vremena
 - 4.5 Diskretizacija vladajuće jednadžbe
 - 4.6 Definiranje rubnih i početnih uvjeta
 - 4.7 Modeliranje anizotropije
 - 4.8 Modeliranje postepenog zasićenja tijela nasipa
5. Primjer modela toka vode kroz tijelo nasipa

- 5.1 Svojstva nasipa
- 5.2 Svojstva numeričkog modela
- 5.3 Rezultati numeričkog modela
- 6. Zaključak
- 7. Popis literature

1. Uvod

U hidrotehničkoj praksi se za navodnjavanje i odvodnjavanje često koriste melioracioni kanali. Melioracioni kanali su najčešće ukopani ali se zbog topografije terena te iz drugih razloga za izradu kanala mogu koristiti i nasipi.

Spomenuti nasipi su na hidromelioracionim kanalima najčešće izloženi djelovanju vode sa uzvodne strane samo u periodu velikih voda. Prije nadolaska velikih voda su nasipi nezasićeni pa se pri pojavi velikih voda javlja tečenje (procjeđivanje) kroz nezasićeni nasip. Nasip se postepeno zasićuje, a može doći i do pojave vrelna plohe sa nizvodne strane. Pojava vrelna plohe može ugroziti stabilnost nasipa te ju svakako treba izbjeći.

Tema ovog rada je hidraulička analiza nestacionarnog tečenja kroz nezasićeni anizotropni nasip sa ciljem određivanja napredovanja vodnog lica te provjere mogućnosti pojave vrelna plohe.

Kod izgradnje nasipa najveći dio troškova otpada na prijevoz materijala od nalazišta do mjesta ugradnje. Ekonomičnost se znatno poboljšava uporabom materijala koji se nalazi u neposrednoj blizini građevine, pa projekt nasipa valja tome prilagoditi. Glede odabira materijala za ugradnju u nasip kriterij je postizanje odgovarajuće čvrstoće, krutosti i propusnosti. Može se uporabiti svaki zemljani krupnozrnati materijal, ako se oblik, dimenzije i konstrukcija nasipa prilagode njegovim osobinama.

U okviru ovoga rada analizirani su hidraulički aspekti toka kroz nasip, što svakako ne umanjuje potrebu za kontrolom drugih uvjeta koje materijali za izgradnju nasipa i oblici nasipa moraju zadovoljiti, kao što su npr. stabilnost kosina, ...

Iako je u radu opisan samo jedan primjer procjeđivanja kroz nezasićenu anizotropnu sredinu, prikupljena i sistematizirana saznanja o toku vode kroz zasićenu kao i kroz nezasićenu poroznu sredinu se mogu primjeniti i na niz drugih slučajeva.

2. Osnovne jednadžbe nestacionarne filtracije

Vladajuća jednadžba nestacionarne filtracije, izvest će se koristeći se *principom kontinuuma* i *zakonom o održanju mase*. Princip kontinuuma vrijedi ukoliko je najmanja cjelina promatranog prostora jednaka ili veća od reprezentativne elementarne zapremine. Takav pristup omogućuje da se karakteristične veličine podzemnog toka, prikažu neprekinutim funkcijama prostornih koordinata i vremena. Za analizu strujanja na makroskopskoj skali promatranja, izdvaja se zapremina tla koji ima dimenzije Δx , Δy i Δz , s bridovima paralelnim Kartezijevim koordinatnim osima. Njegova veličina

zadovoljava princip kontinuum, a naziva se *kontrolna zapremina*. Takav je element prikazan na slici 2.1. Koristeći se zakonom o očuvanju mase, moguće je formirati jednadžbe za opisivanje promjene mase vode sadržane u kontrolnoj zapremini, u vremenskom odsječku Δt . Ta se promjena prikazuje kao razlika mase vode koja ulazi i izlazi iz takve zapremine. Za pojedine smjerove strujanja, one poprimaju sljedeće vrijednosti (jednadžbe 2.1, 2.2 i 2.3).

$$\Delta m_x = \rho \left[q_x \left(x - \frac{\Delta x}{2}, y, z \right) - q_x \left(x + \frac{\Delta x}{2}, y, z \right) \right] \Delta y \Delta z \Delta t \quad (2.1)$$

$$\Delta m_y = \rho \left[q_y \left(x, y - \frac{\Delta y}{2}, z \right) - q_y \left(x, y + \frac{\Delta y}{2}, z \right) \right] \Delta x \Delta z \Delta t \quad (2.2)$$

$$\Delta m_z = \rho \left[q_z \left(x, y, z - \frac{\Delta z}{2} \right) - q_z \left(x, y, z + \frac{\Delta z}{2} \right) \right] \Delta x \Delta y \Delta t \quad (2.3)$$

U prikazanim jednadžbama ρ označava gustoću tekućine, a q_x , q_y i q_z specifične protoke u odgovarajućim smjerovima. Ukoliko se funkcija specifičnog protoka razvije u *Taylorov red* u okolini točke $P(x,y,z)$, i u njemu zanemare članovi viših potencija, dobivaju se sljedeći izrazi (2.4, 2.5 i 2.6).

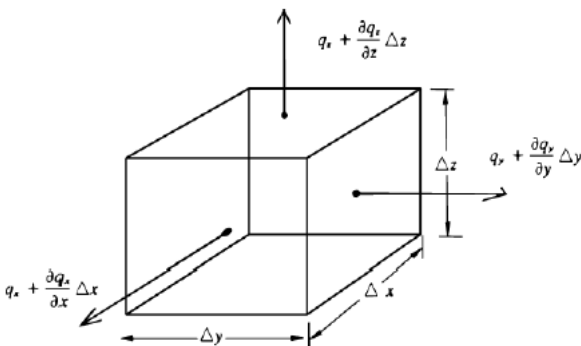
$$\Delta m_x = -\rho \frac{\partial q_x}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t \quad (2.4)$$

$$\Delta m_y = -\rho \frac{\partial q_y}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t \quad (2.5)$$

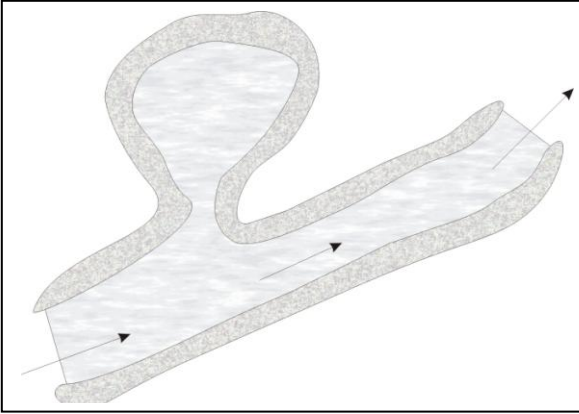
$$\Delta m_z = -\rho \frac{\partial q_z}{\partial z} \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t \quad (2.6)$$

Zbrajajući promjenu mase u x , y i z smjeru (jednadžbe 2.4, 2.5 i 2.6), dobiva se ukupna promjena mase vode sadržane u kontrolnoj zapremini (2.7).

$$d(\Delta M) = \Delta m_x + \Delta m_y + \Delta m_z = -\rho \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t$$



Slika 2.1:
Kontrolna zapremina



Slika 2.2:
Primjer mrtve pore

Za nastavak izvođenja vladajuće jednadžbe nestacionarne filtracije, mora se definirati ukupna količina vode sadržane u kontrolnoj zapremini. Kako se promjena mase vode prati unutar poroznog tla, očito je da se za definiranje ukupne vrijednosti sadržane vode mora raspolagati parametrima njegove poroznosti (n). Ukoliko su oni poznati, masa vode definirana je jednadžbom 2.8.

$$\Delta m = \rho n \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.8)$$

U tečenju vode kroz tlo, ne sudjeluje sva voda sadržana u njemu. Razlog tome su one pore tla koje se nalaze izvan glavnog toka. Naime, one su s glavnim tokom povezane samo jednom njihovim stranom, što dovodi do toga da voda koja je sadržana u njima nije u mogućnosti priključiti se ostatku vode koja struji. Te pore nazivaju se *mrtve pore*. Tipičan primjer takve pore tla prikazan je na slici 2.2.

Kako je namjera poglavlja prikazati način izvođenja jednadžbe koja simulira tečenje vode u nestacionarnim uvjetima, za definiranje količine vode koja sudjeluje u tečenju, mora se koristiti vrijednost efektivne poroznosti (n_e). Primjenjujući rečeno, može se odrediti ukupna količina promjene vode u vremena (2.9).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\Delta M) = \frac{\partial}{\partial t}(\rho n_e \Delta x \Delta y \Delta z) \quad (2.9)$$

Povezivanjem jednadžbe (2.9) s jednadžbom 2.7, dobiva se izraz koji opisuje vremensko variranje količine vode unutar kontrolne zapremine (2.10).

$$-\rho \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t = \frac{\partial}{\partial t}(\rho n_e \Delta x \Delta y \Delta z) \quad (2.10)$$

Jacob Bear (1972), godine pronalazi da se desna strana gornje jednadžbe (2.10), može pisati u nešto drugačijem obliku (2.11). Takav je pristup omogućen ukoliko je promatrana kontrolna zapremina u potpunosti *zasićena* (saturirana).

$$\rho S_s \frac{\partial h}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.11)$$

U gornjem izrazu S_s predstavlja količinu vode koju će otpustiti jedinična zapremina poroznog tijela, i to onda kada se visina stupca vode u njemu spusti za jedinicu. Ta veličina naziva se *specifični koeficijent uskladištenja* (S_s). Za opis nestacionarnog strujanja vode kroz vodonosni sloj, potrebno je vrijednost specifičnog koeficijenta uskladištenja pomnožiti s njegovom debljinom (M). Dobivena vrijednost naziva se *koeficijent uskladištenja* (S). Uvrštavajući izraz 2.11 u jednadžbu 2.10 i dijeljenjem iste sa $\delta \Delta x \Delta y \Delta z$ formira se konačni oblik vladajuće jednadžbe nestacionarne filtracije (2.12).

$$-\left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.12)$$

$$- \operatorname{div} \vec{q} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.13)$$

Dobivena jednadžba pokazuje promjenu specifičnog protoka u svakoj točki elastičnog vodonosnog sloja i poznata je pod imenom **jednadžba kontinuiteta** (2.13). Takvo ime je dobila iz razloga što je izvedena koristeći se zakonom o održanju mase. Nadalje, specifični protok može se na osnovi Darcyevog zakona izraziti u ovisnosti od piezometarskog potencijala (2.14).

$$\vec{q} = -k \operatorname{grad} h \quad (2.14)$$

Uvrštavanjem posljednjeg izraza u jednadžbu 2.13, dobiva se jednadžba koja opisuje nestacionarni tok tekućine kroz izotropno i homogeno porozno tlo (2.15). Takva jednadžba je u matematičkom smislu parcijalna diferencijalna jednadžba drugog reda, za čije je rješavanje potrebno poznavati *rubne i početne uvjete*. Kako se govori o nestacionarnom procesu, očito je da će se rješenja vladajuće jednadžbe (2.15) mijenjati u vremenu. Da bi se dobila rješenja, potrebno je poznavati vrijednost početnog rasporeda potencijala unutar poroznog tijela. Početni uvjeti definirani su poznavanjem rasporeda potencijala na početku promatranja procesa. Za slučaj nestacionarne filtracije, osim diskretizacije prostora, potrebno je izvršiti i *diskretizaciju vremena*. Taj postupak provodi se tako da se odabrani period promatranja podijeli na diskretne vremenske intervale. Rješenja jednadžbe nestacionarne filtracije, nalaze se na njihovim krajevima.

$$\nabla^2 h = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.15)$$

U jednadžbi nestacionarne filtracije (2.15) je sa T označena *transimisivnost* koja je definirana kao umnožak koeficijenta filtracije (k) i debljine vodonosnog sloja (M) kroz kojeg se odvija tečenje (2.16).

$$T = k M \quad (2.16)$$

3. Opis strujanja kroz anizotropnu nezasićenu poroznu sredinu

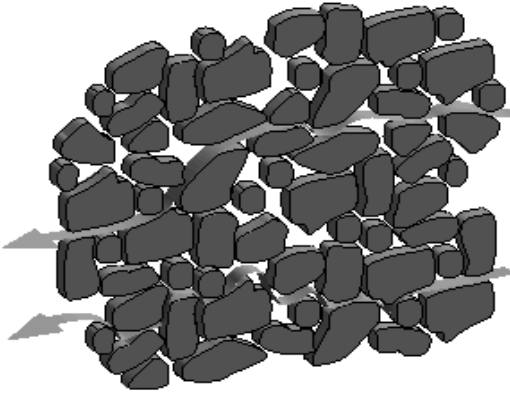
Anizotropija poroznog tla označava različitu vrijednost koeficijenta filtracije na način da on varira ovisno o smjeru strujanja vode. Postepeno vremensko zasićenja tla dovodi do odgovarajućeg povećanja koeficijenta filtracije.

3.1 Strujanje kroz anizotropnu poroznu sredinu

Anizotropija se definira kao svojstvo materijala s raznim svojstvima u različitim smjerovima. U vodonosnim slojevima anizotropija se manifestira na način da koeficijent filtracije mijenja svoju vrijednost ovisno o smjeru strujanja vode. Na slici 3.1 su prikazane dvije vodoravne strujnice koje prolaze kroz porozno tlo.

Promatrajući čestice tla, uočava se da je njihova prosječna vodoravna dimenzija veća od vertikalne. Razlog tomu je način taloženja čestica tla za vrijeme formiranja vodonosnog sloja. Da bi se potanje objasnio pojam anizotropije, zamišljaju se dvije čestice vode, koje kroz takvo tlo putuju jednakim brzinama. Prva čestica se giba u okomitom, a druga u vodoravnom smjeru. Čestica tekućine koja kroz takav medij putuje vertikalno (od gore prema dolje), na svom putu zaobilazi dulju stranu čestice tla, dok ona čestica koja se giba u vodoravnoj ravnini zaobilazi kraću stranu te čestice. Promatrajući veličinu prevaljenih putova u jednakom vremenskom odsječku, primjećuje se da je čestica vodoravne putanje prevalila bitno kraći put od one s vertikalnom putanjom. Na makroskopskoj skali promatranje razlike u prevaljenim putovima objašnjava se na način, da se česticama pridodaju različite brzine. Takav je pristup moguć ukoliko se za brzinu procjeđivanja, koja je definirana Darcyevim zakonom, usvoje dvije različite vrijednosti koeficijenta filtracije. Na taj način, razlikuju se vertikalni (k_v) i vodoravni koeficijent filtracije (k_h). U izotropnim i homogenim vodonosnim slojevima, koeficijent filtracije ima konstantnu vrijednost koja ne ovisi o smjeru strujanja vode niti o trenutnom položaju čestice. U takvim sredinama brzina procjeđivanja određuje se Darcyevim zakonom u kojem je koeficijent filtracije predstavljen sa skalarnom vrijednošću. Ukoliko se promatrano strujanje odvija unutar anizotropnog poroznog materijala, koeficijent filtracije varira ovisno o smjeru tečenja. Kako bi u jednadžbama toka uzeli u obzir njegovu promjenjivost, skalarna vrijednost zamjenjuje se *tenzorskom veličinom*. U matematičkoj konotaciji tenzori se prikazuju matričnim zapisom. Na taj način koeficijent filtracije za trodimenzionalnu anizotropnu sredinu poprima sljedeću vrijednost, a naziva se *tenzorom filtracije* (3.1).

$$\begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$



Slika 3.1:
Strujanje kroz anizotropno tlo

Analogno Darcyevom zakonu za izotropnu sredinu, brzine procijeđivanja u trodimenzionalnoj anizotropnoj sredini se dobivaju množeći tenzor filtracije s hidrauličkim gradijentom, napisanim u matričnom obliku (3.2).

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\partial h / \partial x \\ -\partial h / \partial y \\ -\partial h / \partial z \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Koristeći se pravilima matrične algebre moguće je izraziti brzine procijeđivanja za pojedine smjerove tečenja vode (3.3).

$$\begin{aligned} v_x &= -k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} - k_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} - k_{xz} \frac{\partial h}{\partial z} \\ v_y &= -k_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} - k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} - k_{yz} \frac{\partial h}{\partial z} \\ v_z &= -k_{zx} \frac{\partial h}{\partial x} - k_{zy} \frac{\partial h}{\partial y} - k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Tenzor filtracije opisuje propusna svojstva tla u promatranoj točki. Vidljivo je da se on sastoji od devet komponenata. Svaka komponenta predstavlja skalarnu vrijednost koeficijenta filtracije za odgovarajući pravac gibanja vode. Tenzor filtracije je simetričan tenzor, što govori da su njegove suprotne komponente, s obzirom na njegovu dijagonalu, međusobno jednake (3.4).

$$k_{yx} = k_{xy} \quad , \quad k_{zx} = k_{xz} \quad , \quad k_{zy} = k_{yz} \quad (3.4)$$

U konačnosti, ukoliko se koordinatne osi Kartezijevog koordinatnog sustava podudaraju s pravcima za koje je definiran pojedini koeficijent filtracije, tenzor filtracije može se pisati na sljedeći način (3.5).

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\partial h / \partial x \\ -\partial h / \partial y \\ -\partial h / \partial z \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Ukoliko je ispunjen posljednji zahtjev, brzine procijeđivanja za anizotropan medij mogu se definirati kao umnožak odgovarajućeg koeficijenta filtracije i hidrauličkog gradijenta za pojedini pravac koordinatne osi. Množeći takve brzine s debljinom vodonosnog sloja od jednog metra, dobivaju se vrijednosti specifičnih protoka (3.6).

$$\begin{aligned} v_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x} &\Rightarrow q_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x} \\ v_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y} &\Rightarrow q_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y} \\ v_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z} &\Rightarrow q_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Uvrštavanjem izraza specifičnih protoka u jednadžbu 2.12, formira se parcijalna diferencijalna jednadžba drugog reda, koja opisuje nestacionarni tok kroz trodimenzionalan, anizotropan porozan medij (3.7).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.7)$$

Prethodnu jednadžbu nije moguće u općem slučaju direktno riješiti (analički), pa se za iznalaženje njenih rješenja uglavnom koriste numeričke metode. Način uzimanja u obzir učinka anizotropije takvim pristupom njenog rješavanja, prikazat će se u primjeru dvodimenzionalnog strujanja kroz anizotropnu poroznu sredinu (3.8).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \Rightarrow k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Ukoliko je vodoravni koeficijent filtracije veći od vertikalnog, učinak anizotropije se može uzeti u obzir na dva načina. Prvi način se sastoji u formiranju jednadžbi u kojima će biti posebno zapisan vodoravni a posebno vertikalni koeficijent filtracije. Drugi pristup je da se realno područje modela *distorzira*. Oba pristupa će za iste hidrogeološke uvijete dati jednake rezultate.

U ovom radu je prikazan pristup korištenjem distorzije modelom obuhvaćenog prostora pod čime se podrazumijeva povećanje njegovih vodoravnih dimenzija, množeći ih s faktorom ξ čija vrijednost je jednaka korijenu omjera vertikalnog i vodoravnog koeficijenta filtracije (3.9).

$$\zeta = \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (3.9)$$

Nakon provedene diskretizacije prostora modela, odabrani prostorni inkrement u x smjeru (Δx) množi se s faktorom ξ . Takvim postupkom njegova se vrijednost mijenja, čime se dobiva fiktivno diskretizacijsko područje. Pojam fiktivnog diskretizacijskog područja podrazumijeva transformaciju vodoravnih dimenzija, na predhodno definiran način (3.10).

$$x_t = x \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \Rightarrow x_t = x \zeta \quad (3.10)$$

Zamjenom transformirane vodoravne koordinate (x_t) s njenom starom vrijednosti (x) unutar jednadžbe toka (3.8), dobiva se njen pojednostavljeni oblik (3.11). Na taj način, za potrebe numeričkog deriviranja jednadžbe 3.8, problem učinka anizotropije rješava se indirektnim putem, uzimajući ga u obzir povećanim prostornim inkrementom u x smjeru (Δx_t) dok odabrani prostorni inkrement u y smjeru (Δy), s kojim se formirala diskretizacijska mreža, ostaje nepromijenjen.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x_t^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.11)$$

Nakon dobivene strujne mreže, protok kroz takvu sredinu računa se na nešto drugačiji način od strujanja kroz izotropan medij. Razlika je u zamjeni koeficijenta filtracije u jednadžbi za proračun protoka s njegovom ekvivalentnom vrijednošću za anizotropan medij. *Ekvivalentni koeficijent filtracije* definiran je korijenom umnoška njegove vodoravne i vertikalne komponente (3.12).

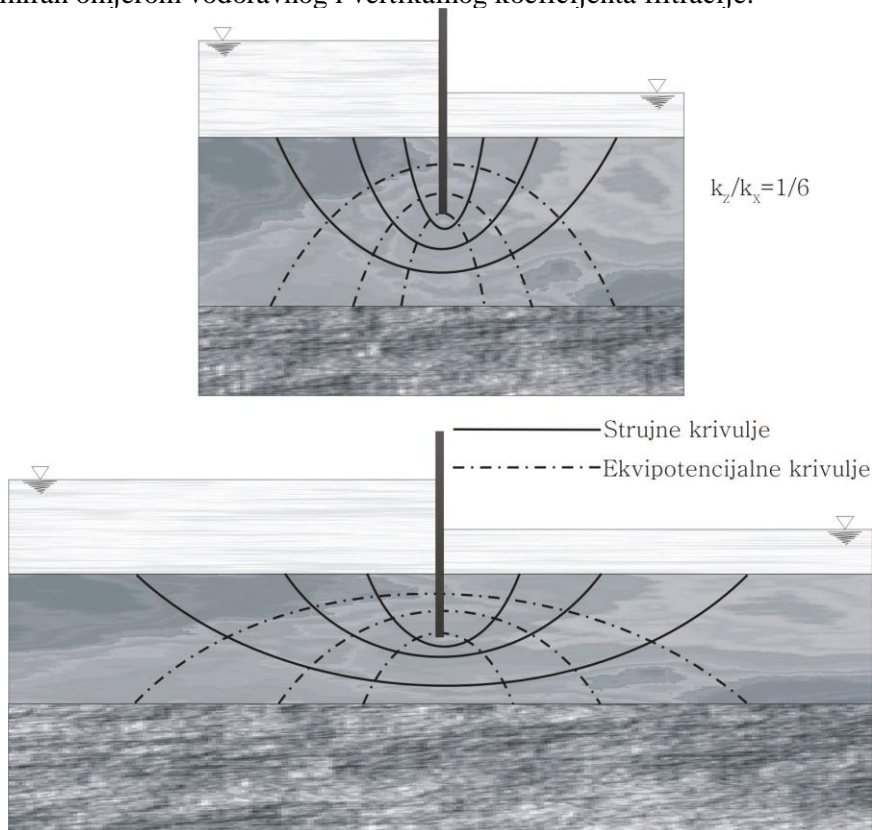
$$k_e = \sqrt{k_x k_y} \quad (3.12)$$

Za strujne mreže dobivene za tok kroz anizotropnu sredinu ne vrijedi pravilo okomitosti ekvipotencijalnih i strujnih krivulja. Kut između ekvipotencijala i strujnica (kut Φ) je ovisan o faktoru ξ , a njegovu vrijednost može se izračunati na sljedeći način (3.13).

$$\delta = 2 \arctg \frac{1}{\xi} \quad (3.13)$$

Na slici 3.2 prikazana je usporedba strujnih mreža dobivenih za filtracijski tok ispod vodonepropusnog zagata, ostvaren kroz izotropno (a) i anizotropno (b) porozno tlo. Primjećuju se razlike u kutovima između strujnih (puna linija) i ekvipotencijalnim krivulja (isprekidana linija).

Po načinu nastajanja anizotropija može biti posljedica načina taloženja krute faze (skeleta) unutar sloja kao i izmjenjivanjem slojeva vrlo različite vodopropusnosti (*uslojene strukture*). U praktičnim razmatranjima, svojstvo anizotropije poroznog tla, mjeri se *koficijentom anizotropije (A)*. On je definiran omjerom vodoravnog i vertikalnog koficijenta filtracije.



Slika 3.2: Strujne mreže za tok kroz izotropno (a) i anizotropno (b) porozno tlo

3.2 Tekuća i kruta faza

U nezasićenim poroznim sredinama strujanje tekućina se može odvijati kroz prostor koji nije u potpunosti ispunjen kapljevinom, već se u dijelu pora nalazi i plin. Za nezasićene vodonosne slojeve ta druga tekućina (plin) je u većini slučajeva zrak. Iz tog razloga, gibanje vode nije više uzrokovano samo gravitacijskim silama već i silama *međumolekularnog djelovanja* između vode, zraka i čestica poroznog tijela. Za razumijevanje i opisivanje gibanja vode u takvim uvjetima, potrebno je sagledati način međudjelovanja te tri tvari na mikroskopskoj razini. Nakon spoznavanja njihovih interakcija, prijelaz s mikroskopskog na makroskopsko promatranje tečenja, omogućit će postupak osrednjavanja pojedinih veličina toka. Za opisivanje gibanja vode u takvom tlu, potrebno je promatrati njeno strujanje u blizini čestica poroznog tla, uz prisustvo zraka koji

djelomično ispunjuje prazan prostor njegovih pora. Kako bi se olakšalo opisanje takvog toka, uvodi se pojam *faze*. Faza je definirana kao homogeni dio prostora koji je odvojen od ostalih dijelova (ostalih faza) oštro definiranom granicom (*međufazna granica*).

Uobičajena podjela je na krutu i tekuću fazu. Tekuća faza se još može podijeliti na kapljevinu i na plin. I kapljevinu i plin se ubrajaju u tekuću fazu jer po definiciji oboje počinju teći i pri najmanjim posmičnim naprezanjima. U inženjerskoj praksi se kapljevinu često naziva tekuća faza a plin (zrak) plinovita faza. Unutar poroznog tijela može se nalaziti samo jedna plinovita faza i to iz razloga što se plinovi lako miješaju pa među njima ne postoji vidljiva granica. Za slučaj miješanja dviju ili više tekućih faza, moguće ih je promatrati kao odvojene, ukoliko su vidljive njihove granice.

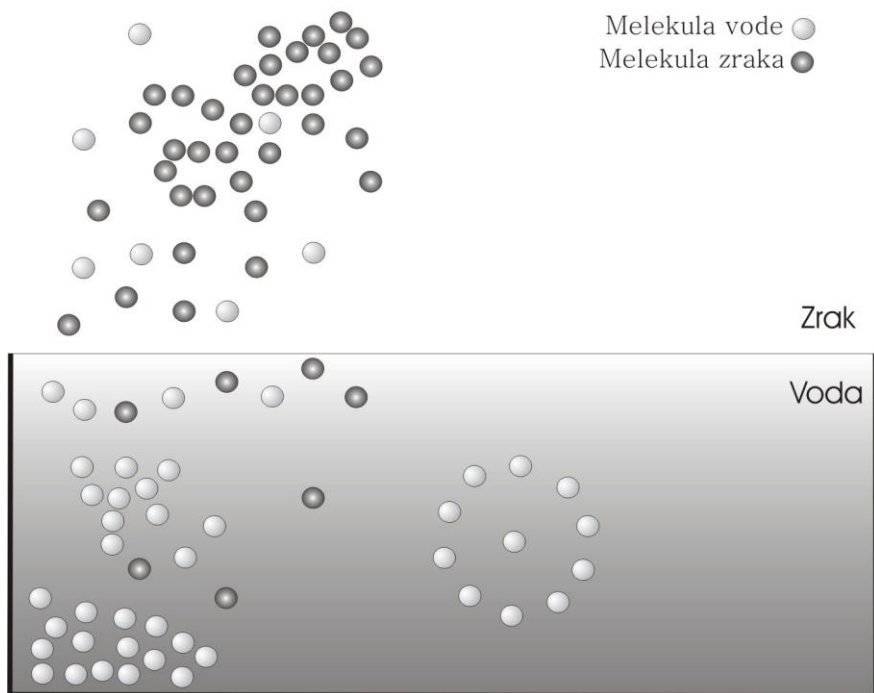
3.3 Energija dodirnih točaka dviju različitih faza

Da bi se objasnio pojam *energije dodirnih točaka*, zamišlja se posuda u kojoj se nalaze dvije tekućine, i to jedan kao kapljevinu, a druga u plinovitom agregatnom stanju. Usvaja se pretpostavka da među njima nije došlo do miješanja. Blizu površine tekuće faze (na udaljenosti od samo nekoliko molekula), koju se ujedno smatra *međufaznom granicom*, svojstva obe tekućine su bitno različita od onih unutar njih. Razlog takve različitosti ponašanja može se doznati, ukoliko se sagledaju svojstva tvari na molekularnoj razini. Na slici 3.3 prikazana je zamišljena posuda u kojoj se nalazi kapljevinu i plin. Tamnijim točkama su prikazane molekule kapljevine, a svjetlijim točkama molekule plina. Molekule tekućina koje se nalaze unutar pojedine faze, okružene su molekulama iste vrste, težine i istog međusobnog razmaka. Iz tog razloga je njihova prosječna privlačna sila jednaka u svim smjerovima, pa rezultirajuća sila privlačenja postaje jednaka nuli. Približavanjem površini kapljevine situacija se bitno mijenja. Molekule uz samu površinu su podložne rezultirajućoj privlačnoj sili prema unutrašnjosti kapljevine. Rad te sile uzrokuje povećanje broja dodirnih točaka, što dovodi do toga da se molekule iz unutrašnjosti tekućine pomiču prema površini. Ukoliko na kapljevinu u posudi ne djeluju vanjski utjecaji, površina vodnog lica će spontano poprimiti formu koja odgovara minimumu energije u prevladavajućim uvjetima. Na molekularnoj razini, zbog stalnog pomicanja molekula (*Brownovo gibanje*), ne postoji oštro definirana granica razdvajanja tekućina. Ta tanka površina (široka svega nekoliko promjera molekula) u kojoj dolazi do miješanja molekula obe tekuće faze, naziva se *tranzicijsko područje*. Unutar tog područja može se definirati *energija dodirnih točaka tekućina*, kao razlika energija molekula u njemu i energije koju bi imale da se nalaze unutar svojih vlastitih polja.

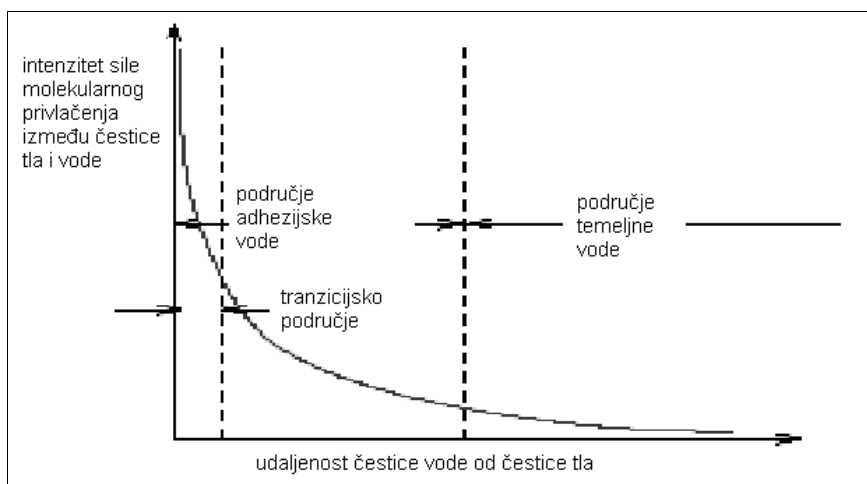
3.4 Adsorbirana voda

U prijašnjem poglavlju razmatrane su pojave koje se javljaju na granici kapljevine i plina. Voda, koja je prisutna u nezasićenom vodonosnom sloju ne graniči samo s plinovitom, već i s krutom fazom koju čine čestice poroznog tla. U takvim okolnostima tekuća faza posjeduje dva tranzicijska područja. Jedno se

formira na dodiru s plinovitom fazom, a drugo na dodiru s krutom fazom tj. sa česticama tla. Razmatrat će se tranzicijsko područje između tekuće i krute faze, kako bi se definirao pojam apsorbirane vode u poroznom tlu. Dijagram na slici 3.4 prikazuje promjenu magnitude sile molekularnog privlačenja između krute i tekuće faze, u funkciji njihovog međusobnog razmaka.

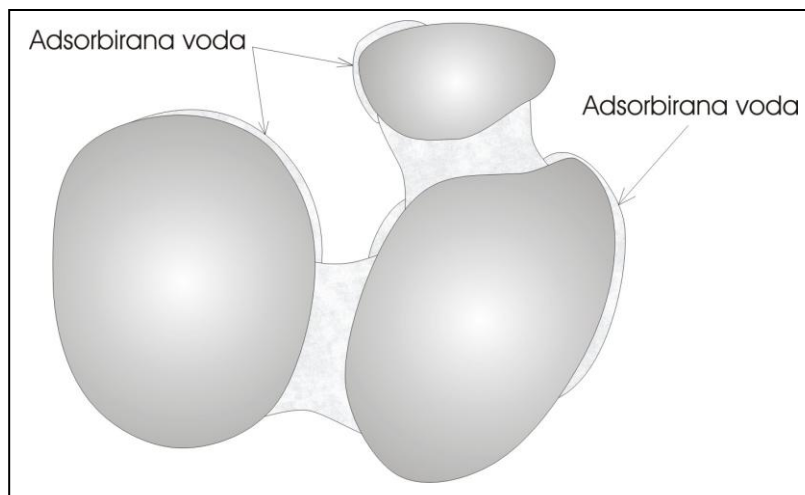


Slika 3.3 Posuda ispunjena kapljevinom i plinom



Slika 3.4: Dijagram intenziteta molekularnih privlačnih sila između krute faze čestice tla i tekuće faze vode

Vidljivo je da vrijednost privlačne sile raste eksponencijalno, kako se približavamo krutoj fazi. U dijagramu se prepoznaje *tranzicijsko područje* unutar kojeg je tekuća faza sadržana uz samu površinu čestica, što ju čini praktički nepomičnom. Ta tanka opna apsorbirane tekuće faze naziva se *apsorbirana voda*. Na slici 3.5 su prikazane čestice tla i tanka opna apsorbirane vode. U takvom dvofaznom toku, molekularne sile (*Van der Waalsove sile*) sprječavaju potpuno isušivanje tekuće faze unutar praznog prostora. Apsorbirana voda ne sudjeluje u toku podzemnih voda, a njeno prisustvo može se odstraniti samo termičkim isušivanjem tla. Kako u prirodnim uvjetima nije moguć takav postupak, njena veličina uzima se u obzir unutar jednadžbi toka, napisanih za strujanje kroz nezasićenu sredinu. Udaljavajući se od tranzicijskog područja, privlačna molekularna sila opada, što omogućuje gibanje vode uzrokovano gravitacijskim privlačenjem sile teže. Voda, sadržana na takvoj udaljenosti od čestica tla, naziva se *temeljna* ili *gravitacijska voda*

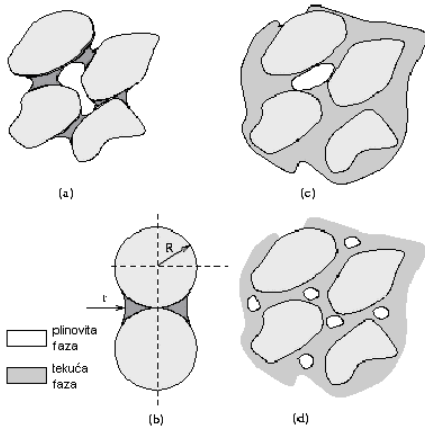


Slika 3.5:
Tanka opna
adsorbirane
vode

3.5 Zasićenost tla

Za objašnjenje pojma zasićenosti tla, pogledajmo što se događa s vlagom sadržanom u njemu, u slučaju kada dolazi do postepenog smanjenja njene količine isušivanjem i povećanja natapanjem. Kod situacije isušivanja tla, voda ishlapljuje iz njega i biva zamijenjena zrakom koji ulazi umjesto nje.

Na slici 3.6 prikazana su četiri karakteristična slučaja međudjelovanja krute faze poroznog tla i tekuće faze u njemu. U prvom slučaju je zasićenost mala pa se čestice vode rastežu prema njima najbližim česticama tla (slika 3.6 a). Nastali oblik tekuće faze naziva se *viseći prsten*. Oni su izolirani jedan od drugoga i ne tvore kontinuiranu cjelinu. Zaključuje se da za takvu količinu tekuće faze nije moguć nikakav protok kroz tlo jer ne postoji kontinuirana staza toka vode. Na sljedećoj slici (slika 3.6 b) prikazan je slučaj visećih prstenova između dvije idealno okrugle čestice. Za taj slučaj moguće je odrediti zapreminu visećeg prstena, s obzirom na radijus zakrivljenosti dodirnih područja vode i zraka. Kako je ta situacija idealizirana i jednostavna za promatranje, iskoristit



Slika 3.6:
Različiti stupnjevi zasićenosti tla

Daljnijim povećavanjem sadržane vode, zrak nije više kontinuirana faza, već se raspada u pojedine međusobno nepovezane mjehuriće (slika 3.6 d). Takvi mjehurići se mogu pomicati samo ako u okružujućoj vodi postoje razlike u tlakovima. U slučaju odsutnosti zraka dolazi do potpune ispunjenosti poroznog tla. Tlo u kojem su sve pore ispunjene vodom, naziva se *potpuno zasićeno* ili *saturirano tlo*, a tok vode koji se kroz njega odvija, *saturirani tok*. Tijekom vremena moguće je smanjenje zapremine zraka s obzirom na njegovu topivost u vodi. Isto tako se i zapremina visećih prstenova može smanjiti, u slučaju kada dolazi do isparavanja uslijed temperaturnih promjena. Moguća je i situacija u kojoj, zbog djelomične ispunjenosti tla vodom, dio vode tvori kontinuiranu fazu, a preostali dio se još uvijek nalazi u stanju visećih prstenova. U tom slučaju, za opisivanje toka vode, potrebno je razlučiti pomičan i nepomičan dio vode prisutne u poroznom tijelu.

3.6 Stupanj zasićenosti tla

Da bi se objasnio pojam stupnja zasićenosti tla, promatra se porozno tlo u kojem tekuća faza (kapljevinna) zauzima dio prostora između čestica koje čine krutu fazu. Definirat će se količina tekuće faze α u vremenu t i u točki x , uz uvjet da prostor točke promatranja zadovoljava pretpostavke reprezentativne elementarne zapremine. Na taj način, može se definirati *vrijednost tekuće zapremine* (Θ) narednim izrazom (3.14).

$$\Theta_{\alpha} = \frac{\text{volumen faze } \alpha - \text{kolicina faze u uzorku}}{\text{volumen uzorka}} \quad (3.14)$$

$$0 \leq \Theta_{\alpha} \leq n \quad \sum_{\alpha} \Theta_{\alpha} = n$$

će se kako bi se došlo do važnog zaključka. Uočavamo da, ukoliko se količina vode povećava, viseći prstenovi se šire i spajaju sve dok se ne formira kontinuirana tekuća faza. Za onu količinu vode, u kojoj tekuća faza postaje kontinuirana, moguće je formiranje njenog toka. Razlog tome je činjenica da je u takvim uvjetima omogućen prijenos tlaka unutar nje. Sljedeće dvije slike (slike 3.6c i 3.6d) prikazuju odnos tekuće i plinovite faze ukoliko se nastavi s natapanjem uzorka. Kako se promatra dvodimenzionalna slika trodimenzionalnog poroznog područja, na prvoj slici (slika 3.6 c) uočava se da su obje faze u kontinuiranom stanju.

To prikazuje količinu sadržane tekuće faze u poroznom tijelu reprezentativne elementarne zapremine. Njena vrijednost ovisna je o poroznim svojstvima promatranog tla i o količini kapljevine. Ukoliko je tlo u potpunosti ispunjeno takvom fazom, ona poprima njenu maksimalnu vrijednost koja se naziva *zasićenom tekućom zapreminom* (Θ_s). Teorijski gledano, ta je veličina jednaka poroznosti materijala n . U praktičnim razmatranjima ta pretpostavka nije ispunjena, već je njena vrijednost nešto manja. Razlog tomu je činjenica da u prirodnim uvjetima uspostavljanja podzemnog toka, unutar pora tla nije samo prisutna tekuća faza, već postoji i malen dio plinovite faze u obliku zarobljenog zraka.

Nadalje, promatrajući zamišljenu zapreminu tla u kojem postoji tekuća faza, može se definirati i *stupanj njegove zasićenosti* (θ). Njegova vrijednost varira od nule, ukoliko u tlu nema prisutne tekuće faze, do maksimalne vrijednosti zasićenja koja je jednaka jedinici. Tlo u kojem je stupanj njegove zasićenosti manji od jedinice, naziva se nezasićenim ili nesaturiranim tlom.

$$\theta_\alpha = \frac{\text{volumen faze } \alpha - \text{kolicina faze u uzorku}}{\text{volumen praznina u uzorku}} \quad (3.15)$$

$$0 \leq \Theta_\alpha \leq n \quad \sum_\alpha \theta_\alpha = 1$$

U obje definicije n označava poroznost promatranog prostora, a suma se odnosi na sve tekuće faze prisutne u poroznom tijelu. Ta dva pojma mogu se međusobno povezati sljedećom relacijom (3.16).

$$\Theta_\alpha = n \theta_\alpha \quad (3.16)$$

Vidljivo je da postoji linearna veza između vrijednosti tekuće zapremine i stupnja zasićenosti tla. Porastom tekuće zapremine raste i vrijednost stupnja zasićenosti tla ovisno o njegovim poroznim svojstvima.

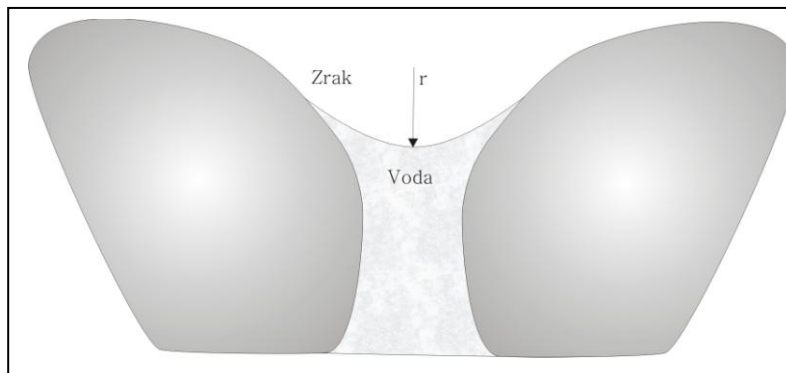
3.7 Strujanje vode kroz djelomično zasićeno porozno tlo

U većini hidrauličkih procesa razlog uspostavljanja toka je formiranje gradijenta energije. Gibanja uzrokovana spomenutim gradijentom objašnjavaju se *teoremom minimalne energije sustava*. Strujanje vode u zasićenim poroznim tijelima odvija se kao posljedica različitosti potencijalnih energija u njoj pa se sila gravitacijskog privlačenja usvaja kao dominantna sila. U zasićenim ili djelomično zasićenim vodonosnim slojevima, gibanje vode je uzrokovano prisutstvom više različitih sila. U jednom od prijašnjih poglavlja (3.4 *Pojam apsorbirane vode*) govorilo se o privlačnim molekularnim silama kratkog doseg a relativno jakog intenziteta, koje vodu na određenim udaljenostima od čestica tla čine gotovo nepomičnom. Taj dio sadržane vode ne sudjeluje u formiranju podzemnog toka jer sama gravitacijska sila nije dovoljna za odvajanje vode od čestica tla. Nadalje, u takvim sredinama postoji specifičan vid gibanja vode nazvan *kapilarno izdizanje*. To kapilarno izdizanje prouzrokovano je djelovanjem dviju različitih sila koje se jednim imenom nazivaju *sile kapilarnog tlaka*. Na taj način razlikujemo *kohezijsku silu* koja djeluje između molekula

tekuće faze i *adhezijsku silu*, prisutnu između molekula tekuće i krute faze. Kao posljedica djelovanja tih sila, voda se iznad vodenog lica uzdiže kroz uske prostore poroznog medija. Zaključuje se da je gibanje vode u nezasićenim vodonosnim slojevima uvjetovano silom gravitacijskog privlačenja i silama kapilarnog tlaka. U svrhu boljeg razumijevanja sila kapilarnog tlaka, naredna dva poglavlja posvećena su njima.

3.8 Kapilarni tlak

Cilj ovog poglavlja je definiranje veličine kapilarnog uzdizanja vode, prouzrokovano djelovanjem kapilarnih sila. U tu svrhu krenut će se s promatranjem jednog visećeg prstena nastalog između dvije čestice tla. Pretpostavlja se da je takav prsten opkoljen plinovitom fazom zraka. Prisjećajući se rečenog u poglavlju 3.3 (*Pojam energije dodirnih točaka dviju različitih faza*), ako nema vanjskih utjecaja, vodena površina zauzet će oblik koji odgovara minimumu energije u takvim okolnostima.



Slika 3.7
Detalj
vodenog
prstena

Za definiranje vrijednosti kapilarnog tlaka, promatrat će se nastala zakrivljena površina. *Slika 3.7* prikazuje dio formiranog vodenog prstena s uvećanim detaljem takve površine. Kako molekularne sile privlačenja između čestica vode i čestica tla nemaju isti intenzitet, kao one nastale na dodiru čestica vode i zraka, formira se vodena površina određenog radijusa zakrivljenosti. Kako se pretpostavilo da je sustav u ravnoteži, formirana površina može opstati samo ako na dodirnoj granici vode i zraka postoji razlika u tlakovima s obje strane. Upravo se ta razlika smatra uzrokom zakrivljenosti vodene površine. Na taj način, kapilarni tlak se definira kao razlika pritiska na dodirnoj granici plinovite faze zraka i tekuće faze vode (3.17).

$$P_k = P_z - P_v \quad (3.17)$$

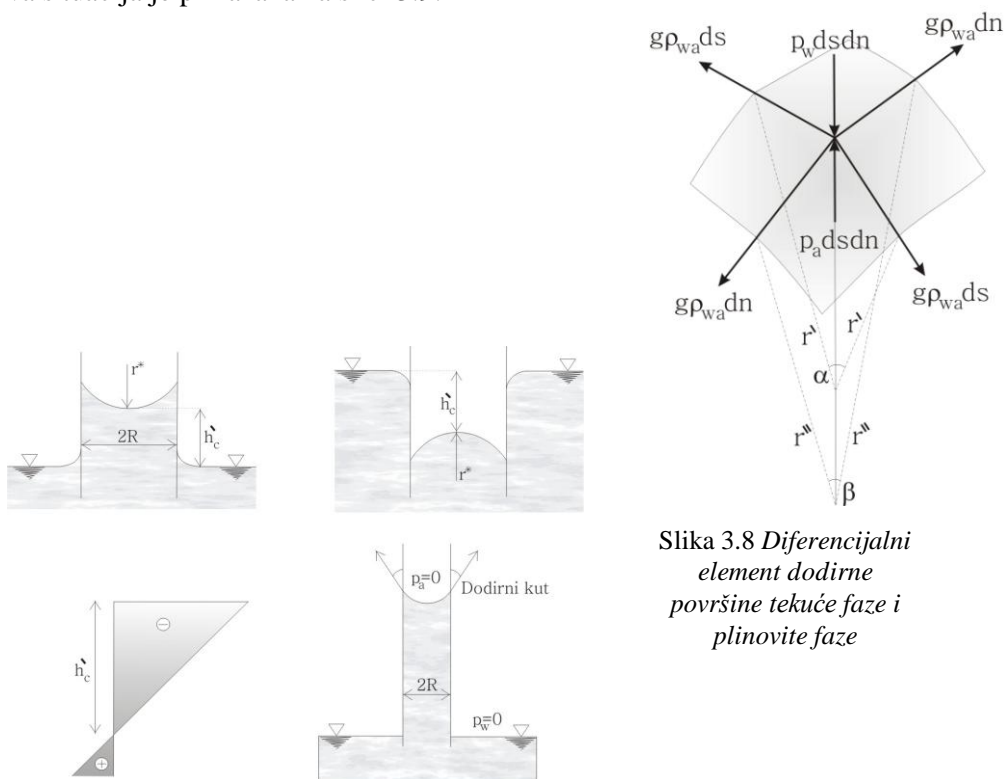
Kako je zakrivljenost vodene površine u funkciji zasićenosti tla, postoji direktna veza između kapilarnog tlaka (p_k) i stupnja zasićenosti (θ). Da bi se odredila veza između dviju faza, odvojenim dodirnim područjem vode i zraka, mora se pretpostaviti da te faze čine dvodimenzionalno materijalno tijelo, koje posjeduje svoja vlastita reološka svojstva. Ponašanje takvog tijela slično je po-

našanju rastegnute membrane, koja se nalazi na kontaktu dviju različitih tekuće faze. Uravnoteženo stanje u takvom materijalu postiže se ukoliko je zbroj sila koje djeluju na površini tekućina jednak nuli. U tu svrhu pogledajmo sliku 3.8, na kojoj su prikazane sile koje djeluju na diferencijalno mali element površine dodirnog područja vode i zraka.

Na slici 3.8 se tekuća faza vode nalazi u udubljenoj strani zakrivljene površine, a plinovita faza zraka na izbočenoj strani. Pretpostavit će se da je napetost dodirnih područja između dvije faze konstantna. Da bi se zadovoljio uvjet uravnoteženog stanja normalnih sila, mora biti ispunjen naredni uvjet (3.18).

$$p'_c = p_a - p_w = g\rho_{aw} \left(\frac{1}{r'} + \frac{1}{r''} \right) = \frac{2g\rho_{aw}}{r^*} \quad (3.18)$$

Može se uvesti pojam kapilarne cjevčice, kako bi se uz pomoć nje dobila vrijednost kapilarnog izdizanja vode u poroznom tlu. Kapilarna cjevčica se definira kao cijev relativno malog promjera, u kojoj se voda izdiže iznad vodenog lica ukoliko je jedan njen kraj uronjen u nju. Opažanjem takve cjevčice, može se ustanoviti da veličina izdignute vode ovisi o njenom promjeru. Smanjujući promjer, voda se izdiže na veće kote. Takvo izdizanje vode je uzrokovano adhezijskim i kohezijskim silama. Promotrimo primjer kapilarne cijevčice koja simulira uski prolaz između zrna tla u kojem se nalazi voda. Takva situacija je prikazana na slici 3.9.



Slika 3.8 Diferencijalni element dodirne površine tekuće faze i plinovite faze

Slika 3.9
Kapilarna cijevčica

Ukoliko se usvoji da je tlak atmosferskog zraka jednak nuli ($p_a=0$), tlak ispod same površine vode mora biti te iste vrijednosti. Sljedeći zadatak na putu za dobivanje veličine kapilarnog izdizanja je definiranje pojma *dodirnog kuta* (ω). Taj kut se dobiva ukoliko se postavi tangenta u točki zakrivljene vodene površine, koja dodiruje stijenke cjevčice. Njegova je vrijednost jednaka kutu koji zatvaraju tangenta i stijenka cjevčice. Nakon uvedenog pojma dodirnog kuta, može se izračunati radijus zakrivljenosti vodene površine (r^*), na sljedeći način (3.19):

$$r^* = \frac{R}{\cos \omega} \quad (3.19)$$

pri čemu je sa R označen radijus kapilarne cjevčice. Koristeći se posljednjim izrazom (3.19), moguće je izračunati težinu vodenog stupca izdignutog u kapilarnoj cjevčici. Vidi se da je neizbježan podatak u tom izračunu upravo visina kapilarnog izdizanja. Ostavivši vrijednost kapilarnog dizanja samu na jednoj strani jednadžbe, uočava se da je njegova veličina ovisna o radijusu kapilarne cjevčice (3.20).

$$\pi R^2 h_c \rho_w g = 2\pi R g \rho_{aw} \cos \omega \Rightarrow h_c = \frac{1}{\delta_w g} \frac{2g \rho_{aw} \cos \omega}{R} \quad (3.20)$$

Promatrajući kapilarno izdizanje unutar vodonosnih slojeva, može se postaviti hipoteza da je radijus zakrivljenosti kapilarne cjevčice analogan radijusu zakrivljenosti pora tla. Na taj način, vrijednost kapilarnog tlaka može se izračunati u funkciji radijusa zakrivljenosti odgovarajuće pore (3.21).

$$h'_c = \frac{1}{\rho_w g} \frac{2g \rho_{aw} \cos \omega}{R} = \frac{1}{\rho_w g} \frac{2g \rho_{aw}}{r^*} = \frac{p'_c}{\rho_w g} \quad (3.21)$$

Kako nije moguće poznavati radijuse zakrivljenosti svih pora u tlu, a taj podatak bi ujedno bio i malog praktičnog značaja, potrebno je prijašnju jednadžbu, dobivenu mikroskopskim promatranjem, prevesti na makroskopsku razinu.

3.9 Makroskopsko promatranje kapilarnog tlaka

U prijašnjem poglavlju razmatralo se ponašanje dodirnih točaka između dvije uravnotežene, nemiješajuće tvari unutar jedne pore, i to na mikroskopskoj razini. Za praktične potrebe sagledavanja raspodjele kapilarnog pritiska u vodonosnim slojevima, koristi se prosječna vrijednost takvog tlaka. U tu svrhu, definirat će se makroskopski kapilarni tlak, razlikom prosječnih pritiska zraka i vode na njihovoj dodirnoj granici (3.22).

$$p_c = \bar{p}_a^a - \bar{p}_w^w \quad (3.22)$$

Sukladno načinu dobivanja mikroskopskog kapilarnog tlaka, može se dobiti i njegova makroskopska veličina (3.23).

$$p_c = p_a - p_w = \frac{2 g \rho_{aw}}{r^*} \quad (3.23)$$

Fizikalne veličine u toj jednadžbi izražene su na makroskopskoj skali. Radijus zakrivljenosti pora u njoj (r^*) prikazuje srednji radijus zakrivljenosti mikroskopskog područja i to unutar reprezentativne elementarne zapremine. Pod tim okolnostima mikroskopska vrijednost kapilarnog tlaka (3.21) prelazi na makroskopsku razinu. U prijašnjem primjeru kapilarne cjevčice, zamijenio se lokalni radijus zakrivljenosti (r^*) s omjerom $R/\cos\omega$. Veličina R može se promatrati kao mjera veličine pora koja je ispunjena tekućom fazom. Prisjetimo se da u nezasićenim vodonosnim slojevima nalazimo tekuću fazu vode i plinovitu fazu zraka. U većini slučajeva smatra se da je zrak pod konstantnim atmosferskim tlakom jednakim nuli ($p_z=0$). Na taj način, makroskopsku vrijednost kapilarnog tlaka moguće je definirati na sljedeći način (3.24).

$$p_c = -\bar{p}_w^w \quad (3.4)$$

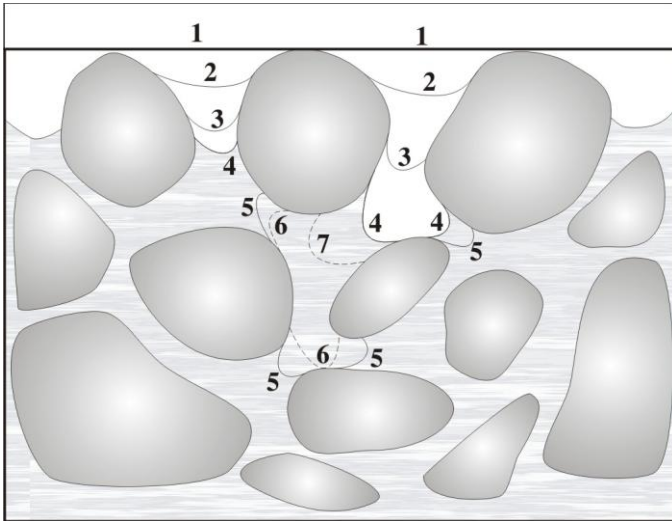
3.10 Kapilarni tlak i krivulja retencije

Unutar ovog poglavlja razmatrat će se odnos kapilarnog tlaka i vrijednosti stupnja zasićenosti tla. Prije nego se prijeđe na definiranje krivulje retencije, napraviti će se sažetak onoga što se događa u tlu tijekom njegovog isušivanja ili natapanja. Prvo se promatra isušivanje vode iz tla. Nekoliko faza takvog procesa je prikazano na slici 3.10.

Brojevima je označeno kronološko odvijanje procesa isušivanja. Ono se provodi na način da voda izlazi na dnu poroznog tla, dok nastali slobodan prostor ispunjava zrak koji ulazi kroz njegov gornji dio. Nakon prve faze isušivanja unutar pora tla, stvara se dodirno područje između vode i zraka. Radijus zakrivljenosti takvih površina ovisi o lokalnom mikroskopskom kapilarnom pritisku (3.19). Taj se radijus povećava sa smanjenjem kapilarnog pritiska i obrnuto. Sljedeće faze isušivanja prikazane su brojevima od dva do pet. Faze 'šest' i 'sedam' prikazuju ponovno vlaženje ili natapanje uzorka. Unutar svake faze isušivanja, najveći kapilarni tlak koji može podnijeti lokalno dodirno područje, odgovara najmanjem radijusu krivulje smještene unutar takve

pore. Iz tog razloga se najmanji radijus zakrivljenosti nalazi u najužoj pori tla. U općem slučaju, pore tla mogu biti različitih dimenzija i oblika. Iz tog razloga se prilikom procesa isušivanja sve pore neće isprazniti pod istim kapilarnim pritiskom. Zaključuje se da se šire pore prazne pod nižim kapilarnim pritiskom, a uže pod njegovom većom vrijednosti. Nastavljanjem isušivanja, dodirno područje tekuće i plinovite faze, povlači se u pore čija se zakrivljenost smanjuje, što rezultira povećanjem kapilarnog tlaka. Ukoliko se zaustavi proces isušivanja tla, pazeći na isparavanje i na proces rastapanja zraka, uspostaviti će se ravnotežno stanje u kojem se tlak raspoređuje po hidrostatskom zakonu. Iz svega do sada rečenog dolazi se do važnog zaključka. U svakoj fazi isušivanja tla voda, koja ostaje u praznom prostoru, poprima određenu mikroskopsku konfiguraciju koja je ovisna o raspodjeli geometrijskih svojstava pora tla. Kao posljedica toga, količina sadržane vode ovisi o kapilarnom pritisku opisanom u prethodnim poglavljima. U svrhu definiranja krivulje retencije, obrnut će se proces isušivanja tla, na način da se njegove pore postupno natapaju vodom. Takav je proces moguće pratiti na istoj slici, s razlikom da se tranzicija vode sada odvija od *pete* faze prema *šestoj* i *sedmoj* fazi. Primjećuje se da se radijus krivulja dodirnih područja tekuće i plinovite faze, postupno povećava. Na mikroskopskoj skali može se dovesti u vezu kapilarni tlak u odgovarajućoj točki s radijusom zakrivljenosti pore tla (3.25).

$$p'_c = p_a - p_w = g \rho_{aw} \left(\frac{1}{r'} + \frac{1}{r^n} \right) = \frac{2 g \rho_{aw}}{r^*} \quad (3.25)$$



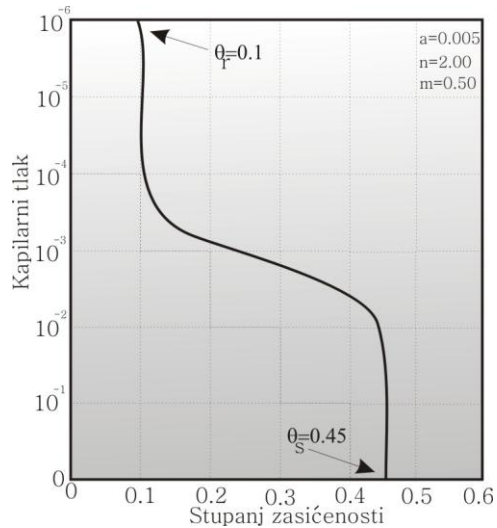
Slika 3.10
Faze isušivanja
i natapanja tla

Na makroskopskoj skali moguće je takvu vezu uspostaviti za makroskopski kapilarni tlak i srednji radijus zakrivljenosti pora tla (3.26).

$$p_c = p_a - p_w = \frac{2 g \rho_{aw}}{r^*} \quad (3.26)$$

Ukoliko je tlo u potpunosti ispunjeno vodom, zakrivljenost vodene površine teži beskonačnoj vrijednosti, što dovodi do toga da kapilarni tlak postaje jednak nuli. Takvi uvijeti vladaju u potpuno zasićenom tlu.

Smanjivanjem zasićenosti uzorka, povećava se vrijednost kapilarnog pritiska. Ako se u nekom dvodimenzionalnom koordinatnom sustavu na x os nanese vrijednosti stupnja zasićenosti tla (θ), a na y os vrijednost kapilarnog tlaka (p_c), moći će se definirati krivulja retencije. Prateći proces isušivanja tla, na način da se neprestano bilježe veličine stupnja zasićenosti i vrijednost kapilarnog tlaka za pojedini takav stupanj, dobit će se vrijednosti koje se mogu nanijeti na prijašnje spomenut koordinatni sustav. Učinivši rečeno, dobiva se krivulja koja definira odnos kapilarnog tlaka i stupnja zasićenosti tla. Ona se zove *krivulja retencije tla*, a njena uloga u proučavanju toka kroz nezasićene porozne sredine, ima neobično važan značaj. Na slici 3.11 vidljiv je primjer krivulje retencije. Skrenimo pozornost na najmanji stupanj zasićenja tog tla. On je nešto veći od nule, a uzrokovan je prisustvom apsorbirane vode.



Slika 3.11
Primjer krivulje retencije

3.11 Učinak zarobljenog zraka

U ovom poglavlju bit će pokazano da se krivulja retencije razlikuje za slučaj postupnog natapanja tla od one koja se dobiva putem njegovog isušivanja. Na slici 3.12 je vidljiva krivulja retencije dobivena isušivanjem tla.

Usvaja se pretpostavka da se na početku postupnog isušivanja tlo nalazi u potpuno zasićenom stanju ($\theta_s=1$). Postupak njegovog isušivanja, može se pratiti pomičući se ulijevo uzduž krivulje retencije. U trenutku dostizanja njenog maksimuma, tlo je u potpunosti isušeno ($\theta=0$). Ukoliko se takvo tlo počne natapati vodom, zamijetit će se interesantan fenomen. Sada se prati druga krivulja koja se nalazi ispod one dobivene isušivanjem uzorka, pomičući se od lijeva udesno. Oblik krivulje natapanja tla razlikuje se od one za njegovo isušivanje. Nadalje, uočava se da se kod njegovog prividnog potpunog zasićenja, krivulja retencije ne vraća na početnu točku potpune zasićenosti. Točka do koje dolazi je okarakterizirana vrijednošću kapilarnog tlaka jednakom nuli ($p_c=0$) i stupnju zasićenosti tla manjeg od jedan ($\theta<1$). Taj isti postupak ponovnog natapanja može se započeti u bilo kojem trenutku, za bilo koju vrijednost trenutne zasićenosti tla. Interesantno je primijetiti da se dobivene krivulje retencije, ovisno o trenutku početka natapanja, međusobno uvijek razlikuju. Njihova krajnja točka nije jedinstvena. Ona ovisi o točki na krivulji isušivanja, na kojoj se prešlo na proces natapanja tla. Iako se za svaki takav slučaj krivulja retencije vraća u vrijednost kapilarnog tlaka jednakog nuli, ona ne dostiže stupanj zasićenosti jednak jedinici, već uvijek vrijednost nešto manju od nje. Takve se razlike objašnjavaju na sljedeći način. U trenutku natapanja tla, uz uvjet da se on nalazi u stanju djelomične zasićenosti, u njemu postoji plinovita faza zraka sadržana u njegovim, vodom nezasićenim porama. Ispunjavajući pore tla, voda nailazi na prisutne mjehuriće zraka. Neke od njih ona istiskuje iz uzorka dok preostali dio biva opkoljen tekućom fazom i na taj način zatočen u tlu. Iz tog razloga, ukupna porozna zapremina tla nije samo ispunjen vodom već i zrakom. Vrijednost zatočenog zraka može se dobiti oduzimanjem stupnja potpunog zasićenja sa stupnjem ostvarenog. To je razlog prividnog potpunog zasićenja tla. Iz svega prije rečenog, zaključuje se da se krivulje retencije razlikuju za proces natapanja i isušivanja uzorka tla. Jednom kada se krivulja retencije odmakne od stupnja potpune zasićenosti tla putem isušivanja, nije se moguće više vratiti na tu istu vrijednost ponovnim natapanjem uzorka.

Slika 3.12
Primjer krivulje retencije
u slučaju isušivanja tla

3.12 Histereza krivulje retencije

Pojam histereze krivulje retencije objasniti će se koristeći dijagram iz prethodnog poglavlja (slika 3.12), nastavljajući s izmjeničnim procesima natapanja i ponovnog isušivanja uzorka tla, ponavljajući to više puta.

Obrativši pažnju na prijašnju sliku, zamijetit će se nekoliko takvih ciklusa. Proces započinje s potpuno zasićenim uzorkom ($\theta=1$). Mičući se ulijevo uzduž krivulje isušivanja, stat će se na nekoj odabranoj vrijednosti trenutnog stupnja zasićenosti. U tom trenutku započinje natapanje uzorka, sve dok vrijednost kapilarnog tlaka u njemu ne postane jednaka nuli. Skrenimo pozornost na količinu zatočenog zraka. Taj isti postupak ponavlja se s razlikom da natapanje uzorka započinje kad stupanj njegove zasićenosti dosegne vrijednost nešto veću od nule.

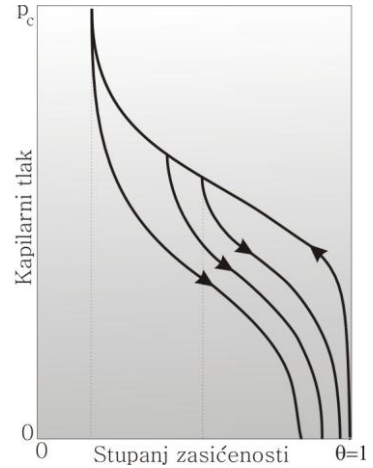
Primjećujemo da se količina zatočenog zraka povećava ukoliko postupak natapanja započne s manjom vrijednošću trenutne zasićenosti. Ova pojava ovisnosti vrijednosti zatočenog zraka o načinu isušivanja i natapanja tla, naziva se *histereza krivulje retencije*. Dva su razloga takvog ponašanja krivulje retencije. Prvi razlog je prikazan na slici 3.13, a naziva se *učinak boce tinte*. Na toj slici primjećuje se da je zakrivljenost vodene površine jednaka za različite razine vode u boci promjenjivog poprečnog presjeka. Detalj slike označen slovom *a*, prikazuje grlo takve boce relativno velikog radijusa i ispod njega vrat mnogo manjeg radijusa. Grlo većeg radijusa bit će naglo isušeno čim kapilarni tlak u njemu premaši sljedeću vrijednost (3.27).

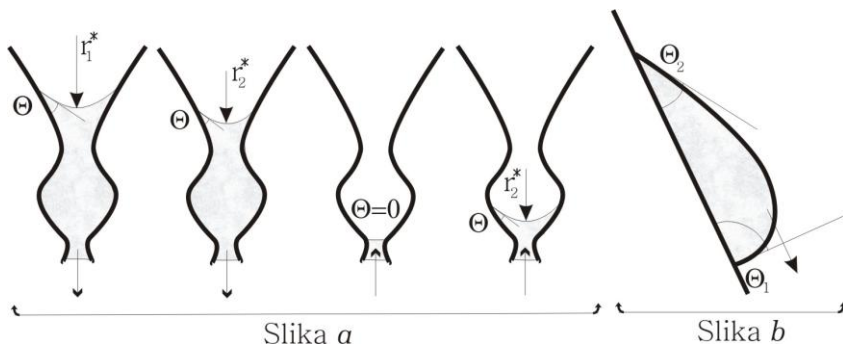
$$p_{c/r} = \frac{2g\rho_{wa}}{r} \quad (3.27)$$

Da bi se to grlo boce ponovo napunilo vodom tlak u njemu mora se smanjiti ispod vrijednosti koja je definirana narednom jednadžbom (3.28).

$$p_{c/R} = \frac{2g\rho_{wa}}{R} \quad (3.28)$$

Kako je $R > r$, slijedi da je tlak potreban za pražnjenje grla veći od tlaka potrebnog za njegovo punjenje. Radijusi pora poroznog tla variraju na sličan način kao spomenuta boca. Iz tog razloga histereza krivulje retencije nastaje uslijed promjenjivog karaktera uskih radijusa pora tla.





Slika 3.13 Učinak boce tinte (a) i kapi kiše (b)

Drugi razlog histereze krivulje retencije, naziva se *učinak kapi kiše*, a prikazan je također na slici 3.13. Ta pojava je uzrokovana činjenicom da se kut dodirivanja vode i tla (ω), u napredujućoj fazi natapanja, razlikuje od kuta stvorenog između njih za slučaj njegovog isušivanja. Natapanjem uzorka voda se izdiže u njegovim porama dodirujući čvrstu podlogu čestica tla na svim njenim stranama. Za slučaj njegovog isušivanja voda kliže po tim česticama stvarajući manji dodirni kut između njih a vrijednost kapilarnog tlaka zavisi upravo o tom kutu.

Ukoliko su molekule tekuće faze polarnog karaktera kao što je voda (težište pozitivnog i negativnog naboja molekule ne pada u istu točku prostora), kut dodirivanja ovisi o tome je li tlo prethodno bilo natopljeno tekućinom ili nije. Spomenimo da na pojavu histereze krivulje retencije mogu utjecati i nečistoće, moguće promjene minerala čestica tla i hrapavost samih čestica. U konačnici vidi se da veza između kapilarnog tlaka i stupnja zasićenosti ovisi o odvijanju procesa isušivanja i natapanja odabranog uzorka tla. Za zadani kapilarni tlak postiže se veća zasićenost kada je uzorak isušen, nego za vrijeme njegovog natapanja.

3.13 Raspodjela vertikalne zasićenosti vodonosnika

Za prikazivanje promjene stupnja zasićenosti vodonosnog sloja po njegovoj vertikali, zamišlja se takva sredina u kojoj je njena donja strana u potpunosti zasićena vodom. Tako zamišljeno tlo prikazano je na slici 3.14. Kako bi se omogućilo korištenje piezometarske visine kao varijable problema, usvaja se pretpostavka konstantnosti temperature vodonosnika, a time i nepromjenjivost gustoće vode u njemu. Na taj način krivulja retencije, koja je u funkciji stupnja zasićenosti tla ($h_c = h_c(\theta)$), definira rasprostranjenost zasićenosti vodom iznad površine vodenog lica. Kako je ispod njegove površine tlo u stanju potpune zasićenosti ($\theta=1$), vrijednost kapilarnog tlaka u njemu je jednaka nuli.

Udaljavajući se od vodenog lica, krećući se prema površini tla, vrijednost kapilarnog tlaka se povećava, što rezultira smanjenjem stupnja zasićenosti.

Skrenimo pozornost na područje u neposrednoj blizini vodenog lica. Odmah iznad njega tlo se nalazi u stanju potpune ili djelomične zasićenosti. To područje, u kojem su izražena kapilarna svojstva vode, naziva se *kapilarni okrajak*. Kako je tlo sastavljeno od pora različitih dimenzija i oblika, a visina

kapilarnog izdizanja vode je u njihovoj funkciji, kapilarni okrajak je približna veličina.

Vrijednost kapilarnog okrajka (h_{co}) može se izračunati sljedećom empirijskom jednačbom (3.29). U toj jednačbi, d_z predstavlja srednji promjer zrna promatranog tla.

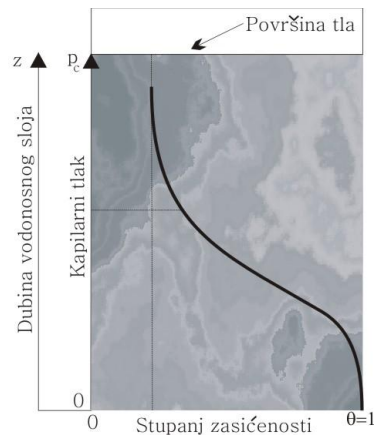
$$h_{co} = \frac{2.2}{d_z} \left(\frac{1-n}{n} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (3.29)$$

Slika 3.14:
Raspodjela zasićenosti
u vodonosnom sloju

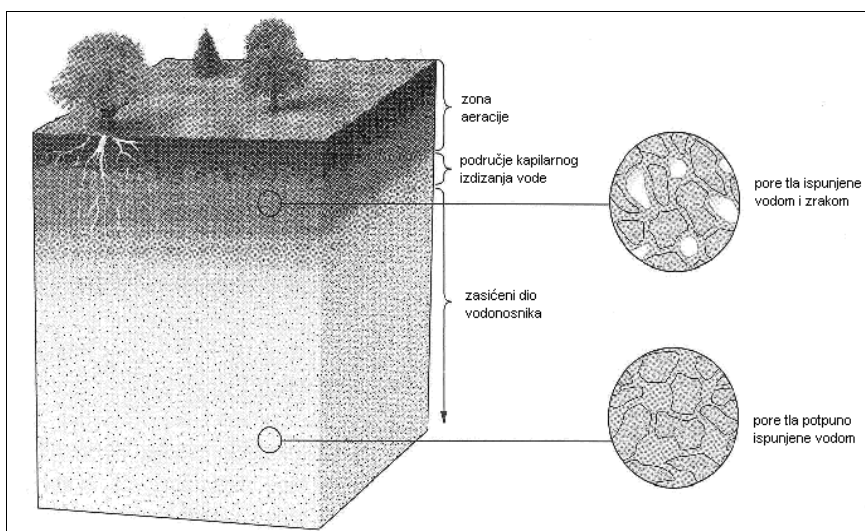
3.14 Ovisnost koeficijenta filtracije o stupnju zasićenosti tla

Pojam koeficijenta filtracije se može definirati uz pomoć Darcyevog eksperimenta. On predstavlja propusnu moć tla uz pretpostavku usvojenih konstantnih svojstava tekuće faze. U Darcyevom eksperimentu se usvaja da je tekuća faza kontinuirana, te da unutar nje promjene tlaka izazvana na jednoj strani može putovati kroz nju do uspostave konačne ravnoteže. Dobiveni koeficijent filtracije predstavlja propusnu moć zasićenog materijalna. U nastavku će se razmatrati propusna moć nezasićenog tla pa će se koeficijent filtracije dobiven Darcyevim eksperimentom, opreznije nazvati *zasićeni koeficijentom filtracije* (k_s). Da bi se objasnili

razlozi promjene vrijednosti koeficijenta filtracije u nezasićenim sredinama, poslužit ćemo se jednom od prijašnjih slika (slika 3.6) u kojoj su predstavljena tri stupnja zasićenosti tla (*detalj a, c i d*). Prvi detalj te slike (*a*) prikazuje relativno malu zasićenost promatranog tla, u kojem se prisutna voda pojavljuje u visećim prstenovima. Zamišlja se ulazak određene količine vode unatar takvog tla. Njenim ulaskom ona se spaja s visećim prstenovima, povećavajući stupanj zasićenosti uzorka. U takvim okolnostima napredovanje fronte vode bitno se usporava. Na makroskopskoj skali, takva se situacija toka opisuje na način da se djelomično zasićenom materijalu pridodaje smanjena veličina koeficijenta filtracije. Ta vrijednost se naziva *nezasićeni koeficijent filtracije* (k_n). Na istoj slici (slika 3.6 – *detalj c*) vidljiv je takav stupanj zasićenja u kojem nisu više



prisutni viseći prstenovi, ali postoje područja u koje voda još nije prodrla. Za takvu situaciju, dio fronte dolazeće vode zaustavlja se unutar slobodnih pora dok njen preostali dio nastavlja putovati kroz tlo. U tom slučaju nezasićeni koeficijent filtracije poprima nešto veću vrijednost od one prije spomenute. Zaključuje se da je vrijednost nezasićenog koeficijenta filtracije u funkciji stupnja zasićenosti tla. Mnogo autora je istraživalo tu funkcijsku vezu, a u narednom poglavlju prikazat će se rezultati van Genutchena.



Slika 3.15: Presjek vodonosnog sloja

3.15 Van Genutchenov model

Prije nego što krenemo na definiranje van Genutchenovog modela, spomenimo nekoliko saznanja vezanih za promjenu nezasićenog koeficijenta filtracije, ovisno o stupnju zasićenosti tla. Nakon više laboratorijskih ispitivanja opazilo se da nezasićeni koeficijent filtracije rapidno raste s povećanjem zasićenosti tla, što dovodi do zaključka da funkcija koja ta dva parametara povezuje mora biti nelinearnog karaktera. Kako nezasićeni koeficijent filtracije ovisi o trenutnoj zasićenosti uzorka, za opisivanje van Genutchenovog modela, krenut će se s definiranjem *relativnog stupnja zasićenosti tla*. On je jednak zapremini vode sadržane u jediničnom prostoru zapremine pora tla (3.30).

$$S = \frac{V_v}{V_p} \Rightarrow S = \frac{\theta}{\theta_s} \quad (3.30)$$

Teoretski njegova vrijednost varira od nule za potpuno nezasićeno tlo do jedinice za potpuno zasićeno. U praktičnim slučajevima nije moguće potpuno isušivanje tla, pa ga preostala voda unutar njega čini djelomično zasićenim. Veličina tog stupnja zasićenja je relativno mala (0.001—0.02), a naziva se *rezidualni stupnjem zasićenosti* (θ_r). Na taj način, obrađujući pozornost i na tu

količinu vode, može se preciznije definirati relativni stupanj zasićenosti tla (3.31).

$$S = \frac{V_v}{V_p} \Rightarrow S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3.31)$$

Općenito gledajući, svako gibanje tekućine pa tako i vode, uzrokovano je postojanjem gradijenta tlaka. Na taj način i voda unutar nezasićenog tla struji iz istih razloga. Specifičnost takvih sredina je u tome da, ukoliko je tlo u potpunosti zasićeno, tlak u njegovim porama ima vrijednost veću od atmosferskog, a za slučaj djelomičnog stupnja zasićenosti, njegova vrijednost postaje manja od atmosferskog. Prisjećajući se krivulje retencije, primjećuje se da smanjivanjem vrijednosti kapilarnog tlaka zasićenost tla raste na nelinearan način. *Van Genuchten* (1980) postavio je empirijski izraz koji simulira porast zasićenosti tla ovisno o tlaku u njegovim porama. Taj model prikazan je sljedećim jednadžbama (3.32). Skrenimo pozornost da vrijednost tlaka sadržana u njima ulazi u visinskom obliku. Na taj način h_p označava piezometarsku visinu vode u promatranoj pori tla.

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 + (\alpha |h_p - h_{p_a}|)^n \right]^m & \text{za } h_p < h_{p_a} \\ \theta &= \theta_s & \text{za } h_p \geq h_{p_a} \end{aligned} \quad (3.32)$$

U prvoj jednadžbi susreću se nepoznate oznake n , m i α . Njih jednim imenom nazivamo *van Genuchtenovi parametri*, a njihova prisutnost rezultira nedostatkom empirijskog rješavanja problema. Oni će se razmatrati u narednom poglavlju (3.16 *Van Genuchtenovi parametri*). Vidljivo je da se napisani model sastoji od dviju jednadžbi. On uzima u obzir situaciju u kojoj je tlak u porama manji od atmosferskog, pa takvim porama pridodaje zasićenost koja je veća od rezidualne. Ukoliko je tlak u njima veći od atmosferskog, stupanj zasićenosti jednak je jedinici (θ_s). Kako se usvaja da je vrijednost atmosferskog tlaka jednaka nuli, gornje jednadžbe mogu se napisati na sljedeći način (3.33).

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 + (\alpha |h_p|)^n \right]^m & \text{za } h_p < 0 \\ \theta &= \theta_s & \text{za } h_p \geq 0 \end{aligned} \quad (3.33)$$

Uvrštavajući dobivene izraze u jednadžbu relativnog stupnja zasićenja (3.30), dobiva se veza S s tlakom vode u porama tla (3.34).

$$\begin{aligned} S &= \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[1 + (\alpha |h_p|)^n \right]^m & \text{za } h_p < 0 \\ S &= 1 & \text{za } h_p \geq 0 \end{aligned} \quad (3.34)$$

Prisjećajući se rečenog u prijašnjem poglavlju i koristeći se sadržajem ovog poglavlja, može se nastaviti s uspostavljanjem veze nezasićenog koeficijenta

filtracije i stupnja zasićenosti tla. Maksimalna propusna moć tla je definirana zasićenim koeficijentom filtracije. Vrijednost nezasićenog koeficijenta filtracije uvijek je manja od nje. Model van Genutchena sastoji se u tome da se zasićeni koeficijent filtracije pomnoži s točno određenim bezdimenzionalnim faktorom, kako bi se dobila njegova nezasićena veličina (3.35).

Taj faktor naziva se *relativni koeficijent filtracije* (k_r).

$$k_n = k_s k_r \quad (3.35)$$

Očito je da vrijednost relativnog koeficijenta filtracije mora biti u funkciji zasićenosti tla, koja opet ovisi o tlaku u njegovim porama. U konačnici može se napisati jednadžba koju je predložio van Genutchen, a služi za izračunavanje relativnog koeficijenta filtracije (3.36).

$$k_r = \sqrt{S} \left[1 - \left(1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (3.36)$$

Rekapitulirajući ovo poglavlje, može se reći da se vrijednost nezasićenog koeficijenta filtracije dobiva ukoliko su poznata svojstva tla, van Genutchenovi parametri i vrijednost tlaka unutar pora. Interesantno je primijetiti da se van Genutchenov model, u više navrata koristio prilikom istraživanja mogućnosti postojanja podzemnih voda na Marsu.

3.16 Van Genutchenovi parametri

Ovo poglavlje započinje podsjećanjem na nelinearnu vezu između stupnja zasićenosti tla i tlaka u njegovim porama (3.37).

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 + (\alpha |h_p|)^n \right]^m \quad (3.37)$$

$n, m, \alpha \Rightarrow$ van Genutchenovi parametri

Objašnjavanje parametara u toj jednadžbi će započeti van Genutchenovim parametrom m . Njegova vrijednost ovisna je o parametru n , pa ju je iz tog razloga najjednostavnije definirati (3.38).

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad \text{za } n > 1 \quad (3.38)$$

Vrijednost parametra α , zbog dimenzionalne homogenosti prijašnje jednadžbe (3.38), mora imati dimenziju cm^{-1} . Ona se određuje na temelju karakteristične točke P koja se nalazi na krivulji retencije (3.10 *Kapilarni tlak i krivulja retencije*). Njen je položaj definiran vrijednošću stupnja zasićenosti, koji se nalazi između rezidualnog (θ_r) i zasićenog (θ_s). Tom stupnju odgovara određena vrijednost kapilarnog tlaka, koja se označava oznakom h^* . Iz jednadžbe 3.38 slijedi da je vrijednost parametara α obrnuto proporcionalna vrijednosti tlaka (h_p). Njegov iznos određuje se sljedećom jednadžbom (3.39).

$$\alpha = \frac{1}{h^*} \left(2^{\frac{n}{n-1}} - 1 \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.39)$$

Za dovoljno velike vrijednosti parametara n , parametar m teži jedinici, a α se može aproksimirati kao obrnuto proporcionalnom vrijednost tlaka h^* . Za većinu tala parametar m je bitno manji od jedinice. Primjećuje se da α raste eksponencijalno sa smanjivanjem m . Parametar n definira se na način da se provede derivacija jednadžbe 3.37 i supstituira parametar α u njoj, s jednadžbom 3.39. Njegovu vrijednost moguće je dobiti i na jednostavniji način, ukoliko se odredi nagib tangente (S_t) u točki P na krivulji retencije (3.40).

$$S_t = \frac{1}{\theta_s - \theta_r} \left| \frac{d\theta}{d(\log h)} \right| \quad (3.40)$$

Nakon izračunate vrijednosti S_t , parametar n određuje se empirijskim putem, uz pomoć sljedećih jednadžbi (3.41).

$$n = \begin{cases} e^{(0.8S_t)} & \text{za } 0 < S_t \leq 1 \\ \left(\frac{0.5755}{S_t} + \frac{0.1}{S_t^2} + \frac{0.025}{S_t^3} \right)^{-1} & \text{za } S_t > 1 \end{cases} \quad (3.41)$$

U svrhu rekapituliranja ovog poglavlja, u sljedećoj tablici prikazana je usporedba karakterističnih parametara filtracijskih tokova u zasićenim i nezasićenim poroznim sredinama.

Svojstva	Zasićeno tlo	Nezasićeno tlo
Lokacija	ispod vodenog lica	iznad vodenog lica
Stupanj zasićenosti tla	$\theta=n$	$\theta<n$
Koeficijent filtracije	$k \neq f(\theta)$	$k=f(\theta)$
Vrijednost tlaka	$p>0$	$p<0$
Vrijednost tlačne visine	$h_p>0$	$h_p<0$

4. Model toka vode kroz tijelo nasipa

Nasipi kao hidrotehničke građevine su objekti koji stvaraju razliku potencijala između njihove *uzvodne* i *nizvodne strane*. Uzvodnom stranom nasipa definirano je područje ispunjeno vodom, a nizvodnom stranom smatramo dio nasipa okrenutog prema području branjenom od vode. Voda sadržana na uzvodnoj strani naziva se *gornja voda*, a na nizvodnoj strani, *donja voda*. Posljedica razlika potencijala rezultira strujanjem vode kroz tijelo i temelje nasipa. Takvo strujanje može izazvati određene situacije u kojima njihova stabilnost može biti ugrožena. Za provjeru stabilnosti potrebno je poznavati parametre filtracijskog toka,

što

se postiže izradom odgovarajućeg modela. Primjenjujući numeričko modeliranje za simuliranje takvog oblika strujanja fluda, omogućeno je spoznavanje takvih veličina.

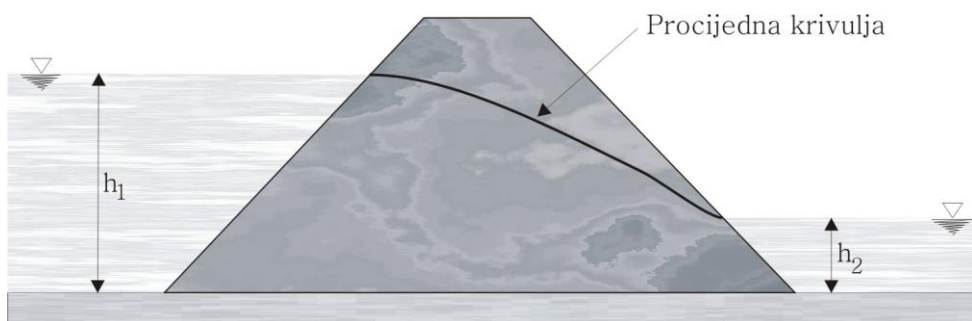
4.1 Svrha numeričkog modela toka vode kroz tijelo nasipa

U ovom poglavlju će biti prikazan način izrade numeričkog modela za simuliranje strujanja vode kroz nasipe izgrađene u svrhu obrane od poplava. Kako su poplave vremenski promjenjivog karaktera, tok vode kroz takve nasipe bit će nestacionarne prirode. U takvim situacijama postoji opasnost ugrožavanja njihove stabilnosti. Prije nego što se krene na daljnja razmatranja, definirat će se osnovni pojmovi vezani za takav oblik strujanja vode.

Zamislimo situaciju u kojoj je ostvareno stacionarno strujanje kroz tijelo nasipa. Na njegovoj uzvodnoj strani, piezometarski potencijal ima određenu vrijednost veću od nule, dok je na strani branjenog područja njegova veličina bitno manja. Strujeći kroz poroznu sredinu, voda se s kote gornje vode mora spustiti na razinu donje vode. Zaključuje se da svaka čestica vode mora posjedovati vertikalnu komponentu brzine. Iz tog razloga formirano vodeno lice će biti zakrivljenog oblika. Uobičajeno je takvo vodeno lice nazivati *procijednom krivuljom*. Ona se definira na isti način kao i slobodno vodeno lice. Na njenoj površini je tlak jednak atmosferskom ($p_a=0$), što dovodi do toga da je piezometarski potencijal točke na njenoj površini jednak geodetskoj koti promatrane točke. Ispod procijedne krivulje tlo se nalazi u potpuno zasićenom stanju ($\theta_s=1$). Udaljavajući se od nje prema kruni nasipa, vrijednost stupnja zasićenosti tla opada ($\theta < 1$) pa se taj dio nasipa nalazi u nezasićenom stanju. Važno je spomenuti da je tlak vode u tom području manji od atmosferskoga.

Na slici 4.1 prikazan je nasip na kojem je vidljiv način procijeđivanja vode kroz njega. U toj slici prepoznaje se procijedna krivulja, kao linija koja spaja kotu gornje i kotu donje vode. Upoznavši se s osnovnim pojmovima, može se nastaviti razmatranje problema stabilnosti nasipa. Strujeći kroz nasipe, voda prolazi kroz njegove pore. U tom toku ona opstrujava čestice tla, djelujući na njih određenom silom. Općenito gledajući, sila tekućine na opstrujavajuće tijelo može se izračunati narednim izrazom (4.1).

$$F = Ac\rho \frac{v^2}{2} \quad (4.1)$$

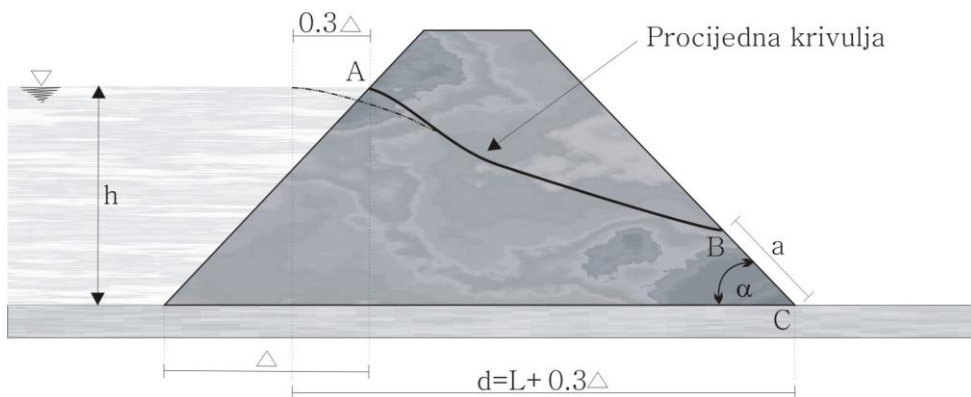


Slika 4.1 Prikaz procijedne krivulje u tijelu nasipa

U toj jednadžbi oznaka A predstavlja projekciju površine čestice tla na ravninu okomitu na smjer strujanja vode. Slovo c označava koeficijent čija vrijednost zavisi o obliku promatranog tijela te se iz tog razloga naziva *koeficijent oblika*, a vrijednost mu se najčešće određuje eksperimentalnim putem. Važno je primijetiti da vrijednost sile kojom tekućina djeluje na opstrujavajuće tijelo raste s kvadratom brzine. Kako sve čestice tla nisu međusobno povezane na jednak način, postoji razlika u silama kojima je potrebno djelovati na njih, kako bi se ostvario njihov prostorni pomak. Vrativši se na strujanje vode kroz tijelo nasipa, zapaziti će se da se u njemu formira nehomogeno polje brzina. Na taj način opstrujavajuća sila vode djeluje na njegove čestice (4.1) pa poprima različite vrijednosti u promatranom prostoru. Te razlike nisu samo uzrokovane različitim brzinama strujanja, već promjenama koeficijenta oblika svake čestice tla. Formirano polje opstrujavajuće sile u tijelu nasipa veoma je složenog karaktera i u praktičnim uvjetima nemoguće ga je odrediti. Sve do sada rečeno olakšat će razumijevanje jednog oblika pojave njegove nestabilnosti. Unutar tijela nasipa mogu postojati područja u kojima je opstrujavajuća sila postigla vrijednost dovoljnu za pokretanje čestica tla. Takve čestice bivaju nošene strujom tekućine, ispirući tlo na području s kojeg su pokrenute. Ukoliko taj proces potraje u nekom vremenu, može doći do znatnog ispiranja materijala unutar tijela nasipa. Gubitak toga odnešenog tla može rezultirati rušenjem nasipa. U tom slučaju rušenje nasipa je posljedica pojave *unutarnje erozije*. Unutarnja erozija sprječava se na način, da raspored dijametara zrna tla ide od sitnijeg prema krupnijem, poštujući *Terzaghijevo filterarsko pravilo*. Po tom pravilu, granulacija tla mora biti takva da nasip bude dovoljno propusan, a opet da bude u stanju zadržati njegove čestice na istim mjestima. Ovaj problem nestabilnosti nasipa nemoguće je promatrati numeričkim modelom, pa se za njegovo rješavanje koristi prijašnje navedeno pravilo.

Druga pojava koja može ugroziti globalnu stabilnost nasipa naziva se *vrelna ploha*. Taj pojam objasniti će se zamišljajući sljedeću situaciju. Pretpostavimo da je strujanje vode u stacionarnom režimu. U tom slučaju procijedna krivulja spaja kotu donje i gornje vode, kao što je prikazano na slici 4.1. Protok ostvaren kroz njegovo tijelo izlazi na nizvodnoj strani, što dovodi do toga da se branjeno područje puni vodom. Pretpostavljeni stacionarni režim strujanja podrazumijeva da ista količina vode koja iz njega izlazi, otječe na nizvodnoj strani. Time procijedna linija ima konstantan oblik u vremenu. Ukoliko se poveća protok otjecanja nizvodne vode, radi održanja jednadžbe kontinuiteta, povećat će se brzina strujanja vode u tijelu nasipa. To povećanje brzine nastavit će se sve dok se vrijednost izlaznog protoka iz nasipa ne izjednači s vrijednosti povećanog protoka donje vode. Nastavivši povećanje protoka donje vode, što ujedno rezultira sniženjem njene razine, povećat će se i protok u nasipu, nastojeći pratiti nastale promjene. Ukoliko se nastavi sa smanjenjem razine donje vode, primjetit će se zanimljiva pojava. Naime, fizički uvjeti tečenja vode kroz porozno tijelo ne dopuštaju povećanje brzine filtracije preko stanovite vrijednosti. Kada brzina filtra-cijskog toka dostigne njenu maksimalnu moguću vrijednost, a razina donje vode nastavi se spuštati, jednadžba kontinuiteta može se zadovoljiti samo povećanjem protočne površine na nizvodnoj strani nasipa. Povećanje te površine očituje se u

podizanju procijedne krivulje iznad razine donje vode. Površina između razine donje vode i točke na nasipu do koje se izdigla procijedna linija, naziva se *vrelna ploha*. Na slici 4.2 je formirana ploha prikazana dužinom a .



Slika 4.2 Prikaz formirane vrelne plohe dužine a

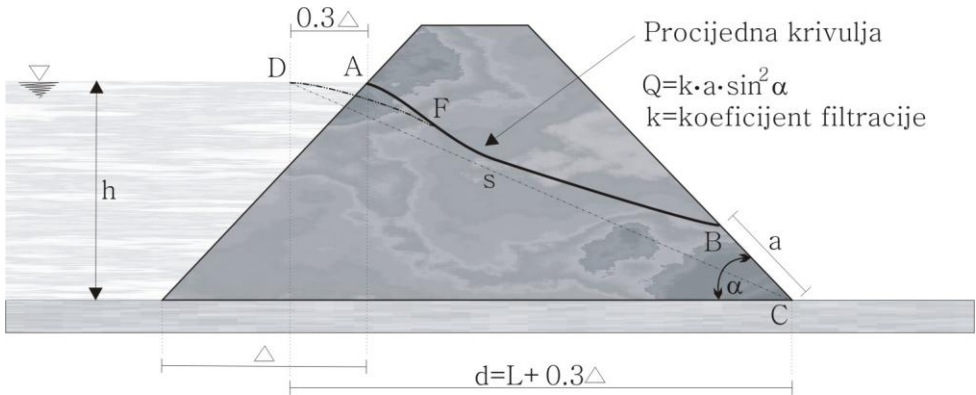
Vrelna ploha uzrokuje nagli pad piezometarskog potencijala, na relativno kratkoj razdaljini. Kako je ona izložena atmosferskom tlaku, vrijednost potencijala na njoj definirana je nagibom pokosa nasipa. Njeno pojavljivanje može uzrokovati ispiranje čestica tla na njenom području. Ukoliko se taj proces nastavlja u vremenu (*progresivna erozija*), postoji mogućnost rušenja nasipa. Takvo je rušenje uzrokovano smanjenjem nosivosti tla na tom području. Iz tog razloga, uvjete formiranja vrelne plohe treba ispitati prije izgradnje takvog objekta. Njenu poziciju i površinu, moguće je dobiti odgovarajućim numeričkim simuliranjem strujanja vode kroz tijelo nasipa. Nekoć se taj problem rješavao na empirijski način. Ukratko će se prikazati način dobivanja vrijednosti takvog problema. Ukoliko je poznata geometrija nasipa i razina gornje vode, veličina vrelne plohe određuje se sljedećim izrazom (4.2).

$$a = \frac{d}{\cos \alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}} \quad (4.2)$$

Geometrijske veličine u toj jednadžbi su iskotirane na prijašnjoj slici (*slika 4.2*). Tu istu vrijednost moguće je dobiti na drugačiji način. Na donjoj slici (*slika 4.3*) prikazana je ista vrelna ploha kao i na prijašnjoj, s tom razlikom da su u njoj druge geometrijske veličine kotirane.

Veličinu nastale vrelne plohe moguće je odrediti koristeći se sljedećim nizom jednadžbi (4.3).

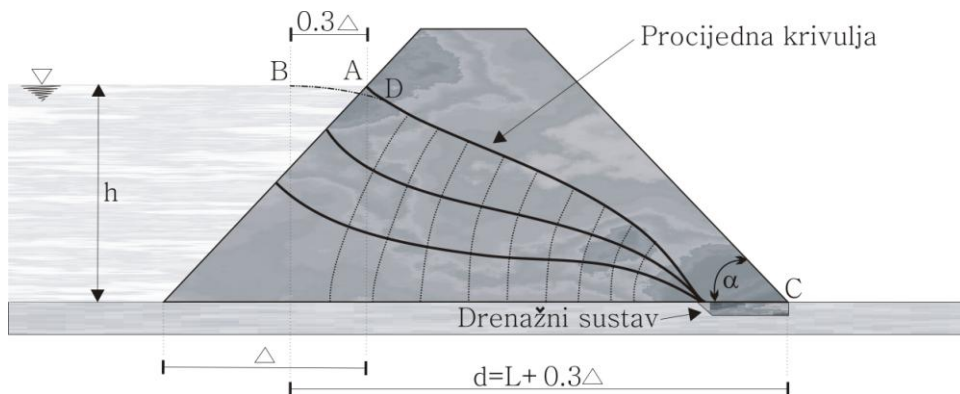
$$a = S - \sqrt{S^2 - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}} \quad , \quad S = \sqrt{d^2 + h^2} \quad , \quad d = L + 0.3\Delta \quad (4.3)$$



Slika 4.3 Prikaz formirane vrelne plohe dužine a

Ukoliko se u proračunima dobiva vrijednost vrelne plohe veća od dopuštene, potrebno je izvršiti odgovarajuće promjene projekta nasipa. Jedna od mogućih varijanti rješenja takvog problema je ugradnja *drenažnog sustava*. Princip djelovanja takvog oblika sprječavanja njene pojave je u tome da se u donjem području nizvodnog pokosa nasipa, nasip sagradi od materijala veće propusnosti od onog u njemu. Na taj način omogućene su veće brzine strujanja u tom području, što olakšava formiranje ravnotežnog stanja između izlaznog protoka i otjecajnog protoka donje vode. Iz tog razloga nije potrebno formiranje vrelne plohe u svrhu zadovoljavanja jednadžbe kontinuiteta. Na slici 4.4 prikazana je strujna mreža za tok kroz tijelo nasute brane, s izgrađenim drenažnim kanalom. Primjer nasute brane može se primijeniti na promatrani nasip, iz razloga što se ta dva objekta uglavnom razlikuju samo po svojim dimenzijama.

Na slici 4.4 primjećujemo da sve strujne cijevi ulaze u ugrađenu drenažu. Na taj način je spriječeno formiranje vrelne plohe te je osiguran nasip od pojave progresivne erozije. Kao što je već napomenuto, strujanje vode kroz nasipe, izgrađene u svrhu obrane od poplava, uvijek je nestacionarnog karaktera. Za takve nasipe postoji opasnost formiranja vrelne plohe. Ovakvu vrstu ugrožavanja nestabilnosti nasipa moguće je sagledati numeričkim modeliranjem. U narednom poglavlju opisać će se kronološki redoslijed uspostavljanja toka kroz takav nasip.



Slika 4.4 Prikaz strujne mreže za slučaj drenažnog sustava u tijelu brane

4.2 Nestacionarno strujanje kroz nasipe

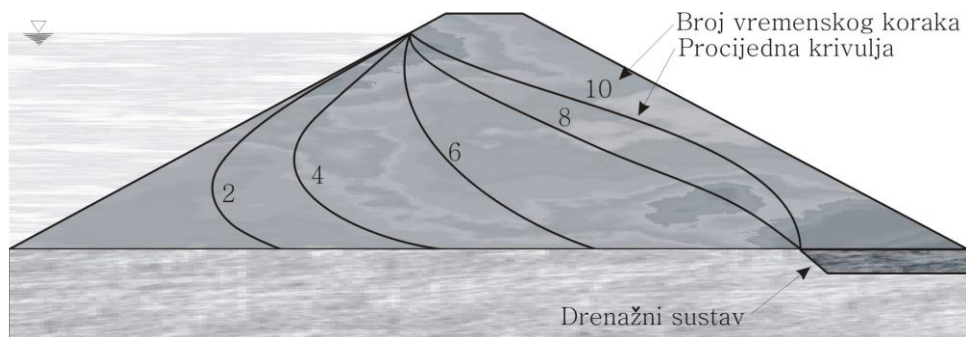
Poplave su prirodni fenomeni koji se javljaju u isprekidanim vremenskim intervalima. Ovisno o geografskom području, one se tokom godine mogu pojavljivati i više puta. Promatranje strujanja kroz nasipe započet će se u vremenu kada poplave nisu prisutne. U takvoj situaciji očito je da ne postoji strujanje vode kroz tijelo nasipa. U jednome od prijašnjih poglavlja (3.6 *Stupanj zasićenosti tla*), porozno tijelo u prirodnim uvjetima nije moguće potpuno isušiti pa unutar njega vlada stupanj rezidualne zasićenosti (θ_r). Nadalje, zamislimo situaciju u kojoj dolazi do pojavljivanja relativno velikog poplavnog vala. U tom slučaju uzvodna strana spomenutog nasipa počinje se ispunjavati vodom. Usvojit će se porast vodnog lica do određene kote, na kojoj se i zaustavlja. Usvaja se pretpostavka da je brzina podizanja razine vode na pokosu nasipa dovoljno velika da se u trenutku njenog zaustavljanja još nije formirao tok kroz nasip. Za realne situacije ova pretpostavka nije ispunjena, ali koristit će kako bi se olakšalo prikazivanje formiranja toka.

Promatranja započinju u trenutku kada kota gornje vode postigne konstantnu vrijednost, a nasip se još uvijek nalazi u nezasićenom stanju. Propusna moć takvog nasipa definirana je nezasićenim koeficijentom filtracije (k_n) koji je ujedno i manji od njegove zasićene vrijednosti (k_s). Voda počinje s prodiranjem u unutrašnjost nasipa. Postepenim ispunjavanjem pora tla, raste zasićenost, što uzrokuje povećanje vrijednosti nezasićenog koeficijenta filtracije. Kako su brzine prodiranja različite, a ovise o tlačnom stupcu vode iznad mjesta penetriranja, brzina zasićenja pora nije jednaka. Na taj način se propusna moć nasipa povećava s njegovom dubinom. Vrijednost nezasićenog koeficijenta filtracije raste nelinearno sa zasićenošću.

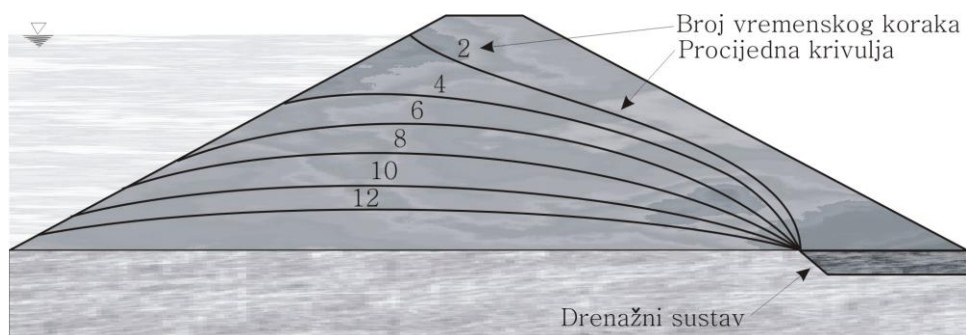
Fiksirajmo jedan dio uzvodnog pokosa. Promatrajmo što se događa u njegovim porama. Ulazeći u pore takvog tla, jedan dio vode ih zapunjuje dok se manji dio nastavlja gibati naprijed. Nastavljajući ispunjavanje pora, povećava se propusna moć tog područja. U trenutku kad su sve pore ispunjene ($\theta=1$), koeficijent filtracije poprima njegovu maksimalnu vrijednost (k_s). Ispred promatranog,

sada zasićenog područja, nasip se dalje nalazi u nezasićenom stanju. Njegovo postepeno zasićenje odvija se analogno prijašnjem opisanom načinu. Zamislimo situaciju u kojoj smo nakon nekog određenog vremena početka penetriranja vode, u mogućnosti zaustaviti vrijeme. Promotrimo raspodjelu zasićenosti u nasipu. Vidljivo je da ona varira od rezidualne vrijednosti do veličine potpunog zasićenja. U području nezasićenog tla vlada tlak manji od atmosferskog dok je onaj u zasićenom djelu ovisan o vrijednosti piezometarskog potencijala. Ukoliko se atmosferski tlak usvoji jednakim nuli, veličina tlaka u nasipu varira od neke negativne vrijednosti do pozitivne. Spojivši vrijednosti atmosferskog tlaka ($p_a=0$), dobiva se oblik slobodnog vodenog lica, koje se za strujanje kroz nasipe naziva *procijednom krivuljom*. Primjećuje se da je njen oblik i položaj specifičan u usporedbi s uobičajenim strujanjem kroz vodonosnik. Ako voda i dalje struji, prijašnji postupak se ponavlja. Procijedna krivulja mijenja svoj oblik i položaj u prostoru. Nastavivši njeno promatranje u vremenu, vidi se da se ona giba kroz nasip. Mijenjanje njenog položaja u vremenu, naziva se *propagacijom procijedne krivulje*.

Na slici 4.5 prikazan je slučaj propagacije procijedne linije kroz tijelo nasipa. U prikazanom primjeru vidi se da je u nasip ugrađen drenažni sustav. Svrha sagledavanja pomaka procijedne krivulje je u tome, da se za neki određeni vremenski period sagleda mogućnost formiranja vrelna plohe. Za nasipe izgrađenih za obranu od poplava, moguće je raspolagati vrijednostima prosječnih trajanja poplava. Na taj način, zadatak se svodi na definiranje propagacije procijedne krivulje unutar tog vremenskog intervala. U takvim situacijama interesantno je promatranje njenog položaja na kraju trajanja poplave. Ako je za to vrijeme došlo do formiranja vrelna plohe, moraju se primijeniti mjere njenog uklanjanja. Jedan od takvih načina, opisan je u prijašnjem tekstu. Njeno formiranje može se spriječiti na još jedan način. Naime, u opisu gibanja procijedne krivulje, rečeno je da njeno napredovanje ovisi o koeficijentu filtracije nasipa. Ukoliko se smanji ta veličina, za isto proteklo vrijeme njen pomak u prostoru bit će manji. Odabir načina sprječavanja formiranja vrelna plohe je ekonomskog karaktera. Pomake procijedne krivulje moguće je sagledati adekvatnim numeričkim modeliranjem. Rezultati takvog modeliranja prikazuju se prostornom i vremenskom raspodjelom piezometarskog potencijala u tijelu nasipa. Vladajuća jednačba sličnog procesa izvedena je u poglavlju 2 (*Osnovne jednačbe nestacionarne filtracije*), a naziva se jednačba nestacionarne laminarne filtracije (jednačba 2.13). Ta jednačba u takvom obliku ne simulira pomake procijedne linije, jer se kod njenog izvoda usvojila pretpostavka da je zasićeni dio sloja kroz koji se odvija tečenje konstantne debljine. Taj nedostatak može se ispraviti ukoliko se vrijednost transmisivnosti (2.16) u njoj prikaže u funkciji razine vodenog lica. Tako modificiranom jednačbom nestacionarne laminarne filtracije moguće je promatrati definiranu pojavu. Radi jednostavnosti, takvi numerički modeli prave se za dvodimenzionalno strujanje u ravnini okomitom na tijelo nasipa. Prilikom izrade takvih modela treba pripaziti i na promjenjiv karakter vrijednosti koeficijenta filtracije, uzrokovanim strujanjem kroz nezasićeno tijelo nasipa. Prijašnje spomenuta vladajuća jednačba ne uzima u obzir takve promjene pa ih treba uzeti u obzir na indirektan način (3.15 *Van Genuchtenov model*).



Slika 4.5 Računalni prikaz pomaka procijedne krivulje u tijelu nasipa



Slika 4.6 Računalni prikaz pomaka procijedne krivulje u tijelu nasipa za slučaj opadanje vodnog lica

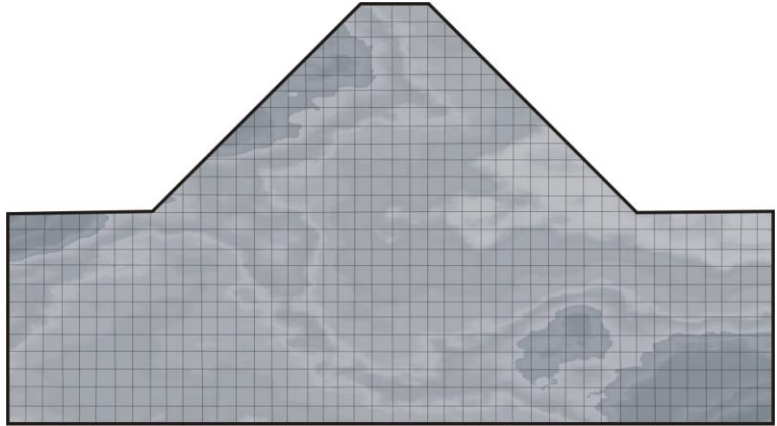
U ovom radu prikazat će se numeričko rješavanje problema propagacije procijedne krivulje kroz anizotropno i nezasićeno tijelo nasipa, koristeći se metodom konačnih diferencija. Unutar ovog poglavlja prikazati će se način dobivanja numeričkog algoritma, a u sljedećem će bit riješen (5. *Primjer modela toka vode kroz tijelo nasipa*). Dobiveni sustav algebarskih jednažbi riješit će se programskim paketom *Mathcad 2001 Professional*.

U ilustrativne svrhe pogledajmo sliku 4.6 na kojoj je prikazana propagacija procijedne krivulje za situaciju spuštavanja razine poplavne vode. Numeričko modeliranje ovakvog procesa se bitno razlikuje od prijašnjeg. Razlog tome leži u različitom definiranju rubnih uvjeta modela.

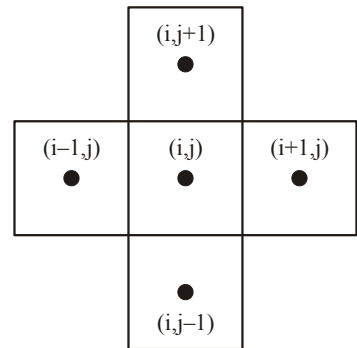
4.3 Diskretizacija prostora

U ovom poglavlju biti će prikazan način provedbe diskretizacijske mreže, za slučaj nasipa parametarski definiranih dimenzija. Promatrat će se i područje ispod nasipa do neke određene dubine. Diskretizacija prostora provodi se metodom konačnih diferencija, na način da formirana mreža bude ekvidistantna ($\Delta x = \Delta y$). Koordinate čvorova u mreži, označit će se slovima i i j . Primjer takve mreže prikazan je na slici 4.7.

Slika 4.7
Diskretizacijska
mreža formirana
za tijelo nasipa



Spomenimo da, ukoliko u takvom nasipu postoji područje specifičnog interesa, moguće je formiranu mrežu na toj lokaciji učiniti gušćom. Na taj način dobiva se precizniji uvid strujanja vode unutar promatranog dijela. Iz tako provedene diskretizacijske mreže izdvojiti će se jedan njen čvor (slika 4.8). Ako su njegove prostorne koordinate (i, j) , koordinate njemu susjednih čvorova mogu se prikazati kao na slici 4.8. Kako vrijednost potencijala u tom čvoru ovisi o vrijednosti istog u susjednim čvorovima, takav pristup njihove numeracije olakšava postavljanje jednadžbi za cijelo područje modela.



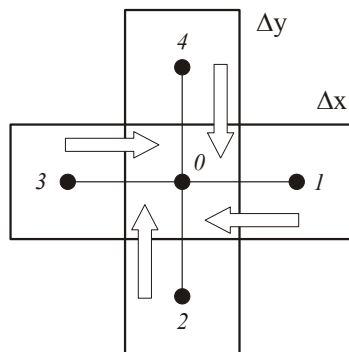
Slika 4.8:
Detalj diskretizacijske mreže

U kasnijem primjeru koristit će se ovaj pristup definiranja njihovih prostornih koordinata. Kako je u svakom čvoru definirana jedna jednadžba, broj jednadžbi koje treba riješiti jednak je broju čvorova. U slučaju iterativnog rješavanja sustava jednadžbi, vladajuće jednadžbe treba riješiti više puta kako bi rješenje konvergiralo točnom. Količina tako nastalih proračuna je prevelika za samostalno rješavanje. Razvojem računalne tehnologije inženjerima je omogućeno rješavanje takvog broja jednadžbi. Iz tog razloga modelarima hidrodinamičkih procesa neophodno je poznavanje osnove računarstva. Odabir broja formiranih čvorova zavisi o performansama računala na kojem se radi. Porast broja čvorova rezultira porastom vremena njihovog rješavanja. Važno je spomenuti da ta veza nije linearnog, već nelinearnog karaktera. Vrijeme potrebno računalu za rješavanje jednadžbi raste s trećom potencijom njihovog broja.

4.4 Diskretizacija vremena

Kako je strujanje kroz nasipe, izgrađene u svrhu obrane od poplava, nestacionarnog karaktera, osim spomenute diskretizacije prostora potrebno je provesti i

diskretizaciju vremena. Pod tim pojmom podrazumijevamo dijeljenje ukupno promatranog vremenskog intervala na diskretne vrijednosti (Δt). Ako prije spomenuta poplava traje deset dana, mogla bi se tražiti rješenja vladajuće jednadžbe na kraju svakog dana. Na taj način, svako bi takvo rješenje davalo oblik i položaj procijedne krivulje u promatranom danu. Unutar svakog takvog inkrementa strujanje se smatra stacionarnim. Sukcesivnim povezivanjem dobivenih rezultata sa susjednim vremenskim intervalima, dobivamo napredovanje procijedne krivulje u vremenu.



Slika 4.9: Pravci kretanja protoka u čvoru 0

4.5 Diskretizacija vladajuće jednadžbe

Za opis strujanja vode kroz nasipe izgrađenih u svrhu obrane od poplava može se koristiti *modificirana jednadžba nestacionarne laminarne filtracije*. U toj jednadžbi vrijednost transmisivnosti (jednadžba 2.16) ulazi kao funkcija razine vodenog lica. Radi lakšeg sagledavanja diskretizacije vladajuće jednadžbe, ona će se provesti za slučaj tečenja s vodoravnim vodenim licem, a transmisivnost u dobivenoj jednadžbi mehanički će biti zamjena s onom u funkciji razine vodenog lica. Numerički oblik parcijalne diferencijalne jednadžbe dobit će se pristupom zadovoljavanja Darcyveve jednadžbe i jednadžbe kontinuiteta unutar svakog čvora diskretizacijske mreže. Prije nego se krene na iznalaženje takvih jednadžbi, promijenit će se numeracija čvorova mreže, označivši njihov položaj u prostoru jednim indeksom. U promatrani čvor ulaze protoci iz njegovih susjednih čvorova. S obzirom na pravac strujanja vode, parametre toka treba označavati indeksima jednakim broju čvora iz kojeg dolaze. Pravci kretanja protoka označeni su na slici 4.9 strelicama. Da bi se numerički zadovoljila jednadžba kontinuiteta, potrebno je poznavati njihove vrijednosti. Za određivanje tih veličina koristit će se Darcyev zakon. Primijenimo taj zakon kako bi odrediti brzinu strujanja vode iz čvora broj 1 prema promatranom čvoru (4.4).

$$v_1 = k I_1 \quad (4.4)$$

U toj jednadžbi I_1 označava pad piezometarskog potencijala na razdaljini diskretizacijskog inkrementa Δx . Formirana razlika potencijala uzrokovana je različitim razinama podzemne vode u čvoru 0 i čvoru 1. Spomenimo da te vrijednosti potencijala pratimo u vremenu t' koje se nalazi unutar odabranog vremenskog inkrementa (Δt). Na taj način jednadžba 4.4 poprima sljedeći oblik (4.5).

$$v_1 = k \frac{h_1(t') - h_0(t')}{\Delta x} \quad (4.5)$$

Protok iz tog pravca dobiva se množeći prijašnji izraz s površinom protočnog presjeka. Ta je površina u ovom slučaju, određena kao umnožak prostornog inkrementa Δy i debljine vodonosnog sloja. Prisjetivši se definicije transmisivnosti (jednadžba 2.16), protok iz čvora I moguće je napisati na sljedeći način (4.6).

$$Q_1 = \Delta y T_1 \frac{h_1(t') - h_0(t')}{\Delta x} \quad (4.6)$$

Zadovoljavanje jednadžbe kontinuiteta u čvoru O provodi se na način da se zbroj svih protoka izjednači sa članom nestacionarnosti jednadžbe gibanja podzemne vode. Učinivši rečeno, jednadžba kontinuiteta poprima sljedeći oblik (4.7).

$$h_{i,j}(t + \Delta t) \left[-\frac{T_{i-1,j}}{\Delta x^2} - \frac{T_{i+1,j}}{\Delta x^2} - \frac{T_{i,j-1}}{\Delta y^2} - \frac{T_{i,j+1}}{\Delta y^2} - \frac{S_{i,j}}{\Delta t} \right] \\ = \\ -h_{i-1,j}(t + \Delta t) \frac{T_{i-1,j}}{\Delta x^2} - h_{i+1,j}(t + \Delta t) \frac{T_{i+1,j}}{\Delta x^2} - h_{i,j-1}(t + \Delta t) \frac{T_{i,j-1}}{\Delta y^2} - h_{i,j+1}(t + \Delta t) \frac{T_{i,j+1}}{\Delta y^2} - \frac{S_{i,j} h_{i,j}(t)}{\Delta t} \quad (4.7)$$

Ta jednadžba treba biti zadovoljena unutar svakog čvora diskretizacijske mreže. Da bi se mogao napisati takav sustav jednadžbi, potrebno je vratiti numeraciju čvorova sa prostornim koordinatama i i j .

$$\begin{array}{ll} h_0 \rightarrow h_{i,j} & T_1 \rightarrow T_{i+1,j} \\ h_1 \rightarrow h_{i+1,j} & T_2 \rightarrow T_{i,j-1} \\ h_2 \rightarrow h_{i,j-1} & T_3 \rightarrow T_{i-1,j} \\ h_3 \rightarrow h_{i-1,j} & T_4 \rightarrow T_{i,j+1} \\ h_4 \rightarrow h_{i,j+1} & S_0 \rightarrow S_{i,j} \end{array} \quad (4.8)$$

Nakon provedene zamjene članova za sve čvorove unutar diskretizacijske mreže, dobiva se sustav algebarskih jednadžbi. Sustav dobivenih jednadžbi, predstavljen je sljedećim izrazom (4.9).

$$\frac{S_{i,j}}{\Delta t} [h_{i,j}(t + \Delta t) - h_{i,j}(t)] \\ = \\ T_{i+1,j} \frac{h_{i+1,j}(t') - h_{i,j}(t')}{\Delta x^2} + T_{i,j-1} \frac{h_{i,j-1}(t') - h_{i,j}(t')}{\Delta y^2} + \\ + T_{i-1,j} \frac{h_{i-1,j}(t') - h_{i,j}(t')}{\Delta x^2} + T_{i,j+1} \frac{h_{i,j+1}(t') - h_{i,j}(t')}{\Delta y^2} \quad (4.9)$$

Broj nepoznatih vrijednosti piezometarskog potencijala jednak je broju dobivenih jednadžbi. Čvorovi koji definiraju rub modeliranog područja moraju biti unaprijed definirani vrijednostima potencijala u njima. Prije nego se započne rješavati dobiven sustav jednadžbi, potrebno je odrediti vrijeme t'

unutar vremenskog inkrementa (Δt), u kojem će se tražiti raspodjela potencijala u čvorovima. Odabir tog vremena može se provesti na tri načina. U slučaju da se on nalazi na početku vremenskog inkrementa ($t^*=t$), takav pristup naziva se *eksplicitnim*. Na takav način, usvaja se vrijednost nepoznatog potencijala $h_{i,j}(t^*)$ na početku vremenskog intervala u kojem je poznata razina vode u čvoru. Ovakav pristup modeliranja ima manu da za prevelike vrijednosti Δt numerički model postaje *nestabilan*. Numerička nestabilnost modela očituje se u tome da dobiveni rezultati nemaju fizikalnog značaja. Ukoliko se vrijednost nepoznatog potencijala usvoji u vremenu $t^*=t+\Delta t$, takav postupak naziva se *implicitnim*, što znači da se njegova vrijednost aproksimirala na osnovi poznatog stanja na kraju vremenskog inkrementa. Ovim pristupom numerički model postaje bezuvjetno stabilan.

Implicitni pristup biti će korišten u narednom poglavlju (5. *Primjer modela toka vode kroz tijelo nasipa*) prilikom izrade modela nestacionarnog strujanja vode kroz tijelo nasipa. U tu svrhu prikazat će se oblik gornje jednačbe (4.9), dobiven nakon primjene takvog načina aproksimiranja nepoznate vrijednosti piezometarskog potencijala (4.10).

$$h_{i,j}(t + \Delta t) \left[-\frac{T_{i-1,j}}{\Delta x^2} - \frac{T_{i+1,j}}{\Delta x^2} - \frac{T_{i,j-1}}{\Delta y^2} - \frac{T_{i,j+1}}{\Delta y^2} - \frac{S_{i,j}}{\Delta t} \right] \quad (4.10)$$

$$=$$

$$-h_{i-1,j}(t + \Delta t) \frac{T_{i-1,j}}{\Delta x^2} - h_{i+1,j}(t + \Delta t) \frac{T_{i+1,j}}{\Delta x^2} - h_{i,j-1}(t + \Delta t) \frac{T_{i,j-1}}{\Delta y^2} - h_{i,j+1}(t + \Delta t) \frac{T_{i,j+1}}{\Delta y^2} - \frac{S_{i,j} h_{i,j}(t)}{\Delta t}$$

Na desnoj strani gornje jednačbe (4.10) nalazi se nepoznata veličina potencijala $h_{i,j}$ u vremenu $t+\Delta t$. Vidi se da ona ovisi o vrijednostima potencijala u njenim susjednim čvorovima unutar istog vremenskog intervala. Za rješavanje takve jednačbe koristi se iterativni postupak. Član jednačbe u kojem se nalazi vrijednost potencijala na početku vremenskog intervala ($h_{i,j}(t)$), definira početne uvjete. Ta jednačba simulira nestacionarno strujanje podzemne vode s vodoravnim vodenim licem. Da bi se mogla koristiti za sagledavanje propagacije procijedne krivulje, potrebno je transmisivnost definirati u funkciji njene razine. Na taj način vrijednost transmisivnosti u čvoru $h_{i,j}$ poprima sljedeći oblik (4.11).

$$T_{i,j} = k h_{i,j}(t + \Delta t) \quad (4.11)$$

U implicitnoj shemi takva se vrijednost transmisivnosti mora usvojiti za veličinu potencijala $h_{i,j}$ u vreme $t+\Delta t$. Uvrštavajući tako izraženu transmisivnost u gornju jednačbu (4.11), pazeći na način njenog definiranja za pojedine čvorove, dobiva se njen modificiran oblik (4.12).

$$\begin{aligned}
 h_{i,j}(t + \Delta t) & \left[-\frac{k h_{i-1,j}(t + \Delta t)}{\Delta x^2} - \frac{k h_{i+1,j}(t + \Delta t)}{\Delta x^2} - \frac{k h_{i,j-1}(t + \Delta t)}{\Delta y^2} - \frac{k h_{i,j+1}(t + \Delta t)}{\Delta y^2} - \frac{S_{i,j}}{\Delta t} \right] \\
 & = \\
 & - h_{i-1,j}(t + \Delta t) \frac{k h_{i-1,j}(t + \Delta t)}{\Delta x^2} - h_{i+1,j}(t + \Delta t) \frac{k h_{i+1,j}(t + \Delta t)}{\Delta x^2} - \\
 & - h_{i,j-1}(t + \Delta t) \frac{k h_{i,j-1}(t + \Delta t)}{\Delta y^2} - h_{i,j+1}(t + \Delta t) \frac{k h_{i,j+1}(t + \Delta t)}{\Delta y^2} - \frac{S_{i,j} h_{i,j}(t)}{\Delta t}
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

Dobivena jednadžba je nelinearna. Linearizaciju je moguće provesti na način da se veličina nepoznatog potencijala u izrazu za transmisivnost, zamijeni s njegovom vrijednosti iz prijašnjeg iteracijskog ciklusa. U prvom postupku provedbe iteracije njena je vrijednost definirana početnim uvjetima. Nakon rečenog krećemo u iteracijski izračun. Iterativna shema se ponavlja dok nije zadovoljen uvjet da te razlike budu manje od prijašnje definirane vrijednosti ε (4.13).

$$\left| h_{i,j}(t + \Delta t) - h_{i,j}^s(t + \Delta t) \right| < \varepsilon \tag{4.13}$$

Početkom penetriranja vode u tijelo nasipa, njegov materijal je bio u nezasićenom stanju. Stupanj njegove zasićenosti naziva se rezidualnim (θ_r). Ta veličina predstavlja najmanji stupanj zasićenosti tla, iz razloga što vodu prisutnu u njemu nije moguće odstraniti prirodnim putem (3.4 *Pojam apsorbirane vode*). Dakako, s prolaskom vremena pore nasipa se ispunjavaju prodiranjem vode unutar njega, što povećava stupanj rezidualne zasićenosti. Promotrimo situaciju u kojoj je voda, stupanj njegove zasićenosti dovela u maksimalnu vrijednost ($\theta_s=I$). Pitajmo se koliku će količinu vode ispustiti jedinčna zapremina njegovog tla, ukoliko se stupac vode u njemu spusti za jedinicu. Zaključuje se da je vrijednost ispuštene vode jednaka razlici stupnjeva potpune zasićenosti tla i njene rezidualne vrijednost ($\theta_s - \theta_r$). Ponovivši definiciju koeficijenta uskladištenja, vidjet će se da ona nije adekvatna za simuliranje tečenja kroz tijelo nezasićenog nasipa. Njenu vrijednost u gornjoj jednadžbi (4.13) potrebno je zamijeniti prijašnje spomenutom razlikom. Na taj način, dobiva se diskretizacijski oblik valadajuće jednadžbe koja opisuje propagaciju procijedne krivulje u vremenu (4.14).

$$\begin{aligned}
 h_{i,j}(t + \Delta t) & \left[-\frac{k h_{i-1,j}(t + \Delta t)}{\Delta x^2} - \frac{k h_{i+1,j}(t + \Delta t)}{\Delta x^2} - \frac{k h_{i,j-1}(t + \Delta t)}{\Delta y^2} - \frac{k h_{i,j+1}(t + \Delta t)}{\Delta y^2} - \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\Delta t} \right] \\
 & = \\
 & - h_{i-1,j}(t + \Delta t) \frac{k h_{i-1,j}(t + \Delta t)}{\Delta x^2} - h_{i+1,j}(t + \Delta t) \frac{k h_{i+1,j}(t + \Delta t)}{\Delta x^2} - \\
 & - h_{i,j-1}(t + \Delta t) \frac{k h_{i,j-1}(t + \Delta t)}{\Delta y^2} - h_{i,j+1}(t + \Delta t) \frac{k h_{i,j+1}(t + \Delta t)}{\Delta y^2} - \frac{(\theta_s - \theta_r) h_{i,j}(t)}{\Delta t}
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

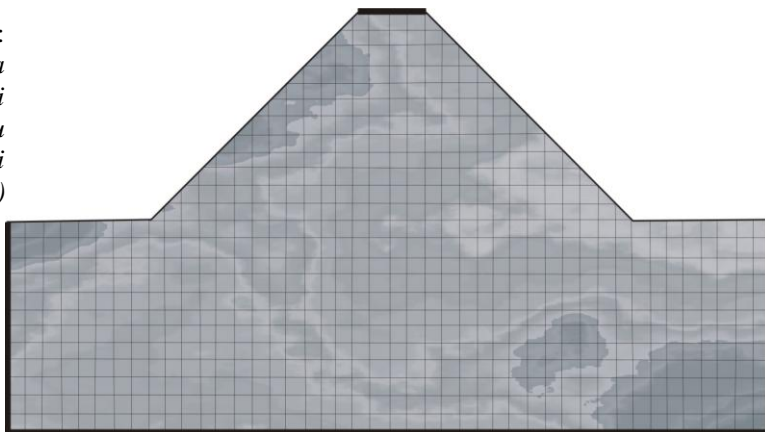
Promjene vrijednosti koeficijenta filtracije, uzrokovane različitim stupnjevima zasićenosti tla, uzet će se u obzir van Genutcheovim modelom. Postupak

kojim će se to provesti, bit će pokazan u poglavlju 4.8 (*Modeliranje postepenog zasićenja tijela nasipa*).

4.6 Definiranje rubnih i početnih uvjeta

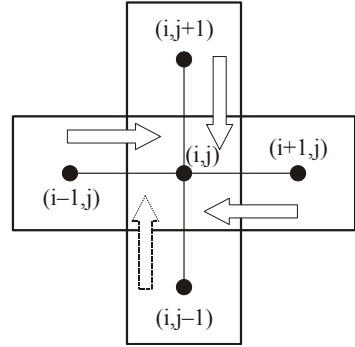
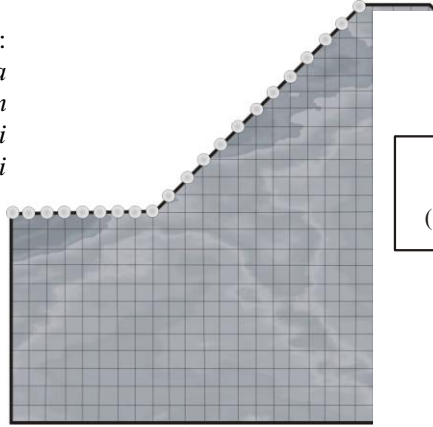
Prisjetivši se definicije rubnih uvjeta, rečeno je da oni definiraju vrijednost piezometarskog potencijala na rubovima modeliranog područja. Svakom takvom čvoru pridružuje se jedna brojčana vrijednost. Ona se sastoji od zbroja piezometarske visine u čvoru i njegove geodetske kote. Da bi se definirao položaj čvorova u prostoru, potrebno je postaviti referentnu ravninu od koje će započeti mjerenje visinske razlike. Za model toka kroz tijelo nasipa, ona se postavlja paralelno s vodonepropusnim slojem tla, koji se nalazi na nekoj određenoj dubini ispod nasipa. Bokovi modela se isto tako smatraju vodonepropusnim. Taj je uvjet ispunjen ukoliko je diskretizirano područje ispod nasipa relativno velikih dimenzija. Ako nema infiltracije oborina, kruna se također smatra vodonepropusnim područjem. Takvi rubovi modela su na slici 4.10 prikazani debljom crtom.

Slika 4.10:
*Prikaz rubova
modela koji
se smatraju
vodonepropusni
m (deblje linije)*



Vrijeme početka nestacionarnog strujanja smatra se ono, u kojem je razina gornje vode dostigla jednu određenu vrijednost i još nije došlo do penetriranja vode u tijelo nasipa. Ukoliko su poznate: kota referentne ravnine, razina gornje vode i geometrijske svojstva nasipa, moguće je definirati numeričke vrijednosti potencijala na njegovoj uzvodnoj strani. Spomenimo da propagaciju procjedne krivulje promatramo uz uvjet da te vrijednosti ostaju konstantne u vremenu. Dobiven raspored potencijala na rubu modela, predstavlja Dirichletov rubni uvjet. Takvi su čvorovi diskretizacijske mreže, na slici 4.11 prikazani točkama.

Slika 4.11:
Prikaz područja
modela na kojem
su definirani
rubni uvjeti



Slika 4.12: Čvora kraj
vodonepropusne podloge

Nadalje će se definirati jednadžbe koje opisuju vrijednost potencijala na nepropusnim konturama modela. Pretpostavimo da je diskretizacijska mreža dovoljno velika da pokrije područje veće od promatranog prostora. Na taj način vodonepropusna granica prolazi kroz odgovarajuće čvorove takve mreže. Na slici 4.12 je prikazan čvor (i,j) koji se nalazi na vodonepropusnoj konturi. Razumljivo je da iz čvora mreže na suprotnoj strani vodonepropusne podloge, nije moguće ostvariti protok prema promatranom čvoru. Takav neostvareni protok je na slici (slika 4.12) označen točkastom strelicom. U numeričkoj shemi čvorovi iz kojih nije moguće ostvariti protok, tretiraju se na način da im se pridodaje vrijednost transmisivnosti jednaka nuli. Za primjer sa slike možemo napisati sljedeće (4.15).

$$T_{i,j-1} = 0 \quad (4.15)$$

Ako se jednadžba kontinuiteta u takvom čvoru zadovolji primjenom Darcyevog zakona u svrhu iznalaženja protoka prema njemu, dobit će se slična jednadžba kao prije (4.14). Jednadžbe se razlikuju u tome što članovi koji sadrže vrijednost transmisivnosti u čvoru nasuprot vodonepropusnog sloja, postaju jednaki nuli, pa ih se može zanemariti. Na taj način, jednadžba koja treba biti zadovoljena u takvim čvorovima prelazi u naredan oblik (4.16).

$$\begin{aligned}
 h_{i,j}(t + \Delta t) & \left[-\frac{k h_{i-1,j}(t + \Delta t)}{\Delta x^2} - \frac{k h_{i+1,j}(t + \Delta t)}{\Delta x^2} - \frac{0}{\Delta y^2} - \frac{k h_{i,j+1}(t + \Delta t)}{\Delta y^2} - \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\Delta t} \right] \\
 & = \\
 & - h_{i-1,j}(t + \Delta t) \frac{k h_{i-1,j}(t + \Delta t)}{\Delta x^2} - h_{i+1,j}(t + \Delta t) \frac{k h_{i+1,j}(t + \Delta t)}{\Delta x^2} - \\
 & - h_{i,j-1}(t + \Delta t) \frac{0}{\Delta y^2} - h_{i,j+1}(t + \Delta t) \frac{k h_{i,j+1}(t + \Delta t)}{\Delta y^2} - \frac{(\theta_s - \theta_r) h_{i,j}(t)}{\Delta t}
 \end{aligned} \quad (4.16)$$

Ukoliko vodonepropusna granica prolazi kroz dva susjedna čvora onog promatranog, analognim postupkom može se dobiti numerički oblik vladajuće jednadžbe za tako postavljen čvor. Napisat će se jednadžba za primjer da se proma-

trani čvor (i, j) nalazi na donjem lijevom kutu diskretizacijske mreže. U takvom čvoru treba biti zadovoljena sljedeća jednadžba (4.17).

$$\begin{aligned}
 h_{i,j}(t + \Delta t) & \left[-\frac{0}{\Delta x^2} - \frac{k h_{i+1,j}(t + \Delta t)}{\Delta x^2} - \frac{0}{\Delta y^2} - \frac{k h_{i,j+1}(t + \Delta t)}{\Delta y^2} - \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\Delta t} \right] \\
 & = \\
 & - h_{i-1,j}(t + \Delta t) \frac{0}{\Delta x^2} - h_{i+1,j}(t + \Delta t) \frac{k h_{i+1,j}(t + \Delta t)}{\Delta x^2} - \\
 & - h_{i,j-1}(t + \Delta t) \frac{0}{\Delta y^2} - h_{i,j+1}(t + \Delta t) \frac{k h_{i,j+1}(t + \Delta t)}{\Delta y^2} - \frac{(\theta_s - \theta_r) h_{i,j}(t)}{\Delta t}
 \end{aligned} \tag{4.17}$$

Vidi se da nije neophodno da diskretizacijska mreža prelazi vodonepropusna područja. Ukoliko su ona sadržana na njenim rubovima, moguće je dobiti oblik njihove jednadžbe, zamišljajući fiktivne čvorove izvan granica modela. U takvim čvorovima pretpostavlja se vrijednost transmisivnosti jednaka nuli, i provodimo nalaženje jednadžbe za čvor na vodonepropusnoj granici na isti način kao i prije.

Uobičajeno je tokove podzemnih voda promatrati jednim unaprijed izrađenim univerzalnim modelom. Izrada takvog modela sastoji se u tome da se diskretizacijska mreža formira relativno velika, kako bi mogla pokriti većinu praktičnih problema koji se razmatraju. Kako se problemi međusobno razlikuju u geometrijskim osobinama i parametrima toka, u tako formiranoj mreži geometriju promatranog područja opisujemo odgovarajućim definiranjem transmisivnosti u čvorovima nepropusnih kontura. Ukoliko se u takvom području modela nalazi zona u kojoj nema strujanja, svim čvorovima unutar nje moraju se pridodati vrijednosti transmisivnosti jednake nuli.

Vratimo se na model nasipa pa zamislimo da numeričkim putem treba ispitati rad drenažnog sustava u njemu. Spomenimo da se drenažni sustav postavlja da bi se spriječilo formiranje vrelne plohe (*4.1 Svrha numeričkog modela toka vode kroz tijelo nasipa*). Ulazeći u drenažni sustav voda poprima konstantnu vrijednost potencijala. Ta vrijednost ovisi o geodetskoj koti samog drenažnog kanala. Zaključuje se da bi čvorovi mreže koji pokrivaju to područje trebali u vremenu zadržati konstantnu vrijednost potencijala. Ukoliko se poznaje geodetska kota drenaže, veličina takvih potencijala može se lako odrediti. Postavlja se pitanje kako ju održati konstantnom u različitim vremenskim inkrementima. To se postiže ukoliko članovi nestacionarnosti jednadžbe 4.14 poprimaju iznimno velike vrijednosti. Za numeričko modeliranje takvih čvorova, u njima se usvaja iznimno velika vrijednost koeficijenta uskladištenja ($S=10^{30}$). Ukoliko promatramo strujanje kroz spomenut primjer nasipa, umjesto koeficijentu uskladištenja, takva vrijednost mora se pridodati razlici stupnjeva potpune i rezidualne zasićenosti ($\theta_s - \theta_r = 10^{30}$).

4.7 Modeliranje anizotropije

U izradi numeričkog modela za strujanje vode kroz tijelo nasipa, mora se uzeti u obzir, ukoliko ono postoji, anizotropno svojstvo materijala od kojeg je izgrađen. Za primjer nasipa pretpostavlja se da je on izgrađen od homogenog materijala sa anizotropnim svojstvima. Usvaja se da je vrijednost vodoravnog koeficijenta filtracije veća od vertikalne. Anizotropija se modelira na način da se realno područje modela distorzira. Taj se postupak provodi tako da se prostorni inkrement diskretizacijske mreže u x smjeru (Δx) zamijeni s njegovom transformiranom vrijednosti (Δx_t). Transformacija se vrši na način da se prostorni inkrement Δx pomnoži s *faktorom anizotropije* ξ . Veličina tog faktora ovisi o omjeru vertikalnog i vodoravnog koeficijenta filtracije, a vrijednost joj je jednaka korijenu tog omjera (4.18).

$$\xi = \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \Rightarrow \Delta x_t = \Delta x \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (4.18)$$

Nakon transformacije prostornog inkrementa, ta se vrijednost uvodi u jednadžbu toka, supstituirajući je s veličinom Δx . Važno je primijetiti da formirana mreža čvorova ostaje nepromijenjena (4.19).

$$\begin{aligned} h_{i,j}(t + \Delta t) & \left[-\frac{k h_{i-1,j}(t + \Delta t)}{\Delta x_t^2} - \frac{k h_{i+1,j}(t + \Delta t)}{\Delta x_t^2} - \frac{k h_{i,j-1}(t + \Delta t)}{\Delta y^2} - \frac{k h_{i,j+1}(t + \Delta t)}{\Delta y^2} - \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\Delta t} \right] \\ & = \\ & - h_{i-1,j}(t + \Delta t) \frac{k h_{i-1,j}(t + \Delta t)}{\Delta x_t^2} - h_{i+1,j}(t + \Delta t) \frac{k h_{i+1,j}(t + \Delta t)}{\Delta x_t^2} - \\ & - h_{i,j-1}(t + \Delta t) \frac{k h_{i,j-1}(t + \Delta t)}{\Delta y^2} - h_{i,j+1}(t + \Delta t) \frac{k h_{i,j+1}(t + \Delta t)}{\Delta y^2} - \frac{(\theta_s - \theta_r) h_{i,j}(t)}{\Delta t} \end{aligned} \quad (4.19)$$

Rješavajući ovu jednadžbu, dobiva se raspored piezometarskog potencijala unutar tijela nasipa, za odabrani vremenski inkrement. Na strujnu sliku učinak anizotropije manifestirat će se na način da kut između ekvipotencijalnih i strujnih linija nije više vrijednost od devedeset stupnjeva, kao što je to bio slučaj za tok kroz izotropnu sredinu. Formirani kut biti će u funkciji faktora anizotropije, a njegovu vrijednost može se odrediti sljedećim izrazom (4.20).

$$\delta = 2 \arctg \frac{1}{\xi} \quad (4.20)$$

U narednom poglavlju (5. *Primjer modela toka vode kroz tijelo nasipa*), učinak anizotropije uzet će se u obzir prilikom izrade konkretnog primjera numeričkog modela za tok vode kroz nasip.

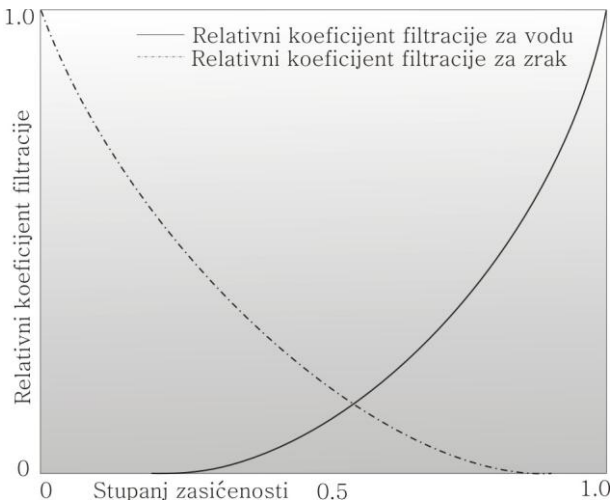
4.8 Modeliranje postepenog zasićenja tijela nasipa

Stupanj zasićenosti tla modelirat ćemo u svrhu određivanja vrijednosti nezasićenog koeficijenta filtracije (k_n). Kao što smo rekli u poglavlju 3.14 (*Ovisnost koeficijenta filtracije o stupnju zasićenosti tla*), porastom zasićenosti tla raste njegova propusna moć. Veza između ta dva parametara je nelinearnog karaktera, što dovodi do toga da porastom zasićenosti vrijednost koeficijenta filtracije raste po određenom eksponencijalnom zakonu. Tipičan primjer takve veze prikazan je na dijagramu na slici 4.13.

Da bi se te promjene uključile u numerički model, ukratko će se ponoviti neki pojmovi sadržani u prijašnjim poglavljima. Počnimo s varijacijom vrijednosti koeficijenta filtracije. Ukoliko se tlo nalazi u stanju zasićenosti manjeg od jedinice ($\theta < 1$), njegova propusna moć definirana je nezasićenim koeficijentom filtracije (k_n). Povećavanjem stupnja zasićenosti, veličina propusne moći raste do jedne određene granice. Kada je tlo u potpuno zasićenom stanju, koeficijent filtracije poprima njegovu maksimalnu vrijednost, pa se naziva zasićeni koeficijent filtracije (k_s). Dakle, veličine između njegove maksimalne i minimalne vrijednosti zovemo nezasićeni koeficijentom filtracije (k_n) i upravo su nam one potrebne za opisivanje toka kroz takvo tlo. Nama su one od posebnog značaja, jer njihovim uvođenjem u jednadžbu toka (4.14) možemo simulirati strujanje kroz nezasićenu sredinu. Provedbom takve supstitucije spomenuta jednadžba poprima oblik (4.21).

$$\begin{aligned}
 h_{i,j}(t+\Delta t) & \left[-\frac{k_n h_{i-1,j}(t+\Delta t)}{\Delta x^2} - \frac{k_n h_{i+1,j}(t+\Delta t)}{\Delta x^2} - \frac{k_n h_{i,j-1}(t+\Delta t)}{\Delta y^2} - \frac{k_n h_{i,j+1}(t+\Delta t)}{\Delta y^2} - \frac{(\theta_s - \theta)}{\Delta t} \right] \\
 & = \\
 & -h_{i-1,j}(t+\Delta t) \frac{k_n h_{i-1,j}(t+\Delta t)}{\Delta x^2} - h_{i+1,j}(t+\Delta t) \frac{k_n h_{i+1,j}(t+\Delta t)}{\Delta x^2} - \\
 & -h_{i,j-1}(t+\Delta t) \frac{k_n h_{i,j-1}(t+\Delta t)}{\Delta y^2} - h_{i,j+1}(t+\Delta t) \frac{k_n h_{i,j+1}(t+\Delta t)}{\Delta y^2} - \frac{(\theta_s - \theta) h_{i,j}(t)}{\Delta t}
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

Slika 4.13:
Ovisnost koeficijenta



filtracije o stupnju zasićenosti tla

Na taj način, napisanu jednadžbu treba riješiti za ostvareni stupanj zasićenosti tla u odabranom vremenskom inkrementu. Sljedeća zadaća je odrediti numeričku vrijednost takvog koeficijenta filtracije. Vrativši se na primjer nasipa, rečeno je da se u njegovom tijelu postepeno povećava stupanj zasićenosti. Kao njena početna vrijednost usvaja se stupanj rezidualne zasićenosti (θ_r). Prodiranjem vode, ta vrijednost raste. Da bi se odredila vrijednost nezasićeni koeficijent filtracije, uvodi se pojam relativnog stupnja zasićenosti tla (4.22).

$$S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4.22)$$

Ovisno o promatranom tlu, vrijednosti rezidualnog i potpunog stupnja zasićenosti moguće je pronaći u odgovarajućoj literaturi. Na taj način, određivanje relativne zasićenosti uzorka svodi se na spoznavanje ostvarenog stupnja zasićenosti (θ). Da bi se odredila takva vrijednost, spomenut će se njene veze s veličinom kapilarnog tlaka u porama tla. Naime, porastom tlaka u porama raste i njegoza zasićenost na nelinearan način. Vratimo se na trenutak diskretiziranoj vladajućoj jednadžbi za simuliranje toka kroz nasip. Vidi se da njena rješenja svakom čvoru diskretizacijske mreže pridružuju vrijednost piezometarskog potencijala. Ta se veličina sastoji od geodetske kote čvora i tlaka u njemu. Kako je njegoza prostorna koordinata poznata, može se odrediti i njegoza visinska kota. Na taj način, oduzimajući vrijednost njegovog potencijala sa vrijednosti njegovog visinskog položaja, dobiva se vrijednost tlaka vode u takvom čvoru. Za određivanje stupnja zasićenosti tla u promatranom čvoru, problem se svodi na razotkrivanje nelinearne veze između ostvarenog tlaka i stupnja zasićenosti. Mnogo je istraživača proučavalo tu vezu, a u ovom radu koristit će se rezultati istraživanja van Genutchena. Te rezultate on prikazuje jednim parom analitičkih jednadžbi. Odabir njihovog korištenja zavisi o tlaku u promatranom čvoru. Ukoliko je taj tlak veći od atmosferskog, stupanj zasićenosti je jednak njegovoj maksimalnoj vrijednosti (θ_s). Na taj način, van Genutchenov model predstavlja se nizom sljedećih jednadžbi (4.23).

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 + (\alpha |h_p - h_{p_a}|)^n \right]^m & \text{za } h_p < h_{p_a} \\ \theta &= \theta_s & \text{za } h_p \geq h_{p_a} \end{aligned} \quad (4.23)$$

Iznimno je važno spomenuti da se u tim jednadžba tlak prikazuje u visinskom obliku (h_p). U jednadžbi koja opisuje stupanj zasićenosti, za vrijednost tlaka manjoj od atmosferskoga, susreću se već prije spomenuti parametri n , m i α . Veličina, kao i razlog njihove prisutnosti, tumačili su se u prijašnjim poglavljima (3.16 Van Genutchenovi parametri). Nakon izračunate vrijednosti stupnja zasićenosti, primjenjujući odgovarajuću jednadžbu van Genutchenovog modela, moguće je dobiti njegovu relativnu veličinu (4.24).

$$S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[1 + \left(\alpha |h_p - h_{p_a}| \right)^n \right]^m \quad \text{za } h_p < h_{p_a}$$

$$S = 1 \quad \text{za } h_p \geq h_{p_a} \quad (4.24)$$

Na početku poglavlja, rečeno je da je za simuliranje toka u nezasićenim uvjetima tla potrebno poznavati vrijednost njegove propusne moći koja ovisi o postignutom stupnju zasićenosti. U takvim uvjetima strujanja, propusna moć materijala je definirana nezasićenim koeficijentom filtracije. Isto tako za potrebe numeričke simulacije strujanja, nezasićenost sredine uzima se u obzir zamjenom koeficijenta filtracije (k) u jednadžbi toka, s njegovom nezasićenom veličinom (k_n). Kako je veličina nezasićenog koeficijenta filtracije uvijek manja od njegove zasićene vrijednosti, ona se može dobiti umnoškom zasićenog koeficijenta filtracije s bezdimenzionalnim faktorom manjim od jedinice (4.25). Taj faktor se naziva *relativni koeficijent filtracije* (k_r).

$$k_n = k_s k_r \quad (4.25)$$

Zadatak se sada svodi na određivanje vrijednosti relativnog koeficijenta filtracije. Očito je da će njegova veličina ovisiti o postignutom stupnju zasićenosti, što se sada može pratiti ovisno o postignutom tlaku u porama tla (4.23). Spomenimo da se nakon više eksperimentalnih pokusa ustanovilo, da je njegova veličina povezana sa zasićenošću materijala nelinearnim zakonom. Van Genuchten razotkriva tu vezu predlažući sljedeću jednadžbu za njeno opisivanje (4.26).

$$k_r = \sqrt{S} \left[1 - \left(1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (4.26)$$

Rekapitulirat će se rečeno u ovom poglavlju, u svrhu prikazivanja kronološkog redoslijeda izračunavanja pojedinih parametara, kako bi se u konačnosti dobila vrijednost nezasićenog koeficijenta filtracije. Da bi takve jednadžbe mogle biti uključene u model toka kroz tijelo nasipa, morat će se pojedine parametre unutar njih uključiti u diskretizacijsku mrežu. Na taj način, pratit će se stupanj zasićenosti tla unutar svakog čvora mreže ($\theta_{i,j}$). Takav pristup će u svakom čvoru zasebno izračunavati vrijednost nezasićenog koeficijenta filtracije ($k_{n \ i,j}$). Parametri koji nam na početku proračuna trebaju biti dostupni su: stupanj potpunog (θ_s) i rezidualnog zasićenja (θ_r) i van Genuchtenovi parametri (n , m i α). Njihove vrijednosti variraju ovisno o vrsti tla od kojeg je izgrađen nasip. Kako je promatrani nasip izgrađen od homogenog materijala, spomenute veličine ostat će nepromijenjene u prostoru, pa ih se ne mora definirati zasebno za svaki čvor. Na početku modeliranja toka, nasip se nalazi u stanju rezidualne zasićenosti. U prvom iteracijskom ciklusu zadovoljavanja numeričke jednadžbe toka, usvojit će se da je vrijednost koeficijenta filtracije jednaka onoj koja odgovara rezidualnom stupnju zasićenja. Nakon prvog iteracijskog izračuna, svakom čvoru mreže pridodana je vrijednost piezometarskog potencijala. Prvi korak koji treba napraviti da bi se u konačnosti dobila vrijednost relativnog koe-

ficijenta filtracije za promatrani čvor ($k_{r,i,j}$), je određivanje veličine relativnog stupnja zasićenosti u njemu ($S_{i,j}$). On se određuje sljedećim izrazom (4.27).

$$S_{i,j} = \frac{\theta_{i,j} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4.27)$$

Da bi se dobila ta vrijednost, vidljivo je da se mora izračunati ostvareni stupanj zasićenosti ($\theta_{i,j}$) u takvom čvoru. Njegova veličina može se odrediti van Genutchenovim modelom. Ako se usvoji da je atmosferski tlak jednak nuli, spomenuti model poprima sljedeći oblik (4.28).

$$\begin{aligned} \theta_{i,j} &= \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 + \left(\alpha |h_{p,i,j}| \right)^n \right]^m & \text{za } h_{p,i,j} < 0 \\ \theta_{i,j} &= \theta_s & \text{za } h_{p,i,j} \geq 0 \end{aligned} \quad (4.28)$$

Zasićenost u promatranom čvoru je u vezi sa njegovom tlačnom visinom ($h_{p,i,j}$). Ponovimo da je piezometarski potencijal sastavljen od zbroja tlačne visine (h_p) i geodetske kote (z). Kako se veličina potencijala u čvoru dobiva kao rješenje jednadžbe toka, lako se može odrediti tlačna visina u njemu. Ona se dobiva oduzimajući vrijednost potencijala i njegove geodetske kote (4.29).

$$h_{p,i,j} = h_{i,j} - z_{i,j} \quad (4.29)$$

Na taj način, nakon prvog iteracijskog ciklusa može se odrediti stupanj zasićenosti tla unutar svakog čvora diskretizacijske mreže. Nakon tako provedenog proračuna, izračunavaju se relativni stupnjevi zasićenosti pojedinih čvorova (4.30).

$$\begin{aligned} S_{i,j} &= \frac{\theta_{i,j} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[1 + \left(\alpha |h_{p,i,j}| \right)^n \right]^m & \text{za } h_{p,i,j} < 0 \\ S_{i,j} &= 1 & \text{za } h_{p,i,j} \geq 0 \end{aligned} \quad (4.30)$$

Primjećujemo da se korak u kojem se izračunavala vrijednost ostvarenog stupnja zasićenosti ($\theta_{i,j}$) može i izostaviti. Razlog tomu je činjenica da se relativni stupanj zasićenosti tla (S) može dobiti na dva načina. Za njegovo određivanje mora se raspolagati podacima tlačnog stupca unutar pora (h_p), ili ostvarenog stupnja zasićenosti u njima (θ). Kako se u promatranom primjeru vrijednost tlačnog stupca dobiva oduzimajući potencijal u čvorovima s njihovom geodetskom kotom, korak u kojem se izračunavalo trenutno zasićenje tla, bio je suvišan (4.28). On se ovdje proveo sa ciljem da se prikaže način njegovog dobivanja, ukoliko bi takve vrijednosti iz nekih drugih razloga bilo interesantno promatrati. Vratimo se određivanju relativnog koeficijenta filtracije kako bismo ga mogli uključiti u model (4.21). Nakon izračunatog relativnog stupnja zasićenosti čvorova ($S_{i,j}$), preostalo je još samo određivanje relativnog koeficijenta filtracije unutar svakog od njih ($k_{r,i,j}$). Taj proračun se provodi tako da se van

Genutchenov izraz (4.26) napiše u takovom obliku da pokrije sve čvorove unutar diskretizacijske mreže (4.31).

$$k_{ri,j} = \sqrt{S_{i,j}} \left[1 - \left(1 - S_{i,j} \frac{1}{m} \right)^m \right]^2 \quad (4.31)$$

Rješenje posljednje jednačbe pridodaje svakom čvoru diskretizacijske mreže vrijednost relativnog stupnja zasićenosti. Za određivanje nezasićenog koeficijenta filtracije dovoljno je tu vrijednost pomnožiti s njegovom zasićenom veličinom (4.32).

$$k_{ni,j} = k_{ri,j} k_s \quad (4.32)$$

Na taj način odredila se propusna moć poroznog materijala u funkciji tlaka u njegovim porama. Ponovimo da smo takve tlakove dobili uz pomoć rješenja jednačbe toka (4.21). Postupak se dalje nastavlja na način da se izračunata vrijednosti nezasićenih koeficijenata filtracije u svim čvorovima unesu u jednačbu toka, napisanu za svakog od njih. To se postiže tako da se koeficijent filtracije, korišten u prvom iteracijskom ciklusu, zamijeni s njegovom dobivenom nezasićenom veličinom. Na taj način, formira se iterativna shema koju treba riješiti više puta, kako bi rješenje jednačbe konvergiralo točnim.

Napisat će se još jednom sve korištene jednačbe koje trebaju biti zadovoljene unutar svakog čvora diskretizacijske mreže. Skup tih jednačbi predstavlja numerički model za simuliranje propagacije procijedne krivulje u nezasićenom i anizotropnom tijelu nasipa. Redoslijed njihovog izlaganja jednak je redoslijedu njihovog rješavanja.

$$\zeta = \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (4.33)$$

$$x_t = x \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \Rightarrow x_t = x \zeta \quad (4.34)$$

$$h_{i,j}(t+\Delta t) \left[\frac{k_{(n)_{i-1,j}} h_{i-1,j}(t+\Delta t)}{\Delta x_t^2} - \frac{k_{(n)_{i+1,j}} h_{i+1,j}(t+\Delta t)}{\Delta x_t^2} - \frac{k_{(n)_{i,j-1}} h_{i,j-1}(t+\Delta t)}{\Delta y^2} - \frac{k_{(n)_{i,j+1}} h_{i,j+1}(t+\Delta t)}{\Delta y^2} - \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\Delta t} \right]$$

$$=$$

$$-h_{i-1,j}(t+\Delta t) \frac{k_{(n)_{i-1,j}} h_{i-1,j}(t+\Delta t)}{\Delta x_t^2} - h_{i+1,j}(t+\Delta t) \frac{k_{(n)_{i+1,j}} h_{i+1,j}(t+\Delta t)}{\Delta x_t^2} -$$

$$-h_{i,j-1}(t+\Delta t) \frac{k_{(n)_{i,j-1}} h_{i,j-1}(t+\Delta t)}{\Delta y^2} - h_{i,j+1}(t+\Delta t) \frac{k_{(n)_{i,j+1}} h_{i,j+1}(t+\Delta t)}{\Delta y^2} - \frac{(\theta_s - \theta_r) h_{i,j}(t)}{\Delta t}$$

$$h_{p_{i,j}} = h_{i,j} - z_{i,j} \tag{4.36}$$

$$S_{i,j} = \frac{\theta_{i,j} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[1 + \left(\alpha |h_{p_{i,j}}| \right)^n \right]^m \quad \text{za } h_{p_{i,j}} < 0$$

$$\tag{4.37}$$

$$S_{i,j} = 1 \quad \text{za } h_{p_{i,j}} \geq 0$$

$$k_{r_{i,j}} = \sqrt{S_{i,j}} \left[1 - \left(1 - S_{i,j}^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \tag{4.38}$$

$$k_{n_{i,j}} = k_{r_{i,j}} k_s \tag{4.39}$$

5. Primjer modela toka vode kroz tijelo nasipa

Unutar ovog poglavlja biti će primijenjeno prijašnje izloženo gradivo, na način da će se izraditi numerički model s konkretnim ulaznim veličinama. Razmatrat će se filtracijski tok vode kroz tijelo nasipa, izgrađenog u svrhu obrane od poplava. Usvaja se vremenski period trajanja poplave od deset dana. Zadatak modela svodi se na ispitivanje mogućnosti formiranja vrelna plohe u takvom vremenskom periodu. Isto tako bit će interesantno sagledavanje pomaka procijedne krivulje, kako bi se vidio njen položaj na kraju poplavnog razdoblja.

5.1 Svojstva nasipa

U ovom ilustrativnom primjeru numeričkog modela, promatrani nasip je homogenog sastava i izgrađen od građiranog pijeska anizotropnih svojstava. Njegova propusna moć u vodoravnom smjeru deset je puta veća od one u okomitom, pa faktor anizotropije takvog materijala iznosi 0.1 . Na početku modeliranog procesa, tijelo nasipa nalazi se u stanju rezidualne zasićenosti (θ_r). Njegov poprečni presjek je uobičajenog trapeznog oblika s nagibima pokosa $1:1$. Takvi nagibi nisu primjenjivi u praktične svrhe, a razlog njihovog usvajanja je uzrokovan poteškoćama koje nastaju koristeći se programskim paketom *Mathcad 2001 Professional*, i to prilikom definiranja diskretizacijske mreže nasipa drugačijih nagiba pokosa. Takve poteškoće bit će opravdane ukoliko se spomene da je korišteni softver namijenjen u općenite svrhe matematičkog modeliranja. Vodoravno dno nasipa smatra se vodonepropusnim područjem. Isto tako usvaja se pretpostavka da za vrijeme trajanja poplave nije došlo do infiltracije oborina unutar njega. Na sljedećoj tabeli prikazane su osnovna svojstva modeliranog nasipa.

Tabela 5.1 Svojstva nasipa

Svojstva nasipa		
Materijal nasipa	-	Građirani pijesak
Visina nasipa	H	300 cm
Dužina nasipa	L	780 cm
Dužina krune nasipa	B	180 cm
Vodoravni zasićeni koeficijent filtracije	k_h	100 cm/dan
Vertikalni zasićeni koeficijent filtracije	k_v	10 cm/dan
Faktor anizotropije	ξ	0.1
Koeficijent anizotropije	A	10
Stupanj potpune zasićenosti materijala nasipa	θ_s	$0.4686 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$
Stupanj rezidualne zasićenosti materijala nasipa	θ_r	$0.106 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$
Van Genutchenov parametar n	n	4.72
Van Genutchenov parametar m	m	0.788
Van Genutchenov parametar α	α	0.8451 cm^{-1}

5.2 Svojstva numeričkog modela

Poprečni presjek nasipa je diskretiziran ekvidistantnom diskretizacijskom mrežom. Razmak dobivenih čvorova iznosi 6 cm . Na taj način, rješenje modela daje vrijednost piezometarskog potencijala u točkama presjeka međusobno odmaknutim takvim prostornim inkrementom. Rubnim uvjetima definirana je vrijednost potencijala u čvorovima na uzvodnoj strani nasipa, i to u iznosu od 300 cm . Za početne uvjete usvaja se potencijal čvorova u tijelu nasipa jednakim nuli. Vrijeme trajanja poplave diskretizira se u vremenske inkremente veličine pola dana. Sažeti prikaz ulaznih veličina numeričkog modela, vidljiv je u sljedećoj tablici.

Numerički algoritam je formiran korištenjem palete za programiranje sadržane u programskom paketu Mathcad 2001 Professional.

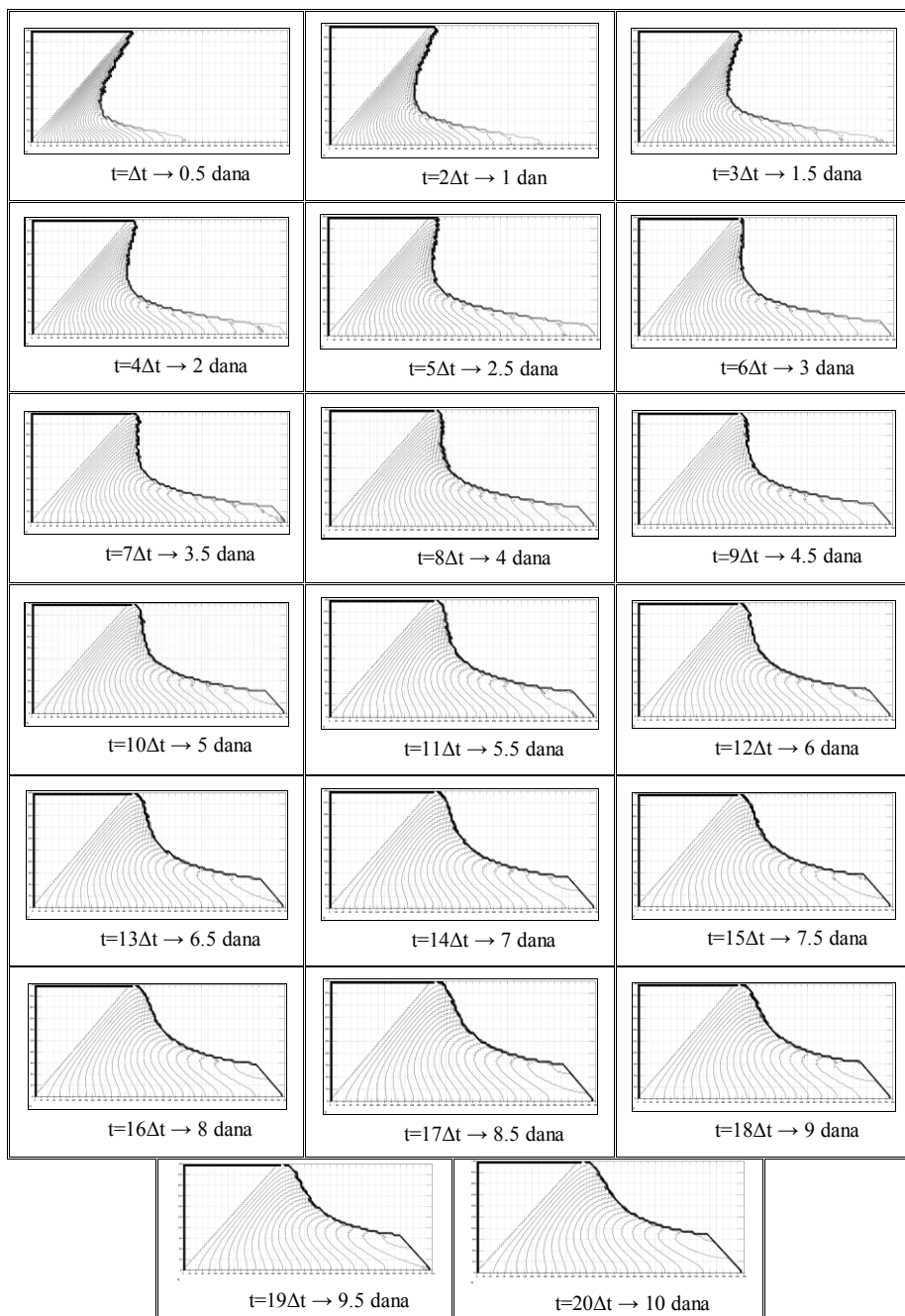
Tabela 5.2 Svojstva numeričkog modela

Vrijednost potencijala definirana rubnim uvjetima	h	300 cm
Vrijednost potencijala definirana početnim uvjetima	h	0 cm
Diskretizacijski vremenski inkrement	Δt	0.5 dana
Diskretizacijski prostorni inkrement u x smjeru	Δx	6 cm
Diskretizacijski prostorni inkrement u y smjeru	Δy	6 cm
Transformirani prostorni inkrement u x smjeru	Δx_t	2.2683 cm
Broj formiranih čvorova diskretizacijske mreže	-	6500
Broj definiranih jednadžbi u svakom čvoru	-	4
Broj riješenih jednadžbi jednim iteracijskim ciklusom	-	26000
Broj iteracijskih ciklusa	-	100000
Broj riješenih jednadžbi za jedan vremenski interval	-	$26 \cdot 10^8$

5.3 Rezultati numeričkog modela

Dobiveni rezultati su prikazani korištenjem palete za grafičko modeliranje, također sadržane u programskom paketu Mathcad 2001 Professional. Takva paleta nudi veći izbor interpretiranja dobivenih rezultata. U ovom radu je raspodjela piezometarskog potencijala u odabranom vremenskom inkrementu predstavljena iscrtanim ekvipotencijalima na kojima je ispisana njihova brojčana vrijednosti.

Na slici 5.3 se primjećuje da desni pokos nasipa nije vidljiv. Razlog je u tomu što korišteni softver prikazuje samo potencijale čija je vrijednost veća od nule, a na njemu je potencijal upravo definiran takvom vrijednošću. Isto tako postoje područja u kojima ekvipotencijalne krivulje poprimaju neočekivani oblik. To se može opravdati nedovoljnom gustoćom diskretizacijske mreže i primjenom programa namijenjenog za općenite svrhe matematičkog modeliranja.



Slika 5.3: Napredovanje vode kroz tijelo nasipa

6. Zaključak

U inženjerskoj praksi se za spriječavanje plavljenja meliracionih površina u uvjetima visokih vodostaja u vodotocima često koriste obrambeni nasipi. U ovom je radu prikazan model nestacionarnog strujanja kroz nezasićeni anizotropan nasip.

Cilj rada je sistematiziranje teorije toka kroz nezasićenu poroznu sredinu i ukazivanje na fizikalne procese te njihov matematički zapis. Rješenje vladajućih jednadžbi uz usvojene početne i rubne uvijete je ilustrativnog karaktera i nisu primjenjivi u općem slučaju.

U prikazanom primjeru je pretpostavljeno da se na početku modeliranja tijelo nasipa nalazi u stanju rezidualne zasićenosti. Prodiranjem vode zasićenost porozne sredine raste što rezultira odgovarajućim povećanjem propusne moći materijala od kojeg je nasip izgrađen. Postepeno zasićenje tijela nasipa i povećanja propusnosti je opisano uz pomoć van Genutchenovog modela. Formirani sistem jednadžbi je riješen iterativnom shemom na način da su se u jednom iteracijskom ciklusu izračunavale vrijednosti potencijala u čvorovima diskretizacijske mreže, te su pomoću njih dobivane vrijednosti tlaka u svakom čvoru mreže. Nakon dobivenih vrijednosti tlakova, koristile su se van Genutchenove jednadžbe kako bi se dobila vrijednost nezasićenog koeficijenta filtracije u pojedinom čvoru, ostvaren za pojedini stupanj zasićenosti tla. Tako dobiven koeficijent filtracije supstituirao se u jednadžbi toka s njegovom prvobitnom veličinom. Povećavajući broj iterativnih ciklusa, vrijednost zasićenosti, a time i vrijednost potencijala u čvorovima mreže konvergiraju točnom rezultatu.

Formiranim modelom promatralo se napredovanje procijedne krivulje u tijelu nasipa izgrađenog od građiranog pijeska. S pretpostavkom da je vodoravni koeficijent filtracije deset puta veći od njegove vertikalne komponente, koeficijent anizotropije takvog materijala iznosi 10.

Rezultati numeričkog modela pokazuju da se vrelna ploha formira nakon dva dana od početka penetriranja vode. Tokom vremena površina vrelne plohe na nizvodnoj strani nasipa se povećava, pa na kraju poplavnog perioda njena vrijednost iznosi $1.05 \text{ m}^2/\text{m}^2$. Ispitani nasip nije zadovoljio kriterij globalne stabilnosti, koja je ugrožena formiranom vrelnom plohom. Da bi se izbjegla njena prisutnost, potrebno je izvršiti odgovarajuće izmjene u projektu nasipa. Jedna od mogućih varijanti je ugradnja drenažnog sustava. Moguće je i smanjiti propusnu moć materijala nasipa. Na taj način, potreban je veći vremenski period da bi procijedna krivulja stigla do nizvodne strane nasipa, pa je za isto vremensko razdoblje pomak procijedne krivulje bitno manji.

Popis literature:

- [1] **Agroskin, I.I., Dimitrijević, G.T., Pikalov, F.I.,** *Hidraulika*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1973.
- [2] **Raus, H.,** *Tehnička hidraulika*, Građevinska knjiga, Beograd, 1969.
- [3] **Stojić, P.,** *Hidrotehničke gađevine* (knjiga I.), Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 1997.
- [4] **Stojić, P.,** *Hidrotehničke gađevine* (knjiga II.), Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 1998.
- [5] **Žugaj, R.,** *Hidrologija*, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2000.
- [6] **Više autora,** *Inženjerski priručnik* (temeljni inženjerskih znanja), Školska knjiga, Zagreb, 1996.
- [7] **Pečornik, M.,** *Tehnička mehanika fluida*, Školska knjiga, Zagreb, 1989.
- [8] **Jurković, M.,** *Matematičko modeliranje inženjerskih procesa i sistema*, Strojarski fakultet Sveučilišta u Bihaću, Bihać, 1999.
- [9] **Gjetvaj, G.,** Rukopisi predavanja iz predmeta hidraulika, Zagreb, 2003.
- [10] **Kožar, I.,** *Uvod u teoriju konačnih elemenata*, Rijeka, 1996.
- [11] **Bear, J.** - <http://www.cmdlet.com/demos/mgfc-course/mgfc-toc.html#toctoc>
- [12] **Unsaturated zone flow project** - <http://www.rcamnl.wr.usgs.gov/uzf/index.html>
- [13] **Unsaturated flow** - <http://en.alfit.af.mil/env/Documents/ENVR%20640/lec06b.pdf>
- [14] **Modeling flow through unsaturated zone** - <http://www.ias.ac.in/sadhana/Pdf2001Dec/PE789.pdf>
- [15] **Soil water retention curve** - http://www.water.hut.fi/~tkarvone/van_gen.htm
- [16] **Software to model soil water retention curves** - http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162000000100031
- [17] **Land Use Effects on Soil Hydraulic Properties** - <http://www.cprl.ars.usda.gov/wmru/pdfs/ISTRO2000.pdf>

5

ZNAČENJE CRPNIH STANICA ZA VODNI REŽIM MELIORACIJSKIH PODRUČJA

Prof.dr.sc. Josip Marušić
Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Josip Pondeljak, dipl.inž.stroj.
Hrvatske vode Zagreb

1. Uvod	1
2. Potreba izbradnje i podloge za projektno-izvedbena rješenja crpnih stanica	2
3. Sadržaj projektne i ostale dokumentacije crpnih stanica	16
4. Osnovni građevinski objekti i ostali djelovi crpnih stanica	17
5. Osnovni podaci o crpnim stanicama za melioracijsku odvodnju u Hrvatskoj	24
6. Obnova crpnih stanica za odvodnju melioracijskih površina	34
7. Pogon i održavanje crpnih stanica	39
8. Zaključci	40
9. Fotografije crpnih stanica	42
10. Popis literature i podataka	50

1. Uvod

Prema topografskim, hidrološkim, pedološkim i klimatskim obilježjima Hrvatska ima 1 673 792 ha melioracijskih površina na kojima je potrebno vršiti odvodnju suvišnih površinskih voda. Od navedenih površina na 822 350 ha potrebna je pravovremena odvodnja i suvišnih podzemnih voda u cilju održavanja optimalnog vodnog režima za uspješan razvoj te ostvarenje visokih i stabilnih prinosa biljnih kultura. Prije izgradnje hidromelioracijskih sustava površinske i podzemne odvodnje kao i navodnjavanja potrebna je izgradnja hidrotehničkih objekata za zaštitu od poplavnih voda rijeka, kao i brdskih voda. U Hrvatskoj je ukupno 471 730 ha poplavnih površina koje su pod utjecajem štetnog djelovanja vanjskih voda različitog povratnog perioda. Postojećim hidrotehničkim objektima zaštićena je 263 730 ha melioracijskih površina. Potrebna je dogradnja dijela postojećih i izgradnja novih hidrotehničkih objekata (nasipi, brane, ustave, regulacijski objekti na rijekama, akumulacije i retencije) za zaštitu od štetnog djelovanja vanjskih voda 208 000 ha melioracijskih površina.

- a) Do 1990. godine u Hrvatskoj je izgrađeno 82 crpne stanice. U 2004. godini u funkciji je bilo 71 crpna stanica ukupnog kapaciteta 316,5 m³/s i snage 24 166 KW – za odvonju 276 000 ha nizinskih melioracijskih površina na 19 slivnih područja.
- b) Posebno je potrebna dogradnja dijela postojećih i izgradnja novih crpnih stanica za odvodnju suvišnih unutarnjih voda sa 146 000 ha nizinskih melioracijskih površina za vrijeme trajanja visokih voda u rijekama.
- c) Dio crpnih stanica je oštećen i razoren ratnim djelovanjem bivše “JNA” i raznih srbo-četničkih vojnih farmacija i to u najvećoj mjeri na području Baranje, (nizinskog dijela) sliva Vuke te dijela Jelas, Lonjskog i Mokrog polja. Krajem 1991. godine potpuno je uništena crpna stanica “Paulin Dvor” kapaciteta 20,0 m³/s, koja je izgrađena 1981. godine za potrebe odvodnje nizinskih površina sliva Vuke – bare “Polača” – površine 20 000 ha. Crpna stanica je obnovljena 2002. godine. Nažalost i u 2004. godini još uvijek dio melioracijskih površina na slivu Vuke nije deminiran. Ukupno 11 manjih crpnih stanica (kapaciteta od 0,5 do 1,0 m³/s) nije obnovljeno tako da ih je u 2004. godini radilo 71.

I pored primarnog značenja i potrebe rada crpnih stanica za odvodnju poljoprivrednih površina treba imati na umu i njihovo veliko značenje za pravovremenu odvodnju suvišnih unutarnjih voda s nizinskih melioracijskih površina na kojima se nalaze naselja te prometnice i ostali infrastrukturni objekti, kao i odgovarajući gospodarski objekti.

U Hrvatskoj se 1990. godine navodnjavalo 13 290 ha, a u 2003. godine samo 7160 ha. Dio površina se navodnjavao putem crpnih stanica, a najveća je izgrađena 1967. godine na kraju dovodnog kanala “Dren” – kapaciteta 0,75 m³/s – za navodnjavanje voćnjaka Borinci s vodom iz Bosuta (kod Vinkovaca). Nažalost, dio crpnih stanica kao i ostalih objekata sustava za navodnjavanje je oštećen ili razoren ratnim djelovanjem, a dio nije u funkciji zbog negativnih posljedica “pretvorbe i privatizacije” u poljoprivredi. Pored brane akumulacije “Vlačine” izgrađena je crpna stanica ukupnog kapaciteta 240 l/s (4×60 l/s), snage 125 KW i H_{man}=125 m – za navodnjavanje voćnjaka i vinograda područja Baštice površine 200 ha (1988.). Na melioracijskom području Vranskog polja izgrađena je crpna stanica kapaciteta 220 l/s (2×80+60 l/s), snage 190 KW i H_{man}=70 m – za navodnjavanje povrća na lokaciji Jankolovica.

2 Potreba izgradnje i podloge za projektno-izvedbena rješenja crpnih stanica

2.1. Potreba izgradnje i rada crpnih stanica

Potreba izgradnje crpnih stanica za odvodnju uvjetovana je nepovoljnim odnosom razine vode u glavnim recipijentima (vanjske vode u rijekama odnosno u glavnim recipijentima) i melioracijskim kanalima (unutarnje vode).

Kod pojave viših vodostaja u glavnim recipijentima u odnosu na dozvoljenu razinu vode u glavnom dovodnom kanalu kao i mreži melioracijskih kanala prestaje mogućnost gravitacijske odvodnje pa je potrebno vršiti odvodnju putem crpnih stanica.

Zahtjevi održavanja vodnog i zračnog režima poljoprivrednih zemljišta kao i pravovremena odvodnja suvišnih voda i sa ostalih nizinskih površina određuje izbor lokacije crpnih stanica. Sastavni dio toga su i podaci o izboru mjerodavnog povratnog perioda, odnosno pojava i trajanje visokih vodostaja (velikih voda) u rijekama kao glavnim recipijentima pojedinih melioracijskih područja.

Trajanje nepovoljnog odnosa vanjskih i unutarnjih vodostaja određuje rad kako pojedinih tako i svih crpnih agregata. Posebno je značenje rada crpnih postrojenja u vegetacijskom periodu razvoja biljnih kultura – u cilju održavanja optimalnog vodnog i zračnog režima u rizosferi (sloj tla u kojem se razvija korijen biljnih kultura). Od ukupno 71 crpnih stanica u tijeku pojedine godine najduže rade crpni agregati na melioracijskom području sliva Donje Neretve. Na tom području je vremenski najnepovoljniji odnos vanjskih vodostaja (rijeka Neretva) i unutarnjih odnosno dozvoljene razine vode i to kako u glavnim dovodnim kanalima tako i mreži melioracijskih kanala. Ovisno o klimatskim i hidrološkim obilježjima vremenski je kraće vrijeme trajanja rada kako pojedinih tako i svih agregata crpnih stanica na melioracijskim odnosno slivnim područjima Save, Drave i Dunava.

Ukupna slivna površina (ha) i mjerodavni hidromodul odvodnje (l/s/ha) određuje ukupni kapacitet (l/s; m³/s) pojedinih crpnih stanica. A hidromoduli površinske odvodnje na nizinskim melioracijskim površinama slivnog područja Save, Drave i Dunava je u pravilu od 1,0 do 3,0 l/s/ha, a na slivnim područjima Neretve, Cetine, Mirne i Raše od 3,0 do 8,0 l/s/ha. Kapaciteti pojedinih crpnih agregata su od 0,5 do 5,0 m³/s, a ukupni kapacitet crpnih stanica od 1,0 do 20,0 m³/s. Najveći kapacitet na području Hrvatske imaju crpne stanice “Paulin Dvor” na slivu rijeke Vuke (4×5,0 m³/s, ukupno 20,0 m³/s) i crpne stanice “Modrić” na slivu rijeke Neretve (2×5,5 + 3×2,5+1×1,5=20,0 m³/s). Najveći kapacitet ima crpna stanica “Bosut” čija je lokacija u selu Bosut pored Save (Vojvodina) ukupnog kapaciteta 30,0 m³/s (6×5,0 m³/s) ali je slivna površina 71 posto na području Republike Hrvatske, a preostali dio na području Vojvodine. Ukupna slivna površina Bosuta je 331 628 ha, a od toga na području Republike Hrvatske je 235 456 ha.

2.2. Topografske podloge i izbor lokacija crpnih stanica.

U pravilu su lokacije crpnih stanica na najnižim kotama pojedinih slivnih površina pa je zbog toga potrebno imati detaljne topografske podloge. Na osnovu analize terenskih podataka melioracijskih područja određuju se trase kako mreže melioracijskih kanala (II., III., i IV. reda) tako i njihovi geometrijski i hidraulički elementi. Sastavni dio toga je određivanje trase i ostalih elemenata glavnog dovodnog kanala u kojeg se slijevaju suvišne površinske ali i podzemne vode putem mreže melioracijskih kanala. Na kraju odnosno na ušću glavnog dovodnog kanala u glavni recipijent melioracijskog područja je u pravilu lokacija crpnih stanica (“najniži teren”). Pored detaljne analize topografskih

podataka za potrebe fiksne odvodnje bitno je zadovoljiti zahtjeve biljnih kultura i to posebno u vegetacijskom periodu njihovog razvoja. *Ovisno o hidropedološkim svojstvima tala i zahtjevima optimalnog razvoja biljnih kultura potrebno je uskladiti projektne i izvedbene elemente hidromelioracijskih sustava površinske i podzemne odvodnje. U skladu s navedenim i za crpne stanice treba odrediti mjerodavne visinske elemente koji će udovoljiti kako pravovremenu odvodnju suvišnih površinskih tako i podzemnih voda u cilju stvaranja i održavanja optimalnog vodnog režima u tlu.*

Na osnovu analize topografskih, hidroloških i pedoloških obilježja melioracijskih područja određuje se veličina površine koju je moguće odvodnjavati gravitacijskim putem (bez crpnih stanica) i površina koje se trebaju odvodnjavati putem crpnih stanica. A sastavni dio toga je određivanje vremena trajanja nepovoljnog odnosa razine dozvoljenog vodostaja u melioracijskim kanalima (niži od vanjskih vodostaja) i razine velikih voda u glavnim recipijentima (viši od razine unutarnjih voda). Izbor lokacije crpnih stanica ovisi i o položaju te projektno-izvedbenim elementima nasipa za obranu od poplavnih voda rijeka kao i akumulacijskom kapacitetu glavnog dovodnog kanala a i mreže melioracijskih kanala.

U sklopu izbora lokacije crpnih stanica od posebnog značenja za troškove u izgradnji i njihovom radu je korištenje postojećih ili izgradnja novih prometnica te dovod energije za rad crpnih postrojenja (elektro ili “diesel-pogon”).

Izbor lokacija crpnih stanica za sustave navodnjavanja je takođe uvjetovan odnosom mjerodavnih razina voda u rijeci, akumulacije, jezeru (ili drugom izvoru voda) i topografskim obilježjima površina koje se navodnjavaju. U pravilu su to lokacije na prijelazu nizinskih (dovod vode) i viših površina koje se navodnjavaju (najčešće voćnjaka i vinograda). Također je česta potreba izgradnje crpnih stanica i za navodnjavanje povrća te industrijskog i ljekovitog bilja kao i određenih žitarica (sjemenske robe) na nizinskim površinama pojedinih melioracijskih područja (s manjom manometarskom visinom “dizanje” vode). Također je važno uskladiti mjerodavne geometrijske i hidrauličke elemente glavnog dovodnog kanala s mjerodavnim projektno-izvedbenim elementima crpnih stanica, ali i mrežom razvodnih kanala ili cjevovoda za navodnjavanje kao i zahtjevima biljnih kultura (dubina korjena biljaka, hidropedološka svojstva tla). Sastavni dio toga je i zadovoljavanje zahtjeva za odgovarajuće vrste i načine navodnjavanja – (razni načini umjetnog kišenja ali i površinskog navodnjavanja).

2.3. Klimatske i hidrološke podloge

U cilju iznalaženja optimalnih projektnih i izvedbenih elemenata te troškova građenja i korištenja crpnih stanica posebno treba provesti detaljnu analizu klimatskih i hidroloških podataka melioracijskih područja. U sklopu navedenog treba imati na umu da se melioracijski kanali (III. i IV. reda) u pravilu dimenzioniraju na maksimalne jednodnevne (rijeđe dvodnevne) oborine povratnog perioda 5 ili 10 godina. Također je važan podatak da su te mjerodavne oborine u većini pojava od 40 do 70 mm/dan – na melioracijskim

područjima sliva Save, Drave i Dunava. Sastavni dio analize i izbora mjerodavnih oborina za dimenzioniranje hidromelioracijskih objekata je i utjecaj topografskih, pedoloških i vegetacijskih obilježja na uvjete i količine otjecanja površinskih voda. Na nizinskim melioracijskim površinama sliva Save, Drave i Dunava koeficijent površinskog otjecanja je najčešće od 0,15 do 0,30, a na melioracijskim područjima sliva Jadranskog mora koeficijent površinskog otjecanja je veći. Za određivanje mjerodavnog hidromodula površinskog otjecanja na slivu Save, Drave i Dunava u praksi se potvrdila u najvećoj mjeri i opravdana primjena formule prof. D. Srebrenovića i prof. A. N. Kostjakova, a na melioracijskim područjima sliva Jadranskog mora opravdana je primjena formula prof. D. Turazza.

Za dimenzioniranje melioracijskih kanala IV. i III. reda na melioracijskim područjima sliva Save, Drave i Dunava mjerodavni hidromodul površinskog otjecanja od 1,0 do 3,0 l/s/ha, a na slivu Jadranskog mora od 3,0 do 8,0 l/s/ha. To je bitno uzeti u obzir i kod određivanja mjerodavnog hidromodula za dimenzioniranje crpnih stanica.

Crpke se redovito dimenzioniraju na manju protoku od one koju smatramo mjerodavnom za hidrauličko dimenzioniranje gravitacijske odvodnje. Ekonomski nije opravdano crpne agregate dimenzionirati na maksimalnu protoku odnosno na vršni dio hidrograma unutarnjih voda. Stupanj redukcije izvršava sljedećim odnosom $\eta = Q_c/Q_{\max}$. Kapacitet crpke (Q_c) ovisi o sljedećim terenskim i ostalim parametrima: veličina i pad slivne površine, intenzitetu, veličini i trajanju oborina, uvjetno površinske i podzemne retardacije, veličini procjeđivanja, vegetaciji područja. Zbog toga je potrebna detaljna analiza klimatskih, topografskih, pedoloških i hidroloških podataka melioracijskih područja. Za određivanje optimalnog kapaciteta crpke posebno je važno definirati mjerodavni hidrogram unutarnjih voda – s maksimalnom protokom ($Q_{\max} - m^3/s$) i vremenom koncentracije (t_k -sati) i adekvatnim volumenom retardacije vodnog vala ($V - m^3$). Na osnovu navedenih parametara i veličina određuje se mjerodavni kapacitet crpke sljedećim izrazom:

$$Q_c = Q_{\max} - \sqrt{\frac{Q_{\max} \cdot V}{t_k}} \quad m^3/s$$

Sastavni dio toga je i određivanje mjerodavnog vremena intervencije hidrograma

$$t_p = \frac{2 \cdot V}{Q_{\max} - Q_c} \quad (\text{sati})$$

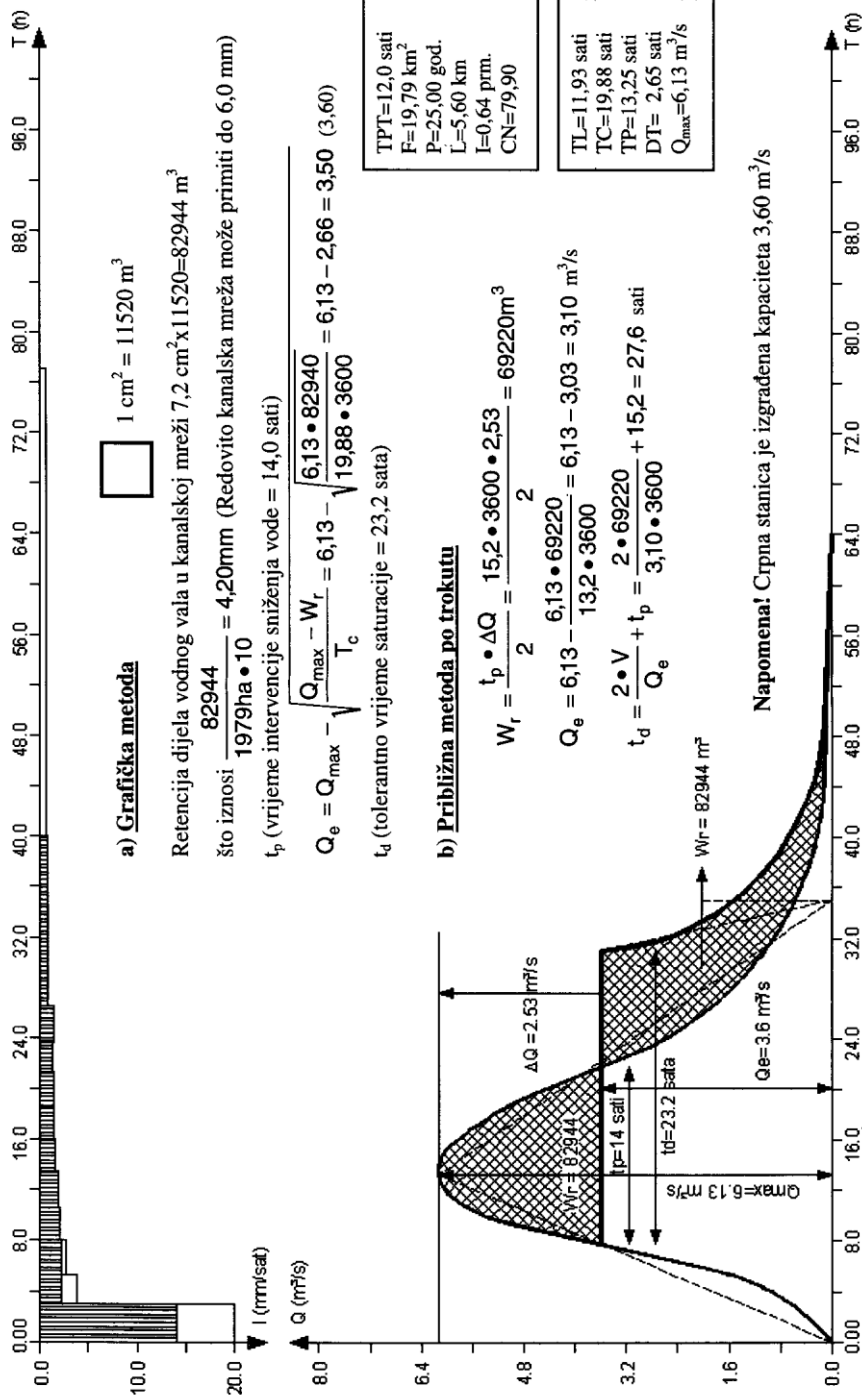
i vremena tolerantnog plavljenja retencijskih površina

$$t_d = \frac{2 \cdot V}{Q_c} + t_p \quad (\text{sati})$$

Posebno je značenje u usklađivanju veličine Q_c , t_d i V . Najbolji efekti se postižu unutarnjim retardiranjem vode u depresijama (šume, livade) što omogućava smanjenje kapaciteta crpki. Primjer odgovarajućeg proračuna odnosno

određivanja optimalnog kapaciteta crpki za melioracijsku odvodnju prikazan je na slici 1.

ODREĐIVANJE POTREBNOG KAPACITETA CRPNE STANICE »TEČA« (sliv Save)



Slika 1:

Određivanje ukupnog kapaciteta crpke za melioracijsku odvodnju

U sklopu provedbe hidrauličkih analiza pored mjerodavne protoke crpki, veliko značenje za snagu (i potrošnju energije) ima mjerodavna manometarska visina. Razlika mjerodavnih vanjskih i unutarnjih vodostaja je geodetska visina na koju treba dodati odgovarajuće linijske i lokalne gubitke ($\Sigma\xi$) u cilju određivanja manometarske visine “dizanja” vode putem crpnih postrojenja. $H_{\text{man}} = H_g + \Sigma\xi$ — manometarska visina (crpljenja i tlačenja) je bitno za određivanje snage elektromotora pojedinog crpnog agregata po sljedećem izrazu:

$$N = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_c \cdot H_{\text{max}}}{\eta} = \frac{9,8 \cdot Q_c \cdot H_{\text{max}}}{\eta} \text{ KW}$$

gdje je: Q_c — kapacitet pojedinog crpnog agregata (m^3/s)
 H_{man} — manometarska visina (m)
 q — gustoća vode (kg/m^3)
 δ — akceleracija sile teže ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)
 η — stupanj korisnog djelovanja crpke ($\eta = 0,90\text{--}0,95$)

Kod izbora vrsti pogona crpki treba razmatrati realnost funkcioniranja cjelokupnog crpnog postrojenja u razdobljima kada se crpke moraju koristiti, raspoloživost energije i goriva, početni troškovi, troškovi pogona, učestalost i trajanje crpljenja. U praksi se najčešće koriste elektromotori, ali dio crpnih postrojenja radi i na diesel-pogon.

Sastavni dio dimenzioniranja crpnih postrojenja je i određivanje specifičnog broja okretaja po sljedećem izrazu:

$$N_s = \frac{N \cdot \sqrt{Q_c}}{H_{\text{man}}^{3/4}}$$

gdje je: η_s — specifična brzina u najefikasnijoj točki (m/s)
 η — brzina rotacije izražena brojem okretaja u minuti (okr/min)
 Q_c — kapacitet crpke (m^3/s)
 H_{man} — manometarska visina “dizanje” vode (m)

U praksi se koriste sljedeći tipovi crpki: aksijalna, aksijalno–radijalna i radijalne (jednostepene i višestepene radijalne).

Specifična brzina se definira kao broj okretaja s kojim bi se trebao okretati geometrijski sličan rotor, kada je rotor takve veličine da kapacitira m^3/min na 1 m visine. Rasponi specifičnih brzina za centrifugalne crpke su sljedeći:

- od 12 do 80 za radijalne crpke
- od 80 do 120 za aksijalno-radijalne crpke
- od 120 do 400 za aksijalne crpke

Kod izbora crpki treba poznavati maksimalnu manometarsku visinu i kapacitet (m^3/s) u cilju određivanja specifičnog broja okretaja crpke odnosno tipa crpke. Prema krivuljama eksploatacijskih parametara crpke određuje crpka koja

se najbolje prilagođava radnim varijablama crpnih postrojenja. U pravilu se ugrađuju dva ili više crpnih agregata za potrebe crpljenja ukupne odnosno maksimalne protoke.

Broj agregata u radu ovisi o mjerodavnoj količini vode koju treba crpiti i visinskoj razlici unutarnje i vanjske vode u glavnom recipijentu).

Za potrebe melioracijske odvodnje mjerodavna monomentalna visina je najčešće od 2,0 do 6,0 m (min 1,0 a maksimalno 10,0 m). Ukupan kapacitet crpnih postrojenja je od 1,0 do 20,0 m³/s – na 80% crpnih stanica. Broj crpnih agregata je od 2 do 6, a kapacitet pojedinih crpki je najčešće od 0,5 do 2,0 m³/s, a maksimalni je 5,0 m³/s. U sklopu analize terenskih podataka melioracijskih područja te određivanja ukupnog kapaciteta crpnih postrojenja treba imati na umu da su prosječni troškovi od 70 000 do 85 000 EUR za kapacitet od 1,0 m³/s, odnosno od 525 000 do 637 000 kn. Također je kako za projektante tako i za izvođače i korisnike crpnih stanica važan podatak da u ukupnim troškovima izgradnje crpnih postrojenja građevinski radovi sudjeluju od 55 do 60%, a strojarska i elektro oprema sa ugradnjom od 40 do 45%. Posebno treba imati na umu troškove redovnog i tehničkog održavanja te energije i osoblja u procesu rada crpnih postrojenja.

2.4. Geotehničke podloge i temeljenje objekata crpnih stanica

Iako topografske i hidrološke podloge te hidraulički razlozi u najvećoj mjeri određuju izbor lokacije crpnih stanica, posebno treba provesti detaljna geotehnička ispitivanja zbog određivanja načina temeljenja objekata crpnih stanica. S obzirom da je lokacija crpnih stanica u pravilu na najnižim površinama melioracijskih područja treba imati na umu da je na tim lokacijama sastav tla slabije konsolidacije. Često su zastupljeni sitni pjeskoviti materijali, pjeskovito-prašinate mješavine, prašine i gline, organske gline i treseti. Kako u Hrvatskoj tako i u svijetu je potvrđeno da su crpne stanice za odvodnju i navodnjavanje uglavnom izgrađene na slabo konsolidiranom i vrlo stišljivu tlu s visokom razinom podzemne vode – odnosno u vrlo nepovoljnim geomehaničkim uvjetima. Iz navedenih razloga potrebna je provedba detaljnih geotehničkih ispitivanja i analiza mjerodavnih podataka u cilju iznalaženja rješenja kako stabilnosti građevinske jame tako i izgrađenih objekata u sklopu crpnih stanica, ali i za vrijeme njihovog korištenja.

Geotehničkim istražnim radovima treba odrediti sastav tla i njegove geomehaničke parametre te uvjete kretanja podzemne vode i to kako u procesu gradnje tako i korištenja odnosno rada objekata crpnih stanica. U cilju osiguranja stabilnosti objekata potrebno je sljedeće:

- svaki dio objekta treba zadovoljiti dopušteno opterećenje tla;
- slijeganje svakog dijela pojedinog objekta treba biti u granicama dozvoljenog, a diferencijalna slijeganja između pojedinih dijelova trebaju biti u dopuštenim granicama;
- hidraulička stabilnost objekata treba biti osigurana u svim fazama rada crpnih postrojenja;
- objekti trebaju biti stabilni na dinamički utjecaj rada crpnih agregata (imajući na umu utjecaj strojarske i elektroopreme), a ovisno o području;

- ovisno o području objekti crpnih stanica trebaju biti stabilni i na seizmičke utjecaje;
- u procesu izgradnje objekata treba biti osigurana stabilnost dna i pokosa građevne jame te pojedinih dijelova objekata u svim fazama izvođenja odgovarajućih radova.

U sklopu navedenog posebno je značenje u određivanju vrijednosti dopuštenog opterećenja tla koje ovisi o sljedećem:

- karakteristikama tla, razini podzemnih voda, tlocrtnim dimenzijama temelja i dubini temeljenja.

Pored glavnih opterećenja u proračunu temeljenja treba uzeti u obzir i dopunska opterećenja, a to su najčešće seizmički i dinamički utjecaji. Također je važan utjecaj razine podzemnih voda koji umanjuje dopuštena specifična opterećenja tla. Zbog toga je potreban poseban proračun temeljenja: strojarnice, tlačni i gravitacijski kanali, odnosno cjevovodi krilni zidovi glavnog dovodnog kanala, krilni zidovi izljevskog objekta, zatvaračnice. U pravilu potrebno je odrediti slijeganje za sve objekte crpnih stanica. S obzirom na različite dimenzije i težine kako pojedinih objekata tako i njihovih dijelova te različite uvjete temeljenja različita su i njihova slijeganja.

Najsloženiji i najvažniji je proračun realnih slijeganja glavnog objekta crpnih stanica, a to je strojarnica koja je najveće težine i najvećih tlocrtnih dimenzija i s najvećom dubinom temeljenja (u skladu sa zahtjevima usisnog bazena). Posebno je značenje u definiranju veličine vertikalnih pomaka strojarnice na koju su "vezani" ostali dijelovi crpne stanice: dovodni kanali, krilni zidovi, tlačni kanal (cjevovod), elektro-postrojenje. Najvažnije je osiguranje stabilnosti spojeva strojarnice s tlačnim i gravitacijskim kanalom (ili cjevovodom). Objekt strojarnice izvodi se najčešće u neposrednoj blizini unutarnje nožice nasipa za obranu od poplava. Ako je nasip ranije izgrađen tada je u pravilu izvršena konsolidacija tla, ali u procesu izgradnje objekata crpnih stanica dolazi do rasterećenja tla i pojave povratnih deformacija. Još veći problemi nastaju kada se objekti crpnih stanica grade na lokaciji gdje prethodno nije izgrađen nasip za obranu od poplava. Tako dolazi do pojave velikih slijeganja i to posebno na koherentnom tlu.

U praksi se pojavljuju i slučajevi kada nije moguće izvršiti prethodno opterećenje tla nasipom. Tada je rješenje da se objekti u tijelu nasipa (tlačni, gravitacijski cjevovodi) trebaju ugraditi s dilatacijama (nepropusne gumene brtve) i nadvise za veličinu slijegavanja. Broj dilatacija i veličina nadvišenja treba odrediti na temelju proračuna veličine slijeganja i vremena konsolidacije. Izradbi spojeva strojarnice s gravitacijskim i tlačnim u kanalima (cjevovodima) treba kvalitetno izvesti jer se na tom mjestu pojavljuju najveća diferencijalna slijeganja, a o tome ovisi način i vrsta spoja. *Za detaljan proračun slijeganja objekata crpnih stanica potrebno je definirati sljedeće: – realne težine objekta (iz statičkog proračuna), realne kombinacije vodostaja uzgona, geotehničke istražne radove potrebnog opsega i kvalitete.*

Provedba detaljne analize slijeganja svih objekata crpnih stanica je neophodna za izbor načina temeljenja – na temeljnim pločama ili pilotima? U sklopu toga treba imati na umu dinamički utjecaj rada crpnih agregata, efekte

usisavanja sitnih čestica tla iz podloge objekata, određivanje diferencijalnih slijeganja, seizmičkih utjecaja.

2.5. Hidraulička stabilnost objekata crpnih stanica

Za određivanje hidrauličke stabilnosti objekata crpnih stanica od posebnog je značenja razlika razine vanjskih i unutarnjih voda i hidrogeološki sastav tla te kapacitet crpnih agregata i režim njihovog rada. Sastavni dio navedenog je kvalitetno rješenje stabilnosti građevnih jama objekata crpnih stanica. Za potrebe melioracijske odvodnje visina "dizanja vode" je najčešće od 2,0 do 6,0 m (min 1,0 m, a maksimalno 10,0 m), a to je razlika razine vode u glavnom recipijentu (vanjski vodostaj) i glavnom dovodnom kanalu (unutarnji vodostaj). U sklopu toga bitan je kapacitet pojedinog crpnog agregata kao i njihov broj te ukupan kapacitet svih crpnih agregata i režim njihovog rada. Razlika razine vaskih i unutarnjih vodostaja odnosno razlika potencijala može dovesti do negativnih posljedica – ovisno o hidrogeološkom sastavu tla te kapacitetu i režimu rada crpnih agregata (vrijeme trajanja i promjena razlike vanjskih i unutarnjih vodostaja).

Hidraulički slom tla nastaje kada se zbog velikog gradijenta potencijala pri vertikalnom stupanju vode stvara sila pritiska veća od težine tla. Zbog toga dolazi do "izdizanja" i sloma tla (pojavu "živog pijeska"). Hidraulička stabilnost objekata crpnih stanica može se poremetiti i kada je koeficijent neujednačenosti zrna poroznog materijala $d_{60}/d_{10} > 20$, pa zbog povećanog gradijenta dolazi do ispiranja čestica materijala ispod objekata. Ispiranje materijala vrši se kontinuirano duž konture objekata, a pri tome izlazni gradijenti postaju sve veći i "odnošenje" sitnih čestica temeljnog tla sve intenzivniji. Da se navedeno izbjegne, gradijenti potencijala trebaju biti manji od određenih kritičnih gradijenata potencijala. Rubni uvjeti stupanja podzemne vode oko i ispod objekata crpnih stanica određuju se na temelju hidrogeoloških istražnih radova. Na temelju analize geomehaničkih i hidrogeoloških podataka određuje se geomehaničke karakteristike tla, infiltracijski parametri u zoni visokog potencijala mjerodavnih parametara provodnosti materijala u području crpnih bazena.

Razlika između povoljnih i nepovoljnih uvjeta koji utječu na hidrauličku stabilnost objekata crpnih stanica dovodi do raspodjela potencijala stupnja i to kako u vrijeme građenja tako i korištenja objekata crpnih stanica a u najvećoj mjeri zavisi od rasporeda hidrodinamičkih parametara materijala porozne sredine ispod i oko objekta crpnih stanica. U praksi je najčešća pojava slabo propusnih površinskih slojeva, a ispod njih se smjenjuju slojevi glinovitog, pjeskovitog, prašinstog i šljunkovitog sastava. Najnepovoljniji raspored potencijala dobiva se kada se dobro provodni sloj nalazi plitko (do 5,0 m) ispod kote dna usisnog bazena, a istodobno ima dobar kontakt s vodom dovodnog i odvodnog kanala. Nepovoljan raspored potencijala u području crpnog bazena dobije se i u slučaju kada plitki dobro provodni sloj nema dobar kontakt s vodotokom, ali ima veliku površinu kroz koju se voda s visokim potencijalom infiltrira i u dobro provodnom sloju ostvaruje visoki potencijal. U navedenim slučajevima uspostavlja se približno vertikalno strujanje između dobro pro-

vodnog sloja i crpnog bazena, što pri većim gradijentima može izazvati hidraulički slom tla.

Zbog složenosti navedenih problema za iznalaženje sigurnog rješenja hidrauličke stabilnosti objekata crpnih stanica neophodna provedba detaljnih istražnih radova s pravovremenom ugradnjom piezometara i bušenih zdenaca i to kako u vremenu gradnje tako i korištenje objekata crpnih stanica – u cilju određivanja koeficijenata propusnosti. To je preduvjet za simuliranje strujanja na matematičkim ili analognim modelima za potrebe određivanja odgovarajućih rješenja zaštite zbog povećanja hidrauličke stabilnosti objekata crpnih stanica. Koeficijenti propusnosti za matematička modeliranja određuje se iz granulometrijskih analiza i empirijskih formula, a ne eksperimentalnim metodama. Nakon izgradnje objekata crpnih stanica potrebno je izvršiti kontrolu stvarne raspodjele potencijala u odnosu na matematički model strujanja podzemne vode u cilju potvrde da su objekti sigurni od hidrauličkog sloma – a to treba vršiti i u nepovoljnim uvjetima rada crpnih postrojenja (kod dužeg trajanja crpljenja vode i nepovoljnog odnosa vanjskog i unutarnjeg vodostaja.

2.6. Dinamički utjecaji na objekte crpnih stanica

Kako za proračun i osiguranje geomehaničke tako i hidraulička stabilnost objekata crpnih stanica od posebnog značenja je ispitivanje vodopropusnosti koherentnog tla u laboratoriju na neporemećenim uzorcima. Vodopropusnost nekoherentnog tla obavlja se terenskim ispitivanjima. S obzirom da su lokacije crpnih stanica za melioracijsku odvodnju najčešće na pjeskovitim tlima, ispitivanje propusnosti provodi se crpljenjem iz bušotina s ugrađenim plastičnim cijevima i taložnicama te filterskim dijelom perforiranimi zaštićenim mrežicama. U slučaju ispitivanja vodopropusnosti u uslojenim pijescima potrebno je izvesti dvostruke i trostruke piezometre koji omogućavaju mjerenje razine podzemne vode u pojedinim slojevima.

U konkretnim materijalima treba vaditi neporemećene uzorke zbog potreba provođenja laboratorijskih pokusa. U nekoherentnim materijalima, a po potrebi i koherentnim, treba izvoditi pokuse standardnom dinamičkom penetracijom. Na izvađenim poremećenim i neporemećenim uzorcima tla potrebno je izvesti klasičijska ispitivanja kao i ispitivanja za fizičke i mehaničke parametre slojeva tla – uključujući i određivanje koeficijenata propusnosti koherentnih materijala. Posebno treba provesti ispitivanja u cilju određivanja parametara zbivanja rahlih pijesaka u procesu stalnog rada crpki. Pokusima standardne dinamičke penetracije potrebno je ispitati djelovanje potresa na objekte crpnih stanica i to naročito na lokacijama sa rahlim pijescima. U sklopu provedbe terenskih geomehaničkih ispitivanja i mjerenja sve bušotine i piezometre te statičke sonde trebaju biti geodetski definirani (iskolčenje, visinski) s potrebnim osiguranjem i to kako u procesu građenja tako i korištenja objekata crpnih stanica i rada ugrađenih strojeva.

3. Sadržaj projektne i ostale dokumentacije crpnih stanica

U cilju iznalaženja optimalnog tehničkog i financijskog projektnog rješenja crpnih stanica potrebno je izvršiti sljedeće poslove:

- 1) Analiza mikrolokacije objekta crpnih stanica, s obzirom na prirodna obilježja melioracijskih područja (dotok i ispušt vode, uvjeti temeljenja);
- 2) Izrada raznih varijanti (inačica) idejnog rješenja crpne stanice – s osnovnim tehničkim pokazateljima;
- 3) Analiza ekonomskih pokazatelja – sa stajališta optimalizacije i tipizacije objekata uključujući i potrebnu opremu;
- 4) Izbor optimalnog tehničkog i ekonomskog rješenja crpne stanice;
- 5) Definiranje projektnog zadatka na temelju prethodnih analiza – za potrebe izrade glavnog projekta;
- 6) Izrada idejnog i glavnog projekta objekata crpne stanice: građevinski, strojarSKI i energetski dio. U sklopu izrade građevinskog projekta crpne stanice posebno je značenje u izvršenju sljedećih poslova:
 - hidrološke analize, hidrološki proračun, proračun temeljenja te statički proračun pojedinih dijelova objekata crpnih stanica – uključujući i hidrauličku stabilnost objekata;
- 7) Revizija projektnih rješenja objekata crpne stanice te predloženih strojeva i opreme crpne stanice;
- 8) Izrada dokumentacije za javno nadmetanje – u skladu s aktualnim propisima i zakonima;
- 9) Izbor – odabir izvođača za izgradnju objekata crpne stanice – s odgovarajućim suizvođačima radova (temeljenje, strojarSKA i elektrooprema);
- 10) Projektantski i izvođački nadzor u procesu izgradnje objekata i ugradnje opreme – s usklađivanjem rada svih sudionika.

U sklopu izrade projektne i ostale dokumentacije za crpne stanice posebno treba dati rješenje dovoda energije te pristupnih cesta kao stambene objekte za rukovaoce crpnih postrojenja.

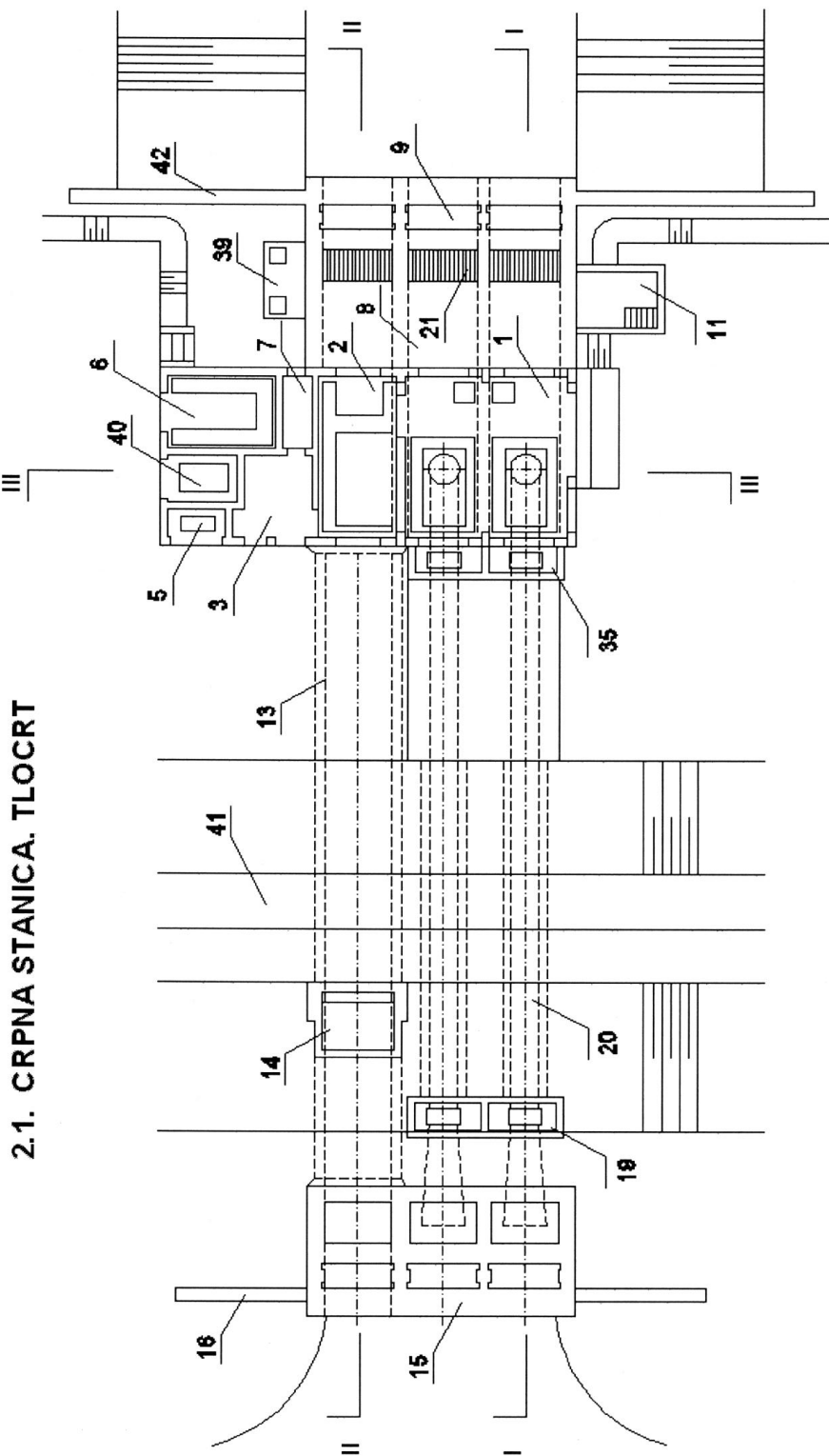
4. Osnovni građevinski objekti i ostali dijelovi crpnih stanica

4.1. Građevinski objekti crpne stanice

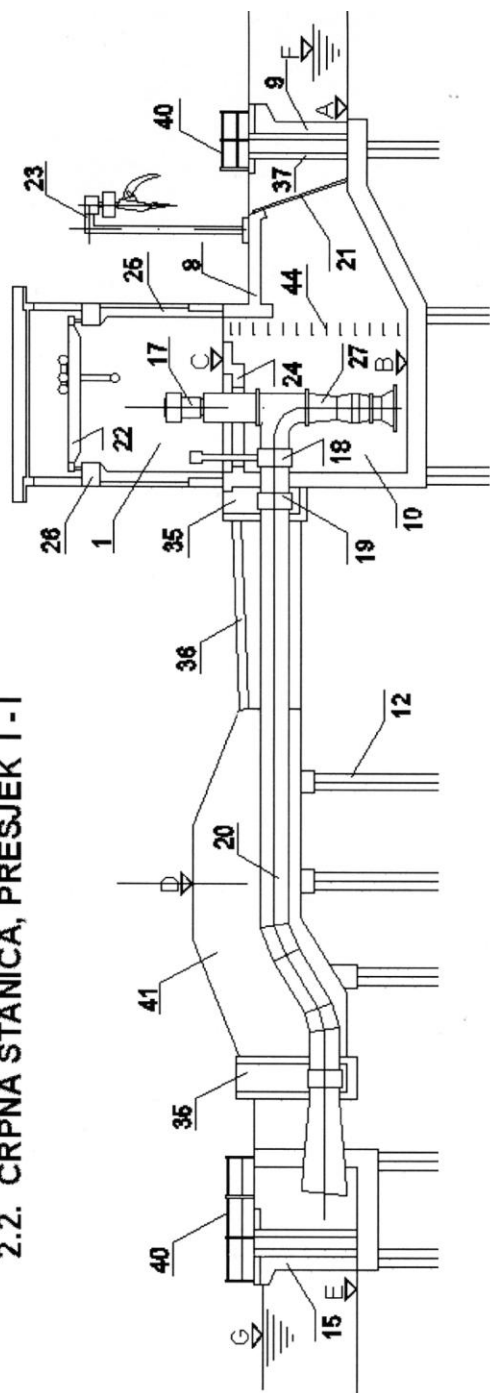
U cilju sagledavanja problema i složenosti objekata crpnih stanica daju se slike 2.1.; 2.2; 2.3 i 2.4 na kojima su vidljivi odgovarajući sastavni dijelovi i to kako (hidro)građevinski tako i ostali objekti te strojevi i oprema crpnih stanica. Na slici 2.1. prikazani su tlocrtni pokazatelji, na slici 2.2 i 2.3 uzdužni presjek crpne stanice sa tlačnim i gravitacijskim cjevovodom, a na slici 2.4 poprečni presjek s popisom svih objekata, dijelova i opreme crpnih stanica. Zbog toga se daje opis samo sljedećih objekata i dijelova crpnih stanica.

Temeljna ploča je dio konstrukcije crpne stanice kojom se neposredno prenosi njeno opterećenje na tlo. Pojedine konstrukcijske cjeline odvajaju se razdjelnim spojnica (dilatacijskim reškama).

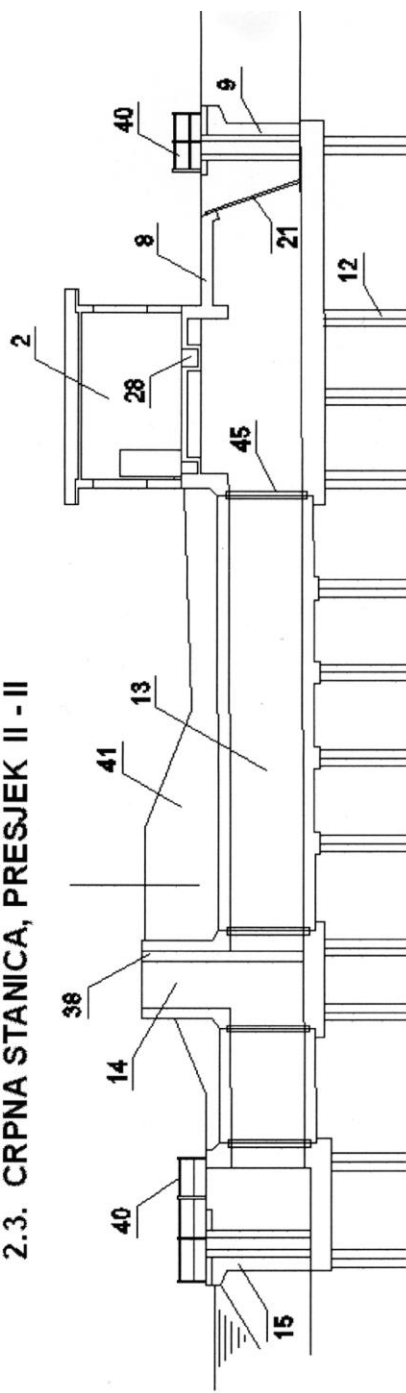
Temeljna traka je dio konstrukcije kojom se prenosi opterećenje tlačnog cjevovoda na tlo.



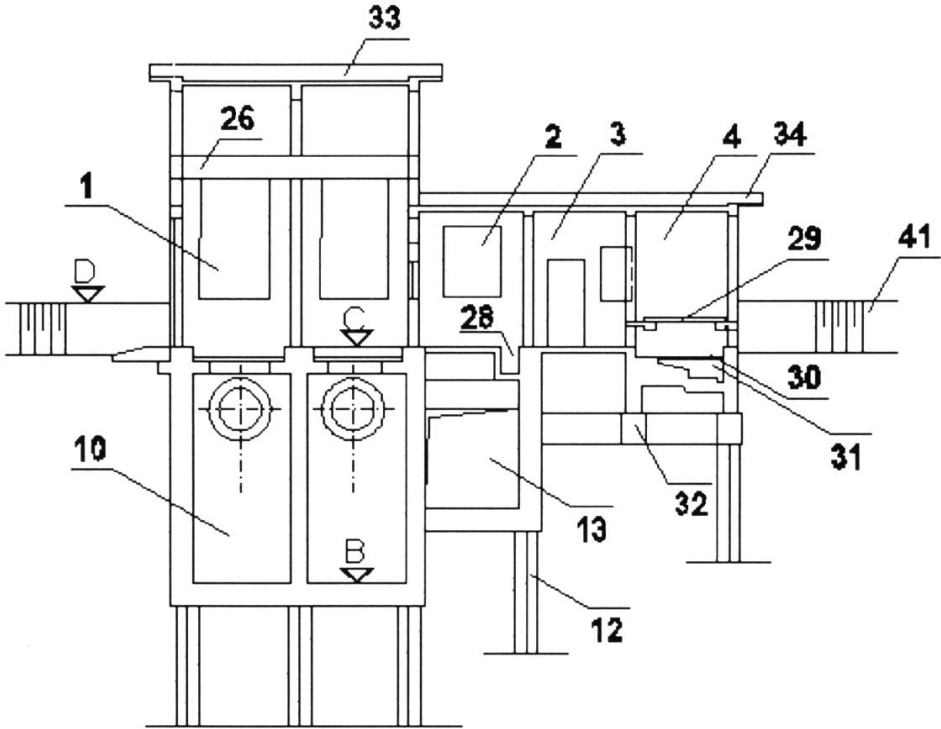
2.2. CRPNA STANICA, PRESJEK I - I



2.3. CRPNA STANICA, PRESJEK II - II



2.4. CRPNA STANICA, PRESJEK III - III



- | | | | |
|----|----------------------------------|----|--|
| 1 | Strojarnica | 27 | Crpka |
| 2 | Komandna prostorija | 28 | Kanali za kablove |
| 3 | Soba strojara | 29 | Nosač transformatora |
| 4 | Transformator I | 30 | Rešetka nad uljnom jamom |
| 5 | Transformator II | 31 | Uljna jama |
| 6 | Prostorija za VN uređaje | 32 | Temeljne trake |
| 7 | WC | 33 | Krov strojarnice |
| 8 | Poslužni most | 34 | Krov iznad pomoćnih prostorija |
| 9 | Ulazna građevina | 35 | Okno kompenzatora |
| 10 | Usisni bazen | 36 | Armirano-betonska zaštita cjevovoda |
| 11 | Spremnik za smeće | 37 | Utori za postavljanje Šandorovih greda |
| 12 | Piloti | 38 | Utori za pločasti zatvarač |
| 13 | Gravitacijski ispust | 39 | Septička jama |
| 14 | Okno ustave | 40 | Ograda |
| 15 | Izljevna građevina | 41 | Nasip |
| 16 | Krilni zidovi izljevne građevine | 42 | Krilni zidovi ulazne građevine |
| 17 | Elektromotor | 43 | Naglavna konstrukcija pilota |
| 18 | Okrugli zasun | 44 | Stupaljke |
| 19 | Kompenzator | 45 | Brtnjena traka |
| 20 | Tlačni cjevovod | A | kota ulaznog praga |
| 21 | Rešetka | B | kota dna usisnog bazena |
| 22 | Kran | C | kota poda strojarnice |
| 23 | Čistač rešetke | D | kota krune nasipa |
| 24 | Nosač crpke | E | kota dna izljevne građevine |
| 25 | Okvir strojarnice | F | kota srednjeg unutarnjeg vodostaja |
| 26 | Kranska staza | G | kota srednjeg vanjskog vodostaja |

Piloti omogućuju rješenje temeljenje crpne stanice u vrlo nepovoljnim uvjetima, kada se pokaže da druga rješenja nisu pouzdana i kada se može ekonomski opravdati njihova primjena.

Strojarnica je središnja prostorija crpne stanice u kojoj su smješteni motori crpki, te kran za montažu i remont crpki i opreme.

Usisni bazen je prostor ispod strojarnice u kojem se nalaze crpke.

Ulazna građevina je dio crpne stanice u kojoj se voda usmjerava prema crpkama i gravitacijskom ispustu. Pregradni zidovi ulazne građevine nastavljaju se na pregradne zidove usisnog bazena i zidove gravitacijskog ispusta, te tako usmjeravaju vodu prema crpkama i gravitacijskom ispustu.

Poslužni mostić se oslanja na pregradne zidove ulazne/izlazne građevine i služi za postavljanje pomoćnih zatvarača, a kod ulazne građevine i za pristup, održavanje i čišćenje rešetki.

Rešetke se postavljaju na svakom polju ulazne građevine radi zadržavanja predmeta i nečistoće, a čiste se čistilcima koje mogu biti različite izvedbe.

Pomoćni zatvarač (gredni zatvarač, Šandorove grede) je zatvarač koji se postavlja u odgovarajuće utore, a kojim je omogućeno zasebno zatvaranje svakog polja ulazne/izlazne građevine za potrebe pregleda i popravka.

Pomoćne prostorije se sastoje od komandne prostorije, sobe strojara, sanitarnih prostorija te za transformatore i prostorije za visokonaponske uređaje. U podu pomoćnih prostorija nalaze se kanali za provođenje energetskih i signalnih kablova.

Gravitacijski ispust je armiranobetonska cijev kvadratnog ili pravokutnog presjeka. Služi za gravitacijsku odvodnju.

Tlačni cjevovod je cjevovod kojim se voda crpkom tiska (tlači) prema glavnom recipijentu.

Okno kompenzatora je okno u kojem se postavlja kompenzator.

Kompenzator se ugrađuje na tlačni cjevovod u oknu kompenzatora. Na tlačnom cjevovodu nalaze se dva kompenzatora i to u oknu koji se naslanja na nizvodni zid usisnog bazena i u oknu koji se nalazi uz uzvodni zid izljevne građevine. Kompenzatori omogućuju pomake tlačnog cjevovoda koji mogu nastati zbog različitog slijeganja pojedinih dijelova crpnih stanica.

Zaštitna konstrukcija cjevovoda se izvodi radi zaštite tlačnog cjevovoda, na mjestima gdje preko cjevovoda prelazi prometnica.

Izljevna građevina je dio crpne stanice kojim se vode usmjeravaju u prijemnik. Svaki tlačni cjevovod i gravitacijski ispust odjeljeni su pregradnim zidovima, što omogućuje nezavisno zatvaranje svakog protočnog polja. U izlaznoj građevini smješteni su završni komadi tlačnog cjevovoda (izlazni difuzori).

Kompenzacioni bazen zajedno s usisnim bazenom čini potprostor za prikupljanje vode.

Prilazna cesta i plato crpne stanice omogućuje pristup crpnoj stanici.

Osim navedenih i na skicama označenih dijelova crpne stanice, postoje još i krovne konstrukcije, ugrađeni dijelovi od metala (vrata, ograde, stupaljke i sl.), vodovod, sanitarije i kanalizacija i td.

4.2. Strojarski elementi crpnih stanica

Osnovni elementi crpne stanice su zaštitna rešetka, crpka s pomoćnom opremom, direktno ili indirektno spojena sa pogonskim agregatom, elementi za regulaciju protoka, cjevovodi i oprema za regulaciju i rad crpke kao i njenu zaštitu. Energija za pokretanje crpke u najvećem broju slučajeva uzima se iz javne elektromreže ili se izuzetno uzima iz motora sa unutrašnjim sagorjevanjem.

4.3. Glavni strojarski dijelovi crpnih postrojenja

a) Crpke

Crpku kao središnji strojarski element crpne stanice nalazimo ovisno o vremenu izgradnje crpne stanice na prostorima Hrvatske u različitim izvedbama. Većina crpki ugrađenih od početka mehanizirane odvodnje 1900. godine do 1945. godine je centrifugalnog tipa u horizontalnoj izvedbi. U vremenu do 1990. godine ugrađivane su propelerne crpke u vertikalnoj izvedbi, od 1990. godine ugrađeno je nekoliko potopljenih propelernih crpki izvedenih u bloku sa elektromotorom. Sve crpke izrađene do 1945. godine bile su na pogon s motorima sa unutrašnjeg sagorjevanja, a za pogonsko gorivo poslužio je gorivi plin proizveden sagorjevanjem drvene mase. Crpke koje su ugrađene poslije 1945. godine bile su s elektromotornim pogonima.

Prijenos snage vršen je za starije crpke (nazivnog broja okretaja oko 150 o/min) indirektno remenskim prenosom pretežno pomoću plosnatog remenja. Zamjenom motora sa unutrašnjim sagorjevanjem sa elektromotorima zadržani su remenski prijenosi. Na crpkama koje su ugrađene do 1970-ih godina, a s elektromotornim pogonima, za redukciju broja okretaja pogonskog elektromotora korišteni su zupčasti reduktori. Crpke kasnije ugradnje (nazivni broj okretaja 375 o/min) u pravilu direktno su s elektromotornim pogonom preko elastičnih spojki.

b) Elementi za regulaciju protoka, cjevovodi, oprema i zaštite

Elementi za regulaciju protoka u najvećem broju su zasunski ventili ili leptirasti zatvarači djelomično opskrbljeni elektromotornim pogonima, dok su na dijelu objekata ugrađeni nepovratni ventili i žablji poklopci na tlačnom dijelu cjevovoda. Linije za gravitacijsko ispuštanje opskrbljene su pločastim zapornicama različitih veličina (od 1 do 4 m² sa ili bez elektromotornih pogona). Cjevovodi su izvedeni kod najstarijih crpnih stanica u ljevanoj izvedbi, a redovito su izvedeni zavarivanjem.

Oprema za regulaciju rada crpke najčešće se sastoji od mehanizama za regulaciju kuta lopatica sa ili bez elektromotornih pogona, a čija je svrha promjena kapaciteta crpljenja. Za sniženje struje pokretanja ugrađeni su uljni pokretači za kliznokolutne motore odnosno uređaji za “meko startanje” za motore sa kratko spojenim rotorom.

Za propelerne crpke vertikalne izvedbe obavezna pomoćna oprema je crpke za mast koja opskrbljuje radijale ležaje pogonske osovine za prenos snage mašču

za podmazivanje. Pokretanje crpke za mast moguće je direktno sa pogonske osovine preko remenskog prenosa ili putem elektromotornog pogona.

U slučajevima izvedbe tlačnog cjevovoda sa nategom za popunu natege vodom ugrađeni su uređaji za vakumiranje tlačnog cjevovoda.

Elementi zaštite od zahvaćanja predmeta većih gabarita su usisne rešetke, razmaka između štapova od 35 do 80 mm, smještene neposredno prije usisnih komora crpki. Čišćenje naplavina sa rešetki na crpnim stanicama manjeg kapaciteta vrši se ručno dok se na većim objektima ugrađuju uređaji za čišćenje rešetki od naplavina i njihov transport do prostora za odlaganje.

Zbog potrebe zaustavljanja većih plovećih predmeta neki objekti su zaštićeni grubim rešetkama raspona štapova oko 150 mm koje su u pravilu montiraju na ulazu u retencioni bazen crpne stanice. Elementi zaštite samih crpki od rada bez vode sastoje se od dvije sonde različitih izvedbi (kontaktne, plovci) od kojih prva isključuje crpku na donjem radnom nivou, a druga je siguronsna.

Dio strojarske i elektro opreme za pogon crpnih postrojenja je prikazan na slikama: 3.1; 3.2; 3.3; 3.4; 3.5, 3.6 i 3.7.

5. Osnovni podaci o crpnim stanicama za melioracijsku odvodnju u Hrvatskoj

Na slikama 4.1, 4.2 i 4.3. dat je prikaz stupnja izgrađenosti sustava melioracijske odvodnje s lokacijama crpnih stanica za odvodnju suvišnih oborinskih voda po slivnim područjima Save, Drave i Dunava te području Istre i Dalmacije. U tablici 1 (str. 151—153) o crpnim stanicama za melioracijsku odvodnju po slivnim područjima u Hrvatskoj dati su sljedeći osnovni podaci:

- godina izgradnje, slivna površina (ha), broj crpki (agregata) ukupni kapacitet (m^3/s) i ukupna snaga (KW)

Sumarni podaci po vodnim područjima 71 crpnoj stanici za melioracijsku odvodnju prikazani su u tablici 2.

U svezi navedenih sumarnih pokazatelja treba posebno sagledati podatke za crpnu stanicu “Bosut” koja se nalazi na ušću rijeke Bosut u Savu na području Vojvodine. Ukupna slivna površina rijeke Bosut (s Biđom i ostalim pritokama je), a od toga na području Republike Hrvatske 235 456 ha. Crpnoj stanici “Bosut” gravitira 126 450 ha nizinskih površina, a od toga je na području Republike Hrvatske 89 780 ha (71% od ukupnih). U navedenom odnosu računat je pripadajući dio kapaciteta ($21,30 m^3/s$) i snage crpne stanice Bosut (1 342 KW) na području Hrvatske.

Zbog navedenih razloga treba posebno analizirati i vrednovati potrebu odvodnje nizinskih melioracijskih površina kao što je slivno područje rijeke Bosut, Črnc polja i Lonjskog polja na vodnom području Save te nizinski dio sliva rijeke Vuke kao i Baranje na vodnom području Drave i Dunava. To je vidljivo i u osnovnim pokazateljima izgrađenih crpnih stanica na navedenim melioracijskim područjima. Stvarne potrebe odvodnje suvišnih površinskih voda na nizinskim

melioracijskim površinama sliva Save, Drave i Dunava zahtjevaju ostvarenje mjerodavnog hidromodula od 0,5 do 2 l/s/ha.

Tablica 1. Pregled osnovnih podataka o crpnim stanicama za melioracijsku odvodnju u Hrvatskoj

Rbr	Naziv crpne stanice	Lokacija	Godina izgradnje	Veličina sliva [ha]	Broj crpki	Ukupni kapacitet [m ³ /s]	Vrsta pogona	Ukupna snaga [kW]
1.	VODNO PODRUČJE SLIVA SAVE			89.279	82	147,50		11.357
1.1.	VGI "Biđ-Bosut" Vinkovci			11.860	11	14,24		742
1.1.1	Konjuša Nova	Biđ Bosut polje	1984	3.410	4	5,60	elektro	300
1.1.2	Konjuša Stara	Biđ Bosut polje	1935	0	2	2,80	diesel	146
1.1.3	KUPINA	Biđ Bosut polje	1940	2.500	2	1,78	diesel	94
1.1.4	TEČA	Biđ Bosut polje	1932	5.250	2	3,56	diesel	176
1.1.5	ZIB-Pos.Podgajci	Biđ Bosut polje	1970	700	1	0,50	diesel	26
1.2.	VGI "Brodsko posavina" Slavonski Brod			15.528	14	32,40		2.690
1.2.1	DUBOČAC	Jelas polje	1938	2.597	2	4,40	elektro	280
1.2.2	GRLIĆ	Jelas polje	1990	4.345	4	8,00	elektro	800
1.2.3	MRSUNJA	Jelas polje	1960	4.520	4	8,00	elektro	660
1.2.4	MIGALOVCI	Jelas polje	1979	4.066	4	12,00	elektro	950
1.3.	VGI "Šumetlica-Crnac" Nova Gradiška			24.371	12	32,30		2.630
1.3.1	CRNAC	Crnac polje	1961	7.200	3	9,00	elektro	945
1.3.2	DAVOR	Crnac polje	1982	9.800	4	15,00	elektro	1.140
1.3.3	KAZETA 2	Crnac polje	1981	1.200	3	3,30	elektro	225
1.3.4	LJUFINA	Crnac polje	1961	6.171	2	5,00	elektro	320
1.4.	VGI "Subocka-Strug" Novska			4.095	9	8,05		700
1.4.1	KOŠUTARICA	Mokro polje	1978	628	2	0,75	elektro	65
1.4.2	LONČARICA	Lonjsko polje	1984	1.966	3	4,00	elektro	380
1.4.3	MLAKA	Mokro polje	1975	867	2	0,80	elektro	100
1.4.4	TANAC	Ušće Une u Savu	1983	634	2	2,50	elektro	155
1.5.	VGI "Ilova-Pakra" Daruvar			326	1	0,60		40
1.5.1	S-2	Zaobalje Pakre	1985	326	1	0,61	diesel	40
1.6.	VGI "Banovina" Sisak			14.093	11	20,20		2.285
1.6.1	HRASTELNICA	Lonjsko polje	1983	1.249	2	2,00	elektro	180
1.6.2	MAHOVO	Črnec polje	1984	6.324	4	12,00	elektro	1.240
1.6.3	ORLOVAC	Orlovačko polje	1985	270	2	1,00	diesel	190
1.6.4	ŠAŠNA GREDA	Lonjsko polje	1952	6.250	3	5,20	elektro	675
1.7.	VGI "Lonja-Trebež" Kutina			17.366	19	35,70		2.270
1.7.1	ČRNEC	Črnec polje	1987	3.281	3	6,00	elektro	360
1.7.2	HRASTILNICA	Črnec polje	1982	1.554	2	4,00	elektro	220
1.7.3	LONJA	Črnec polje	1987	1.730	2	4,00	elektro	220
1.7.4	OBEDIŠĆE	Črnec polje	1987	2.104	2	4,00	elektro	240
1.7.5	OKOLI	Črnec polje	1988	3.879	4	7,20	elektro	640
1.7.6	Posavski Bregi	Črnec polje	1978	1.370	2	2,50	elektro	150
1.7.7	ROŽEC	Črnec polje	1982	1.602	2	4,00	elektro	220
1.7.8	VEZIŠĆE	Črnec polje	1982	1.846	2	4,00	elektro	220
1.8.	VGI "Česma-Glogovnica" Bjelovar			240	2	2,00		150
1.8.1	DEREZA	D.-Prokuvljani	1990	240	2	2,00	elektro	150

1.9.	VGI "Lonja-Zelina" Dugo selo			1.400	3	2,10		132
1.9.1	DUGO SELO	Črnec polje	1985	800	2	1,50	elektro	90
1.9.2	POLJANSKI LUG	Črnec polje	1989	600	1	0,60	diesel	42

Rbr	Naziv crpne stanice	Lokacija	Godina izgradnje	Veličina sliva [ha]	Broj crpki	Ukupni kapacitet [m ³ /s]	Vrsta pogona	Ukupna snaga [kW]
2.	VODNO PODRUČJE GRADA ZAGREBA			10.263	9	18,00		1.080
2.1.	JEŽEVO	Črnec polje	1985	3.986	3	6,00	elektro	360
2.2.	OBOROVO	Črnec polje	1985	3.100	3	6,00	elektro	360
2.3.	RUGVICA	Črnec polje	1985	3.177	3	6,00	elektro	360
3.	VODNO PODRUČJE SLIVA DRAVE I DUNAVA			73.166	33	53,85		4.424
3.1.	VGI "Vuka" Osijek			24.100	14	24,10		1.744
3.1.1	PAULIN DVOR	rijeka Vuka	1981/2000	20.000	4	20,00	elektro	1.264
3.1.2	RUDINE	Bobotski kanal	1974	1.000	2	1,00	diesel	120
3.1.3	SELCE	Bobotski kanal	1970	1.000	2	1,00	diesel	120
3.1.4	SELEŠ	Bobotski kanal	2004	700	2	0,70	diesel	80
3.1.5	VRBIK	Bobotski kanal	2004	700	2	0,70	diesel	80
3.1.6	ERNESTINOVO	Bobotski kanal	2004	700	2	0,70	diesel	80
3.2.	VGI "Karašica-Vučica" Donji Miholjac			6.266	4	5,00		560
3.2.1	VILJEVO	kanal Karašica-Drava	1978	5.723	2	4,00	elektro	360
3.2.2	Koška-Ordanja	slijev Gornje Jasenovice	1982	543	2	1,00	diesel	200
3.3.	VGI "Baranja" Darda			42.800	15	24,75		2.120
3.3.1	VELIKA	Dravski nasip	1912/1956	7.600	2	3,50	elektro	320
3.3.2	PODUNAVLJE	Kopački rit	1874/1956	3.300	1	1,75	elektro	160
3.3.3	TIKVEŠ	Baranjske planine	1910/1956	8.900	2	5,00	elektro	400
3.3.4	Zlatna Greda	Baranjske planine	1898/1956	9.800	3	6,00	elektro	520
3.3.5	DRAŽ	rijeka Karašica	1900	2.800	1	1,50	elektro	160
3.3.6	BUDŽAK	zaobalje Dunava	1912	1.100	1	0,40	elektro	50
3.3.7	GOMBOŠ	zaobalje Dunava	1952	800	1	0,30	elektro	50
3.3.8	PUŠKAŠ	zaobalje Drave	1984	3.600	2	2,00	elektro	100
3.3.9	BAKANKA	Toplica Beremend	1975	4.900	2	4,30	elektro	360
4.	VODNO PODRUČJE PRIMORSKO-ISTARSKIH SLIVOVA			1.301	12	9,44		464
4.1.	VGI "Mirna-Dragonja" Buzet			893	5	5,00		217
4.1.1	ANTENAL	Ušće Mirne	1935	893	5	5,00	elektro	217
4.2.	VGI "Raša-Boljunčica" Labin			408	7	4,44		247
4.2.1	FOŠKA	Raško polje	1935	264	3	2,40	elektro	135
4.2.2	MOST RAŠA	Raško polje	1992	25	1	0,24	elektro	22
4.2.3	ŠTALIJE	Raško polje	1935	119	3	1,80	elektro	90
5.	VODNO PODRUČJE DALMATINSKIH SLIVOVA			12.189	42	66,28		4.077
5.1.	VGI "Cetina" Sinj			4.857	8	19,68		1.082
5.1.1	TRILJ	Sinjско polje	1963/1973	2.977	4	10,88	elektro	532
5.1.2	VEDRINE	Sinjско polje	1963	1.880	4	8,80	elektro	550
5.2.	VGI "Neretva-Korčula" Opuzen			6.462	26	43,70		2.615
5.2.1	HUM I	Polder Vrbovci	1957	528	3	3,70	elektro	260
5.2.2	HUM II	Polder Vrbovci	1968	528	2	1,60	elektro	180
5.2.3	LUKE	Polder Luke	1956	312	5	2,70	elektro	201
5.2.4	METKOVIĆ	rukavac Neretve	1986	1.250	3	7,00	elektro	480
5.2.5	MODRIĆ	ušće Neretve	1969	2.900	6	20,00	elektro	955
5.2.6	PRAG	Polder Vidrice	1925	600	3	6,45	elektro	370
5.2.7	VERAJA	Polder Koševo	1957	268	3	2,00	elektro	144

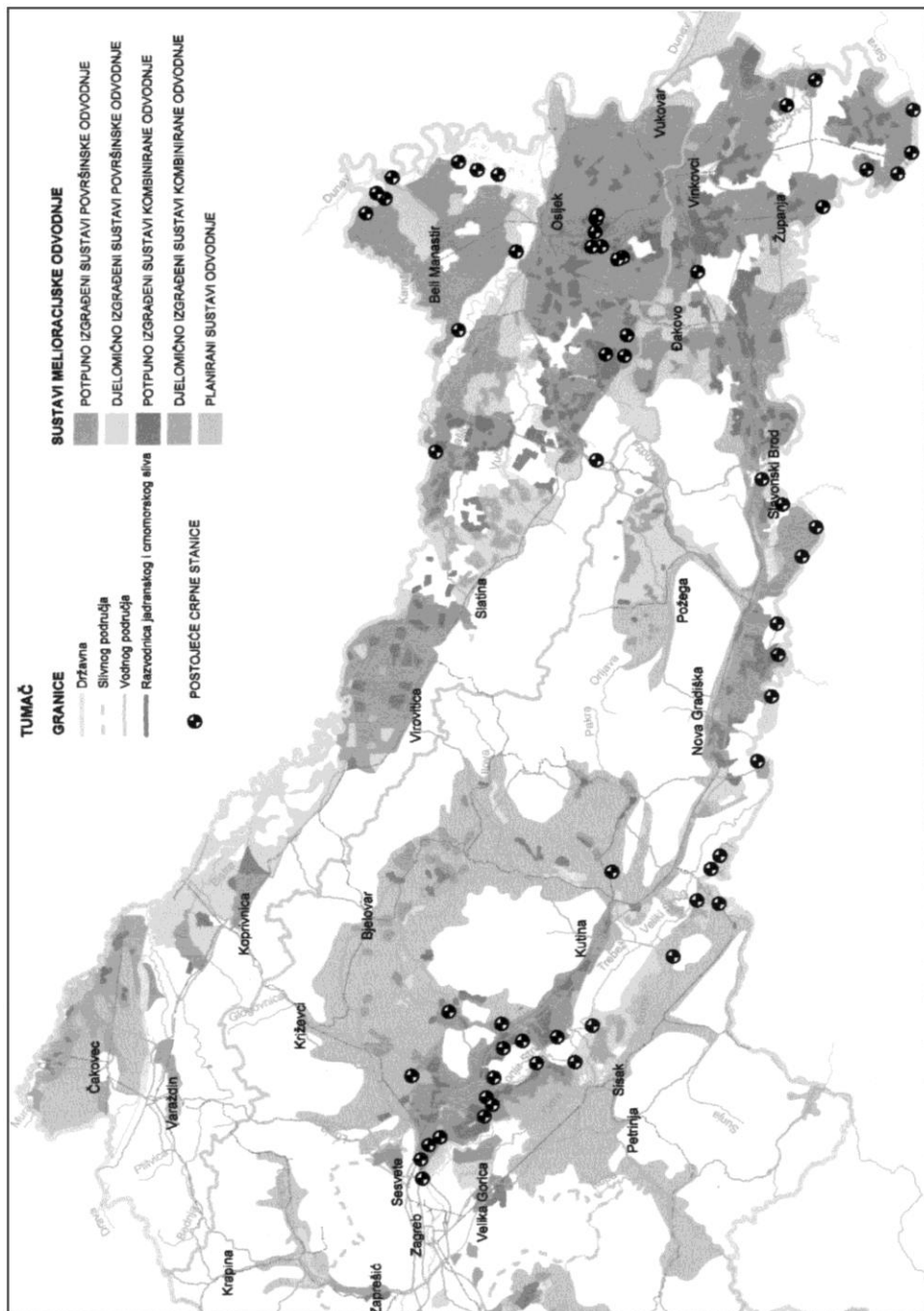
5.2.8	MISLINA	Mislina	1995	76	1	0,25	elektro	25
-------	---------	---------	------	----	---	------	---------	----

Rbr	Naziv crpne stanice	Lokacija	Godina izgradnje	Veličina sliva [ha]	Broj crpki	Ukupni kapacitet [m ³ /s]	Vrsta pogona	Ukupna snaga [kW]
5.3.	VGI "Zrmanja-Zadarsko primorje"	Zadar		400	4	1,60		260
5.3.1	JASEN	Vransko polje	1958	250	2	1,00	elektro	160
5.3.2	NADIN	Nadinsko blato	1977	150	2	0,60		100
5.4.	VGI "Srednjedalmatinsko primorje i otoci" Split			320	4	1,30		120
5.4.1	POTKONJ	Kosovo polje	1950.-tih	320	4	1,30	elektro	120
6.a.	BOSUT - RH	Biđ-Bosut	1952/74	89.780	4	21,30		1.342
	UKUPNO VODNO PODRUČJE SLIVA SAVE (33 objekta)			89.279	82	147,59		11.357
	UKUPNO VODNO PODRUČJE GRADA ZAGREBA (3 objekta)			10.263	9	18,00		1.080
	UKUPNO VODNO PODRUČJE SLIVA DRAVE I DUNAVA (17 objekata)			73.166	33	53,85		4.424
	UKUPNO VODNO PODRUČJE PRIMORSKO-ISTARSKIH SLIVOVA (4 objekta)			1.301	12	9,44		464
	UKUPNO VODNO PODRUČJE DALMATINSKIH SLIVOVA (13 objekata)			12.189	42	66,28		4.077
	SVEUKUPNO REPUBLIKA HRVATSKA (70 objekata)			186.198	178	295,16		21.402
6.b.	BOSUT - ukupno	Biđ-Bosut	1952/74	126.450	6	30,00		1.890
	SVEUKUPNO REPUBLIKA HRVATSKA (71 objekat, s dijelom c.s. Bosut)			275.978	86	316,46		22.744

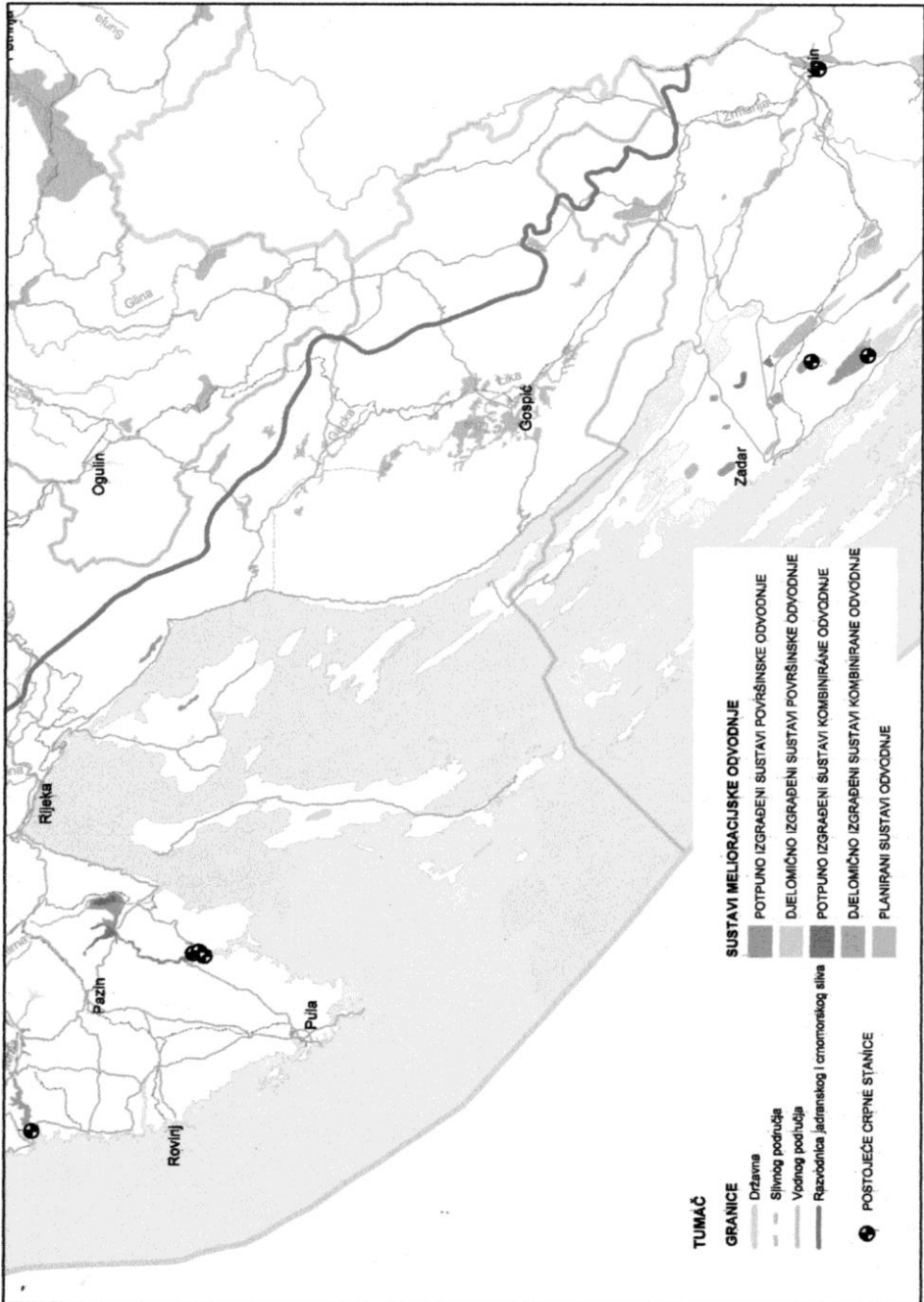
Tablica 2 Osnovni oikazatelji o crpnim stanicama za melioracijsku odvodnju po vodnim područjima Hrvatske

Slivna područja broj melioracijskih područja	Broj objekata	Slivna površina ha	Ukupan kapacitet m ³ /s	Ukupno snaga KW	Prosj. hidromodul l/s/ha
Sava (10)	36	99 542	165,59	124 37	1,66
Drava-Dunav (3)	17	73 166	53,85	4 424	0,74
Istra i Primorje (2)	4	1 301	9,44	464	7,26
Dalmacija (4)	13	12 189	66,28	4 077	5,44
Ukupno RH (19)	70	186 198	295,16	21 402	1,59
C.s. Bosut - ukupno	1	126 450	30,00	1 890	0,24
C.s. Bosut - (RH-71%)	1	89 780	21,30	1 342	0,24
Uk.RH.– s dijelom c.s. Bosut (71%)	71	275 978	316,46	22 744	1,15

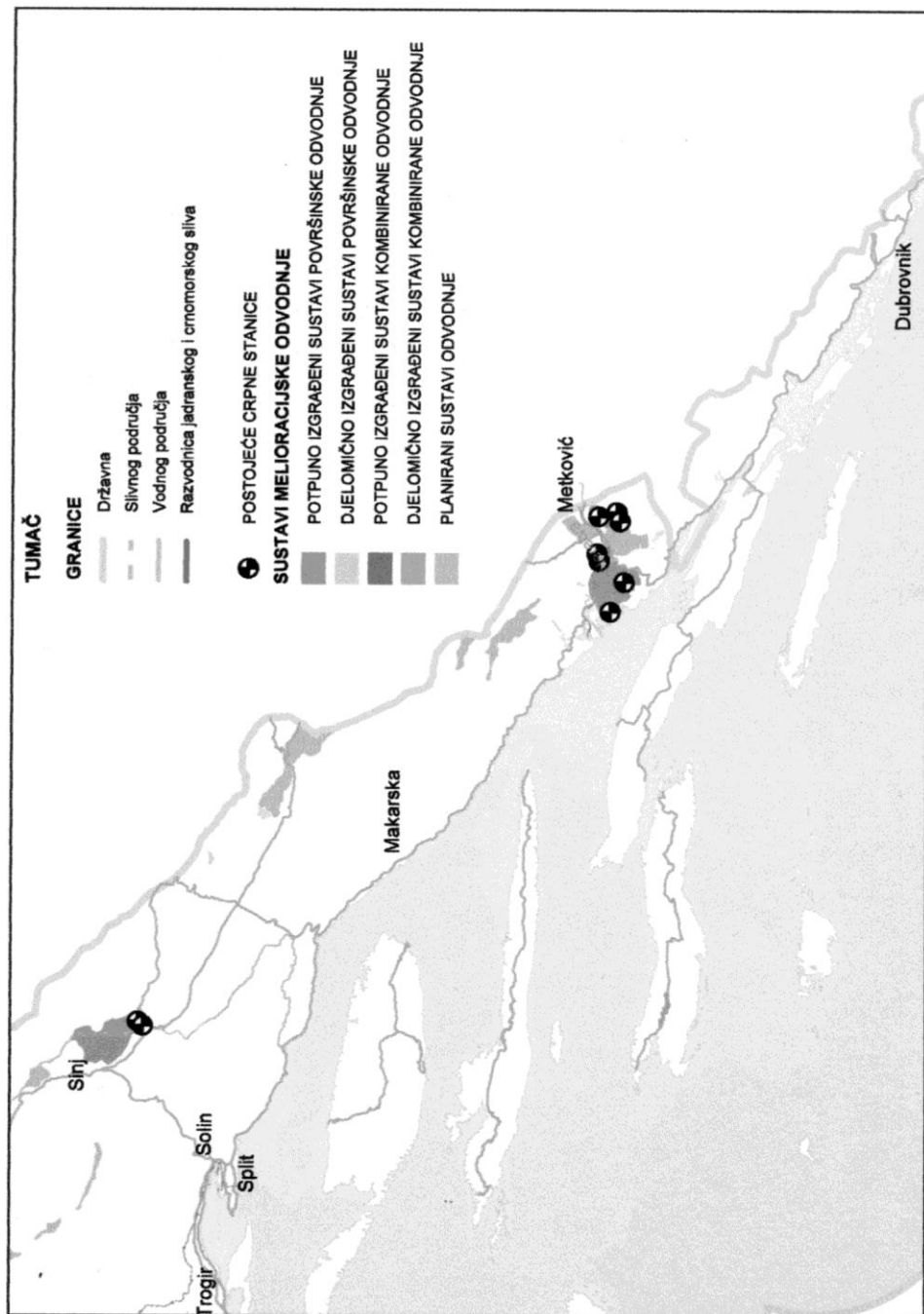
Stupanj izgrađenosti hidromelioracijskih sustava za melioracijsku odvodnju s lokacijama crpnih stanica prikazani su na slikama 4.1; 4.2 i 4.3.



Sl. 4.1: Stupanj izgrađenosti hidromelioracijskih sustava za odvodnju s lokacijama crpnih stanica na slivu Drave, Dunava i Save (54 crpne stanice od ukupno 71)



Sl. 4.2: Stupanj izgrađenosti hidromelioracijskih sustava za odvodnju na slivnim područjima Istre (4) i Sjeverne Dalmacije (3) s lokacijama crpnih stanica (7 crpnih stanica)



Sl. 4.3: Stupanj izgrađenosti hidromelioracijskih sustava za odvodnju s lokacijama crpnih stanica na slivnim područjima južne Dalmacije (10 crpnih stanica)

S postojećim crpnim stanicama hidromodul površinske odvodnje na slivu Save je 1,66 l/s/ha (bez crpne stanice Bosut), a na slivu Drave i Dunava 0,74 l/s/ha. U sklopu navedenih podataka u tablici 1, vidljivo je da se s postojećih 70 crpnih stanica odvodnjava 186 198 ha, a uključujući crpnu stanicu Bosut ukupno 275 978 ha nizinskih melioracijskih površina u Hrvatskoj. Ali također je vidljivo da 'ugrađeni hidromodul' ne zadovoljava potrebe efikasne odvodnje dijela melioracijskih površina sliva Save, Drave i Dunava. Prema pokazateljima provedenih analiza u Hrvatskoj je potrebno povećanje kapaciteta dijela postojećih i izgradnju novih crpnih stanica za efikasnu odvodnju 146 000 ha nizinskih melioracijskih površina – u cilju stvaranja i održavanja vodnog režima poljoprivrednih zemljišta prema zahtjevima optimalnog razvoja biljnih kultura i ostvarenju ukupnih visokih prinosa.

6. Obnova crpnih stanica za odvodnju melioracijskih površina

Ratnim djelovanjem bivše JNA i raznih srbočetničkih oružanih snaga pored ostalog oštećen je ili uništen dio crpnih stanica za odvodnju melioracijskih površina. Najveće štete od ratnog djelovanja bile su na sljedećim melioracijskim, odnosno slivnim područjima:

— Baranja (9 c.s., Vuka (6 c.s.), Subocka-Strug (3 c.s.) – Lonjsko i Mokro polje), Jelas-polje (3 c.s.), Kupa-Banovina (1 c.s.), Šumetlica-Crnac (2 c.s.), Biđ-Bosut (2 c.s.), Krka (1 c.s.), Cetina (1 c.s.), Vrana (1 c.s.) – ukupno 29 crpnih stanica.

Veća oštećenja su učinjena na 19 crpnih stanica, a potpuno je uništena crpna stanica "Paulin Dvor" na slivu rijeke Vuke – ukupnog kapaciteta 20, 0 m³/s i snage 1264 KW (4 crpna agregata po 5,0 m³/s i snage 316 KW po agregatu). sl. 5.1 i 5.12. Za 19 crpnih stanica na kojima su učinjene veće ratne štete osnovni pokazatelji su sljedeći:

— slivna površina 89 119 ha (47,9 posto), kapacitet 99,50 m³/s (33,7 posto) i snage 7974 KW (37,3 posto). postotak je u odnosu na ukupne veličine RH (bez crpne stanice Bosut). postotak je dat u odnosu na ukupne pokazatelje RH (ali bez crpne stanice "Bosut").

Obnova crpnih stanica započeta je nakon hrvatske redarstveno-vojne akcije "Bljesak" (svibanj 1995.) i "Oluja" (kolovoz 1995.) i to prvo na području Lonjskog polja odnosno djelovanja VGI "Subocka-Strug" u sustavu VGO "Sava", Hrvatskih voda. Radovi na obnovi kako građevinskih djelova objekata tako i strojarke te elektro opreme izvršeni su od 1996. do 1998. godine na sljedećim crpnim stanicama:

— Mrsunja (Q = 8,0 m³/s; N=660 KW), Migalovci (Q=12,0 m³/s; N=950 KW) i Dubočac (Q=4,4 m³/s; N=280 KW) Grlić (Q=8,0 m³/s; N=800 KW) – na području Jelas-polja (VGI Slavonski Brod);
 — Mlaka (Q=0,80 m³/s; N=100 KW), Košutarica (Q=0,75 m³/s; N=65 KW) i Lončarica (Q=4,0 m³/s; N=380 KW) – na području "Strug-Subocka" (Sava) VGI Novska;

- Hrastelnica ($Q=2,0 \text{ m}^3/\text{s}$; $N=180 \text{ KW}$) – na području “Kupa-Banovina” VGI Sisak);
- Vedrine ($Q=8,8 \text{ m}^3/\text{s}$; $N=550 \text{ KW}$) – na području “Cetine” (VGI Sinj)
- Nadin ($Q=2 \times 0,30=0,60 \text{ m}^3/\text{s}$; $M=2 \times 50=100 \text{ KW}$) – na području “Vrane” (VGI Zadar)

Oštećenja nastala ratnim djelovanjem vidljiva su na priloženim slikama crpnih stanica (slike r.b. 5.1, 5.4, 5.9, 5.11 i 5.12).

Pored oštećenja dijelova građevinskih objekata načinjene su štete na pogonskim agregatima te ostaloj strojarскоj i elektro opremi crpnih stanica. Za dovođenje crpnih stanica u funkciju izrađena je odgovarajuća dokumentacija po kojoj su izvršeni građevinski radovi kao i popravak oštećene opreme te po potrebi nabava i ugradnja novih strojeva opreme. Sastavni dio obnove su bili i poslovi na osiguranju dovoda energije kao i popravak stambenih objekata za rukovoce crpnih postrojenja.

Najveća oštećenja i razaranja na objektima i opremi crpnih stanica učinjena su na melioracijskom području Baranje i Vuke. Nažalost, zbog sporosti procesa mirne reintegracije na tim područjima, obnova kako hidrotehničkih tako i ostalih objekata zapčeta je tek krajem 1998. godine – nakon potpunog vraćanja privremeno okupiranih područja Baranje, zapadnog Srijema i istočne Slavonije pod nadležnost hrvatskih državnih institucija i vlasti.

Tijekom 1998. i 1999. godine nakon provedenih natječaja ugovorena je rekonstrukcija kanalske mreže i obnova crpnih stanica na području Baranje. Radovi su financirani zajmom Svjetske banke ugovorom koji je potpisan 8. rujna 1998. godine u Washingtonu. Za obnovu zaštitnih i odvodnih hidrotehničkih objekata zadužena je tvrtka *Hrvatske vode*. Zbog privremene okupiranosti Baranje, istočne Slavonije i zapadnog Srijema od 1991. do 1997. godine oštećen je dio obrambenih nasipa kao i ostalih hidrotehničkih objekata na sustavima površinske odvodnje. Zbog neizvršenja poslova redovnog održavanja smanjeni su proticajni profili i to kako glavnih vodotoka tako i melioracijskih kanala u odnosu na njihove projektno-izvedbene elemente. Sastavni dio programa obnove je bilo izvršenje poslova deminiranja dijela zaštitnih hidrotehničkih objekata i melioracijskih površina. Nakon toga se pristupilo izvedbi radova na tehničkom čišćenju – sječi stabala i šiblja, vađenju panjeva i izmuljenju glavnih odvodnih kanala kao i melioracijskih kanala III. i IV. reda. Projektu dokumentaciju za obnovu crpnih stanica izradila je tvrtka Hidroprojekt-ing d.d., Zagreb.

Radovi na obnovi građevinskih objekata crpnih stanica na području Baranje započeti su krajem 1999., a u 2000. godini nastavilo se kako s građevinskim tako i s radovima obnove strojarскоj i elektro opreme. Za dio crpnih stanica nabavljeni su novi strojevi i oprema zbog velikih oštećenja, a dijelom i zbog starosti strojeva kao i do 1991. godine.

Od kraja 1999. do 2001. godine na području Baranje izvršeni su poslovi na obnovi sljedećih crpnih stanica.

- *Velika* (na lijevoj obali r. Drave između Darde i Osijeka), kapaciteta $Q=2 \times 1,75 \text{ m}^3/\text{s}$; $= 3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ i snage $2 \times 160=320 \text{ KW}$;
- *Podunavlje* (u Kopačkom ritu pored ceste “Bilje-Kneževi Vinogradi”), $Q=1,75 \text{ m}^3/\text{s}$, $N=160 \text{ KW}$; (sl. 5.8)
- *Tikveš* (Kopački rit, naselje Podunavlje) $Q=2 \times 2,5 \text{ m}^3/\text{s} = 5,0 \text{ m}^3/\text{s}$ i

$N=2 \times 200=400$ KW; (sl. 5.9 i 5.10)

— Zlatna greda (Kopački rit, naselje Zlatna greda), $Q=2 \times 1,75+2,5=6,0$ m³/s i $N=2 \times 160+200=520$ KW; (sl. 5.1, 5.2 i 5.3)

— Budžak (desna obala Dunava, granica s Mađarskom) $Q=0,4$ m³/s i $N=50$ KW;

— Draž (pored ceste Kneževo-Batina, naselje Draž), $Q=1,5$ m³/s i $N=160$ KW; (sl. 5.4 i 5.5)

— Gombaš (u blizini naselja Batina), $Q=0,3$ m³/s i $N=50$ KW;

— Bakanka (lijeva obala Drave, pored ceste Baranjsko Petrovo Selo – Belišće $Q=2 \times 2,15+2,5=4,3$ m³/s i $N=2 \times 180=360$ KW; (sl. 5.6 i 5.7)

— Puškaš (stari tok Dunava- Topoljski Dunavac), $Q=2 \times 1,0=2,0$ m³/s i snage $N=2 \times 50=100$ KW.

Ukupni kapacitet navedenih 9 crpnih stanica u Baranji je 24,75 m³/s, a snage 4424 KW

Obnova navedenih crpnih stanica je bila vrlo složena s obzirom na njihovu starost i učinjena ratna oštećenja i to kako na građevinskim objektima tako i strojarskoj i elektro opremi kao i dovedu energije. Najveći kapacitet $Q=6,0$ m³/s ima crpna stanica *Zlatna greda* koja zajedno sa crpnim stanicama *Tikveš* ($Q=5,0$ m³/s) i *Podunavlje* ($Q=1,75$ m³/s) služi za odvodnju centralnog dijela područje Kopački rit i dijela sliva Dunava – ukupne površine 22 500 ha. Također je važan podatak da crpna stanica *Tikveš* za vrijeme visokih vodostaja Dunava “ispušta” vode u postojeći melioracijski sustav za potrebe opskrbe vodom ribnjaka *Podunavlje*, a dijelom i za potrebe navodnjavanja poljoprivrednih površina. Treba navesti da je dio strojarke opreme crpne stanice *Budžak* koji nije bilo moguće obnoviti (tehnički i financijski razlozi) postavljen u nekadašnjem skladištu opreme crpne stanice *Zlatna greda* – kao izložbeni odnosno muzejski sadržaji u cilju svjedočenja o kontinuitetu organizirane odvodnje melioracijskih površina putem crpnih stanica u Baranji (od 1874. godine). *U sklopu značenja i potrebe rada crpnih stanica treba imati na umu da je na području Baranje izgrađeno 1056 km melioracijskih kanala za odvodnju 76 730 ha poljoprivrednih i ostalih površina (od ukupno 112 780 ha područja Baranje).*

U jesen 1991. godine potpuno je uništena crpna stanica “Paulin Dvor” na slivu rijeke Vuke – ukupnog kapaciteta $Q=4 \times 5,0=20,0$ m³/s i snage $4 \times 316=1264$ KW, čija je izgradnja završena u studenom 1981. godine. Dio posljedica ratnog djelovanja, srbo-četničkih vojnih snaga vidljivi su na slikama od r.b. 5.1, 5.4, 5.9, 5.11 i 5.12. Crpnom stanicom “Paulin Dvor” vrši se odvodnja na 20 000 ha pedološki vrlo povoljnih tala, ali pod čestim utjecajem suvišnih površinskih voda i visokoj razini podzemnih voda. Pored posljedica ratnog razaranja crpnih stanica za vrijeme privremene okupiranosti nisu obavljani niti poslovi redovnog održavanja i to kako glavnih tako i melioracijskih kanala na nizinskom dijelu slivnog područja rijeke Vuke. Tek nakon usporenog završetka procesa mirne reintegracije stvoreni su uvjeti za pregled stanja hidrotehničkih objekata za zaštitu od štetnog djelovanja vanjskih voda kao i odvodnje suvišnih unutarnjih voda. Pored potpuno uništene najveće crpne stanice “Paulin Dvor” na slivnom području Vuke u velikoj mjeri su oštećene ili razorene i sljedeće manje stanice:

- Seleš ($Q=0,7 \text{ m}^3/\text{s}$; $N=80 \text{ KW}$), Vrbik ($Q=0,70 \text{ m}^3/\text{s}$; $N=80 \text{ KW}$), Ernestinovo ($Q=0,70 \text{ m}^3/\text{s}$; $N=80 \text{ KW}$), Orašić ($Q=1,0 \text{ m}^3/\text{s}$; $N=100 \text{ KW}$), Rudine ($Q=1,0 \text{ m}^3/\text{s}$; $N=120 \text{ KW}$), Ovčara ($Q=1,0 \text{ m}^3/\text{s}$; $N=120 \text{ KW}$)
- ukupnog kapaciteta $5,1 \text{ m}^3/\text{s}$ i snage 580 KW .

Navedenim crpnim stanicama vršila se odvodnja nizinskih melioracijskih površina (“depresija”) površine od 60 do 120 ha.

Prije početka izvršenja poslova na obnovi crpnih stanica prethodno je trebalo izvršiti deminiranje kako lokacije objekata tako i glavnih melioracijskih kanala te poljoprivrednih površina na nizinskom dijelu sliva rijeke Vuke. Ukupno slivno područje Vuke je $179\,300 \text{ ha}$, a hidromelioracijski objekti i sustavi su izgrađeni za odvodnju $141\,410 \text{ ha}$, a od toga odvodnja putem crpnih stanica se vrši na $24\,100 \text{ ha}$ prirodno pogodnih poljoprivrednih zemljišta. A sastavni dio obnove kako crpne stanice bilo je i tehničko čišćenje glavnih i melioracijskih kanala, (sječa stabala i šiblja s uklanjanjem iz profila kanala, vađenje panjeva i izmuljenje nanosa) – u cilju “vraćanja” na njihove projektno-izvedbene elemente.

Na slikama od r.b. 4.1 do 4.6. prikazana su ratna oštećenja i obnova crpnih stanica za odvodnju dijela melioracijskih površina Jelas polja, Crnac polja i Lonjskog polja – na slivu rijeke Save.

7. Pogon i održavanje crpnih stanica

Regularan pogon crpne stanice osiguravaju minimalno dva djelatnika u smjeni, a vrijeme rada unutar 24 sata određuje se temeljem karakteristika objekta (broj i kapacitet crpki, veličina ulazne retencije) kao i temeljem procjene količina padavina i dinamike dolaska vode do crpne stanice. Početak rada crpne stanice poslije dužeg nekorištenja u pravilu zahtjeva veći broj ljudi, a ponekad i mehanizaciju kako bi se savladale veće količine otpadnog materijala na ulaznim rešetkama. Komunikacija objekta sa centrom obrane od poplava omogućena je radio vezom.

Rad većine crpnih stanica značajno varira iz godine u godinu pri čemu se prepoznaje i značajna razlika u vremenu rada. Maksimalan rad crpnih stanica doseže u nekim godinama između 1250 do 2000 sati rada po agregatu dok se za prosjek rada može uzeti 300 do 500 sati rada po agregatu.

Održavanje crpnih stanica sastoji se od građevinskog održavanja objekta crpne stanice i elektrostrojarskog održavanja crpne stanice. Od vitalne je važnosti osiguranje brzih intervencija na elektroopremi u tijeku obrane od poplava kako na dijelu koji osigurava distributer elektroenergije tako i na ostaloj opremi, a za smanjenje broja intervencija redovito servisiranje opreme prije očekivanih stanja obrane od poplava. Stanje rotacione opreme se prati povremenom kontrolom dinamičkog stanja metodom ispitivanja vibracija.

Prosječni godišnji troškovi za energiju u procesu rada 70 crpnih stanica iznose od $3\,800\,000$ do $5\,900\,000$ eura. Prosječni godišnji troškovi poslova održavanja 70 crpnih postrojenja iznose od $8\,200\,000$ do $9\,700\,000$ eura.

Pored većine crpnih postrojenja za melioracijsku odvodnju izgrađeni su stambeni objekti za potrebe rukovoaca odnosno strojarskih stručnjaka koji rade

kako u vrijeme pogona tako i na poslovima održavanja crpnih stanica. U sklopu sagledavanja troškova održavanja crpnih postrojenja treba imati posebno na umu starost ugrađenih strojeva i opreme. A sastavni dio troškova crpnih postrojenja je i potreba zamjene kako pogonskih strojeva tako i odgovarajuće opreme.

8. Zaključci

Do 1990. godine u Hrvatskoj je izgrađeno 82 crpne stanice za melioracijsku odvodnju. U 2004. godini u funkciji je bila 71 crpna stanica ukupnog kapaciteta 316,5 m³/s i snage 22 744 KW. Ukupno je 12 crpnih postrojenja kapaciteta manjeg od 1,0 m³/s. Najviše odnosno 34 crpna postrojenja su kapaciteta od 2,0 do 8,0 m³/s. Najvećeg kapaciteta su slijedeće crpne stanice: 1) Crnac (9,0 m³/s); Migalovci (12,0 m³/s); Mahovo (12,0 m³/s); Davor (15,0 m³/s) – na slivnom području Save, Paulin Dvor (20,0 m³/s) na slivu Vuke te Trilj (10,88 m³/s) na slivu Cetine i Modrić (20,0 m³/s) na slivu Neretve. Na slivu rijeke Save je najvećeg kapaciteta crpna stanica Bosut – 30,0 m³/s, koja se nalazi na području Vojvodine, ali je 71 posto njenog gravitirajućeg područja u Republici Hrvatskoj. Sa 70 crpnih stanica na području Hrvatske odvodnjava se 186 198 ha, a s pripadajućim dijelom crpne stanice “Bosut” ukupno 275 978 ha. Prosječni hidromodul odvodnje je 1,15 l/s/ha, minimalni je 0,24 (crpna stanica Bosut), a maksimalni je na crpnim stanicama koje su izgrađene na slivnim područjima Dalmacije (5,44 l/s/ha) i Istre (7,26 l/s/ha). Na nelioracijskim područjima sliva Drave, Dunava i Save za pravovremenu odvodnju suvišnih voda mjerodavni hidromodul je od 0,5 do 2,0 l/s/ha, a sadašnji kapaciteti 53 crpne stanice imaju prosječni hidromodul od 0,74 do 1,66 l/s/ha (bez crpne stanice Bosut).

Ratnim djelovanjem srbočetničkih vojnih snaga se 1991. i 1992. oštećeno je ili razoreno 29 crpnih stanica. Veća ratna oštećenja učinjena su na 19 crpnih stanica s kojima se vrši odvodnja 89 119 ha (47,9 posto). Njihov kapacitet je 99,50 m³/s, a snaga 7974 KW. Najveća šteta je učinjena na crpnoj stanici “Paulin Dvor” ukupnog kapaciteta 20,0 m³/s i snage 1264 KW, koje je ratnim djelovanjem potpuno razorena u jesen 1991. godine. Obnova te crpne stanice je završena 2002. godine, a njenim radom vrši se odvodnja 20 000 ha poljoprivrednih i ostalih zemljišta na slivu rijeke Vuke. Velike ratne štete su učinjene i ima 9 crpnih stanica na području Baranje – ukupnog kapaciteta 24,75 m³/s i snage 4.424 KW. Njihova je obnova rađena od 1999. do 2002. godine. Srednja i manja ratna oštećenja su učinjena na crpnim stanicama koje su izgrađene za odvodnju nizinskih melioracijskih površina područja Jelas polja, Crnec polja te Lonjskog polja i Mokrog polja na vodnom području rijeke Save.

Značenje crpnih stanica treba vrednovati u sklopu potrebe odvodnje 276 000 ha nizinskih melioracijskih poljoprivrednih zemljišta, ali i njihove uloge u odvodnji suvišnih voda s površina na kojima su izgrađena naselja i prometnice. U sklopu sagledavanja značenja postojećih 71 crpne stanice ukupnog kapaciteta 316,5 m³/s važna je konstatacija da se njihovim radom vrši odvodnja od 22 do 24 % prosječno zasijanih površina u Hrvatskoj. Također treba imati na umu da je potrebna dogradnja dijela postojećih te izgradnja novih crpnih stanica za odvodnju 146 000 ha također nizinskih površina s nepovoljnim odnosom

unutarnjih i vanjskih voda – u cilju stvaranja i održavanja optimalnog vodnog režima poljoprivrednih zemljišta.

9. Fotografije crpnih stanica



3.1: Crpni agregati i oprema crpne stanice »Zlatna greda«, 2000. god.



3.2: Crpni agregati i oprema crpne stanice »Podunavlje«, 2000. god.



3.3: Crpni agregati

i oprema crpne stanice »Velika«



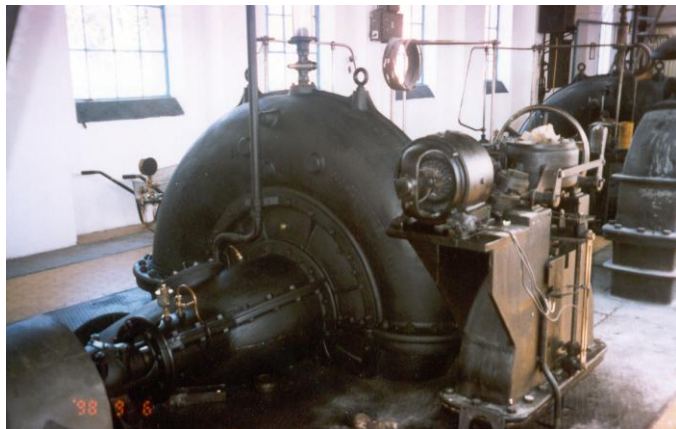
3.4: Pogonska oprema crpne stanice »Paulin dvor«, nakon obnove 2002. god.



3.5: Crpna stanica »Modrić«, ušće Neretve, 1986. god, strojarnica



3.6: Crpna stanica »Vedrine«, Sinjsko polje 1961. Strojarnica – elektromotorni pogon i uređaji za vakumiranje



3.7: Crpna stanica
»Konjuša stara«, 1935.
god. crpka $Q=1,4 \text{ m}^3/\text{s}$



5.1: Crpna stanica
»Zlatna greda«, početak
obnove 1999. god.



5.2: Obnova crpne
stanice »Zlatna greda«,
2000. god.



5.3: *Obnovljena crpna stanica »Zlatna greda«, 2000. god.*



5.4: *Obnova crpne stanice »Draž«, 1999. god.*



5.5: *Obnovljena crpna stanica »Draž«, 2000.*

god



5.6: *Dovodni kanal
crpne stanice
»Bakanka«, 2000. god.*



5.7: *Obnovljena crpna
stanica »Bakanka«,
2000. god.*



5.8: *Završetak
obnove crpne stanice
»Podunavlje«,*

2000. god.



5.9: Početak obnove crpne stanice »Tikveš«, 1999. god.



5.10: Obnovljena crpna stanica »Tikveš«, 2000. god.



5.11: Crpna stanica »Paulin dvor« — nakon ratnog djelovanja

srbočetničkih vojnih snaga, jesen 1991. god.



5.12: *Crpna stanica »Paulin dvor«
— nakon ratnog djelovanja srbočetničkih vojnih snaga, 1991. g.*

5.13: *Obnova crpne
stanice »Paulin dvor«,
2001. god.*



5.14: *Obnovljena crpna*



stanica »Paulin dvor«, 2002. god.



5.15: Obnovljena crpna stanica »Paulin dvor«, 2002. god.

10. Popis literature i podataka

1. Marušić, J: *Objekti hidromelioracijskih sustava površinske odvodnje*, Priručnik za hidrotehničke melioracije, I kolo odvodnjavanje, knjiga 3, Osnovna mreža, Društvo za odvodnjavanje i navodnjavanje Hrvatske (DONH), Zagreb, 1985; str. 149-218.
2. Srebrenović Z: *Elementi dimenzioniranja crpnih stanica*, isto kao r.b. 1, str. 219-236.
3. Drnjević, B; Bagarić, I: *Geomehanička i hidraulička stabilnost crpnih stanica*, isto kao r.b.1; str. 237-258.
4. Bićanić, V: *Odvodnje crpne stanice u Hrvatskoj*, isto kao r.b.1; str. 259-299.
5. Marušić, J: Pregled osnovnih podataka o hidromelioracijskim objektima i sustavima u Hrvatskoj u 1990. g; JVP "Hrvatska vodoprivreda" Zagreb, 1991. g.; str. 1-8.
6. Gereš, D; Kolovrat, I; Marušić, J: *Ratne štete u vodoprivredi R. Hrvatske*; Građevinar, 44, Zagreb, 1992. str. 731-739.
7. Marušić, J: Značenje vodoprivrednih djelatnosti za obnovu i razvoj Hrvatske, Hrvatske vode, 1, 1, Zagreb, 1993. str. 1-12.
8. Marušić, J: *Ratne štete, obnova i održavanje hidromelioracijskih sustava za odvodnju*; Poljoprivreda i gospodarenje vodama, Bizovačke Toplice, 1994. Zbornik radova, str. 317-336.
9. Kolovrat, I; Marušić, J; Šturlan, S: *Značenje, ratne štete i obnova vodoprivrednih objekata*, Prva hrvatska konferencija o vodama, Održivi razvoj i upravljanje vodama, Dubrovnik, 1995; knjiga 1; str. 59-74.
10. Skupina autora, Katalog vodoprivrednih crpnih stanica u Republici Hrvatskoj, JVP "Hrvatska vodoprivreda", IGH, Zagreb, 1995. g.
11. Petraš, J i suradnici: *Prijedlog definicija učestalih vodoprivrednih građevina na otvorenim vodotocima*, Građevni godišnjak '95; HSGI, Zagreb, 1995, str. 383-424.

12. Marušić, J: *Uređenje vodnog režima za potrebe biljne proizvodnje, Problemi obnove poljoprivredne biljne proizvodnje*, Znanost za oslobođena i integrirana područje, HAZU, Savjet za poljoprivredu i šumarstvo, Petrinja, Zagreb, 1996; Zbornik radova; str. 27-33.
13. Marušić, J: *Hydromelioration Works and Drainage Systems in the Danube Basin in Croatia*, XIX Conference of the Danube Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management, Osijek, Croatia, 1998; 587-596.
14. Đuroković, Z; Nodilo, B: *Obnova crpnih stanica*, Građevinar 53 (2001), 6; Zagreb, 2001. str. 407-412.
15. Marušić, J: *Construction, War damages and Rehabilitation of Hydrotechnical facilities in Croatia, 1990-2000*, 2nd SENET Conference on Project Management, Cavtat, Croatia, 2002. g; Theme 6, p. 663-673.
16. Marušić, J: *Izgradnja, ratne štete i obnova hidrotehničkih objekata u Hrvatskoj*, Hrvatske vode i sigurnost, Strateška važnost vode – sigurnosni aspekti, Zbornik radova znanstvenog projekta, MZT, Hrvatske vode i Fakultet političkih znanosti, Zagreb, 2003. str. 35-58.
17. Skupina autora, *Vodnogospodarska osnova Hrvatske*, Zavod za vodno gospodarstvo, Hrvatske vode, Zagreb, 2002.-2003. g.
18. Đuroković, Z: *Obnova vodnogospodarskih objekata na području Hrvatskog Podunavlja*, 3. Hrvatska konferencija o vodama, Hrvatske vode u 21. stoljeću, Osijek, 2003, Zbornik radova, str. 1015-1019.
19. Đuroković, Z: I; Pintarić, Z: *Fotosnimci-fotografije crpnih stanica i ostalih hidrotehničkih objekata na melioracijskim područjima sliva rijeke "Vuke" i "Baranje"*; Osijek, 2000—2004.
20. Steinbauer, M i suradnici: *Obnova područja istočne Slavonije, Baranje i zapadnog Srijema*, Sabor hrvatskih graditelja 2004, HSGI, Cavtat, 2004. str. 1027-1038.
21. Pondeljak, J: *Pregled osnovnih podataka o crpnim stanicama za melioracijsku odvodnju u Hrvatskoj*; Hrvatske vode, Zagreb, 2004.
22. Šustić Diana, *Crteži crpnih stanica i fotodokumentacija Hrvatskog društva za odvodnju i navodnjavanje*, Zagreb, 2003-2005. g.
23. Pondeljak, J.; Glavaš, B: *Fotodokumentacije crpnih stanica na slivu Neretve i Cetine*
24. Barbalić, Darko; Stupanj izgrađenosti hidromelioracijskih sustava za odvodnju s lokacijama crpnih stanica po slivnim područjima, Hrvatske vode, Zagreb, 2004.g.

6

NAVODNJAVANJE U ODRŽIVOJ POLJOPRIVREDI

Prof. dr. sc. Davor Romić
Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

1. Uvod	2
2. Problemi navodnjavanja	3
2.1. Oštećenje tala	4
2.1.1. Fizikalna oštećenja tala	4
2.1.2. Kemijska oštećenja tala	5
2.2. Oštećenje biljaka	6
2.3. Onečišćenje podzemnih i površinskih voda	7
3. Poljoprivredna proizvodnja	
u uvjetima navodnjavanja zaslanjenim vodama	8
3.1. Utjecaj soli na tlo i biljke	8
3.2. Adsorpcijski kompleks i zamjena kationa u tlu	11
3.3. Procjena opasnosti od suvišnog natrija	11
3.4. Mjere gospodarenja u zaslanjenim uvjetima	12
3.4.1. Ocjena kvalitete vode za navodnjavanje	12
3.4.2. Izbor poljoprivredne kulture koja se mogu uzgajati u danim uvjetima	15
3.4.3. Spriječavanje akumulacije soli u tlu	18
3.4.4. Izbor sustava navodnjavanja	18
3.4.5. Spriječavanje adsorpcije natrija u tlu	19
4. Navodnjavanja i onečišćenje voda	20
Literatura	21

1. Uvod

Poljoprivredna proizvodnja ima svoju humanu zadaću osigurati dovoljne količine hrane za rastuću populaciju na Zemlji. Broj stanovnika na Zemlji u posljednjih pedeset godina više se nego udvostručio. Ovo povećanje broja stanovnika tražilo je intenzifikaciju poljoprivredne proizvodnje na postojećim ili osvajanjem novih poljoprivrednih površina, a to je, između ostalog, zahtijevalo i zahvaćanje sve većih količina vode. Dobro je poznato da je poljoprivredna proizvodnja najveći korisnik vode. Uzgoj poljoprivrednih kultura se širio na površine koje za to nisu bile pogodne, a najčešće je osvajanje novih prostora zapravo bila **borba za vodu i protiv vode**. Međutim, javljale su se i popratne

pojave, a one su najčešće bile negativni utjecaji na okoliš. Povećavala se erozija, smanjivala biološka raznolikost, onečišćavalo tlo i voda, a što je ugrožavalo održavanje biološke ravnoteže.

Hrvatska je zemlja relativno bogata vodnim resursima. Međutim, svjedoci smo sve češćih suša i u Hrvatskoj, a štete u poljoprivredi procjenjuju se milijardama kuna. U Hrvatskoj se godišnje zahvati oko 550 milijuna m³ vode, a do krajnjih korisnika dođe oko 375 milijuna m³. Zahvaćena količina vode predstavlja tek nešto manje od 1% od ukupnih količina koje prosječno godišnje padnu na kopneni dio. Naime, na kopneni dio (56610 km²) padne prosječno 1162 mm oborina što čini ukupnu količinu od 6,6x10¹⁰ m³ vode. Zahvaćene količine vode koriste se za različite namjene: vodoopskrbu, industriju, poljoprivredu i drugo.

Poznata je činjenica da poljoprivreda i u globalnim razmjerima koristi oko 70% od zahvaćenih količina vode, a navodnjavanje je glavni potrošač te vode. Od ukupno 1,5 milijardi ha zasijanih površina, u svijetu se trenutno navodnjava 250 milijuna ili oko 17%, a na njima se proizvodi oko 40% svjetske hrane (van Hofwegen i Svendsen, 2000). Procjenjuje se da navodnjavanje koristi između 2000 i 2500 km³ vode godišnje.

Procjenjuje se, nadalje, da se u Republici Hrvatskoj danas navodnjavana između 7000 i 9000 ha poljoprivrednih površina. Najviše se navodnjava na vodnom području Dalmacije posebno u dolini Neretvi i na Zadarsko-biogradskom području, a na ostalim područjima navodnjavane površine su disperzirane, što je uvjetovano načinom korištenja poljoprivrednih površina, odnosno uzgojem pojedinih kultura.

Na području Republike Hrvatske postoje velike mogućnosti za navodnjavanje, ali se one malo koriste. Već je istaknuto vodno bogatstvo Hrvatske, a poljoprivredna proizvodnja je važna gospodarska grana. Od ukupno 3,2 milijuna ha poljoprivrednih površina pod oranicama i vrtovima se nalazi više od 1,1 milijun ha, a voće i povrće se uzgaja na oko 0,3 milijuna ha. Kada su tla na kojima se provodi poljoprivredna proizvodnja u pitanju procjenjuje se da raspoložemo sa oko 2.1 milijun ha poljoprivrednih tala koja su potencijalno pogodna za navodnjavanje. S obzirom na strukturu poljoprivredne proizvodnje, način korištenja poljoprivrednih površina, izvore vode, kakvoću vode za navodnjavanje, ekonomske pokazatelje, te druga ograničenja, svakako da nije realno očekivati da će se sve te površine u budućnosti navodnjavati.

Vanjskotrgovinska bilanca poljoprivredno-prehrambenih proizvoda Republike Hrvatske već je duže razdoblje negativna, tj. više se vrijednosno uvozi nego izvozi. Trenutačno se u uvozi više od 1,2 milijarde US\$ poljoprivredno-prehrambenih proizvoda. Važno je napomenuti da se uvoze kulture za čiju proizvodnju postoje svi agroekološki uvjeti i u Hrvatskoj.

Stoga se na osnovi navedenog može zaključiti da u Hrvatskoj postoje svi osnovni preduvjeti za višestruko veće navodnjavanje nego što se danas prakticira. Temeljem tih činjenica je Vlada Republike Hrvatske pokrenula Nacionalni projekt pod nazivom "Navodnjavanje i gospodarenje poljoprivrednim zemljištem i vodama u Republici Hrvatskoj". Cilj projekta je prvenstveno poboljšati gospodarenje prirodnim resursima, organizirati infrastrukturu u

poljoprivredi, okrupnjavanje poljoprivrednih površina, uvođenje navodnjavanja i novih tehnologija proizvodnje, te time stvoriti preduvjete za učinkovitiju poljoprivrednu proizvodnju.

Svjesni činjenice da je odnos vode i poljoprivrede iznimno dinamičan i složen, da voda i poljoprivredna proizvodnja funkcioniraju u simbiozi između tla i vode, da se poljoprivreda u odnosu na onečišćenje voda javlja i kao *uzrok* i kao *žrtva* želimo za ovo izdanje Priručnika za hidrotehničke melioracije napisati rad koji će ukazati na vezu navodnjavanja i održive poljoprivrede. Tema se čini aktualnom upravo u trenutku kada je započet rad na nacionalnom projektu "Navodnjavanje i gospodarenje poljoprivrednim zemljištem i vodama".

Važna zadaća agronomске prakse jest iznalaženje tehnika i tehnologija gospodarenja koje neće ugroziti prirodne funkcije tla, a zaštitit će površinske i podzemne vode od onečišćenja iz tog izvora. Upravo se ovime želi upozoriti i na posljedice koje se javljaju u nemarnoj praksi navodnjavanja iz vlastitih ali i iz iskustava iz svjetske prakse.

2. Problemi navodnjavanja

Navodnjavanje je, kao praksa s poviješću dugom više od sedam milenija, polučilo brojne povoljne, ali i nepovoljne učinke. Nepovoljni učinci obično nisu svojstveni samom navodnjavanju već njegovoj nemarnoj praksi. Dugotrajnom primjenom navodnjavanja, koje je u početnom razdoblju u pravilu rezultiralo povećanjem produkcije, nedovoljnim znanjem i bez kontrole kakvoće i količine primijenjene vode podmuklo su se širili problemi koji se u početku nisu uočavali. Najčešći problemi u praksi navodnjavanja javljaju se na tlu, biljci, podzemnim i površinskim vodama. Neodgovarajuće gospodarenje sustavom navodnjavanja može dovesti do promjena fizikalnih, kemijskih i mikrobioloških značajki tala. Nadalje, oštećenja se mogu javiti i na biljci i to kao fizička i kemijska oštećenja. Osim na tlu i biljci neodgovarajući sustavi navodnjavanja ili gospodarenje istim može dovesti do promjena, obično negativnih, i u drugim medijima okoliša prije svega podzemnim i površinskim vodama.

2.1. Oštećenje tala

Tlo kao prirodni, otvoreni, višefazni sustav, nastao procesima pedogeneze, podložan je različitim promjenama. Upravo otvorenost sustava omogućava različite promjene. Dio njih, kao što su transformacija tvari i energije, premještanje i otpuštanje, i druge predstavljaju dinamične prirodne procese. Međutim, u tom otvorenom sustavu javljaju se i razna oštećenja najčešće uvjetovana antropogenim utjecajem. Dio oštećenja tla koji se javljaju u praksi navodnjavanja mogu se najčešće podijeliti na fizikalna i kemijska. Ta granica ponekad nije strogo postavljena, što znači da primjerice fizikalne promjene preko fizikalno-kemijskih procesa dovode i do kemijske promjene odnosno obrnuto.

2.1.1. Fizikalna oštećenja tala

Kada je navodnjavanje u pitanju fizikalna oštećenja tala mogu se javiti kao posljedica izbora neodgovarajućeg sustava ili kao posljedica neodgovarajuće mjere gospodarenja. Jedno od najčešćih fizikalnih oštećenja jest destabilizacija i razaranje strukturnih agregata. Naime, čvrsta faza tla koju čine mineralna i organska tvar povezuju se u veće ili manje skupine tvoreći strukturne agregate. Na tvorbu strukturnih agregata tla značajnu ulogu ima udio koloidne frakcije (organske i mineralne), prisutnost iona koagulatora (Ca, Fe, Al), te odgovarajuće klimatske prilike. Čestice čvrste faze tla povezuju se tvoreći mikroagregate, a njihovim povezivanjem nastaju makroagregati formirajući tako strukturu tla. Struktura je jedna od najvažnijih fizikalnih značajki tla, jer djeluje i na druge fizikalne značajke te time i na ukupnu plodnost tla. Tla dobre strukture imaju veću poroznost, bolje vodo-zračne odnose, bolju infiltracijsku sposobnost, te su lakša za obradu.

Razaranje strukturnih agregata može uzrokovati voda koja se na površinu tla dodaje sustavima za navodnjavanje. Stagniranje vode na površini može također utjecati na razaranje strukturnih agregata, a posebice to dolazi do izražaja kod tala koji s nestabilnom strukturom. Dispergirane čestice, prije svega koloida gline, postaju time podložne ispiranju. Njihovo ispiranje i akumuliranje u dubljim slabije propusnim slojevima mijenja poroznost, a time i filtracijska i infiltracijska sposobnost tla. Smanjena filtracijska i infiltracijska sposobnost tla i duže stagniranje vode mogu, nadalje, dovesti do zamočvarivanja. Zamočvarivanje ili hidrogenizacija jest specifična transformacija u anaerobnim uvjetima, odnosno u vremenu kada su makro i mikro pore duže vremena ispunjene vodom. U zamočvarenim horizontima tala dominiraju procesi redukcije, a moguća posljedica je smanjena mogućnost zakorjenjivanja kulturnog bilja.

Disperziju strukturnih agregata mogu izazvati i udari kapljica vode koje stvaraju sustavi za navodnjavanje. Naime, sustavi koji rade pod većim radnim tlakom (do 10 bara i više), kao na primjer samohodna sektorska prskalica – *typhon*, proizvode kapljice koje svojom snagom razaraju strukturne agregate i time uzrokuju promjenu hidrauličkih značajki tala, te dovode do zamočvarivanja. Tla kojima je narušena strukturu agregata podložna su stvaranju pokorice. Pokorica nastaje kada se u sušnim uvjetima formira nekoliko milimetara tvrdog sloja na površini tla koji može spriječiti klijanje bilja i tako uništiti usjev.

Ako do disperzije strukturnih agregata i peptizacije gline dolazi na nagnutim terenima u uvjetima kada je infiltracijska sposobnost tla manja od intenziteta oborina ili intenziteta navodnjavanja može doći do erozije tla. Erozijska koja se javlja kao posljedica navodnjavanja zato se i naziva "*irigacijska erozija*". Površinsko odnošenje čestica tla i njihovo akumuliranje na drugim mjestima može također izazvati niz problema. Fizikalne posljedice odnošenja sedimentima očituju se kao gubitak oraničnog horizonta. Sedimentacija erodiranog materijala na drugim mjestima, primjerice u kanalima i rijekama, može narušiti njihove hidrauličke značajki. Uz fizička mogu se javiti i kemijska onečišćenja. Uloga sedimenta u kemijskom onečišćenju povezana je i s veličinom čestica sedimenta i s količinom spojeva ugljika povezanih sa sedi-

mentom. Obično se ističe da je kemijski aktivna frakcija sedimenata ona koja je manja od 63 μm . Kada se radi o adsorpciji fosfora i metala, tada je veličina čestica najvažnija, zato jer se vežu procesima jednostavne ionske zamjene na površinu koloida gline ili organske tvari, te kemisorpcijom na Fe i Mn okside. Mnogi od perzistentnih i toksičnih organskih tvari, naročito kolorirani sastojci koje sadrže pesticidi, čvrsto se vežu s organskim ugljikom iz sedimenata, a na taj način i transportiraju.

2.1.2. Kemijska oštećenja tala

Jedan od najvećih nepovoljnih učinaka i problema kemijskog oštećenja tala u uvjetima navodnjavanja jest zaslanjivanje i alkalizacija. Zaslanjivanje tla može se definirati kao proces nakupljanja soli u rizosferi do koncentracija koje štetno djeluju na rast i razvoj kulturnog bilja.

Proces nakupljanja soli može biti *priroda/primaran* kada se visoko mineralizirana podzemna voda kapilarnim putem diže do površine tla, a voda evaporacijom i/ili evapotranspiracijom gubi u atmosferu dok soli ostaju u površinskim slojevima. Intenzitet procesa ovisi o stupnju mineralizacije i dubini podzemne vode, klimatskim prilikama, značajkama tla i dr.

Drugi vrlo čest proces je onaj pod utjecajem čovjeka i obično se naziva *sekundarno* zaslanjivanje. Podizanjem razina podzemne vode, primjerice izgradnjom nekih hidrotehničkih objekata ili navodnjavanjem može doći do akumulacije soli u profilu tla. Ima mnogo primjera u svjetskim razmjerima da je upravo je navodnjavanje kao mjera koja ima zadaću povećanja produktivnosti poljoprivrednih tala dovela je do njihova oštećenja.

Zaslanjivanje i/ili alkalizacija je proces uvođenja soli u otopinu tla i kao takav može imati štetne posljedice na biljku, te uzrokovati promjene fizikalnih i kemijskih značajki tala. Nakupljanje natrija na adsorpcijskom kompleksu preko procesa bubrenja i disperzije gline dovodi do smanjenja infiltracijske i filtracijske sposobnosti tla. Alkalizirana tla su loše strukture, sklona stvaranju pokorice, teška za obradu, a zaključno slabo pogodna ili nepogodna za poljoprivrednu proizvodnju.

Prema FAO/UNESCO karti ukupne površine zaslanjenih i/ili alkaliziranih tala na Zemlji iznose približno 831 milijun ha (397 mil. ha zaslanjenih, 434 mil. ha alkalnih). Danas se, ovisno o kriterijima, procjenjuje da je više od jedne trećine od ukupno 250 milijuna ha navodnjavanih poljoprivrednih površina u svijetu zaslanjeno i/ili alkalizirano. Nadalje, procijenjeno je da se uslijed procesa salinizacije i/ili alkalizacije u svijetu svake minute gubi 3 ha površina koje bi trebale koristiti za proizvodnju hrane.

Do problema zaslanjivanja dolazi kad se koncentracija soli u tlu poveća do granice koja izaziva smanjenje primanja vode od strane biljke, a što dalje vodi smanjenju prinosa. Pristup problemu ekstrakcije vode iz tla i usvajanja putem biljke temelji se na prepoznavanju svih dijelova fizički integriranog sustava tlo–biljka–atmosfera. Do primanja vode putem biljnog korijena dolazi uslijed razlike potencijala vode u tlu i citoplazmi korijena. Zanimajući utjecaj gravitacije, ukupni vodni potencijal u tlu određen je matriks potencijalom i osmotskim potencijalom. Osmotski potencijal je u funkciji koncentracije soli u otopini tla. Smanjenjem matriks potencijala povećava se osmotski potencijal, a

posljedica toga je vodni stres i usporen rast biljke. Simptomi ove pojave slični su simptomima nastalima sušom. Problem se dalje povećava primjenom vode s većom koncentracijom soli.

Alkalizacija predstavlja nakupljanje alkalija, prije svega natrija u tlu. Štetne posljedice suvišnog natrija u tlu odražavaju se promjenom fizikalno-kemijskih svojstava matriksa tla bubrenjem gline i disperzijom čestica tla. Ti su mehanizmi međusobno povezani i uzrokuju smanjenje infiltracijske sposobnosti i propusnosti tla za vodu. Kemijska disperzija čestica tla izaziva pokoricu koja je jedna od dijagnostičkih znakova alkaliziranih tala.

Pored zaslanjivanja i alkalizacije, u posljednje vrijeme problem dodatno komplicira sve češća primjena otpadnih voda za navodnjavanje. Primjenom otpadnih voda nedefinirane kvalitete mogu se i u tlu i u biljci akumulirati štetne tvari i i dalje uključiti u hranidbeni lanac. Metali u tragovima nalaze se gotovo u svim izvorima vode, ali u vrlo niskim koncentracijama, obično nižima od nekoliko mg/l, a većinom i manje od 100 µg/l. U većini slučajeva visoke koncentracije pojedinih metala posljedica su antropogenih aktivnosti, najčešće ispuštanja otpadnih voda u vodotoke. Nisu svi metali u tragovima toksični, a neki su od njih u malim količinama esencijalni za biljke (Fe, Mn, Mo, Zn). Međutim, više koncentracije mogu izazvati nepoželjnu akumulaciju u biljnom tkivu i redukciju razvoja biljke. Dugogodišnje navodnjavanje vodama koje sadrže povećane koncentracije metala u tragovima mogu rezultirati njihovom akumulacijom u tlu do granica štetnih za živi svijet.

2.2. Oštećenje biljaka

Visoke koncentracije ukupnih i pojedinačnih soli osim utjecaja na primanje vode mogu izazvati i oštećenja na biljci. Problem toksičnosti razlikuje se od zaslanjivanja po tome što se proces zbiva u samoj biljci i nije vezan za nedostatak vode. Nastaje pod utjecajem pojedinih iona koje je biljka primila i akumulirala najčešće u listu do koncentracije koja izaziva oštećenja. Kad je praksa navodnjavanja u pitanju onda su to najčešće ioni natrija, klor, bora te nekih teških metala.

Ion klor je najčešći uzročnik toksičnosti iz vode za navodnjavanje. Biljka ga prima s otopinom, kreće se transpiracijskim tokom i akumulira u listu. Kada se koncentracija u listu poveća iznad tolerantne granice javljaju se tipični simptomi oštećenja, kao što je palež lišća, sušenje pojedinih dijelova lista, a u težim slučajevima i defolijacija. Prema Mass-u (1990) maksimalne koncentracije klorida u tlu kod kojih ne dolazi do redukcije prinosa su 10 mmol/l (za jagodu, salatu i neke druge kulture), dok za neke kulture tolerantna koncentracija može biti i do 80 mmol/l (na primjer ječam). Ovi podaci pokazuju da pojedine biljne vrste imaju veću ili manju tolerantnost prema visokim koncentracijama kako ukupnih tako i pojedinačnih soli.

Navodnjavanje kišenjem vodom s visokom koncentracijom iona klor posebno je problematično zbog mogućnosti izravne apsorpcije putem lista i nakupljanja do koncentracija koja izazivaju oštećenja, a naročito ako je proces povezan s visokim temperaturama i niskom vlažnosti zraka. Kako ističe Rhoades i sur. (1992) navodnjavanje paprike metodom kišenja vodom $EC = 4,4$ dS/m smanjilo je prinos za 59% u usporedbi s metodom kapanja. Mass (1990) ukazuje

na relativnu osjetljivost nekih poljoprivrednih kultura na navodnjavanje kišenjem kod različitih koncentracija klorida i natrija. Tako, citrusi su osjetljivi na koncentracije od 5 mmol/l, a šećerna repa i cvjetača na koncentracije veće od 20 mmol/l.

Za razliku od toksičnosti iona klora, toksičnost iona natrija nije tako jednostavno utvrditi. Simptomi su slični, ali se palež lišća najprije pojavljuje na vanjskim rubovima, i to u pravilu na starijim listovima. Oštećenja se koncentrično šire prema sredini, a sam proces širenja u pravilu traje dugo. Uz toksične efekte natrij pokazuje i specifične efekte u fiziološkim procesima kao i antagonističke odnose kod primanja kalcija i magnezija. Natrij zamjenjuje kalcij i magnezij te tako smanjuje njihovu ulogu u fiziološkim procesima. Koncentracije natrija u vodi za navodnjavanje veće od 69 mg/l mogu biti toksične za biljke. Međutim, treba naglasiti da sve biljke nisu jednako osjetljive na visoke koncentracije natrije. Isto tako, ni u svim razvojnim fazama biljke nisu jednako osjetljive. Kad je toksičnost natrija iz tla u pitanju ona nije jednaka niti pri svim razinama kalcija. Kod nižih razina kalcija u tlu toksičnost natrija je veća (Evangelou, 1998).

Suprotno natriju, bor je esencijalan element nužan za razvoj biljke. Biljka ga prima u vrlo malim količinama, a s povećanjem koncentracija postaje toksičan. Već u koncentracijama većim od nekoliko mg/l bor postaje toksičan za neke kulture. Tako prema Mass-u (1990) maksimalne koncentracije u tlu kod kojih neće doći do redukcije prinosa za limun iznose 0,5 mg/l, a za šparogu više od 10 mg/l.

2.3. Onečišćenje podzemnih i površinskih voda

Onečišćenje voda širok je pojam, ali se općenito može definirati kao smanjenje kakvoće uslijed unošenja primjesa ili potencijalno štetnih tvari. Izvori promjena mogu biti različiti, a primarno su povezani s aktivnostima čovjeka. Izvori onečišćenja voda mogu biti: *industrija i zbrinjavanje industrijskog otpada, rudarstvo, transport, kućanstvo i zbrinjavanje kućanskog otpada, poljoprivreda i druge djelatnosti*. Brzom industrijalizacijom razvijale su se tehnologije koje su dovodile do bržeg razvoja društva, ali su istovremeno ostavljale posljedice na okoliš, time i na vode. Intenzivnim razvojem organske kemijske industrije i primjenom njenih proizvoda u industriji, poljoprivredi i kućanstvu, dolazilo je do povećanja koncentracija organskih spojeva iz nafte ili njenih derivata, deterdženata, organskih pesticida, organskih otapala, fenola i drugih potencijalno štetnih tvari u vodama. Dio industrijskih proizvoda nalazi svoju primjenu u poljoprivredi, te tako preko poljoprivrede predstavljaju prijetnju kvaliteti vode. I same uzgojne mjere u poljoprivredi mogu uzrokovati fizikalna, kemijska i biološka onečišćenja vode. Intenzifikacijom poljoprivredne proizvodnje procesi onečišćenja voda mogu se povećavati. Tako i navodnjavanje kao mjera u poljoprivredi može utjecati na ispiranje štetnih tvari, te time doprinijeti onečišćenju površinskih i podzemnih voda.

Količine vode koje dolaze na poljoprivrednu površinu, osim što se gube evapotranspiracijom u atmosferu, odlaze neiskorištene stvarajući površinske tokove i podzemne vode. Do ispiranja dolazi kada je tlo saturirano vodom, a unos vode u ovom slučaju navodnjavanjem prelazi gubitke vode iz tla evapo-

transpiracijom. Brzina procjeđivanja vode ovisi o fizikalnim značajkama tla: teksturi, strukturi i poroznosti. Teksturno lagana tla koja imaju i veću zastupljenost makro pora imaju i veći potencijal ispiranja. Voda koja u saturiranim uvjetima uslijed gravitacije prolazi kroz makro pore, odlazi i odnosi u dublje slojeve spojeve koji su podložni ispiranju. Nadalje, drenirana tla, dakle ona na kojima su provedene mjere odvodnje, imaju također veći potencijal ispiranja nego nedrenirana. Voda se kroz tlo procjeđuje prema drenovima, kanalima i podzemnoj vodi. Procjeđivanje do podzemne vode je sporo i ovisi o tipu tla, geomorfološkim karakteristikama profila i dubini do vodonosnika.

U poljoprivrednoj proizvodnji, kao uzgojne mjere, koriste se različite kemikalije. U mineralnim gnojivima hraniva se obično nalaze u obliku da su lako pristupačna biljci. Međutim, dušik koji se dodaje gnojidbom rijetko je, čak i u optimalnim uvjetima, potpuno iskorišten. Ovisno o vrsti gnojiva, vremenu prijeme, kulturi, klimatskim uvjetima i onima u tlu, najveći dio primi biljka, jedan dio se ugradi u organsku tvar u tlu, a samo manji dio se zadržava u obliku slobodnih iona u otopini tla (NH_4^+ i NO_3^-) ili gubi ispiranjem i volatizacijom.

Ono što je zanimljivo s gledišta zaštite voda jesu upravo posljedice ispiranja nitrata iz tla, a one mogu biti sljedeće:

- eutrofikacija i gubitak biološke raznovrsnosti u površinskim vodama,
- povećanje koncentracije dušikovih oksida u atmosferi koji utječu na stvaranje efekta staklenika,
- povećanje koncentracije nitrata u podzemnoj vodi i vodi za piće – Svjetska zdravstvena organizacija preporuča da voda za piće ne smije sadržavati više od $50 \text{ mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$ (WHO, 1993).

3. Poljoprivredna proizvodnja u uvjetima navodnjavanja zaslanjenim vodama

Prirodno zaslanjena tla obuhvaćaju relativno veliki dio zemljišta, prema nekim procjenama oko 6% od ukupnih površina. S obzirom na svoj postanak te su površine prostorno ograničene i nepromjenjive, te su kao takve s agronomskog stajališta marginalne. Međutim, pojava sekundarnog zaslanjivanja i/ili alkalizacije poljoprivrednih tala uzrokovana je najčešće navodnjavanjem vodom neodgovarajuće kakvoće ili primjenom loše tehnologije gospodarenja. Zaslanjivanje tala kao ekološki problem povlači za sobom i degradaciju produktivnih površina o kojima ovisi i sigurnost proizvodnje hrane u svijetu. Globalna je procjena da je trećina ili čak i više proizvodnih sustava ugroženo zaslanjenošću i/ili stagniranjem vode, a godišnje se gubi oko 10 milijuna hektara navodnjavanih površina (Yeo i sur., 1997).

Više koncentracije soli u tlu utječu općenito, ali i specifično, na prinose uzgajanih kultura. K tome, utječu i na neka od fizikalna i kemijska svojstva tla, smanjujući tako njihovu pogodnost kao medija za uzgoj bilja. Budući da je problem zaslanjenosti, a naročito sekundarne, zbog svoje važnosti intenzivno istraživani, razvijeni su kriteriji i standardi za procjenu kako kakvoće vode za

navodnjavanje tako i metode kontrole zaslanjenosti tala. Visoke koncentracije soli u zoni korijena smanjuju mogućnost primanja vode iz otopine, a što rezultira deficitom vlage ili tzv. "vodnim stresom" u određenom vremenskom razdoblju.

3.1. Utjecaj soli na tlo i biljke

Pristup problemu ekstrakcije vode iz tla i primanja putem biljke osniva se na prepoznavanju svih dijelova fizički integriranog dinamičnog sustava tlo–biljka–atmosfera. Budući da je pravi kriterij ravnoteže tokova vode u tlu ujednačen vodni potencijal, tako je općenito prihvaćeno da je razlika potencijala pokretački mehanizam vode u tlu. Količina fiziološki aktivne vode u tlu kao prirodnom spremniku ovisna je o njegovim svojstvima, koncentraciji soli u otopini i fiziološkim funkcijama biljke (Hillel, 1980). Do primanja vode putem biljnog korijena dolazi uslijed razlike potencijala vode u tlu i citoplazmi korijena. Zanimajući utjecaj gravitacije, ukupan vodni potencijal u tlu u blizini korjenovog sustava određen je zbrojem *matriks potencijala* i *osmotskog potencijala*. Prvi je posljedicom adhezijskih sila između vode i čestica tla, te je u nesaturiranim uvjetima negativan. Osmotski je potencijal u funkciji koncentracije soli u otopini tla. Kako se tlo isušuje uslijed primanja vode putem biljke i evaporacije, koncentracija soli u otopini tla proporcionalno se povećava. Sniženje matriks potencijala vodi smanjenju osmotskog potencijala, a posljedica toga je usporen rast biljke sa simptomima koji su slični onima nastalim od suše: venuće, tamnjenje, plavkasto-zelena boja i ponekad odebljali voštani listovi. Simptomi variraju s razvojnom fazom, te postaju sve uočljiviji ukoliko se djelovanje soli na biljke odvijalo u ranim fazama razvoja.

Do problema toksičnosti dolazi kada biljke prime određene ione iz tla ili vode i akumuliraju ih u dovoljno visokim koncentracijama da uzrokuju štete koje će reducirati prinos. Stupanj oštećenja ovisi o količini primljenih iona i osjetljivosti usjeva. Apsorbirani ioni premještaju se iz korijena u listove gdje se akumuliraju tijekom transpiracije. Toksičnost može uzrokovati i izravno primanje navedenih iona putem lista nakon navodnjavanja kišenjem. Količina i trajanje apsorpcije varira između kultura. Pri ocjeni vode za navodnjavanje najčešće se analiziraju kloridi, natrij i bor. Toksičnost ovih iona često prati i komplicira i problem zaslanjenosti i alkaliteta.

Kao praktični indeks zaslanjenosti, s analitičkog gledišta, koristi se *elektrovodljivost* (EC), izražena u jedinicama deciSiemensa po metru (dS/m). Odnos između vrijednosti EC (budući da on ovisi i o specifičnom ionskom sastavu) i ukupne koncentracije soli otprilike je $1 \text{ dS/m} = 10 \text{ mmol}_c/\text{l} = 700 \text{ mg/l}$. Upotrebom EC kao indeksa zaslanjenosti u prvoj procjeni bilo kakvoće vode ili otopine tla naglašava se koncept da biljka prije reagira na ukupnu koncentraciju soli, nego na koncentracije ili odnose pojedinačnih iona. Budući da zaslanjenost tla nije jednoznačni parametar, teško ga je i definirati. Da bi se standardizirali načini njegovog mjerenja i postavile racionalne reference za uspoređivanje "zaslanjenost tla" najčešće se izražava pojmom elektrovodljivosti ekstrakta saturacijske paste (EC_e u dS/m) uzorka tla. Stoga je navedena metoda s primjenom tehnike vakuumske ekstrakcije, opisana od U.S. Salinity Laboratory (1954), najčešće primjenjivana u brojnim istraživanju. Smatra se da se njome postižu

vodene otopine čiji sastav objektivno odražava reakcije između otopine tla i matriksa u prirodnim uvjetima (Sposito, 1988).

Tlo se smatra zaslanjenim ako je vrijednost elektrovodljivosti (EC_e) otopine dobivene iz saturacijske paste > 4 dS/m. Vrijednosti $EC_e > 1$ dS/m drže se tipičnima za tla aridnih i semiaridnih područja. Naime, klimatski uvjeti, tipični i za područje Mediterana, uzrokuju da je godišnja evaporacija viša od oborina. Ioni otpušteni u otopinu tla bilo trošenjem minerala, pod utjecajem zaslanjene podzemne ili navodnjavanjem zaslanjenom vodom nakupljaju se u sekundarnim mineralima koji se formiraju smanjenjem vlažnosti takvih tala. Sekundarni minerali uključuju minerale gline, karbonate i sulfate, te kloride. Budući da se Na, K, Ca i Mg relativno lako otpuštaju u otopinu — bilo kao zamjenjivi ioni sa smektita i ilita, ili kao strukturalni ioni u karbonatima, sulfatima i kloridima — tako najviše i pridonose zaslanjenosti tla. Tako su otopine tala aridnih i semiaridnih područja uglavnom otopine elektrolita koje sadrže kloridne, sulfatne i karbonatne soli metala iz skupine IA i IIA periodnog sustava elemenata.

Odnosi koncentracija kationa u otopini nezaslanjenih tala umjerenog klimata, prema Bohnu i sur. (1985), jesu $Ca > Mg > K > Na$. U alkaliziranoj otopini tla koncentracije i odnosi zastupljenosti ionskih vrsta se bitno mijenjaju. U tablici 1 prikazane su koncentracije najzastupljenijih konstituenata alkalizirane otopine tla (pH 7,6), te postotna zastupljenost pojedinih ionskih vrsta.

Elektrovodljivost (EC_e) od 4 dS/m odgovara ionskoj jakosti od 58 mol/m^3 . Iako je to samo 10% od slanosti morske vode, s agronomskog gledišta ta je razina dovoljno visoka da je samo kulture relativno tolerantne na soli mogu podnijeti. Kulture srednje osjetljive na soli podnose koncentracije otopine tla koje odgovaraju vrijednosti EC_e do 2 dS/m. Biljke osjetljive na soli podliježu "stresu" već pri $EC_e = 1$ dS/m, a što se očituje kao redukcija rasta i prinosa.

Tablica 1: *Koncentracije i zastupljenost ionskih vrsta u alkaliziranoj otopini tla (pH 7,6) (prema Sposito, 1988)*

Konstituent	Koncentracija u mol/m^3	Zastupljenost ionskih vrsta u %
Ca	5,9	Ca^{2+} (82%), $CaSO_4^0$ (16%), $CaHCO_3^+$ (1%)
Mg	1,3	Mg^{2+} (85%), $CaSO_4^0$ (13%), $MgHCO_3^+$ (1%)
Na	1,9	Na^+ (99%), $NaSO_4^-$ (1%)
K	1,0	K^+ (98%), KSO_4^- (1%)
HCO_3	3,0	HCO_3^- (91%), $H_2CO_3^0$ (4%), $CaHCO_3^+$ (3%), $MgHCO_3^+$ (1%)
SO_4	4,4	SO_4^{2-} (74%), $CaSO_4^0$ (21%), $MgSO_4^0$ (4%)
Cl	5,0	Cl^- (99%), $CaCl^+$ (1%)
NO_3	0,28	NO_3^- (99%), $CaNO_3^+$ (1%)
PO_4	0,065	HPO_4^{2-} (36%), $CaHPO_4^0$ (35%), $MgHPO_4^0$ (13%), $H_2PO_4^-$ (8%), $CaPO_4^-$ (4%), $MgPO_4^-$ (4%)
B	0,038	$H_3BO_3^0$ (96%), $B(OH)_4^-$ (3%)
L*	0,022	L^- (95%), CaL^+ (4%), MgL^- (1%)

Navodnjavanje zaslanjenim ili alkaliziranim vodama te uvođenje natrija i soli u otopinu tla drugim putem (zaslanjivanje podzemnih voda prodiranjem

mora), može uzrokovati promjene u tlu: pogoršanje fizikalnih i kemijskih svojstava tla putem mehanizama bubrenja gline i disperzije čestica tla (Shainberg, 1984). Ti su mehanizmi međusobno povezani i uzrokuju smanjenje infiltracijske sposobnosti i propusnosti tla za vodu. Kemijska disperzija čestica tla može izazvati i pokoricu koja je ujedno jedan od vizualnih dijagnostičkih znakova alkaliziranih tala, a ovisi o postotku zamjenjivog natrija (ESP vrijednost) u tlu i koncentraciji elektrolita u apliciranoj vodi.

Kationska zamjena je najosjetljivija je u lancu reakcija koje se pokreću u tlu u takvim uvjetima. Adsorpcija iona rezultat je višefazne ravnoteže između otopine tla, adsorpcijskog kompleksa tla, mineralne faze tla i različitih anorganskih i organskih kompleksa (Sposito, 1988). Kada voda kojom je navodnjavano dolazi u ravnotežu s tlom, distribucija iona između otopine i zamjenjive faze postaje dominantan mehanizam koji određuje sastav otopine u profilu tla kao i sastav procijeđene vode (Levy, 1985).

3.2. Adsorpcijski kompleks i zamjena kationa u tlu

Istraživanje dinamike kationa, njihovog ponašanja u otopini i sposobnosti adsorpcije i desorpcije s matriksa tla, obuhvaća niz transformacija otopljenih i adsorbiranih sastojaka u različite kemijske vrste unutar dugačkog slijeda reakcija. Stoga bi bilo pogrešno razmatrati samo odnose otopine i čvrste faze tla. Čvrsta faza se sastoji od organskih i anorganskih komponenti. Anorganska komponenta podrazumijeva čestice različitih veličina: od gline ($< 2 \mu\text{m}$), preko šljunka ($> 2 \text{mm}$) i stijena, a čine je brojni primarni i sekundarni minerali tla. Zbog toga anorganska čvrsta faza ima najveći utjecaj na svojstva tla i njegovu pogodnost kao medija za uzgoj bilja.

Organsku komponentu čine ostaci biljnih i životinjskih organizama različitog stupnja raščinjenosti, ali i tvari koje sintetiziraju organizmi u tlu. Iako je organska komponenta obično zastupljena u znatno manjim količinama od anorganske, ipak može značajno promijeniti svojstva i reaktivnost tla.

Dva su osnovna svojstva odgovorna za reaktivnost tla: *veličina aktivne površine* i *površinski naboj*. Aktivna površina izravni je rezultat veličine i oblika čestica, a u mineralnim tlima ukupnu aktivnu površinu najvećim dijelom čine organski i anorganski koloidi. Površinski naboj posljedica je bilo izomorfne supstitucije unutar kristalne strukture gline (tzv. permanentni naboj) ili ionizacije funkcionalnih skupina najčešće organskih koloida (tzv. naboj ovisan o pH). Iako taj naboj u nekim tlima može biti i pozitivan, najvećim je dijelom negativan i privlači katione površini koloida. Takvim se zadržavanjem smanjuju gubici esencijalnih makrohraniva ispiranjem. Najvažnija frakcija hraniva pristupačnih biljkama nalazi se stoga u dijelu otopine koja je najbliža površini koloida te se oni mogu zamjenjivati s drugim kationima. Otuda im i naziv *zamjenjivi kationi*.

Distribucija zamjenjivih kationa u produktivnim poljoprivrednim tlima općenito je sljedeća: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ \approx \text{NH}_4^+ \approx \text{Na}^+$. Zato se ukupni kapacitet zamjene kationa može procijeniti iz sume zamjenjivih Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ i Na^+ (ev. Al^{3+} i/ili H^+). Kapacitet zamjene ili adsorpcije kationa može varirati od samo 10 mmol (+)/kg u grubo teksturnim tlima do 500—600 mmol (+)/kg u fino teksturnim

tlima koja sadrže velike količine bilo gline (2:1 uslojene strukture silikatnih minerala) ili organske tvari.

3.3. Procjena opasnosti od suvišnog natrija

Već je prije naglašeno koje su posljedice na fizikalna i kemijska svojstva tala s visokim sadržajem zamjenjivog natrija, a najčešće kao posljedica navodnjavanja zaslanjenom vodom. Međutim, u većini tala koloidi su visoko preferentni za dvovalentne katione, tako da se u tlima navodnjavanima takvom vodom ipak zadržava relativno niska razina zamjenjivog natrija. I većina jednadžbi koje opisuju kationsku zamjenu stavljaju u odnos koncentraciju jednovalentnog kationa i drugi korijen koncentracije dvovalentnog kationa. S obzirom na specifičnost reakcija izmjene između Na^+ te Ca^{2+} i Mg^{2+} u tlu U.S. Salinity Laboratory (1954) je razvio dvije jednadžbe za matematički opis zaslanjivanja. Jedna od njih odnosi se na zaslanjivanje otopine, a druga na saturaciju izmjenjivačkog kompleksa natrijem.

Kemijska disperzija, kao posljedica upotrebe vode za navodnjavanje, može se predviđati izračunavanjem SAR vrijednosti odnosno *omjera adsorpcije natrija* (od engl. sodium adsorption ratio), što predstavlja odnos između natrija prema kalciju i magneziju u njihovim zamjenjivim reakcijama u tlu. Povećanjem SAR vrijednosti povećava se opasnost smanjenja infiltracijske sposobnosti, ukoliko to povećanje ne prati i povećanje ukupne koncentracije soli. Općenito uzevši, brzina infiltracije povećava se s povećanjem EC_w , a smanjuje se ili sa smanjenjem EC_w ili s povećanjem vrijednosti SAR.

Tako se izraz (1) odnosi na sadržaj natrija u otopini, a izračunava se iz jednadžbe:

$$\text{SAR} = \frac{[\text{Na}^+]}{([\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/2)^{1/2}} \quad (1)$$

gdje su koncentracije iona u otopini izražene u mmol/l.

Jednadžba kojom se izražava *omjer zamjenjivosti natrija* (2) (ESR, od engl. exchangeable sodium ratio) je:

$$\text{ESR} = \frac{[\text{NaX}]}{[\text{CaX} + \text{MgX}]} = K_G \frac{[\text{Na}^+]}{([\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/2)^{1/2}} = K_G \text{SAR} \quad (2)$$

izraženog u mmol₍₊₎/kg, dok je K_G Gapon-ova konstanta zamjene i obično iznosi 0,010 do 0,015 (l mmol)^{-1/2}.

3.4. Mjere gospodarenja u zaslanjenim uvjetima

Kada se za navodnjavanje koristi voda visokih koncentracija soli moraju se primjenjivati posebne mjere gospodarenja. Svakako da problem treba rješavati u ishodištu, a u praksi navodnjavanja to je na izvor vode za navodnjavanje. Zbog

problema koji su naprijed navedeni kroz povijest razvijali su se brojni kriteriji za ocjenu pogodnosti vode za navodnjavanje.

3.4.1. Ocjena kvalitete vode za navodnjavanje

Pogodnost vode za navodnjavanje definirana je njenim fizikalnim, kemijskim i biološkim značajkama. U tablici 1 prikazani su najvažniji fizikalni, kemijski i biološki parametri koje treba razmotriti prilikom ocjenjivanja mogućnosti primjene neke vode za navodnjavanje.

Pored navedenog aspekta kvalitete, pogodnost vode za navodnjavanje treba biti ocijenjena i na osnovi specifičnih uvjeta upotrebe, uključujući uzgajanu kulturu, svojstva tla, praksu navodnjavanja, agrotehničke mjere i klimatske prilike.

Tablica 1: Osnovni parametri za ocjenu kvalitete vode

Fizikalni	Kemijski	Biološki
Temperatura	Reakcija (pH)	Broj koliformnih organizama
Suspendirane čestice	Ukupno otopljene soli	Broj patogenih klica
Boja / Mutnoća	Vrsta i koncentracija aniona Vrsta i koncentracija kationa Mikroelementi Toksični ioni Teški metali	Biološka potreba za kisikom (BPK)

Fizikalne značajke vode za navodnjavanje

Od fizikalnih značajki najvažnije su temperatura vode i količina suspendiranih čestica. Navodnjavanje pretoplom ili prehladnom vodom može izazvati temperaturne šokove biljke. Općenito se smatra da je za većinu usjeva u vegetacijskom razdoblju temperatura vode od oko 25°C najpovoljnija za navodnjavanje. Pored same temperature vode vrlo je važan i odnos topline biljke i topline vode. Smatra se da razlika ne bi smjela biti veća od 10°C. Važno je, dakako, i koja se kultura navodnjava, jer nisu sve kulture jednako osjetljive na temperaturne šokove, zatim o razvojnoj fazi biljke i metodi navodnjavanja. Površinske vode u pravilu su uvijek toplije od podzemnih. Poznat je niz slučajeva da se kod korištenja podzemne vode za navodnjavanje grade bazeni (akumulacije) za temperiranje, a naročito kada se navodnjava sustavom kišenja.

Količina suspendiranih čestica u vodi za navodnjavanje vrlo je bitan fizikalni parametar. Na količinu suspendiranih čestica u vodi koja se koristi za navodnjavanje posebno su osjetljivi sustavi pod tlakom. Do oštećenja može doći bilo na pumpi ili pojedinim dijelovima razvoda vode. Kod lokaliziranog navodnjavanja može doći do začepjenja mlaznica ili kapaljki. Količina suspendiranih čestica može izravno utjecati na izbor sustava za navodnjavanje ili dijelova opreme unutar sustava.

Kemijske značajke vode za navodnjavanje

Postupak ocjene kvalitete vode za navodnjavanje ima cilj predvidjeti ionski sastav i matriks potencijal otopine tla u vremenu i prostoru, te odgovoriti na pitanje kakve će posljedice na tlo i biljku imati aplikacija vode takve kakvoće u danim agroekološkim uvjetima. Voda koja se koristi za navodnjavanje može kvalitativno varirati ovisno o količini otopljenih soli. Različiti problemi tla i usjeva povećavaju se s porastom ukupnog sadržaja soli iznad prihvatljivih granica. Razvoj znanosti i iskustva korištenja zaslanjene vode rezultirao je većim brojem klasifikacija. Međutim, najčešće korišteni kriteriji povezani su s problemima zaslanjivanja, alkaliteta i toksičnosti pojedinih iona:

- **zaslanjenost**, djelovanje soli na razvoj biljke putem osmotskog efekta što se povezuje sa ukupnom koncentracijom soli;
- **alkalitet**, djelovanje suvišne koncentracije iona natrija u tlu na strukturu, a povezano sa time i na infiltracijsku sposobnost i propusnost;
- **toksičnost**, djelovanje pojedinih iona iz tla ili vode koji se akumuliraju u biljci do koncentracije koja uzrokuje oštećenje biljke i smanjenje prinosa.

Kemijska analiza vode za navodnjavanje nužna je da bi se predvidjeli mogući problemi, a prema samoj kvaliteti utvrđuju se i potrebne mjere gospodarenja. U tablici 2 prikazani su najčešći kemijski parametri za procjenu kakvoće voda i rasponi njihovih uobičajenih vrijednosti u vodi za navodnjavanje.

Tablica 2: *Kemijski parametri za procjenu kvalitete voda za navodnjavanje i njihove uobičajene vrijednosti*

	Simbol	Jedinica mjere	Uobičajena vrijednost
Zaslanjivanje			
<i>Sadržaj soli</i>			
Električna vodljivost ili	EC _w	dS/m	0—3
Ukupno otopljene soli		mg/l	0—2000
<i>Kationi i anioni</i>			
Kalcij	Ca ⁺²	me/l	0—20
Magnezij	Mg ⁺²	me/l	0—5
Natrij	Na ⁺	me/l	0—40
Karbonati	CO ₃ ⁻²	me/l	0—0,1
Bikarbonati	HCO ₃ ⁻	me/l	0—10
Kloridi	Cl ⁻	me/l	0—30
Sulfati	SO ₄ ⁻²	me/l	0—20
Hraniva			
Dušik – nitratni oblik	NO ₃ -N	mg/l	0—10
Dušik – amonijačni oblik	NH ₄ -N	mg/l	0—5
Fosfor	PO ₄ -P	mg/l	0—2
Kalij	K	mg/l	0—2
Ostalo			
Bor	B	mg/l	0—2
Reakcija	pH		6,0—8,5

Omjer adsorbiranog natrija SAR me/l 0—15

U svjetskim razmjerima koristi se velik broj klasifikacija bilo za ocjenu kvalitete vode za navodnjavanje ili za primjenu u poljoprivredi općenito. Budući da nemamo vlastitu klasifikaciju, u Hrvatskoj agronomskoj praksi se za tumačenje ovog problema najčešće koristi klasifikacija publicirana od FAO (1985).

University of California (citiraju Ayers i Westcot, 1985) predlaže vodiča za ocjenu kakvoće vode za navodnjavanje, u namjeri da pokrije široko područje uvjeta koji se susreću u poljoprivredi s navodnjavanjem. Kakvoća vode ocjenjuje se s obzirom na tri prije navedena problema. Granične vrijednosti postavljene su uz uvjet da mora biti iskorišten puni potencijal uzgajane kulture, da je teksturni sastav navodnjavanog tla praškasta ilovača do praškasta glina, da tlo ima dobru internu dreniranost, te da će navodnjavanje biti prilagođeno zahtjevu biljke s tim da se količina fiziološki aktivne vode neće spustiti ispod 50% poljskog vodnog kapaciteta.

Kao što je prikazano u tablici 3 po ovim se uputama voda svrstava u jednu od triju kategorija s obzirom na pogodnost za navodnjavanje: *bez ograničenja*, *slabo do umjereno* i *izrazito ograničenje*. Pri upotrebi prve kategorije, uz uobičajeni način gospodarenja, nema nikakve opasnosti od pojave ikakvih problema u tlu i kulturi. Ako se želi navodnjavati vodom druge kategorije, može se postići potpun uspjeh samo uz uvjet pažljivog izbora kultura i primjenom posebnih mjera gospodarenja. Kod primjene vode treće kategorije mogu se očekivati ozbiljni problemi u tlu i/ili na biljci. Što znači klasifikacije nam omogućavaju da procijenimo upotrebljivost pojedine vode koja se koristi za navodnjavanja.

Tablica 3: Vodič za tumačenje kvalitete vode za navodnjavanje

Mogući problemi	Jedinica mjere	Ograničenje primjene		
		Nema	Slabo do umjereno	Izrazito
Zaslanost				
Elektrovodljivost (EC _w)	dS/m	< 0,7	0,7—3,0	> 3,0
Ukupno otopljene soli	mg/l	< 450	450—2000	> 2000
Infiltracija (utječe na brzinu upijanja vode u tlo, ocjenjuje se na temelju EC _w i SAR)				
SAR = 0—3 i EC _w =		> 0,7	0,7—0,2	< 0,2
SAR = 3—6 i EC _w =		> 1,2	1,2—0,3	< 0,3
SAR = 6—12 i EC _w =		> 1,9	1,9—0,5	< 0,5
SAR = 12—20 i EC _w =		> 2,9	2,9—1,3	< 1,3
SAR = 20—40 i EC _w =		> 5,0	5,0—2,9	< 2,9
Toksičnost pojedinih iona				
Natrij (Na)				
– površinsko navodnjavanje	SAR	< 3	3—9	> 9
– navodnjavanje kišenjem	me/l	< 3	> 3	—
Klor (Cl)				
– površinsko navodnjavanje	me/l	< 4	4—10	> 10
– navodnjavanje kišenjem	me/l	< 3	> 3	—
Bor (B)				
	me/l	< 0,7	0,7—3,0	> 3,0
Ostalo				
– dušik (NO ₃ -N)	mg/l	< 5,0	5,0—30,0	> 30,0
– bikarbonati (HCO ₃)	mg/l	< 1,5	1,5—8,5	> 8,5
(samo kod kišenja iznad krošnje)				

pH

uobičajena vrijednost 6,5—8,4

3.4.2. Izbor poljoprivredne kulture koja se mogu uzgajati u danim uvjetima

Navedena klasifikacija je samo orijentacijska, dok pogodnost vode treba biti ocijenjena na osnovi specifičnih uvjeta upotrebe. Unutar svakog agroekološkog područja treba analizirati kulturu koja se želi navodnjavati. Sve poljoprivredne kulture nisu jednako osjetljive na soli. Na temelju mnogobrojnih pokusa u poljskim uvjetima Maas i Hoffman (1977) i Maas (1984) utvrdili su da je smanjenje rasta biljke upravo proporcionalno s porastom zaslanjenosti vode. Maas (1986) daje podatke o osjetljivosti pojedinih kultura te redukciji prinosa kao posljedici povećanja koncentracije soli. Osjetljivost povrćarskih kultura na soli prikazana je u tablici 4.

Tablica 4. *Tolerantnost povrćarskih kultura i smanjenje prinosa kod navodnjavanja vodom dane elektrovodljivosti (EC_w u dS/m)*

Kultura	PRINOS %				
	100	90	75	50	0
	EC_w (dS/m)				
Tikvice	3,1	3,8	4,9	6,7	10
Cikla	2,7	3,4	4,5	6,4	10
Brokula	1,9	2,6	3,7	5,5	9,1
Rajčica	1,7	2,3	3,4	5,0	8,4
Krastavac	1,7	2,2	2,9	4,2	6,8
Špinat	1,3	2,2	3,5	5,7	10
Celer	1,2	2,3	3,9	6,6	12
Kupus	1,2	1,9	2,9	4,6	8,1
Krumpir	1,1	1,7	2,5	3,9	6,7
Paprika	1,0	1,5	2,2	3,4	5,8
Salata	0,9	1,4	2,1	3,4	6,0
Radič	0,8	1,3	2,1	3,4	5,9
Luk	0,8	1,2	2,1	2,9	5,0
Mrkva	0,7	1,1	1,9	3,0	5,4
Grah	0,7	1,0	1,5	2,4	4,2

Podaci izneseni u tablici 4 predstavljaju relativnu otpornost pojedinih kultura na soli, a tijekom cijele vegetacijske sezone navodnjava se vodom navedenih koncentracija soli. Međutim, potpuna tolerantnost varira ovisno o klimi, uvjetima u tlu i proizvodnim postupcima. Nadalje, sve kulture nisu jednako osjetljive u svim razvojnim fazama. Mass (1986) istraživao je utjecaj stupnja zaslanjenosti tla na klijanje i rast i razvoj nekih kultura. U tablici 5 prikazan je dio rezultata.

Rezultati iz tablice 5 pokazuju da različite kulture u fazi klijanja različito reagiraju na koncentracije soli u tlu. S obzirom na brojna istraživanja koja su u svijetu provedena na problemu zaslanjavanja i tolerantnosti poljoprivrednih kultura Mass (1986) je rangirao veliki broj kultura prema tolerantnosti na soli.

Tolerantnost dijela kultura koje se uzgajaju u našim klimatskim uvjetima prema solima prikazan je u tablici 6.

Tablica 5. Utjecaj zaslanjenosti tla na na klijanje i rast i razvoj nekih kultura

Kultura	Botanički naziv	Elektrovodljivost saturacijskog vodenog ekstrakta (dS/m)	
		50% prinosa kod dS/m	50% klijanja kod dS/m
Ječam	<i>Hordeum vulgare</i>	18	16—24
Šećerna repa	<i>Beta vulgaris</i>	15	6—12
Sirak	<i>Sorghum bicolor</i>	15	13
Pšenica	<i>Triticum aestivum</i>	13	14—16
Lucerna	<i>Medicago sativa</i>	8,9	8—13
Rajčica	<i>Lycopersicon lycopersicum</i>	7,6	7,6
Kupus	<i>Brassica oleracea capitata</i>	7,0	13
Kukuruz	<i>Zea mays</i>	5,9	21—24
Salata	<i>Lactuca sativa</i>	5,2	11
Luk	<i>Allium cepa</i>	4,3	5,6—7,5
Grah	<i>Phaseolus vulgaris</i>	3,6	8

Tablica 6. Tolerantnost prema solima dijela kultura koje se uzgajaju u našim klimatskim uvjetima

Kultura	Elektrovodljivost saturacijskog vodenog ekstrakta dS/m	Stupanj tolerantnosti		
		Prag kod kojeg nema redukcije (dS/m)	Pad prinosa (%)	
Ratarske kulture i industrijsko bilje				
Raž	<i>Secale cereale</i>	11,4	10,8	Tolerantna
Ječam	<i>Hordeum vulgare</i>	8,0	5,0	Tolerantna
Pšenica	<i>Triticum aestivum</i>	6,0	7,1	Tolerantna
Šećerna repa	<i>Beta vulgaris</i>	7,0	5,9	Tolerantna
Sirak	<i>Sorghum bicolor</i>	6,8	16,0	Umjereno tol.
Soja	<i>Glycine max</i>	5,0	20,0	Umjereno tol.
Lucerna	<i>Medicago sativa</i>	2,0	7,3	Umjereno os.
Kukuruz	<i>Zea mays</i>	1,7	12,0	Umjereno os.
Povrćarske kulture				
Šparoga	<i>Asparagus officinalis</i>	4,1	2,0	Tolerantna
Cikla	<i>Beta vulgaris</i>	4,0	9,0	Umjereno tol
Špinat	<i>Spinacia oleracea</i>	3,2	16,0	Umjereno os.
Brokula	<i>Brassica oleracea botrytis</i>	2,8	9,2	Umjereno os.
Kupus	<i>Brassica oleracea capitata</i>	1,0	14,0	Umjereno os.
Krastavac	<i>Cucumis sativus</i>	1,1	6,9	Umjereno os.
Rajčica	<i>Lycopersicon lycopersicum</i>	0,9	9,0	Umjereno os.
Salata	<i>Lactuca sativa</i>	1,7	12,0	Umjereno os.
Jagoda	<i>Fragaria sp.</i>	1,5	11,0	Osjetljiva
Grah	<i>Phaseolus vulgaris</i>	1,0	19,0	Osjetljiva
Drvenaste kulture				
Vinova loza	<i>Vitis. sp.</i>	1,5	9,6	Umjereno os.

Bajam	<i>Prunus duclis</i>	1,5	19,0	Osjetljiva
Marelica	<i>Prunus armeniaca</i>	1,6	24,0	Osjetljiva
Naranča	<i>Citrus sinensis</i>	1,7	16,0	Osjetljiva
Breskva	<i>Prunus persica</i>	1,7	21,0	Osjetljiva

Na temelju provedene analize vode za navodnjavanja i procjene učinka na tlo moguće je izabrati poljoprivrednu kulturu kojoj će odgovarati dani uvjeti. Međutim, ako imamo zaslanjenu vodu u kombinaciji sa slatkom vodom može se provesti miješanje voda da se postignu povoljniji uvjeti što se tiče količine i kvalitete vode. Naime, problem zaslanjivanja najizraženiji je u područjima gdje su i ograničene količine vode koje se mogu koristiti za navodnjavanje. Razrijeđenjima se osiguravaju veće količine raspoložive vode. Upotreba kvalitetnije vode u osjetljivijim fazama rasta i razvoja, a manje kvalitetnih u drugim razvojnim fazama također je jedna od mjera gospodarenja.

3.4.3. Spriječavanje akumulacije soli u tlu

Neosporno je da navodnjavanje zaslanjenom vodom traži posebne mjere gospodarenja. Navodnjavanjem zaslanjenom vodom dovodi do povećanja koncentracija soli u tlu. Jedna od najčešćih mjera gospodarenja u takvim uvjetima jest *ispiranje* soli. *Ispiranje* podrazumijeva dodavanje većih količina vode od proračunatog obroka navodnjavanja s ciljem premještanja soli u dublje slojeve tla. Ispiranjem soli u dublje horizonte omogućava se smanjenje osmotskog potencijala u rizosferi te time smanjuje ukupni vodni stres. Osim ispiranjem, vodni stres se može smanjiti i učestalijim navodnjavanjem. Naime, između dva navodnjavanja u tlu se smanjuje količina vode uslijed evapotranspiracije, a time povećava osmotski efekt. Učestalijim navodnjavanjem postiže se redukcija osmotskog efekta, te time smanjuje ukupni vodni stres. *Ispiranje* soli obično se kombinira sa učestalosti navodnjavanja da bi se postigli povoljniji uvjeti za rast i razvoj poljoprivrednih kultura u uvjetima korištenja zaslanjenih voda.

Nadalje, ispiranje se može provoditi i nakon sezone navodnjavanja s ciljem da se akumulirane soli isperu i tlo pripremi za sljedeću kulturu. Ispiranje može biti i prirodnim putem oborinama. Istraživanjima provedenima u našim uvjetima utvrđeno je da se prirodnim ispiranjem iz tla mogu ukloniti značajne količine soli unijete u tlo navodnjavanjem zaslanjenim vodama (Romić, 1994), (Romić i Romić, 1997). Naime, u sredozemnim klimatskim uvjetima glavnina oborina pada u jesensko-zimskom razdoblju. Upravo u tom razdoblju ispiru se soli koje su se akumulirale tijekom sezone navodnjavanja. Romić (1994), temeljem provedenih istraživanja u Vranskom bazenu, uvodi termin *prirodno ispiranje* koje je posljedica klimatskih prilika, a ne mjere gospodarenja. Naime, dodavanjem vode iznad proračunatog obroka dodaju se i veće ukupne količine soli u tlo. Pri korištenju zaslanjene vode ili poljoprivredne proizvodnje u zaslanjenim uvjetima, moraju se uzeti u obzir svi agroekološki čimbenici.

Frakcija ispiranja (eng. leaching fraction) podrazumijeva količinu vode iznad obroka koja treba osigurati ispiranje soli. Obično se kreće od 10—30%, što ovisi o više čimbenika, a prije svega koncentraciji soli u vodi, zahtjevu kulture, značajkama tla i drugima. Istraživajući primjenu zaslanjenih voda nu Vranskom bazenu, Romić (1994) je utvrdio da i u prirodnim uvjetima količine

soli koja se isperu iz tla ovisе o tipu tla. Istraživanje je pokazlo da je veća količina soli isprana je iz rendzine nego iz vertisola.

Na poljoprivrednim površinama koje se navodnjavaju zaslanjenom vodom ugrađju se i drenske cijevi, radi što lakšeg i bržeg odvođenja vode.

3.4.4. Izbor sustava navodnjavanja

Izbor sustava za navodnjavanja također je bitna mjera gospodarenja. Već je istaknuto da do oštećenja biljkama dolazi ako se kod navodnjavanja vlaži ukupna biljna masa. Zato je navodnjavanje kišenjem manje prihvatljivo od lokaliziranog. Lokaliziranim navodnjavanjem vlaži se rizosfera. Ovim načinom učestalo se može dodavati voda što može smanjiti negativni osmotski efekt, a soli se "*premještaju*" na rubove rizosfere.

Jedno od naših najosjetljivijih područja u kojem se poljoprivredna proizvodnja odvija u uvjetima navodnjavanja zaslanjenim vodama je dolina Neretve. Naime, u ovom području uzgoj poljoprivrednih kultura u ljetnim rokovima nije ostvarljiv bez navodnjavanja. Poljoprivredni proizvođači za navodnjavanje najčešće koriste metode kišenja i kapanja. Budući da se na tom području kulture mijenjaju tijekom cijele godine, poljoprivrednici koriste jedan sustav za sve kulture. Primjerice, kako je dolina Neretve najznačajnije područje u Hrvatskoj za uzgoj zimskog kupusa koji se sadi u ljetnim mjesecima poljoprivrednici za navodnjavanje koriste metodu kišenja. Isti sustav nakon toga koriste i za druge kulture. Za navodnjavanje se uglavnom koristi voda iz kanala. Poznato je da uslijed prodora morske vode dolazi do zaslanjivanja voda na području gotovo cijele doline Neretve. Stoga je Romić (2002) proveo istraživanja kojima je bio cilj utvrditi kako će se različiti sustavi — kišenje i kapanje, i voda dvaju stupnjeva kakvoće — voda iz vodoopskrbnog sustava (kvalitetna) i zaslanjena iz otvorenog kanala, odraziti na rast i razvoj lubenice. Koncentracija soli u vodama iz kanala kretala se od 3,4 dS/m do 7,4 dS/m. Korištenje vode iz dva izvora imalo je značajnog učinka na rast i razvoj lubenice, a time i na prinos. Navodnjavanje vodom iz kanala metodom kišenja je u prvoj godini istraživanja potpuno uništilo urod. Navodnjavanje kvalitetnom vodom i navodnjavanje kapanjem vodom iz kanala ostvareni su prinosi od 36 t/ha do 42 t/ha. U drugoj godini istraživanja koncentracije soli u vodi u kanalu iznosile su od 2,3 do 5,1 dS/m. I u drugoj godini navodnjavanjem kišenjem urod je potpuno uništen. Prinos lubenice navodnjavane kvalitetnom vodom i sustavom kišenja iznosio je 41 t/ha, a sustavom kapanja 48 t/ha. U isto vrijeme je prinos lubenice navodnjavane vodom iz kanala i sustavom kapanja iznosi 39 t/ha. Iz ovih istraživanja može se zaključiti da se navodnjavanjem kapanjem i primjene kvalitetne vode ostvaruje 10 do 20% veći prinos. Nadalje, prinos je bio potpuno uništen nakon navodnjavanja zaslanjenim vodama iz kanala primjenom metode kišenja u obje godine istraživanja. Navodnjavanjem vodom iz kanala i primjenom metode kapanja ostvaruje se prinos niži za 20-25% u usporedbi s primjenom kvalitetne vode. Na slikama 1 do 4 prikazane su posljedice korištenja vode različite kvalitete i sustava navodnjavanja na razvoj lubenice.

3.4.5. Sprječavanje adsorpcije natrija u tlu

Ion natrija iz otopine tla veže se na adsorpcijski kompleks tla što uzrokuje bubrenje i disperziju gline, a posljedica je narušavanje strukture i promjena hidrauličkih svojstava tla. Mjerama gospodarenja, kao što je dodavanje gipsa ili drugih kemijskih spojeva, može se povećati koncentracija drugih kationa i time smanjiti mogućnost vezivanja natrija na adsorpcijski kompleks tla. Osim gipsa tlu se može dodavati i određena koncentracija sumporne ili drugih kiselina koje će povećati topljivost CaCO_3 i time povećati koncentraciju kalcija u otopini tla i smanjiti negativne učinke natrija u tlu. Svakako da dodavanje kiselina ne dolazi u obzir ako se ne radi o karbonatnim tlima.

Valja naglasiti da je u priobalnom dijelu Hrvatske vrlo izražen problem zaslanjivanja i alkalizacije. Za navodnjavanje poljoprivrednih kultura koristi se zaslanjena voda, bilo površinska ili podzemna. Porijeklo soli povezano je s intruzijom morske vode u zaobalje. Problem je najizraženiji u dolini Neretve i Vranskom bazenu, vrlo značajnim područjima za poljoprivrednu proizvodnju, posebno povrća. Međutim, i u Istri i drugdje uz obalu poljoprivredni proizvođači koriste za navodnjavanje podzemnu vodu iz bunara koji mogu biti zaslanjeni. Napominjemo da se problemi zaslanjivanja i alkalizacije podmukli i dugotrajni, a mogu imati pogubne posljedice. Zato ponovo treba naglasiti da gospodarenje sustavom za navodnjavanje počinje na izvoru vode analizom njene kakvoće.

4. Navodnjavanja i onečišćenje voda

Racionalno korištenje svih prirodnih raspoloživih resursa osnovni je princip tzv. održivog razvoja čovječanstva. Gledajući s agronomskog stajališta to ne znači samo osiguravanje održive proizvodnje hrane, već i skrb za okoliš i zdravlje ljudi, uz zadovoljavajući ekonomski učinak.

Sama poljoprivredna proizvodnja funkcionira u “simbiozi” između tla i vode. Prolaskom vode kroz poljoprivredne površine ona se može onečistiti sredstvima koja se koriste u poljoprivrednoj proizvodnji i time doprinijeti onečišćenju površinske i/ili podzemne vode. Zato se nameće potreba za iznalaženjem mjera i postupaka koji moraju biti učinjeni da bi se smanjio štetni utjecaj poljoprivrede na kakvoću voda te da sljedeći korisnik vode ne bi bio oštećen.

Već je odavno prepoznat negativni utjecaj čovjeka na onečišćenje voda. Šezdesetih godina prošlog stoljeća u SAD, Kanadi i Europi pokrenut je veliki broj projekata koji su bili usmjereni na dijagnosticiranje uzroka i iznalaženje rješenja za smanjenje onečišćenja vode iz različitih izvora, tako i iz poljoprivrede. Oni su rezultirali novim znanstvenim spoznajama koji su rasvijetlile problem i dali rješenja za očuvanje vode (Addiscott i sur., 1991). Nakon toga u mnogim se zemljama donose posebne preporuke o korištenju poljoprivrednog zemljišta s ciljem zaštite vode (*kodeksi dobrog gospodarenja u poljoprivredi*). Temeljem velikog broja primjera onečišćenja nitratima, Europska zajednica je donijela *Naputke za zaštitu voda od nitrata iz poljoprivrede*. Naputke su neke države kasnije proširile i na fosfor i pesticide.

Kako navodi McKenna (1998), podzemne vode ispod 22% obradivih površina u EU imaju koncentracije nitrata više od maksimalno dopuštenih zakonom. Nažalost, to se događa i u Hrvatskoj u pojedinim područjima s intenzivnom poljoprivredom, premda se općenito koriste značajno manje količine i gnojiva i pesticida po jedinici površine. To su područja Međimurja, Podravine, dijela Posavine, doline Neretve, a obično tamo gdje je solum tla iznad vodonosnika plitak. Naša znanost i struka u okviru svojih mogućnosti prati stanje, traži i predlaže rješenja za očuvanje zaliha vode. Tako, na području Vranskog bazena od 1995—2000. godine provode se istraživanja utjecaja poljoprivrede na onečišćenje vode Vranskog jezera (Romić i sur., 2003a). Rezultati ovih istraživanja pokazuju da se malčiranjem tla i fertirigacijom može utjecati na smanjenje ispiranja dušika. U istraživanje su bili uvedeni različiti materijali za malčiranje, različite količine gnojiva dodanih fertirigacijom, te različiti sustavi navodnjavanja. Tijekom prve godine istraživanja (1995) najveća je količina ispranog dušika na kontrolnoj varijanti bez malča (26 kg ha^{-1}), zatim na papiru (18 kg ha^{-1}), a najmanja pod crnom folijom (10 kg ha^{-1}). U prvom oborinskom razdoblju u lipnju pod kontrolom je dušika isprano 18 kg ha^{-1} ili 68% ukupnih količina, pod papirom 6 kg ha^{-1} ili 33%, a pod crnom PE folijom 3 kg ha^{-1} ili 34%. U zadnjem oborinskom razdoblju najviše je dušika isprano na varijanti pod papirom, 11 kg ha^{-1} ili 61% od ukupnih količina. U 1996. godini je najveća količina dušika isprana na kontroli (16 kg ha^{-1}), zatim na papiru (11 kg ha^{-1}), a najmanja pod crnom folijom (8.5 kg ha^{-1}). Ovi rezultati pokazuju da se uzgojnim mjerama kao što je malčiranje u kombinaciji s fertirigacijom može smanjiti ispiranje dušika. Uloga malča je da mijenja mikroklimu tla (Romić i sur., 2003b) te da sprječava ispiranje hraniva iz oraničnog horizonta. U literaturi pojavljuje se i engleski izraz “*agricultural storm water discharges*” koji znači da se onečišćenje vode iz poljoprivrede događa nakon obilnih kiša.

Na problemu zaštite voda znanstvenici u Hrvatskoj rade relativno mnogo. Međutim, istraživanja koja se provode nisu rezultat neke organizirane politike već većinom znanstvene znatiželje pojedinaca. Osim stručnog i znanstvenog rada, u procesu tranzicije poljoprivredne proizvodnje u održivu potrebno je osigurati niz drugih pretpostavki: zakonske propise, sustave nadzora i svakako edukaciju proizvođača.

Literatura

- Addiscott, T.M., Whitmore, A.P. and Powlson, D.S., (1991): Farming, Fertilizers and the Nitrate Problem, C.A.B. International Wallingford, Oxon, p. 166.
- Ayers R.S., D.W. Westcot (1985). Water Quality for Agriculture, FAO Irrigation and Drainage Paper 29. Roma.
- Evangelou V.P. (1998) Environmental soil and water chemistry - Principles and applications. John Wilery & Sons. Inc. New York.
- Hillel D. (1980): Application of Soil Physics. Academic Press Inc. New York.

- McKenna P. (1998): Report on the Commission Reports on the Implementation of Council Directive 91/676/EEC. Committee on the Environment, Public Health and Consumer Protection (A4-0284/98). Brussels.
- Maas E.V., G.J. Hoffman (1977): Crop Salt Tolerance- Current assessment. *Jurnal on Irrigation and Drainage Division*. ASCE 103: 115-134.
- Maas E.V.(1986): Salt Tolerance of Plants. *Applied Agricultural Research* No.1:12-25.
- Maas E.V.(1990): Crop Salt Tolerance, In: *Agricultural Salinity Assessment and Management* Manuel. K.K. Tanji (ed.). ASCE, New York.
- Rhoades J.D., A Kandiah, A.M. Mashal (1992): The use of saline waters for crop production. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 48. Roma.
- Romić D., M. Romić (1997): Ratio of salt content added by irrigation with saline water and percolated from the root zone. *Proceedings of the International Conference on "Water management, salinity and pollution control towards sustainable irrigation in the Mediterranean region"*. Bari, Italy. Volume IV, p.275-284.
- Romić D. (2002): Ekološki problemi i ekonomski učinci navodnjavanja zaslanjenim vodama. *VIP Projekt - Završno izvješće*, Agronomski fakultet Zavod za melioracije, Arhiva.
- Romić D., M. Romić, J. Borošić, M. Poljak (2003a): Mulchung decreases nitrate leaching in bell pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivation. *Agricultural water management* 60, 87 – 97.
- Romić D., J. Borošić, M. Poljak, M. Romić (2003b): Polyethylene Mulches and Drip Irrigation Increase Growth and Yield in Watermelon. *European Journal of Horticultural Science*. 68.
- Sposito G. (1988): *The Chemistry of Soils*. Oxford University Press.
- U.S.Salinity Laboratory (1954): *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils* USDA Handbook No.60. Washington.
- Van Hofwegen P., M. Svendsen (2000): *A Vision of Water for Food and Rural Development*. Final Version, Delft (p. 81).



Slika 1: Oštećenje biljaka lubenica nakon navodnjavanja mikrorasprskivačima zaslanjenom vodom



Slika 2: *Biljke lubenice navodnjavane mikrorasprskivačima nezaslanjenom vodom*



Slika 3: *List zdrave biljke lubenice*



Slika 4: Oštećenje lista lubenice nakon navodnjavanja zaslanjenom vodom

7

ODVODNJA POLJA U KRŠU NA PRIMJERU VRGORSKOG POLJA

Prof. dr. sc. Ognjen Bonacci
Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci

Definicija polja u kršu	1
Kapacitet gutanja ponora	6
Vodni režim vrgorskog polja	10
Velike vode — analiza maksimalnih godišnjih vodostaja	23
Velike vode	35
Literatura	41

Definicija polja u kršu

Strogo uzevši polja u kršu mogu se definirati kao udubljenja u vapnenačkom kršu (Bonacci, 2003.). Općenito i najčešće eliptičnog su oblika. Nagib dna polja je relativno blag s padom od područja dotoka izvorskih voda prema području istjecanja u kojem se nalaze ponori (Bonacci, 1987.). Polja u kršu predstavljaju najveće i najočitije krške površinske oblike. Često nastaju uzduž tektonskih osi i bora. Unutar njih se oblikuju ravne i ispružene aluvijalne doline s relativno strmim i golim bokovima. Široke su od jednog do nekoliko kilometara. Mogu biti izdužene. Površinski vodotok najčešće teče po dužoj osi. Površina polja u kršu varira od manje od 0,5 km² do više od 500 km².

Oblikovanje udolina u krškim terenima posljedica je uzastopnog i istodobnog djelovanja brojnih čimbenika okoliša uključujući geološka svojstva podloge i paleoklimu. Prema Trudgillu (1985.) slijedeća dva važna čimbenika utječu na oblikovanje polja: obodno površinsko izravnavanje na visini razine podzemne vode u taložinama i taloženje u mirnoj, u jezerskoj vodi. U poljima u kršu erozijski procesi su obodni a odvijaju se na mjestima gdje taložine i voda dolaze u dodir s vapnenačkim masivom (Sweeting, 1972.). Na površini dna polja u kršu odlažu se kvartarni, neogeni nanosi među kojima se često javlja crvenica.

Polja u kršu predstavljaju složene strukture u kojima se nalaze različiti hidrološki i hidrogeološki oblici kao što su stalni i povremeni izvori, stalni otvoreni vodotoci kao i oni koji presušuju ili poniru u podzemlje, ponori, estavele itd.

Polja u kršu javljaju se u različitim dijelovima svijeta ali najčešće u području Sredozemlja u Grčkoj, Italiji, Francuskoj, Španjolskoj, Maroku, Turskoj, Sloveniji, Hrvatskoj, Bosni i Hercegovini, Srbiji i Crnoj Gori. U Aziji

postoji nekoliko krških polja u Kini. Polja u kršu brojna su na Jamajci i Kubi te u Kanadi (u području Nahanni), dok u SAD-u Bögli (1980.) spominje samo jedno polje (Grassy Cave u državi Tennessee). U Dinarskom kršu javlja se najveći broj klasičnih polja u kršu. Riječ polje u kršu je zbog toga iz jezika južnoslavenskih naroda ušla u međunarodnu kršku terminologiju. Sweeting (1972.) ističe da je tijekom vremena riječ "polje" dobila posebno značenje u znanosti. Od prvotnog pojma koji se odnosio na ravne prirodnom ili umjetnom vegetacijom pokrivene površine, danas on označava krški površinski oblik i svaku prostranu kršku ravnicu obrubljenu vapnenačkim brdovitim terenima.

U Dinarskom kršu (slično je i u drugim regijama) polja u kršu predstavljaju jedina područja u kojima su uvjeti za život ljudi povoljni. Okružena su golim i negostoljubivim kamenitim terenima, a pokrivena su plodnim tlom. U njima se javljaju stalni i/ili povremeni izvori i otvoreni vodotoci. Iako su relativno malena po prostoru obuhvata, polja u kršu imaju značajnu ekonomsku i socijalnu ulogu.

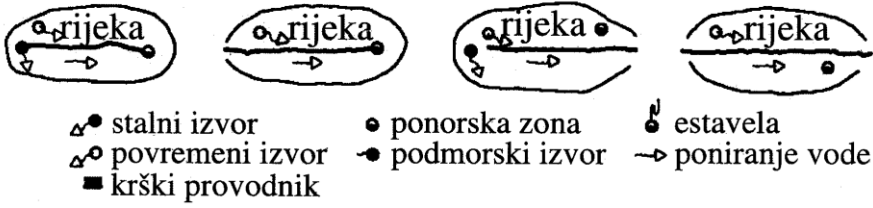
S hidrološkog stanovišta polje u kršu dio je šireg sustava. Ono ne može biti promatrano kao cjelovit sustav već samo kao podsustav u procesu površinskog i podzemnog tečenja vode kroz i preko krškog masiva. Iz navedenog proizlazi da hidrološki procesi u poljima u kršu ne mogu biti odgovarajuće izučavani bez uspostavljanja mjernih točaka unutar okolnog krškog masiva i u poljima koja se nalaze u višim i nižim horizontima s kojima je razmatrani podsustav, tj. analizirano polje u kršu, vezano (Bonacci, 1988.)

Polja u kršu redovno su plavljena u hladnim i vlažnim razdobljima godine. U Dinarskom kršu to se dešava u razdoblju od listopada do travnja (Bonacci, 1986.). Tijekom ljetnog razdoblja izvori i otvoreni vodotoci u poljima u kršu nerijetko presuše. Prema hidrološkom režimu dotoka i istjecanja vode polja u kršu mogu biti klasificirana u sljedeća četiri osnovna tipa prikazana na slici 1A:

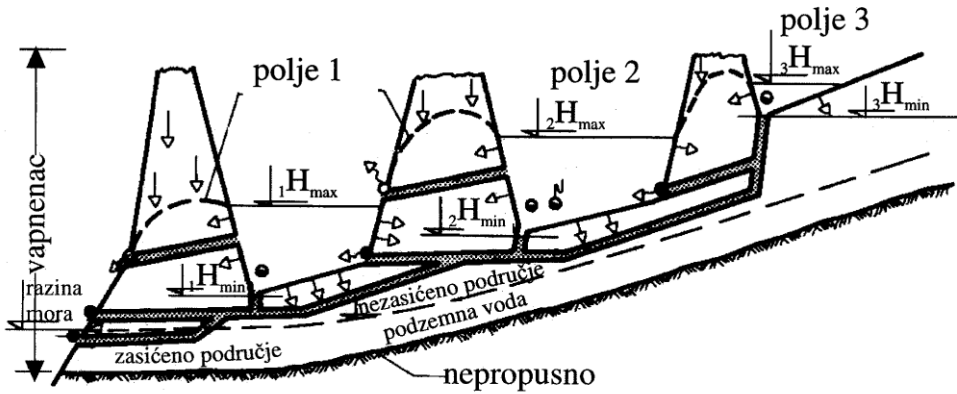
- 1) Zatvoreno polje;
- 2) Uzvodno otvoreno polje;
- 3) Nizvodno otvoreno polje;
- 4) Uzvodno i nizvodno otvoreno polje.

Poplave u poljima u kršu javljaju se zbog ograničenih kapaciteta izlaznih prirodnih organa ili inženjerskih građevina i/ili zbog visoke razine podzemnih voda u okolnom krškom masivu. Za nizvodno zatvorena polja jedini prirodni evakuacijski organi su ponori. U nizvodno otvorenim poljima rijeke na izlazu iz polja teku kroz uske kanjone čiji je kapacitet propuštanja vode ograničen. U ovom slučaju poplave su obično kraće, ali nerijetko se po svom trajanju bitno ne razlikuju od onih koje se javljaju u prethodno spomenutoj vrsti polja. Prirodni evakuacijski organi su ponori, a njihov kapacitet samo u iznimnim slučajevima zavisi od visine vode u polju. Najčešće se za vrijeme poplava kapacitet gutanja ponora smanjuje uslijed visoke razine podzemnih voda u okolnom masivu krša. Često se događa da piezometarske razine u okolnom masivu uvjetuju da ponori počinju raditi kao izvori. Ovaj krški fenomen naziva se estavela. Polja u kršu igraju ključnu ulogu u hidrološkoj bilanci cjelokupnog šireg krškog područja. Na slici 1 dan je shematski prikaz različitih, prije spomenutih svojstava i pojava u poljima u kršu.

(A) Četiri vrste polja u kršu

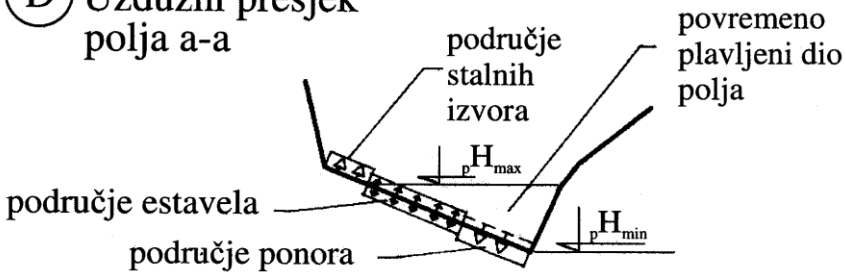


(B) Presjek kroz niz polja u kršu



(C) Situacija polja u kršu

(D) Uzdužni presjek polja a-a



Slika 1

Čovjek je vršio brojne zahvate u poljima u kršu s ciljem poboljšanja hidrološkog režima, a prije svega smanjenja prostora obuhvata i trajanja poplava. Kako danas stvari stoje sigurno je da će isti proces biti nastavljan, pa čak i intenziviran u budućnosti. Činjenica je da su svi zahvati u poljima u kršu izvođeni u cilju poboljšanja uvjeta života, dakle u najboljoj namjeri, ali da su brojni rezultirali posljedicama negativnim po okoliš. One su nerijetko višestruko i dugoročno premašivale koristi postignute čovjekovim mijenjanjem prirodnog stanja. Upravo stoga s hidrotehničkog stanovišta treba stalno imati na umu da su polja u kršu hidrološki, a preko toga i ekološki, vezana s širim prostorom u koji spada krški masiv kao i uzvodno i nizvodno položena krška polja. Antropogene utjecaje na hidrološki režim polja u kršu moguće je svrstati u sljedeće četiri kategorije:

- 1) Akumuliranje vode;
- 2) Povećanje kapaciteta izlaznih građevina;
- 3) Površinski hidrotehnički radovi;
- 4) Crpljenje podzemne vode iz vodonosnika koji leži ispod polja u kršu.

Akumuliranje vode u kršu rjeđe se dešava unutar samih polja. Ako se ide na takva rješenja obično se vodu pokušava uskladištiti u najnižim dijelovima polja u kršu koja su najčešće svake godine povremeno plavljena. U slučaju Buškog Blata radi se o povremeno plavljenom polju u kršu koje je pretvoreno u stalnu akumulaciju za potrebe proizvodnje električne energije. Češće se ide za tim da se sačuvaju plodni dijelovi polja za potrebe poljoprivredne proizvodnje, a da se skladištenje vode vrši na manje vrijednim dijelovima polja ili širih krških prostora. Izgradnja akumulacija u kršu značajno utječe na izmjenu hidroloških i hidrotehničkih odnosa u polju i njegovom širem okolišu. Zbog složenosti i nepoznavanja podzemnih krških veza i oblika, učinke izgradnje akumulacija teško je pretpostaviti. Često dolazi do promjena hidrološkog režima nizvodno ležećih izvora. U uzvodnom području može doći do ponovnog aktiviranja krškog drenažnog sustava zbog podizanja razine podzemne vode uzrokovanog novom visokom razinom vode u akumulaciji koja diktira odnose tečenja u širem prostoru.

Prvi i najčešći radovi na sprječavanju ili barem smanjenju visina i trajanja poplava u poljima u kršu bili su vezani s povećanjem kapaciteta ponora ili širenjem kanjona kroz koji se evakuira voda iz polja. Uspjesi ovakvih zahvata, a posebno povećanja kapaciteta ponora, ograničeni su zbog toga jer količina vode koju ponor može progutati ne zavisi samo o njegovim dimenzijama nego o razini podzemne vode u okolici ponora. U posljednjih stotinjak godina sa svrhom evakuacije velikih voda i smanjenja poplava u poljima u kršu, gradili su se tuneli. O slučaju tunela koji iz Vrgorskog polja odvodi vodu u Baćinska jezera a potom u Jadransko more, bit će detaljno govora u nastavku ovog rada.

Površinski hidrotehnički radovi u poljima u kršu najčešće se odnose na reguliranje otvorenih vodotoka, izgradnju kanala za dovod ili odvod voda, površinsku i podzemnu drenažu itd. Ovi radovi obično nemaju značajan utjecaj na promjenu režima podzemne vode u krškom masivu.

Crpljenje podzemne vode iz krških vodonosnika koji leže ispod ili u neposrednoj blizini polja za potrebe natapanja i opskrbe vodom sve se češće i masovnije primjenjuju u cijelom svijetu. Ako se naglo crpe velike količine podzemnih

voda, može doći do stvaranja pukotina u epikrškom sloju koji je nestabilan i u kojem postoje brojne međusobno povezane pukotine. Na taj način dolazi do stvaranja novih ponora i povećanja kapaciteta postojećih. Crpljenje podzemnih voda utječe na snižavanje razine podzemnih voda krškog vodonosnika, što može rezultirati kolapsom ponikvi i usijecanjem dna na širem prostoru za više metara. Takvi se slučajevi često javljaju na Floridi, gdje se iz krškog vodonosnika crpe velike količine vode za potrebe poljoprivredne proizvodnje. Slično se događa u Kini i Italiji, a poznati su slučajevi proloma tla u Dinarskom kršu.

Kapacitet gutanja ponora

Kapacitet gutanja ponora zavisi od visine vode u predponorskoj retenciji, H, samo dotle, dok tečenje u glavnom kraškom odvodniku nije pod tlakom. U trenutku kad tečenje dolazi pod tlak mijenja se naglo krivulja protoka ponora, kako je to prikazano na slici 2A. Kapacitet gutanja ponora tada zavisi isključivo od visine izražene s, h, ili, h', prikazanih na slici 2A. Riječ je o razlici između razina vode u predponorskoj retenciji i izlazne visine izvora. U slučaju postojanja većeg spiljskog sustava u kraškom masivu, koji se nikad ne ispuni vodom, tj. ne stvore se uvjeti za tečenje pod tlakom do izvora, visina, h, je niža i iznosi, h', kako je prikazano na slici 2A. Na slici 2B dana je krivulja protoke jednog ponora u Vrgorskom polju.

Prethodno objašnjena situacija predstavlja jednostavan i ne suviše čest slučaj djelovanja ponora u kršu. Mnogo češće se dešava da na kapacitet gutanja ponora utječe razina vode u zaleđu krša, kako je to prikazano na slici 3. Ako se u takvoj situaciji želi ustanoviti krivulja protoka ponora, neophodno je mjeriti razinu podzemne vode u pripadnom krškom masivu. Ova se mjerenja vrše pomoću piezometara koji predstavljaju osnovni izvor sakupljanja informacija za sve daljnje analize (Bonacci, 1988.). Sa slike 3 uočava se da kapacitet gutanja ponora zavisi od razlike razine podzemne vode u krškom masivu i razine vode u predponorskoj retenciji, ΔH . Za svaku ponorsku zonu, grupu ponora ili pojedinačni ponor, potrebno je postaviti najmanje jedan piezometar kojim treba kontinuirano pratiti promjene razine podzemne vode u krškom masivu.

Daljnja analiza polazi od jednadžbe bilance voda polja koja glasi:

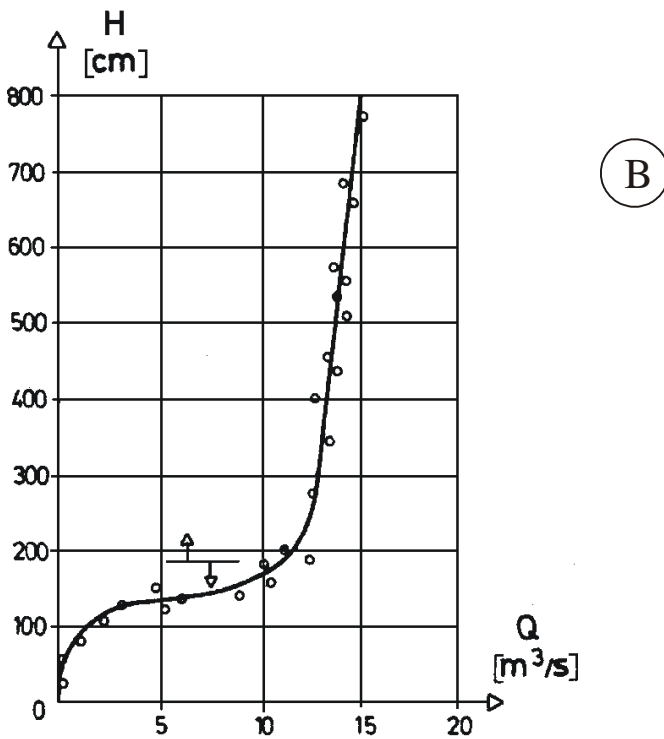
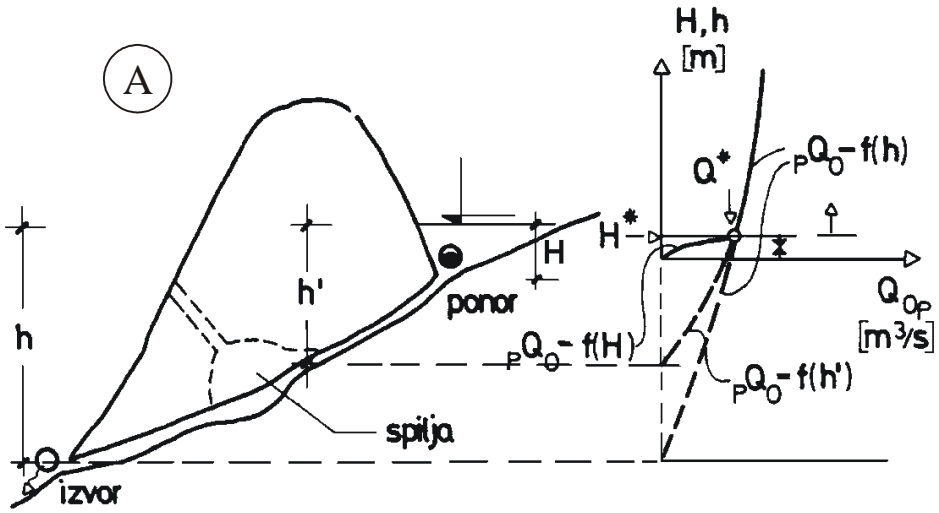
$$Q_0 - Q_1 = \pm(\Delta V / \Delta t) \quad (1)$$

u kojoj je, ΔV , promjena zapremine vode u polju u razdoblju vremena, Δt . Ulazna, Q_1 , i izlazna, Q_0 , protoka sastoje se od mnogobrojnih elemenata koji se mijenjaju u vremenu u svakom pojedinom polju, a moguće ih je pratiti nekom od hidroloških ili hidrometrijskih metoda. Posebnu pažnju treba posvetiti određivanju kapaciteta gutanja ponora, ${}_p Q_0$, ili, preciznije rečeno, istjecanju vode iz polja kroz njegovo dno. Pretpostavi li se turbulentno tečenje pod tlakom uz važenje kvadratnog zakona otpora, što je dokazano brojnim terenskim istraživanjima, za određivanje količine istjecanja vode ponorima, ${}_p Q_0$, vrijedi jednadžba:

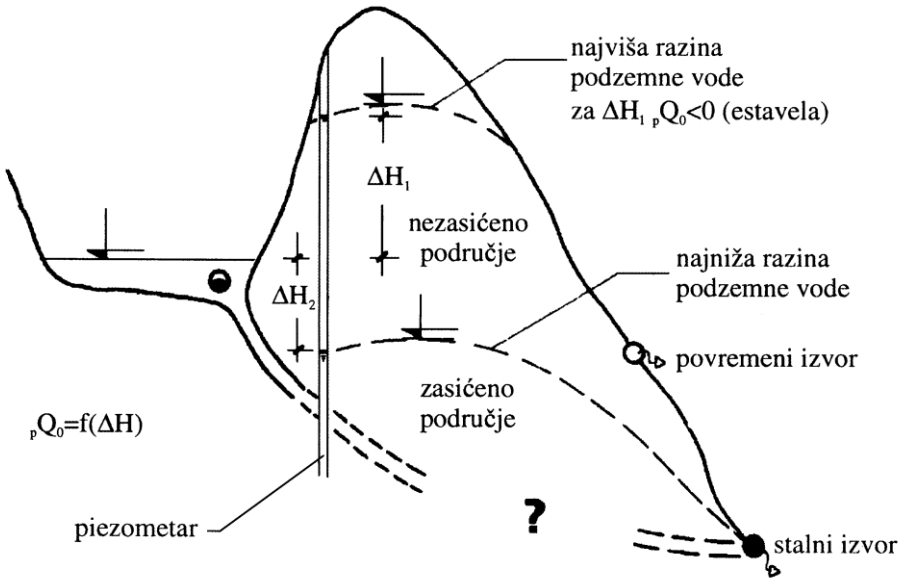
$${}_p Q_0 = k \cdot \Delta H^a \quad (2)$$

u kojoj je, k , hidrološki parametar područja, dok je, a , eksponent zavisian od režima tečenja.

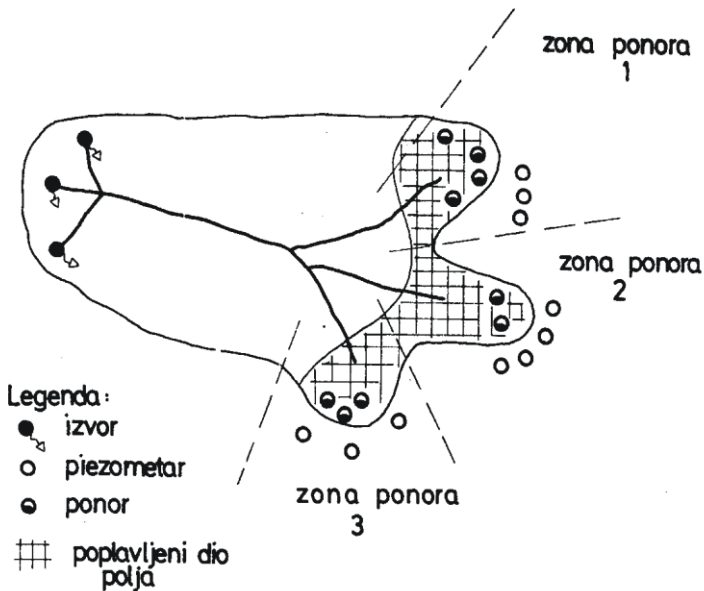
Pošto se pretpostavlja turbulentno tečenje s važenjem kvadratnog zakona otpora, uzima se da je vrijednost $a=0,5$. Međutim, u samome se modelu tijekom proračuna može vrijednost, a , varirati. Kako često postoji veći broj ponorskih zona što je prikazano na slici 4, za svaku od njih se postavlja takova jednađba.



Slika 2



Slika 3



Slika 4

Na polju Buško Blato hidrogeološkim istraživanjima određeno je šest takvih zona, a na Gračačkom, Fatničkom i Vrgorskom polju po tri nezavisne ponorske zone. Ako se svaka pojedina zona označi indeksom i , ($i \in 1, 2, \dots, n$), a ukupan broj zona s, n , te ako se svako mjerenje svih ulaznih i izlaznih veličina označi s, j , ($j \in 1, 2, \dots, m$) može se postaviti sustav od m , jednačbi s, n , nepoznanica:

$$\sum_{i=1}^n k_{i1} \cdot \Delta H_{i1}^a = Q_{i1} - Q_{01}^* \pm (\Delta V_1 / \Delta t_1)$$

$$\sum_{i=1}^n k_{ij} \cdot \Delta H_{ij}^a = Q_{lj} - Q_{0j}^* \pm (\Delta V_j / \Delta t_j) \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n k_{im} \cdot \Delta H_{im}^a = Q_{lm} - Q_{0m}^* \pm (\Delta V_m / \Delta t_m)$$

pri čemu je, Q_{0j}^* , dio izlazne protoke iz polja u kojoj nije sadržano istjecanje ponorima, ${}_pQ_0$, određeno izrazom 2.

Nepoznati hidrogeološki parametri područja, k_i , (njih ukupno, n) dobiju se minimiziranjem sume kvadrata razlika, j , korištenjem sljedećeg izraza:

$$\left(\sum_j Q_{0j}^* + \sum_i \sum_j k_i H_{ij} - \sum_j Q_{0j} \right)^2 = \sum_j \varepsilon_j^2 \rightarrow \min \quad (4)$$

Prilikom primjene izraza 4 i cjelokupnog postupka potrebna je stalnost hidrogeoloških parametara područja, k_i , što se postiže dodatnim hidrogeološkim analizama djelovanja sustava.

Vodni režim Vrgorskog polja

Vrgorsko polje tipično je zatvoreno polje u kršu. Slični se krški fenomeni često nalaze u području Dinarida. Radi se o depresijama u vapnenačkom kršu relativno ravnog dna s blagim padom od uzvodnih izvorišnih zona do nizvodnih ponorskih zona. Vrgorsko polje predstavlja aluvijalnu dolinu obrubljenu relativno strmim i golim vapnenačkim stijenama.

Osnovni problem svih polja u kršu, pa tako i onog Vrgorskog, je u tome što u njima dolazi do plavljenja najnižih dijelova u hladnom i vlažnom razdoblju godine. To se najčešće zbiva od listopada do travnja. Osnovni uzrok poplavama leži u nedovoljnoj izdašnosti evakuacijskih organa. Kod zatvorenih polja u kršu kao prirodni evakuacijski organi služe isključivo ponori ili preciznije rečeno ponorske zone. Poplave mogu biti izazvane vodom koja je dotekla s vlastitog orografskog sliva. Češće su njihov glavni uzrok vode koje su podzemnim putem dotekle iz viših horizonata iz susjednih pa i udaljenih polja u kršu. Najjače poplave najčešće su uzrokovane istovremenim zbivanjem oba spomenuta uzroka.

Izdašnost, tj. kapacitet gutanja ponora, posebno kod poplava koje su zahvatile velike prostore, samo iznimno i tek dijelom vremena zavise od razine vode u polju. Najčešće tijekom poplava na izdašnost gutanja ponora bitan utjecaj imaju razine podzemne vode u okolnom krškom masivu. Nerijetko se dešava da zbog visokih piezometarskih nivoa u okolnom krškom masivu dolazi do istjecanja vode iz ponora u polje. Slučaj pojave estavela uočen je i u Vrgorskog polju.

Osim prirodnih organa za evakuaciju voda čovjek je gradio pa i danas gradi brojne umjetne hidrotehničke građevine kao što su tuneli, prokopi, preljevi, brzotoci, umjetni kanali itd. Namjera njihove izgradnje je smanjenje trajanja poplava u polju i reguliranje vodnog režima. Pošto je Vrgorsko polje visinski raspoređeno na najnižem horizontu u odnosu na Jadransko more, na njegov hidrološki režim mogu utjecati, povremeno i utječu, sva ili barem većina polja smještenih na višim horizontima, koja se nalaze u njegovom širem okolišu. Prirodni hidrološko-hidrotehnički režim Vrgorskog polja je od početka dvadesetog stoljeća pretrpio ozbiljne promjene uslijed radova koje je na njemu i u prostoru njegovog obuhvata vršio čovjek. Posebno treba istaknuti probijanje dva tunela i to od Vrgorskog polja do Baćinskih jezera te iz Baćinskih jezera do Jadranskog mora kao i njihovu višekratnu rekonstrukciju. Kao posebnu zanimljivost treba spomenuti da je 1985. godine probijen tunel između polja Rastok i Vrgorskog polja koji do sada nije stavljen u funkciju.

Kad se od opisanog pristupa rješavanju problema kontrole i upravljanja vodnim resursima u poljima u kršu želi preći na količinske analize neophodno je raspolagati s brojnim mjerenim podacima koji osim toga moraju biti pouzdani i dugotrajni. Gotovo je pravilo da u našim prilikama s odgovarajućim mjerenim podlogama zadovoljavajuće kakvoće ne raspolažemo. Ova sudbina zadesila je i Vrgorsko polje. Brojnost podloga na prvi pogled čak i nije malena, međutim njihova pouzdanost kao i česte promjene položaja te ukidanja i ponovna osnivanja vodokaznih postaja čine njihovu sustavnu obradu vrlo teškom, a nerijetko i bespredmetnom.

Problemi određivanja protoka bitno su složeniji. Opterećeni su daleko većom greškom nego mjerenja vodostaja. Razlog tome je krajnja složenost procesa otjecanja u kršu uzrokovana čestom pojavom ponorskih, ali i izvorskih zona u samim riječnim koritima ili u njihovoj neposrednoj blizini. Ovome treba dodati i činjenicu nemogućnosti određivanja jednoznačnog odnosa protoka u zavisnosti od vodostaja, dakle krivulja protoka, posebno u razdobljima poplava zbog utjecaja uspora i povratnih voda, ali i zbog promjenjive izdašnosti gutanja ponora uzrokovane utjecajem razine podzemnih voda u okolnom krškom masivu. Ove probleme nije moguće riješiti bez brojnih, pouzdanih i kontinuiranih mjerenja razina površinskih i podzemnih voda. Dok se općenito gledano, površinske vode koliko toliko i prate, iako ne dovoljno brojno i pouzdano, s informacijama o podzemnim vodama uglavnom se ne raspolaže. Upravo takva situacija je na Vrgorskom polju. Informacija vezanih s podzemnim vodama koje upravljaju procesima otjecanja tijekom poplava nema tako da se svi zaključci i proračuni moraju donositi na osnovi nedovoljno brojnih i nedovoljno pouzdanih mjerenja razine i protoka vode na nekoliko vodomjernih postaja na Matici vrgorskoj i u polju.

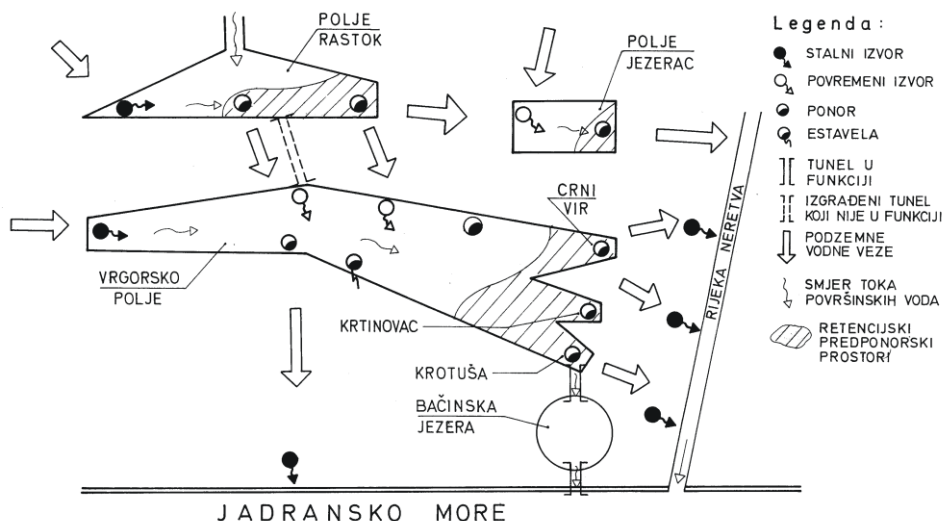
Na slici 5 dan je pojednostavljeni prikaz položaja Vrgorskog polja u odnosu na polja višeg horizonta (Rastok, Jezerac i Ljubuško polje) te na niže horizonte (Baćinska jezera, rijeka Neretva i Jadransko more) u koje se ocjeđuju vode iz Vrgorskog polja. Na istoj slici ucrtan je i položaj dvije meteorološke postaje (Vrgorac i Ljubuški) kao i pet bitnih hidrometrijskih postaja na kojima se kontrolira proces dotoka i istjecanja u i iz Vrgorskog polja. Ucrtan je i položaj dva tunela koji su u funkciji dok tunel između polja Rastok i Vrgorskog polja iako je izveden još 1985., a najveća mu se propusna moć procjenjuje na $18,5 \text{ m}^3/\text{s}$, nije

ucrtan jer do danas nije stavljen u funkciju te prema tome nije utjecao na procese otjecanja u izučavanom prostoru.



Slika 5

Na slici 6 dana je pojednostavljena hidrološko-hidrotehnička skica izučavanog prostora na kojoj su ucrtani svi glavni vodni fenomeni kao što su površinski vodotoci, izvori, estavele i ponori, smjerovi tečenja površinskih i podzemnih voda, položaji predponorskih retencijskih prostora kao i hidrotehnički tuneli u i izvan funkcije.



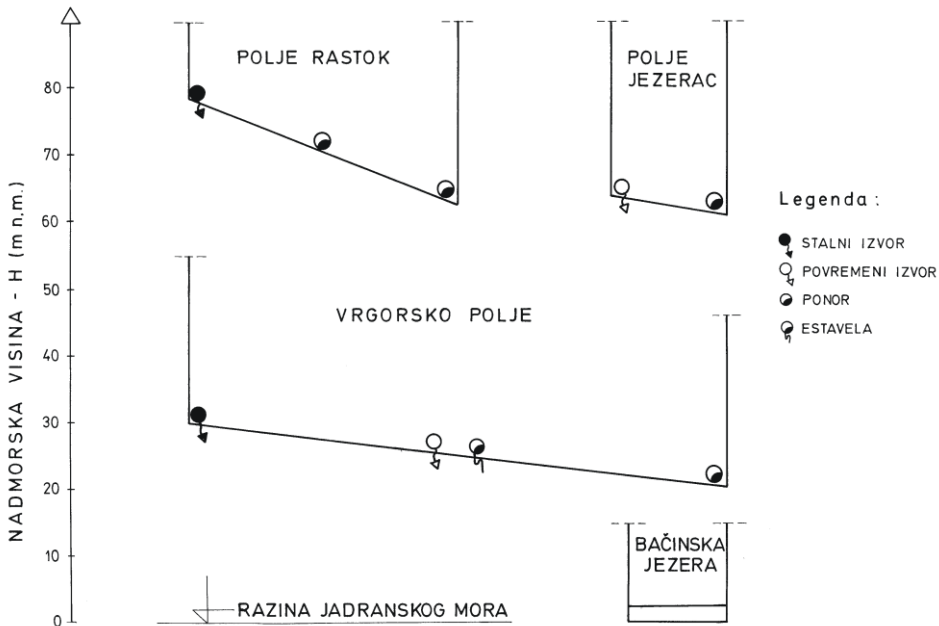
Slika 6

Važno je naglasiti da ključnu ulogu u procesima otjecanja imaju podzemne vode, tj. da se većina transporta voda u izučavanom prostoru vrši podpovršinski kroz sustav krških prslina, pukotina i kaverni dimenzija od onih mikronskih do metarskih. Tijekom vremena, neprekidno i usporedno, odvija se transport voda laminarnim, prijelaznim i turbulentnim režimom tečenja. Osim toga značajnu ulogu igra uspravni transport vode čak i preko riječnih korita koja su na dugim dionicama propusna zbog snažne okršenosti i nedovoljne kolmatacije dna nanosom. Posljednje spomenuto predstavlja razlog zbog kojeg tijekom sušnog i toplog razdoblja godine na pojedinim dionicama otvorenih vodotoka, prvenstveno u donjim dijelovima polja, dolazi do presušivanja korita. Ova pojava može biti dugotrajna, a povezana je i sa stanjem razina podzemnih voda u širem prostoru krškog masiva .

Vjerojatno je da je polje Rastok a možda i polje Jezerac hidrogeološki povezana s Vrgorskim poljem. Kada se koristi pojam hidrogeološki misli se isključivo na činjenicu da voda između ovih prostora cirkulira podzemno kroz razrađene krške putove. Pri tome valja imati na umu postojanje vrlo dinamičnog vodonosnika koji se brzo mijenja kako u prostoru tako i u vremenu. O njegovim svojstvima zna se vrlo malo i to onoliko koliko se može zaključiti iz mjerenja razine i protoka vode vršenih u samim poljima. Mjerenih podataka vezanih s podzemnim vodama nema.

Na slici 7 dan je pojednostavljeni prikaz visinskih odnosa među analizom obuhvaćenim poljima iz kojeg je moguće pouzdanije pretpostaviti glavne putove kretanja podzemnih voda. Postaje unaprijed jasno da nije moguće niti potpuno shvatiti, a kamo li objasniti, a potom kontrolirati i/ili upravljati vodnim resursima na osnovi postojećih saznanja. Bez obzira na to zadatak inženjera je bio i ostao dati praktična rješenja koja bi trebala omogućiti bolje i učinkovitije korištenje vodnih resursa. Primarna zadaća u slučaju Vrgorskog polja bila bi smanjenje trajanja poplava ili njihovo potpuno isključenje (što je praktično nemoguće, a ekološki je štetno). Uz to se vode iz samog polja, ali i iz cijelog razmatranog prostora, ne smiju izvesti prebrzo da ne bi došlo do značajnog poremećaja prirodnog stanja plavljenja. S ekološkog stanovišta bilo bi vrlo štetno eliminirati poplave u cijelosti. Do sada brojni izvedeni radovi kako kod nas tako i u svijetu uzrokovali su kratkoročne pozitivne efekte, ali su dugoročno narušili ekološku ravnotežu ugroživši biološku raznolikost prostora obuhvata. Prilikom izvedbe bilo kakvih hidrotehničkih radova mora se voditi računa da se okolišu ostavi mogućnost oporavka od udara koji će mu isti nanijeti. Udari izazvani brzim i bespovratnim odvođenjem velikih količina voda mogu značajno poremetiti prirodnu ravnotežu. Posljedice ovakvih zahvata obično se ne osjete trenutačno po izgradnji hidrotehničkog objekta ili sustava već one postepeno, nezaustavljivo, te vrlo dugoročno izazivaju sve negativnije efekte. Prilikom odvodnje Vrgorskog polja o tome treba posebno strogo voditi brigu.

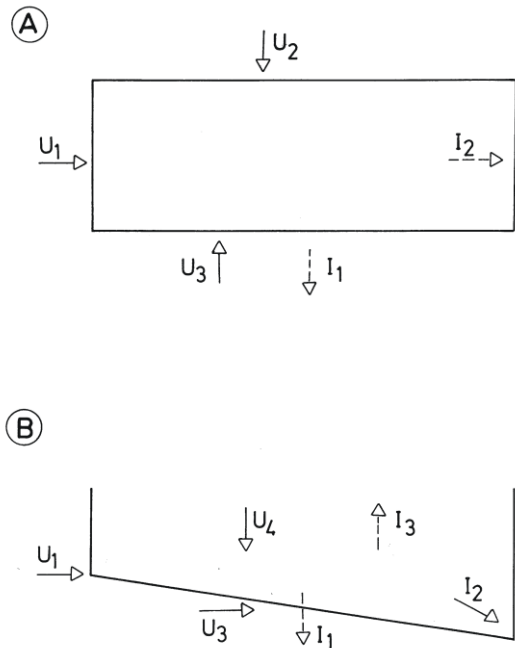
U prethodnom je razmatranju bilo naglašeno da su procesi kretanja površinskih i podzemnih voda međusobno manje ili više interaktivno povezani te da ih je teško kontrolirati stoga jer se mijenjaju u vremenu i prostoru. Za



Slika 7

Vrgorsko polje nastavno će se postaviti jednadžba bilance voda te će se uz komentiranje njenih komponenti ukazati na složenost vodnog režima i poteškoće koje se javljaju pri njegovom upravljanju.

Na slici 8 dan je pojednostavljeni prikaz Vrgorskog polja u situaciji (slika 8A) i uzdužnom presjeku (slika 8B) na kojem su unesene pojedine komponente bilance voda.



Slika 8

Opća jednačba bilance glasi:

$$(U_1 + U_2 + U_3 + U_4) - (I_1 + I_2 + I_3) = \pm \Delta V \quad (5)$$

Nastavno će biti detaljno objašnjenja svaka od navedenih komponenti.

Oznakom U_1 predstavljene su sve vode koje u Vrgorsko polje ulaze na njegovom zapadnom rubu kroz brojne stalne i povremene izvore. Njihova slivna površina do danas nije određena, a moguće je da imaju stalnu ili vjerojatnije povremenu vezu s ponorima Imotsko-Bekijskog polja ili barem s krškim vodonosnikom koji se oblikuje poniranjem voda iz spomenutog horizonta. Valja naglasiti da ova komponenta predstavlja glavni ulaz voda u Vrgorsko polje te da nikada ne presuši. Količine ulaza promjenjive su. Kontrolirane su dimenzijama izlaznih organa te sposobnošću skladištenja vode u kršu, a posebno u njegovom gornjem (epikrškom) sloju. Ove je količine donekle moguće pratiti mjerenjima vodostaja i protoka nizvodno od izvorskih zona. Poteškoće se javljaju pri prolazu valova velikih voda kada je mjerenje na terenu krajnje otežano, a točnost mjerenja značajno smanjena.

Oznaka U_2 odnosi se na vode koje ulaze glavninom sa sjevera kroz ili ispod polja Rastok ili Jezerac. Dokazi za postojanje i odvojeno djelovanje ovog ulaza su brojni povremeni izvori uzvodno od vodomjerne postaje Dusina, ali i na nizvodnom, sjevernom obodu polja. U brojnim situacijama nije moguće odvojiti ulaz voda iz viših sjevernih horizonata od ulaza voda iz vlastitog sliva koje su označene s, U_4 . Očigledno je da se radi o tek povremenim ulazima vode u Vrgorskom polju i to samo tijekom nailaska velikih voda. Količinski je ovaj ulaz promjenjiv, a kreće se od nule do znatnih vrijednosti u kratkotrajnom razdoblju velikih voda. Hidrometrijska kontrola ovog ulaza otežana je dijelom i zbog toga jer pri najvećim poplavama u Vrgorskom polju dolazi do stvaranja uspora uzrokovanog akumuliranjem vode u najnižim horizontima polja. Treba istaknuti i to da zavisno o prostornoj raspodjeli oborina ovaj ulaz može kratkotrajno biti istog reda veličine pa možda i veći od ulaza, U_1 .

Ulaz voda označen s U_3 može se smatrati najupitnijim s motrišta objašnjavanja njegovog porijekla. Radi se o povremenim ulazima vode u južni središnji dio Vrgorskog polja u područje koje se može okarakterizirati kao zona estavela. Ova činjenica upućuje da je cirkulacija vode u njoj upravljana razinama podzemnih voda u okolnom krškom masivu. Nije jasno da li se radi o stalnom, vlastitom hidrogeološkom slivu ili o povremenom dotoku podzemnih voda iz viših i udaljenih horizonata. Moguće je da u većini slučajeva, a posebno pri velikim vodama, djeluju oba uzroka. S gledišta količina ovaj ulaz važan je samo tijekom kratkotrajnih i naglih nailazaka velikih voda s jugoistočnog dijela sliva. Tada su mjerenja krajnje teška. Kontrolu sva tri ulaza, ali i dijela ulaza, U_4 , tj. voda sa vlastitog sliva moguće je vršiti na vodomjernoj postaji Staševica samo do trenutka dok ona ne dođe pod uspor vode retencionirane u ponorskim zonama Krotuša, Krtinovac i Crni vir.

Ulaz U_4 predstavlja ulaz vode s vlastitog sliva. Njega nije moguće odrediti morfologijom ruba Vrgorskog polja već je on uvjetovan razinama podzemnih voda koje se značajno mijenjaju u prostoru i vremenu i o kojima nema nikakvih informacija. Problem je dodatno osložen i činjenicom da je oborinski režim,

osobito kratkotrajnih intenzivnih pljuskova koji izazivaju poplave u polju krajnje različit zbog utjecaja orografije. Stoga su procjene ovog ulaza nepouzdana. U slučajevima ako se centar oluje nalazi točno iznad Vrgorskog polja ovaj ulaz može količinski biti znatan i po redu veličina usporediv s ulazima, U_1 , i U_2 . Treba spomenuti da površina samog polja iznosi oko 30 km^2 te da se površina vlastitog hidrogeološkog sliva kreće u približno istom redu veličine. Za bolju kontrolu ovog ulaza bila bi potrebna mreža od najmanje pet automatskih registratora oborina pažljivo raspoređenih u prostoru i visinski kako bi osigurala pouzdana kontrola direktnih ulaza voda u obliku oborina palih na vlastiti sliv. Koliko od ukupno pale, dakle bruto oborine, bude pretvoreno u direktno otjecanje stvar je posebne analize u kojoj čimbenici kao što su sezona godine u kojoj se proces odvija te vremenski inkrement analize mogu igrati ključnu ulogu. Pri tome se ne smije zaboraviti niti to da je površina vlastitog sliva Vrgorskog polja promjenjiva u vremenu u zavisnosti od stanja razina podzemnih voda. Kako se ovim podacima ne raspolaže nije moguće pouzdana odrediti vrijednosti ulaza vode s vlastitog sliva.

Izlazi vode iz polja označeni su velikim slovom **I**.

Prvi izlaz označen je s I_1 te predstavlja gubitke vode iz srednjeg dijela polja kroz zonu estavela dakle u trenucima kada one djeluju kao ponori. Međutim, ovim izlazima treba pridodati i sva poniranja vode kroz korito Matice vrgorske duž cijelog njenog toka. Dijelom se infiltracija vrši kroz slojeve aluvijalnog nanosa (pretežno u gornjem dijelu polja), a dijelom kroz krške pukotine (uglavnom u donjem golom dijelu polja). Kontrola svih ovih gubitaka praktično nije moguća a njihove procjene su nepouzdana.

Izlaz označen kao I_2 predstavlja istjecanje vode iz Vrgorskog polja kroz tri ponorske zone: Crni vir, Krtinovac i Krotuša. Pošto se istjecanje vrši kroz vrlo prostrane ponorske zone, a ne kroz pojedinačne ponore problem je odrediti točan položaj ovih zona, tj. kraj područja na kojem postoje gubici ili izlazi iz polja označeni s, I_1 . Uvjetno bi se ova granica mogla postaviti na položaj razdjelne građevine u blizini vodomjerne postaje Prigon. U izlaze, I_2 , spada i istjecanje kroz tunel Vrgorsko polje - Baćinska jezera koji predstavlja glavni evakuacijski organ tijekom poplava. Tijekom sušnog ljetnog razdoblja voda ne dotiče do nje-ga već se gubi kroz sitne krške pukotine koje se nalaze u koritu Matice vrgorske. Kapacitet gutanja ponora na dnu Vrgorskog polja (misli se na sve tri ponorske zone) ograničen je nedovoljno velikim dimenzijama evakuacijskih organa, tečenjem pod tlakom, ali i povremenim utjecajem visokih razina podzemnih voda u nizvodnim dijelovima krškog masiva. Zasigurno je on promjenjiv tijekom vremena i samo povremeno zavisi o razini vode u predponorskoj retenciji. Treba naglasiti da je u svim hidrološkim analizama kapacitet gutanja ponora bio izražen kao jednoznačno zavisano o razini vode u predponorskoj retenciji. To je samo dijelom i povremeno točno, ali pošto drugih podataka nema nije bilo mogućnosti problem drugačije i točnije riješiti.

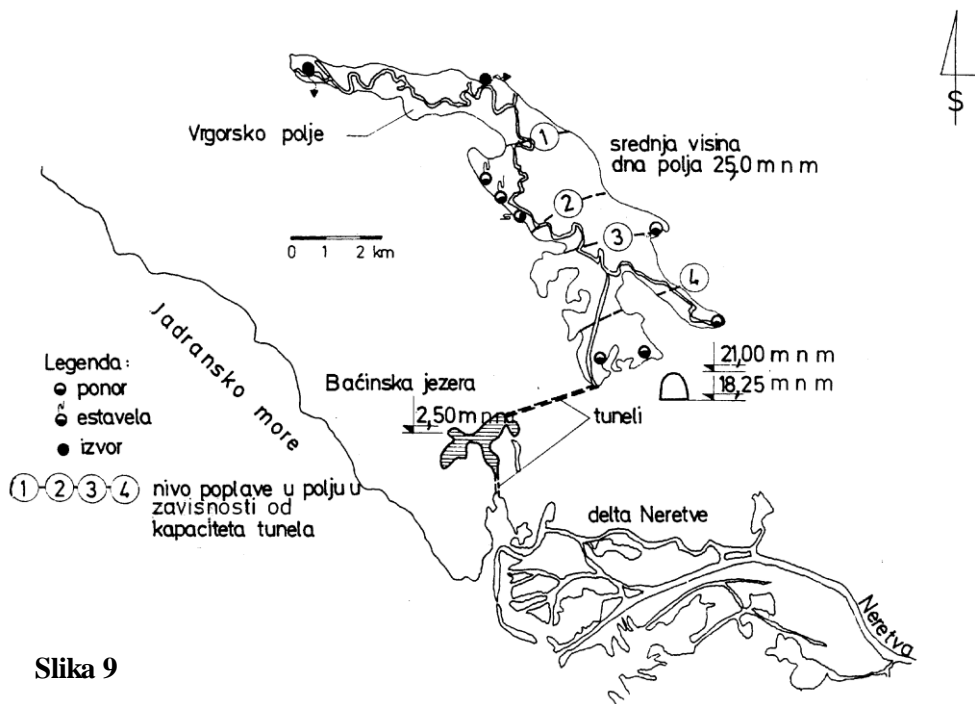
Oznakom I_3 određeni su izlazi iz polja, tj. gubici vode evapotranspiracijom sa slobodne vodene površine, golog tla te kroz vegetacijski pokrov. O ovim gubicima uglavnom se u dosadašnjim hidrološkim analizama nije vodilo računa. To je razumljivo i donekle prihvatljivo kada se radi o bilanciranju voda tijekom poplavnog razdoblja, ali ne može biti usvojeno kada se vrše bilance voda u sušnom i vegetacijskom razdoblju ili za godinu kao jedinicu vremena. Značaj

ove komponente bilance voda Vrgorskog polja postaje sve veći stoga jer se u polju razvija intenzivna poljoprivredna proizvodnja koja troši sve veće količine vode. O količinama ovih izlaza, tj. gubitaka postoje tek grube procjene dobivene primjenom teorijskih izraza čija točnost nije visoka.

Posljednja komponenta jednadžbe bilance koja se ujedno jedina nalazi s desne strane označena je s $\pm\Delta V$, a predstavlja promjenu zapremine vode u Vrgorskom polju. Radi se o zapremini vode u predponorskim retencijama, u koritu rijeke, ali i u podzemlju te u tlu vlastitog sliva Vrgorskog polja. Kada se govori o promjeni zapremine vode misli se na promjenu nastalu od početka do kraja vremenskog inkrementa za koji se računa bilanca vode. Ovaj vremenski raspon može biti kratak, ali i dug, npr. cijela hidrološka ili kalendarska godina. Za svaki vremenski različit raspon obrade mora se voditi računa koji element zapremine vode ima značajnu ulogu. Tijekom bilanciranja prolaska valova velikih voda dominantna je uloga predponorske retencije čija su morfološka svojstva relativno pouzdano određena iako ne bi bilo na odmet provjeriti ih novim premjerom. Za ostale inkremente vremena analize vodnih bilanci, a posebno za one u dužem i vegetacijskom razdoblju ne raspolaže se sa zadovoljavajućim informacijama. Dok se o zapremini vode u koritu vodotoka Matice vrgorske može suditi na osnovi mjerenja razine vode na nekoliko hidrometrijskih postaja, o zapremini podzemne vode i vode u tlu nema nikakvih informacija.

U prethodnoj raspravi o mogućnosti bilanciranja voda Vrgorskog polja ukazano je na brojne informacije koje bi obrađivač trebao sakupiti, a da bi mogao korektno izvršiti ovaj zadatak. Kako do njih nije do danas bilo moguće doći, a očigledno je da će stanje biti identično i u doglednoj budućnosti, sve hidrološke analize izvršene do sada kao i one koje slijede bit će približno točne, tj. morat će biti vršene uz pretpostavke koje mogu osigurati tek djelomičnu točnost. Nažalost se mora ustanoviti da je kakvoća hidroloških podloga od šezdesetih godina dvadesetog stoljeća do danas u stalnom opadanju, a da su usporedno vršeni brojni hidrotehnički i drugi radovi koji su značajno utjecali na poremećaj prirodnog hidrološkog stanja u Vrgorskom polju, ali i njenoj široj okolici. Prethodno spomenuto nameće potrebu izgradnje novog hidrometeorološkog i hidrogeološkog monitoringa koji bi trebao osigurati točnije zaključivanje o složenim procesima kretanja vode u analiziranom prostoru. Ove analize nisu same sebi svrhom te ne predstavljaju nikakav hir znanstvenika. Radi se o krajnje pragmatičnoj potrebi čiji je osnovni zadatak očuvanje još uvijek kvalitetnih i obilnih vodnih resursa ne samo Vrgorskog polja već i šireg prostora na kojeg ono ima bitan utjecaj. Tu se prvenstveno misli na brojne krške izvore uz obalu Jadranskog mora i u blizini korita rijeke Neretve kao i na Baćinska jezera. Svi oni predstavljaju strateške rezerve, za sada po količini i kakvoći, visoko vrijedne pitke vode. Zaštita te organizirano i osmišljeno korištenje i upravljanje vodnim resursima Vrgorskog polja preduvjet je za očuvanje spomenutih vodnih fenomena.

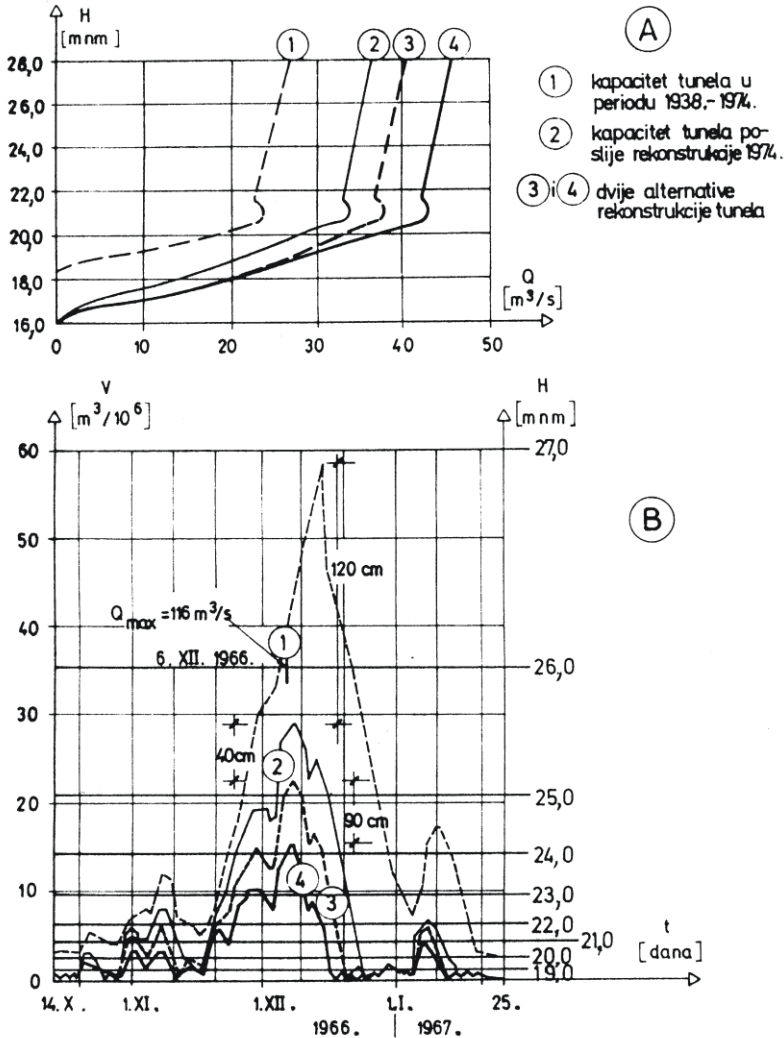
Nastavno vršene analize prvenstveno su usmjerene na rješavanje problema velikih voda, tj. brzu evakuaciju i zaštitu od poplava Vrgorskog polja. Na slici 9 prikazana je situacija Vrgorskog polja s ucrtanim približnim dosezima poplava u



Slika 9

različitim vremenskim razdobljima u zavisnosti o izgrađenosti sustava za odvodnju, a prije svega kapacitetu tunela Vrgorsko polje — Baćinska jezera (Bonacci, 1977.). Do izgradnje tunela 1938. godine poplave u polju bile su dugotrajne i dosezale su do najviše opažene razine od 32,7 m n.m. Kako su mjerenja razine vode u polju započeta tek 1926. godine pretpostavlja se da su ekstremne poplave prelazile kotu od 33,5 m n.m. što bi značilo da je cijelo polje kratkotrajno bilo pod vodom. Brojem 1 označeno je približno maksimalno plavljenje polja po izgradnji tunela od 1938. do njegove rekonstrukcije 1974. Broj 2 označava područje najvećeg plavljenja polja poslije rekonstrukcije tunela izvršene 1974. godine dok su brojevima 3 i 4 označena područja plavljenja polja izračunata za dvije varijante rekonstrukcije tunela. Na slici 10A ucrtane su krivulje protoka tunela u zavisnosti od razine vode u predponorskoj retenciji. Izgradnjom i djelovanjem tunela bitno je skraćeno trajanje i intenzitet poplava te područje plavljenja. Poplave nisu eliminirane niti će to biti moguće učiniti u budućnosti. Maksimalni protok pri poplavama procijenjen je na više od 150 m³/s. Graditi tunel ovog kapaciteta ekonomski, ali i s drugog motrišta, ne bi imalo opravdanja, a ne bi bilo ni učinkovito jer je propusna moć korita Matice vrgorske bitno niža, te se kreće oko reda veličine od 50 m³/s. Uz to nije izgrađen sustav detaljne odvodnje danas poljoprivredno intenzivno iskorištavano srednjeg pa i donjeg dijela polja tako da značajno povećanje propusne moći tunela ne može pomoći detaljnoj odvodnji. Na slici 10B dan je rezultat proračuna transformacije hidrograma velikih voda koje su se javile u razdoblju od 14. listopada 1966. do 5. siječnja 1967. u zavisnosti od različite propusne moći tunela. S grafičkog prikaza jasno se uočava da povećanje propusne moći tunela

utječe značajno na smanjenje zapremina i trajanje poplava, ali ne tako bitno i na smanjenje razine poplava u polju. Potrebno je kritički se osvrnuti na zaključke pa i metode rada u elaboratu iz 1977. godine. Kao prvo za proračun je korištena najjednostavnija metoda bilance predponorske retencije uz usvajanje funkcionalnog odnosa krivulje propusne moći tunela. Vodomjerenja izvršena na postaji Krotuša u razdoblju 1980. — 1996. ukazuju da kod vodostaja viših od 100 cm, tj. za kotu veću od 19,23 m n.m. ovaj odnos nije jednoznačan te da na njega vjerojatno utječu razine podzemne vode. Ako je to zaista tako u slučaju propusne moći tunela gdje su stvari hidrogeološki relativno čiste treba s posebnim pozorenjem gledati na zaključke vezane s kapacitivnim sposobnostima ponorskih zona. Krivulja gutanja ponora određena je u elaboratu Republičkog hidrometeorološkog zavoda SRH izrađenom 1967. godine. Tada je ustanovljen jednoznačni odnos kapaciteta gutanja



Slika 10

svih ponora donjeg dijela polja u zavisnosti od razine vode u predponorskoj retenciji, što sigurno nije uvijek točno. Kako ne postoje ni novi podaci ni nova istraživanja ista se krivulja protoka i danas koristi.

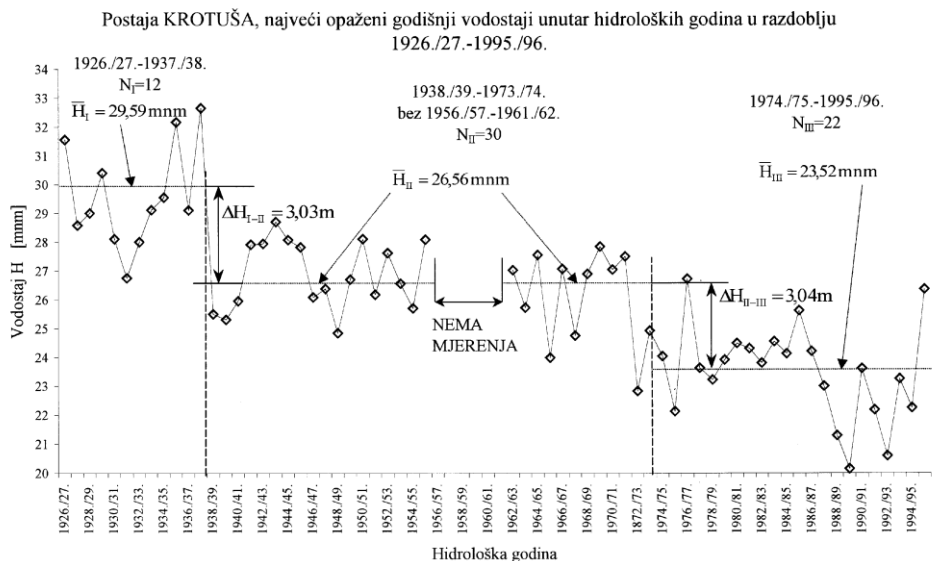
Treba ukazati na još jednu nedoumicu koja postaje sve očiglednija vezano s općim pristupom rješavanju upravljanja vodnim resursima Vrgorskog polja. Pažnja je nažalost usmjerena samo na problem odvodnje, tj. brze evakuacije voda iz polja ili bolje rečeno smanjivanje ili potpunu eliminaciju poplava iz polja što će biti vrlo teško ili čak neće biti moguće ispuniti u cijelosti. Praksa je pokazala brojne i štetne posljedice koje nastaju ako se problem upravljanja vodnim resursima u nekom prostoru sagledava samo s jednog motrišta, a to je u ovom slučaju obrana od poplave. Brzo evakuirana voda prije ili kasnije nedostaje u prostoru iz kojeg je neprirodno i naglo izvedena, što počinje dugoročno i uglavnom negativno utjecati na okoliš, ekološke procese, biološku raznolikost a preko toga i na ekonomske, socijalne pa i političke procese. Danas je vrlo teško predvidjeti što će se u stvarnosti desiti u području Vrgorskog polja i na širem području obuhvata vezanog s ovim poljem, ali iskustva u brojnim drugim prostorima ukazuju na potrebu opreza. Najmanje što se može učiniti je pratiti procese i to ne samo hidrološko-hidrogeološke prirode već prije svega one ekološko-biološke. Sustavi za odvodnju prije svega tuneli, preljevi i ostale hidrotehničke građevine moraju biti tako projektirani i izvedeni da se njima može upravljati. Vrijeme izgradnje tunela kao što je Krotuša, koji nema mogućnost upravljanja vodama, odavno je prošlo. Treba na njemu izgraditi ustavu kojom će se kontrolirano ispuštati voda iz Vrgorskog polja. Istine radi treba spomenuti da je ustava projektom bila predviđena (možda je bila i izvedena), ali da već dugo vremena ne postoji. Upravljanje vodama Vrgorskog polja traži stručnu brigu i znanje čega do sada nije bilo u dovoljnoj mjeri.

Velike vode - analiza maksimalnih godišnjih vodostaja

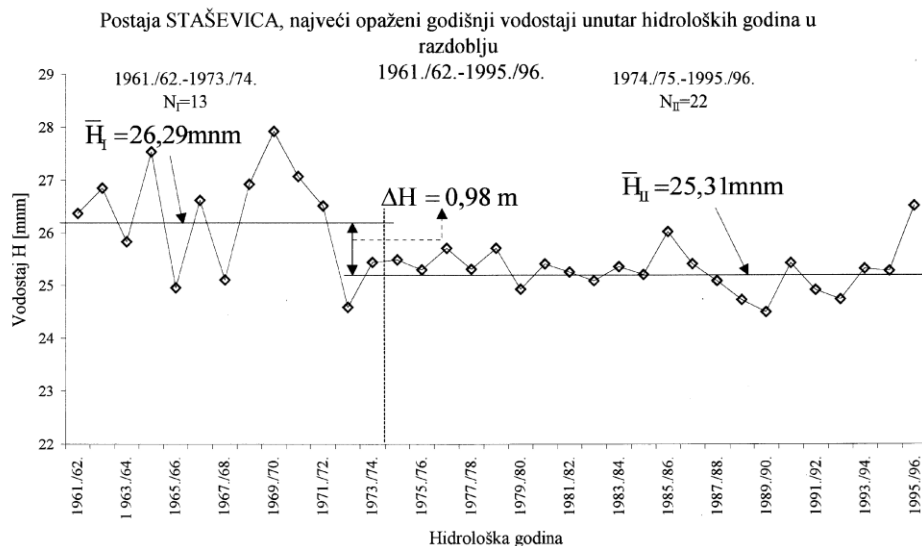
U tablicama 1, 2 i 3 upisani su najviši vodostaji opaženi tijekom hidroloških godina na vodomjernim postajama Krotuša (tablica 1), Staševica (tablica 2) i Dusina (tablica 3). Najduži niz podataka postoji na postaji Krotuša uz napomenu da se u razdoblju od 1956./57. do 1961./62. (dakle 6 hidroloških godina) ne raspolaže mjerenim podacima. Niz opaženih vodostaja na postaji Staševica sadrži 35 podataka u razdoblju 1961./62.—1995./96. Na postaji Dusina neprekinuti niz vodostaja postoji od 1960./61. hidrološke godine uz napomenu da u razdoblju 1954./55.—1959./60. nedostaju mjerenja tijekom tri hidrološke godine.

Od posebnog je interesa izvršiti analizu utjecaja djelovanja tunela na nizove najviših vodostaja na tri prethodno spomenute postaje. Kako je tunel Vrgorsko polje — Baćinska jezera pušten u rad krajem 1938. godine te rekonstruiran krajem 1974. analizi treba podvrći slijedeće vremenske nizove:

- 1) Prije izgradnje tunela, dakle do hidrološke godine 1937./38.;
- 2) Od izgradnje do rekonstrukcije u razdoblju 1938./39. - 1973./74.;
- 3) Poslije rekonstrukcije tunela od 1974./96.



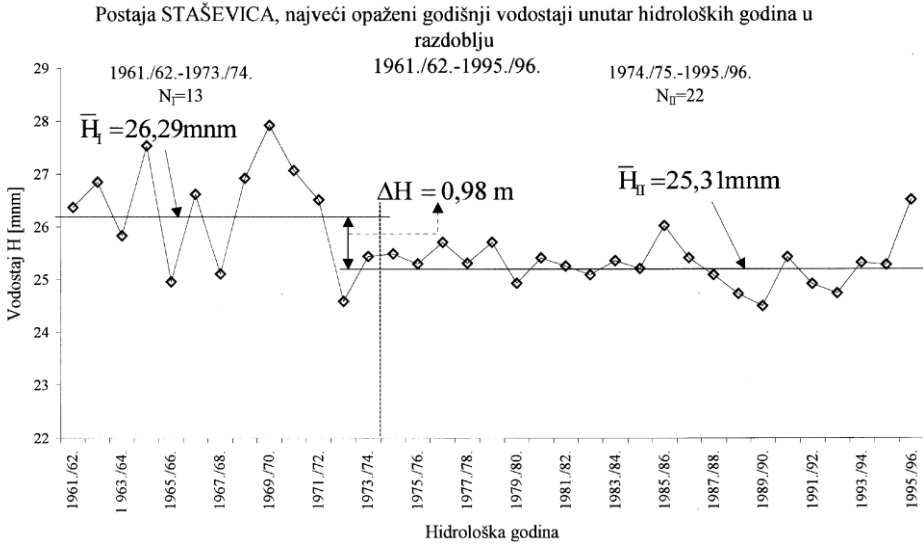
Slika 11



Slika 12

Sva tri spomenuta vremenska niza pokrivena su mjerenjima jedino u slučaju postaje Krotuša dok se na preostale dvije vodomjerne postaje Staševica i Dusina raspolaže s podacima mjerenim u drugom i trećem razdoblju.

Na slikama 11, 12 i 13 grafički su prikazani nizovi najviših vodostaja opaženih na vodomjernim postajama Krotuša (slika 11), Staševica (slika 12) i Dusina (slika 13). Već grubi pregled spomenutih grafičkih prikaza ukazuje da je zbog djelovanja tunela došlo do snižavanja razine najviših vodostaja na sve tri vodomjerne postaje. Primjerom F-testa i t-testa izvršena su testiranja statističke značajnosti razlika varijanci i aritmetičkih srednjaka za tri spomenuta razdoblja.



Slika 13

Testiranje započinje primjenom F-testa koji se koristi za ispitivanje jednakosti varijanci. Računa se, F, vrijednost sljedećim izrazom:

$$F = \left(s_i^2 / s_{i+1}^2 \right) \quad (6)$$

pri čemu je, s_i , standardna devijacija i-tog vremenskog niza. U konkretnom slučaju $i \in (1, 2, 3)$. Najbolja nepristrana procjena standardne devijacije i-tog vremenskog niza (Pavlič, 1965.) računa se izrazom:

$$s_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N_i} (x_j - \bar{x}_i)^2}{N_i - 1}} \quad (7)$$

pri čemu je, x_j , najviši godišnji vodostaj u j-toj godini [$j \in (1, 2, \dots, N_i)$], dok, N_i , označava ukupni broj mjerenih podataka u i-tom vremenskom nizu.

Pošto se izvrši testiranje F-testom te ukoliko se dokaže da se varijance u uspoređivanim vremenskim nizovima statistički značajno ne razlikuju primjenjuje se sljedeći standardni oblik t-testa kojim se testira statistička značajnost razlika aritmetičkih srednjaka dva vremenska razdoblja, x_i , i, x_{i+1} . Vrijednost, t, računa se izrazom:

$$t = \left(\bar{x}_i - \bar{x}_{i+1} \right) / s \quad (8)$$

pri čemu se zajednička standardna devijacija oba uzorka, s, računa kako slijedi:

$$s = \sqrt{\frac{(N_i + N_{i+1}) * \left((N_i - 1)s_i^2 + (N_{i+1} - 1)s_{i+1}^2 \right)}{(N_i \cdot N_{i+1}) (N_i + N_{i+1} - 2)}} \quad (9)$$

Nulta hipoteza, H_0 , koja pretpostavlja da se aritmetički srednjaci međusobno statistički značajno ne razlikuju odbacuje se, tj. prihvaća se suprotna hipoteza, H_1 , ako je apsolutna vrijednost, t , veća od kritične vrijednosti, t_{kr} , koja se dobije iz tablica za, $(N_i + N_{i+1}-2)$, stupnjeva slobode. Kritične vrijednosti računane su za dvostrane ili jednostrane vjerojatnosti uz usvojeni prag značajnosti $\alpha=0,05$.

U slučaju da je F-testom dokazano da se varijance uzoraka različitih vremenskih nizova međusobno statistički značajno razlikuju nije moguće primijeniti prethodno izneseni t-test zbog toga jer ako varijance uzoraka ne pripadaju istom osnovnom skupu ne smije se računati njihova zajednička varijanca. Petz (1985.) tada preporuča korištenje testa Cohrana i Coxa u kojem je potrebno izračunati standardnu pogrešku razlike između dva aritmetička srednjaka sljedećim izrazom:

$$s_{\bar{x}_i - \bar{x}_{i+1}} = \sqrt{\frac{S_i^2}{N_i} + \frac{S_{i+1}^2}{N_{i+1}}} \quad (10)$$

Vrijednost, t , računa se sljedećim izrazom:

$$t = \frac{\bar{x}_i - \bar{x}_{i+1}}{s_{\bar{x}_i - \bar{x}_{i+1}}} \quad (11)$$

Postupak testiranja nastavlja se korištenjem standardne tablice t-testa iz koje se očitaju sljedeće dvije vrijednosti: t_i , za, (N_i-1) , stupanj slobode i, t_{i+1} , za, $(N_{i+1}-1)$, stupanj slobode za izabrani prag značajnosti α . Granična vrijednost, t_{kr} , računa se iz sljedećeg izraza:

$$t_{kr} = \frac{s_{\bar{x}_i}^2 \cdot t_i + s_{\bar{x}_{i+1}}^2 \cdot t_{i+1}}{s_{\bar{x}_i}^2 + s_{\bar{x}_{i+1}}^2} \quad (12)$$

U slučaju kad je, $(t < t_{kr})$, prihvaća se hipoteza, H_0 , po kojoj se aritmetički srednjaci međusobno statistički značajno ne razlikuju, dok se u obratnom slučaju prihvaća hipoteza, H_1 , prema kojoj se oni značajno statistički razlikuju (uz uvažavanje odabranog praga značajnosti α), što sa statističkog stanovišta znači da ne pripadaju istom osnovnom skupu.

U tablici 4 dane su vrijednosti o broju podataka, standardnih devijacija i aritmetičkih srednja za tri vremenska niza najviših vodostaja opaženih na vodomjernoj postaji Krotuša. Uz to su navedeni i rezultati testiranja. Na osnovi podataka unesenih u ovu tablicu uočava se da postoji statistički značajna razlika između aritmetičkih srednjaka uzastopnih vremenskih nizova što ukazuje na činjenicu da su izgradnja, a potom i rekonstrukcija tunela, dakle povećanje njegove propusne sposobnosti, značajno utjecali na smanjenje najviših razina voda mjerenih na postaji Krotuša. Potrebno je objasniti dvije vrijednosti, t_{kr} , navedene u tablici 4. Gornja se odnosi na dvostrano testiranje a donja na jednostrano. Uočava se da je jednostrano testiranje uvijek strože od dvostranog.

Tablica 1. Najviši vodostaji opaženi tijekom hidroloških godina u razdoblju od 1926./27. – 1995./96. na vodomjernoj postaji Krotuša ("0"=18,23 m n.m.)

Rbr	hidrološka godina	H _{max} [m n.m.]	Rbr	Hidrološka godina	H _{max} [m n.m.]	Rbr	Hidrološka godina	H _{max} [m n.m.]
1.	1926./27.	31,56	25.	1950./51.	28,11	49.	1974./75.	24,04
2.	1927./28.	28,59	26.	1951./52.	26,18	50.	1975./76.	22,13
3.	1928./29.	29,01	27.	1952./53.	27,63	51.	1976./77.	26,73
4.	1929./30.	30,41	28.	1953./54.	26,56	52.	1977./78.	23,63
5.	1930./31.	28,11	29.	1954./55.	25,71	53.	1978./79.	23,23
6.	1931./32.	26,76	30.	1955./56.	28,09	54.	1979./80.	23,91
7.	1932./33.	28,01	31.	1956./57.		55.	1980./81.	24,49
8.	1933./34.	29,12	32.	1957./58.		56.	1981./82.	24,31
9.	1934./35.	29,56	33.	1958./59.		57.	1982./83.	23,80
10.	1935./36.	32,17	34.	1959./60.		58.	1983./84.	24,55
11.	1936./37.	29,11	35.	1960./61.		59.	1984./85.	24,13
12.	1937./38.	32,65	36.	1961./62.		60.	1985./86.	25,62
13.	1938./39.	25,50	37.	1962/63.	27,03	61.	1986./87.	24,21
14.	1939./40.	25,31	38.	1963/64.	25,73	62.	1987./88.	23,00
15.	1940./41.	25,96	39.	1964./65.	27,56	63.	1988./89.	21,29
16.	1941./42.	27,92	40.	1965./66.	23,99	64.	1989./90.	20,15
17.	1942./43.	27,95	41.	1966./67.	27,07	65.	1990./91.	23,61
18.	1943./44.	28,71	42.	1967./68.	24,75	66.	1991./92.	22,19
19.	1944./45.	28,08	43.	1968./69.	26,90	67.	1992./93.	20,60
20.	1945./46.	27,83	44.	1969./70.	27,85	68.	1993./94.	23,26
21.	1946./47.	26,09	45.	1970./71.	27,05	69.	1994./95.	22,26
22.	1947./48.	26,38	46.	1971./72.	27,51	70.	1995./96.	26,36
23.	1948./49.	24,85	47.	1872./73.	22,83			
24.	1949./50.	26,71	48.	1973./74.	24,93			

U tablicama 5 i 6 dani su rezultati istih analiza za vodomjerne postaje Staševica i Dusina. Potrebno je ukazati na činjenicu da razlika srednjaka između drugog i trećeg vremenskog niza opada u apsolutnim vrijednostima izraženim u metrima. Za Krotušu iznosi 3,04 m, za Staševicu 0,98 m a za Dusinu tek 0,35 m. Ova činjenica jasno svjedoči o ograničenom doseg utjecaja kapaciteta tunela na vodni režim u polju. Identičan se zaključak može izvesti i iz rezultata t-testa. Za slučaj postaje Staševica razlika srednjaka dva vremenska niza statistički je značajna dok se u slučaju još uzvodnije postaje Dusina ova razlika nalazi na granici statističke značajnosti. Dvostrano testiranje upućuje na zaključak da postoji statistička značajna razlika uz usvojeni prag značajnosti od $\alpha=0,05$ dok jednostrano testiranje upućuje na suprotan zaključak, tj. da nema statistički značajne razlike među aritmetičkim srednjacima dva vremenska niza. Gledajući pragmatično i inženjerski na ovaj problem, može se pouzdano zaključiti da je utjecaj tunela ograničen na učinkovitiji odvodnju donjeg dijela polja, dok u odvodnji gornjeg i srednjeg dijela polja igra znatno manju ulogu. Ovu činjenicu treba svakako uzeti u obzir prilikom eventualnog projektiranja povećanja kapaciteta tunela.

Tablica 2. *Najviši vodostaji opaženi tijekom hidroloških godina u razdoblju od 1961./62. –1995./96. na vodomjernoj postaji Staševica ("0"=20,61 m n.m.)*

Rbr	hidrološka godina	H _{max} [m n.m.]
1.	1961./62.	26,37
2.	1962./63.	26,85
3.	1963./64.	25,83
4.	1964./65.	27,54
5.	1965./66.	24,96
6.	1966./67.	26,62
7.	1967./68.	25,11
8.	1968./69.	26,92
9.	1969./70.	27,92
10.	1970./71.	27,07
11.	1971./72.	26,51
12.	1972./73.	24,59
13.	1973./74.	25,44
14.	1974./75.	25,49
15.	1975./76.	25,30
16.	1976./77.	25,71
17.	1977./78.	25,31
18.	1978./79.	25,71
19.	1979./80.	24,93
20.	1980./81.	25,41
21.	1981./82.	25,26
22.	1982./83.	25,09
23.	1983./84.	25,36
24.	1984./85.	25,21
25.	1985./86.	26,02
26.	1986./87.	25,41
27.	1987./88.	25,09
28.	1988./89.	24,73
29.	1989./90.	24,50
30.	1990./91.	25,43
31.	1991./92.	24,92
32.	1992./93.	24,74
33.	1993./94.	25,32
34.	1994./95.	25,28
35.	1995./96.	26,51

Tablica 3. *Najviši vodostaji opaženi tijekom hidroloških godina u razdoblju 1954./55. –1995./96. na vodomjernoj postaji Dusina ("0"=22,03 m n.m.)*

Rbr	Hidrološka godina	H _{max} [m n.m.]
1.	1954./55.	25,07
2.	1955./56.	25,18
3.	1956./57.	
4.	1957./58.	
5.	1958./59.	25,37
6.	1959./60.	
7.	1960./61.	25,68
8.	1961./62.	25,63
9.	1962./63.	26,78
10.	1963./64.	25,97
11.	1964./65.	27,54
12.	1965./66.	25,55
13.	1966./67.	26,63
14.	1967./68.	25,71
15.	1968./69.	26,91
16.	1969./70.	27,87
17.	1970./71.	27,06
18.	1971./72.	26,58
19.	1972./73.	25,45
20.	1973./74.	25,97
21.	1974./75.	26,16
22.	1975./76.	25,30
23.	1976./77.	26,49
24.	1977./78.	25,88
25.	1978./79.	26,12
26.	1979./80.	26,78
27.	1980./81.	26,18
28.	1981./82.	25,92
29.	1982./83.	25,75
30.	1983./84.	26,09
31.	1984./85.	26,05
32.	1985./86.	26,19
33.	1986./87.	26,12
34.	1987./88.	25,64
35.	1988./89.	26,57
36.	1989./90.	25,38
37.	1990./91.	26,04
38.	1991./92.	25,67
39.	1992./93.	25,55
40.	1993./94.	25,97
41.	1994./95.	26,10
42.	1995./96.	26,68

Tablica 4. Osnovni podaci te rezultati t i F testova za tri vremenska niza najviših godišnjih vodostaja mjerenih na postaji Krotuša

vremenski niz - i		članova uzorka N_i	srednjak \bar{H}_i (m n.m.)	standardna devijacija S_i (m)	F - test		t - test		
i	razdoblje				F	F_{kr}	$ t $	$ t_{kr} $	prihvaćena hipoteza
1	1926./27.–1937./38.	12	29,59	3,19	1,63 < 2,14		5,85 > 1,68		H_1
2	1938./39.–1973./74. nedostaje 6 godina	30	26,56	1,96			0,72 > 0,52		5,85 > 2,02
3	1974./75.–1995./96.	22	23,52	2,73					6,98 > 1,68
							6,98 > 2,02		H_1

Tablica 5. Osnovni podaci te rezultati t i F testova za dva vremenska niza najviših godišnjih vodostaja mjerenih na postaji Staševica

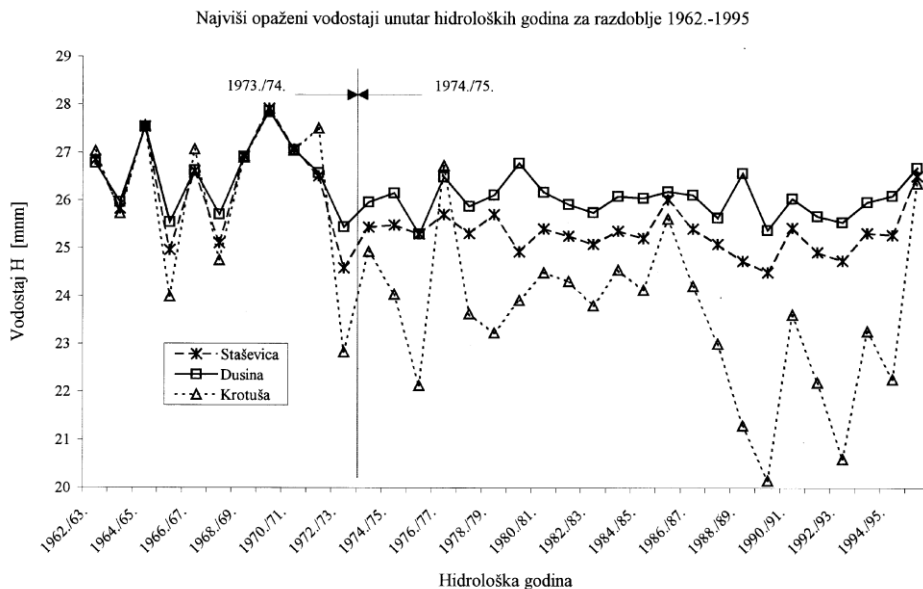
vremenski niz - i		članova uzorka N_i	srednjak \bar{H}_i (m n.m.)	standardna devijacija S_i (m)	F - test		t - test		
i	razdoblje				F	F_{kr}	$ t $	$ t_{kr} $	prihvaćena hipoteza
2	1961./62.–1973./74.	13	26,29	1,06	5,47 > 2,25		3,94 > 1,69		H_1
3	1974./75.–1995./96.	22	25,31	0,19					3,94 > 2,03

Tablica 6. Osnovni podaci te rezultati t i F testova za dva vremenska niza najviših godišnjih vodostaja mjerenih na postaji Dusina

vremenski niz - i		članova uzorka N_i	srednjak \bar{H}_i (m n.m.)	standardna devijacija S_i (m)	F - test		t - test		
i	razdoblje				F	F_{kr}	$ t $	$ t_{kr} $	prihvaćena hipoteza
2	1960./61.–1973./74.	14	26,38	0,61	4,06 > 2,22		1,80 > 1,69		H_1
3	1974./75.–1995./96.	22	26,03	0,15					1,80 < 2,03

Na slici 14 usporedno su ucrtani nizovi najviših opaženih vodostaja u razdoblju 1962./63.—1995./96. na tri prethodno analizirane vodomjerne postaje u Vrgorskom polju. Zanimljivo je istaknuti da je značajna razlika nastala po rekonstrukciji tunela, dakle poslije jeseni 1974. godine. Razlog je najvjerojatnije u činjenici što je dno tunela produbljeno za više od dva metra. U tablici 7 dane su vrijednosti koeficijenta linearne korelacije između nizova svih podataka u razdoblju 1962./63.—1995./96. danih na slici 14. Uočava se da postoji sličnost režima velikih voda koja opada s međusobnim udaljavanjem postaja. Promjene koje je uzrokovala rekonstrukcija tunela mogu se sagledati iz rezultata analiza danih u tablicama 8 i 9 u kojima su upisani koeficijenti linearne korelacije najviših opaženih vodostaja na tri postaje u razdoblju

1962./63.—1973./74. (tablica 8) i 1974./75.—1995./96. (tablica 9), dakle u razdoblju prije i po rekonstrukciji tunela. Prije rekonstrukcije tunela nizovi su na sve tri postaje bili vrlo slični, a koeficijent linearne korelacije kretao se od 0,90 do 0,99. Produbljenje dna tunela i povećanje njegove propusne moći smanjilo je značajno ove koeficijente na vrijednosti od 0,46 do 0,82.



Slika 14

Tablica 7. *Koeficijenti linearne korelacije između nizova najviših godišnjih vodostaja opaženih na tri postaje u razdoblju 1962./63.-1995./96.*

r	KROTUŠA	STAŠEVICA	DUSINA
KROTUŠA	1	0,870	0,753
STAŠEVICA	0,870	1	0,858
DUSINA	0,753	0,858	1

Tablica 8. *Koeficijenti linearne korelacije između nizova najviših godišnjih vodostaja opaženih na tri postaje u razdoblju 1962./63.-1973./74. prije rekonstrukcije tunela*

r	KROTUŠA	STAŠEVICA	DUSINA
KROTUŠA	1	0,949	0,901
STAŠEVICA	0,949	1	0,987
DUSINA	0,901	0,987	1

Tablica 9. *Koeficijenti linearne korelacije između nizova najviših godišnjih vodostaja opaženih na tri postaje u razdoblju 1974./75.-1995./96. poslije rekonstrukcije tunela*

r	KROTUŠA	STAŠEVICA	DUSINA
KROTUŠA	1	0,816	0,602
STAŠEVICA	0,816	1	0,464
DUSINA	0,602	0,464	1

U tablici 10 date su vrijednosti aritmetičkih srednjaka nizova najviših opaženih vodostaja na tri vodomjerne postaje u razdoblju 1962./63.—1995./96. i dva podrazdoblja 1962./63.—1973./74. (prije rekonstrukcije tunela) i 1974./75. do 1995./96. (po rekonstrukciji tunela). Ujedno su navedeni i rezultati t-testa

Tablica 10. *Aritmetički srednjaci nizova najviših godišnjih vodostaja opaženi na tri postaje i u tri različita razdoblja s rezultatima t-testa*

POSTAJA	1962./63. - 1995./96.		1962./63. - 1973./74.		1974./75. - 1995./96.	
	\bar{H} (m n.m.)	t - test	\bar{H} (m n.m.)	t - test	\bar{H} (m n.m.)	T - test
Krotuša	24,43	H ₁	26,10	H ₀	23,52	H ₁
Staševica	25,65		26,28		25,31	
Dusina	26,20	H ₀	26,50	H ₀	26,03	H ₀

Zaključak prethodnih analiza očigledan je. Rekonstrukcija tunela izazvala je bitno sniženje najviših godišnjih razina vode mjenjenih na postaji Krotuša dok je njen utjecaj na uzvodne postaje bio značajno slabiji.

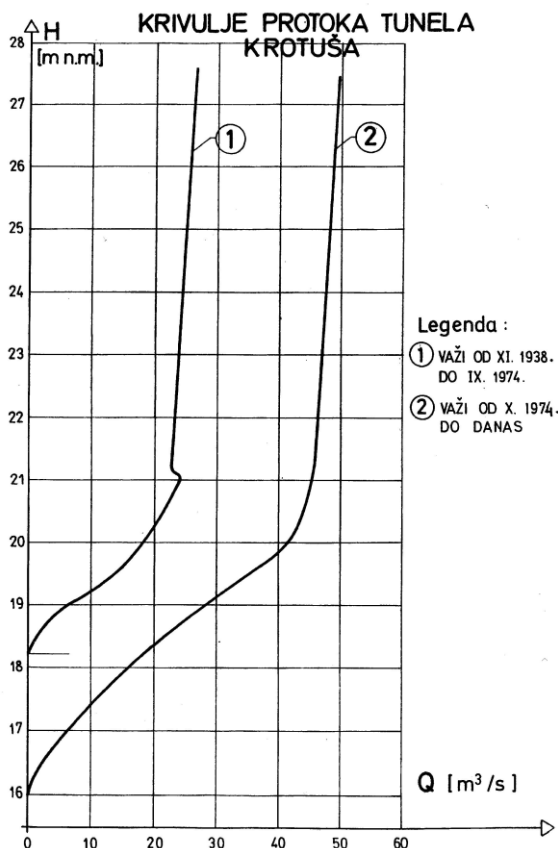
Nastup velikih voda u polju Rastok i njegov utjecaj na velike vode u Vrgorskom polju nije bilo moguće izučavati stoga što se ne raspolaže mjenjenim informacijama nužnim za ovu vrstu analize. Jedino što se moglo učiniti je bilo usporediti trenutke pojave vrhova hidrograma u polju Rastok mjenjene na postaji Voznik s trenutcima pojave vrhova hidrograma na postajama u Vrgorskom polju. Konačni je zaključak da su režimi nastupa velikih voda vrlo slični, ali ne i identični. Njihov međuodnos postoji, ali je dubinu veze nemoguće istražiti na osnovi postojećih podloga. Očigledno je da vode s horizonta polja Rastok dotječu u Vrgorsko polje te da su im hidrološki režimi slični i međusobno uvjetovani, ali je na osnovi postojećih podloga nemoguće detaljnije proniknuti u dubinu njihove međuzavisnosti.

Velike vode

Određivanje protoka u Vrgorskom polju, a posebno onih najviših godišnjih, složen je zadatak o čijim je vidovima prethodno bilo govora tijekom rasprave vezane s jednadžbom bilance. Najveće poteškoće uzrokuje činjenica poplavljenosti polja koja utječe na pojavu uspora na vodomjernim postajama Staševica pa čak i Dusina te nedovoljno pouzdano poznavanje kapaciteta gutanja ponora. Jedina metoda koja u takovim uvjetima obećava barem dijelom pouzdane rezultate je primjena jednadžbe bilance voda za slučaj transformacije hidrograma poplavnih voda u predponorskoj retenciji. Njen osnovni izraz glasi:

$$Q_u = Q_i \pm \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (13)$$

pri čemu je, Q_u , ulazni protok u predponorsku retenciju, Q_i , izlazni protok iz iste retencije, ΔV , promjena volumena retencije u vremenskom inkreментu, Δt . Pošto se u najvećem dijelu razdoblja za koji se vrši proračun najvećih godišnjih protoka raspolagalo samo s protocima očitanim jednom dnevno vremenski inkrement obrade, Δt , morao je biti usvojen u iznosu od 24 sata (jedan dan). Ova činjenica mogla bi utjecati na to da su nastavno određeni najveći protoci nešto niži od onih koji su se trenutačno mogli pojaviti u polju. Izlazni protok iz polja određen je kao zbroj izlaza kroz ponore i izlaza kroz tunel. Krivulja kapaciteta gutanja svih ponorskih zona usvojena je od Pavletića (1967.) dok su krivulje protoka tunela Krotuša usvojene od Pavletića (1967.) i Bonaccija (1977.). Grafički prikazi dani su na slici 15.



Slika 15

U tablici 11 dane su vrijednosti najvećih godišnjih protoka izračunate korištenjem bilansne jednadžbe 13. Uočava se da se radi o razdoblju od 70 godina unutar kojeg se najveći protok zbog nedostatka podataka nije mogao odrediti za ukupno 14 godina i to za podrazdoblja 1939./40.—1944./5., 1956./7.—1960./1. i 1975./6.—1977./8.

Pošto je prilikom izučavanja najviših godišnjih vodostaja u Vrgorskom polju ustanovljeno da se oni značajno razlikuju u podrazdobljima u zavisnosti od kapaciteta tunela smatralo se potrebnim istu analizu izvršiti i za nizove najvećih godišnjih protoka. U tablici 12 navedene su vrijednosti srednjaka te najvećih i najmanjih protoka u pojedinim podrazdobljima kao i rezultati t-testa. Uočava se da se srednji protoci za sva tri podrazdoblja ne razlikuju statistički značajno što je i bilo za očekivati. Izgradnja i rekonstrukcija tunela je mogla utjecati isključivo na razinu i duljinu trajanja poplava u Vrgorskom polju. Ne postoji razlog da tunel svojim povećanim kapacitivnim sposobnostima utječe na promjenu dotoka u polje, prvenstveno na promjenu najvećih protoka. Stoga se niz najvećih godišnjih protoka u Vrgorskom polju može smatrati homogenim u cijelom razdoblju analize, bez obzira na hidrotehničke zahvate koji su vršeni tijekom tog vremena. Ovaj zaključak omogućio je da ga se cjelovito analizira bez potrebe dijeljenja na podrazdoblja.

Tablica 11. *Najveći godišnji protoci u Vrgorskom polju u razdoblju 1926./27.-1995./96.*

Rbr	hidrološka godina	Q_{\max} [m ³ /s]	Rbr	Hidrološka godina	Q_{\max} [m ³ /s]	Rbr	Hidrološka godina	Q_{\max} [m ³ /s]
1.	1926./27.	103	25.	1950./51.	84	49.	1974./75.	078
2.	1927./28.	067	26.	1951./52.	71	50.	1975./76.	
3.	1928./29.	109	27.	1952./53.	87	51.	1976./77.	
4.	1929./30.	112	28.	1953./54.	81	52.	1977./78.	
5.	1930./31.	075	29.	1954./55.	86	53.	1978./79.	103
6.	1931./32.	052	30.	1955./56.	73	54.	1979./80.	097
7.	1932./33.	104	31.	1956./57.		55.	1980./81.	134
8.	1933./34.	085	32.	1957./58.		56.	1981./82.	114
9.	1934./35.	144	33.	1958./59.		57.	1982./83.	104
10.	1935./36.	093	34.	1959./60.		58.	1983./84.	138
11.	1936./37.	106	35.	1960./61.		59.	1984./85.	104
12.	1937./38.	135	36.	1961./62.	101	60.	1985./86.	127
13.	1938./39.	077	37.	1962./63.	106	61.	1986./87.	110
14.	1939./40.		38.	1963./64.	083	62.	1987./88.	093
15.	1940./41.		39.	1964./65.	119	63.	1988./89.	068
16.	1941./42.		40.	1965./66.	071	64.	1989./90.	048
17.	1942./43.		41.	1966./67.	116	65.	1990./91.	101
18.	1943./44.		42.	1967./68.	084	66.	1991./92.	073
19.	1944./45.		43.	1968./69.	154	67.	1992./93.	066
20.	1945./46.	67	44.	1969./70.	121	68.	1993./94.	101
21.	1946./47.	77	45.	1970./71.	153	69.	1994./95.	90
22.	1947./48.	79	46.	1971./72.	141	70.	1995./96.	137
23.	1948./49.	55	47.	1872./73.	102			
24.	1949./50.	74	48.	1973./74.	079			

Tablica 12. *Svojsvene vrijednosti najvećih godišnjih dotoka u Vrgorsko polje u tri podrazdoblja određene na osnovi kapacitivnih sposobnosti tunela Krotuša s naznakom rezultata t-testa*

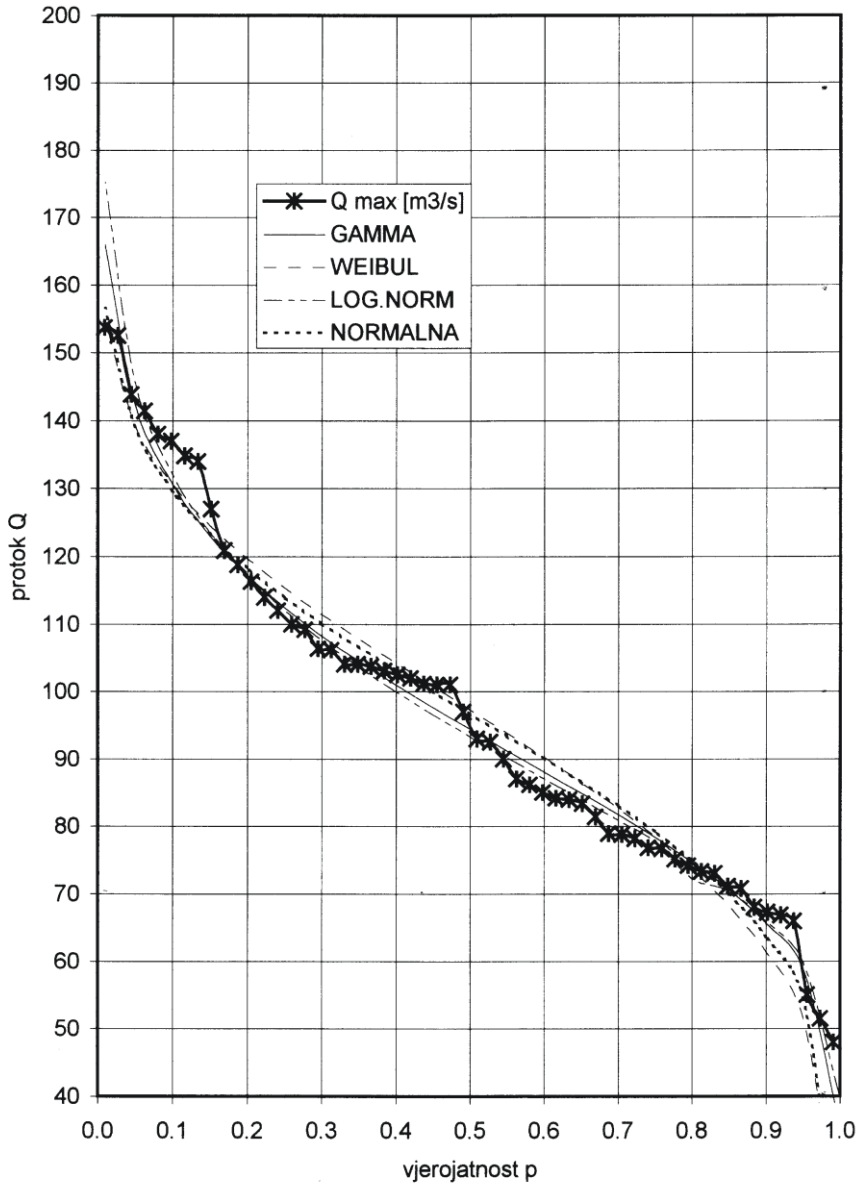
vremenski niz - i		broj članova uzorka N_i	srednji tok \bar{Q}_{\max} [m ³ /s]	Rezultat t-testa prihvaćena hipoteza	najmanji godišnji protok u razdoblju [m ³ /s]	najveći godišnji protok u razdoblju [m ³ /s]
i	RAZDOBLJE					
1	1926./27. - 1937./38.	12	99	H_0	52	144
2	1938./39. - 1973./74. Nedostaje 11 godina	25	94		55	153
3	1974./75. - 1995./96. Nedostaju 3 godine	19	99	H_0	48	138

Tablica 13. *Rezultati prilagodbe četiri krivulje raspodjele na empirijske podatke najvećih godišnjih protoka u Vrgorskom polju*

POVRATNO RAZDOBLJE (god.)	PROTOK Q [m ³ /s] određen sljedećom krivuljom raspodjele			
	gamma	Weibul	log-normalna	normalna
2	94	97	93	97
5	117	120	117	118
10	131	131	132	130
20	142	139	146	139
25	146	142	150	142
50	156	149	163	150
100	166	155	175	156
200	175	160	188	163
500	188	167	204	171
1000	196	171	216	176

Koristeći niz od 56 najvećih godišnjih protoka izračunatih u Vrgorskom polju, navedenih u tablici 11, nastavno su izvršene prilagodbe četiri krivulje raspodjele na navedeni empirijski niz podataka. Grafički prikaz rezultata proračuna dan je na slici 16, a numerički su rezultati dani u tablici 13. Za ispitivanje dobrote prilagodbe krivulja na empirijske podatke korišteni su test Kolmogorova i χ^2 test. Oba su testa u sva četiri slučaja upotrebljenih krivulja raspodjela potvrdila statistički značajno slaganje. U konkretnom slučaju preporuča se za daljnje korištenje upotrebljavati rezultate log-normalne krivulje raspodjele pošto ona daje najveće vrijednosti. Na taj način se barem djelomično ublažava efekt relativno dugog inkrementa vremena obrade od 24 sata, a ujedno se razumno stavlja na stranu sigurnosti.

Vjerojatnost pojave najvećih protoka Matice Vrgorske



Slika 16

Literatura

- 1 **Bögli, A.** 1980. Karst Hydrology and Physical Speleology. Springer Verlag, Berlin.
- 2 **Bonacci, O.** 1977. Analiza hidroloških podloga za projekt regulacije Matice vrgorske s ciljem određivanja velikih voda. GI OOUR FGZ Split, (studija, neobjavljeno).
- 3 **Bonacci, O.** 1986. Hidrološka analiza poplava u poljima u kršu. Vodoprivreda 18 (102-103). 219-229.
- 4 **Bonacci, O.** 1987. Karst Hydrology. Springer Verlag, Berlin.
- 5 **Bonacci, O.** 1988. Piezometer - the main source of hydrologic information in the karst. Vodoprivreda 20 (115). 265-278.
- 6 **Bonacci, O.** 2003. Poljes. U: J. Gunn (ur.) Encyclopedia of Caves and Karst Science. Fitzroy Dearborn, New York. 603-604.
- 7 **Pavletić, I.** 1967. Vrgorsko jezero – hidrološka obrada. Republički HMZ, Zagreb. (studija, neobjavljeno).
- 8 **Pavlić, I.** 1965. Statistička Teorija i Primjena. Panorama, Zagreb
- 9 **Petz, B.** 1985. Osnovne Statističke Metode za Nematematičare. Sveučilišna Naklada Liber, Zagreb.
- 10 **Sweeting, M.M.** 1972. Karst Landforms. Macmillan, London. Trudgill, S. 1985. Limestone Geomorphology. Longman, London.

8

RACIONALNO KORIŠTENJE VODE U POLJOPRIVREDI

dr.sc. Marko Josipović
Poljoprivredni institut Osijek

Prof.dr.sc. Madjar Stjepan
Dr.sc. Jasna Šostarić
Poljoprivredni fakultet Osijek

Uvod	1
Osnove racionalnog navodnjavanja	2
I Utvrđivanje čimbenika koji opravdavaju navodnjavanje	3
II Potrebe biljaka za vodom i evapotranspiracija	3
Transpiracijski koeficijenti	4
Isparavanje sa slobodne vodene površine	4
Evapotranspiracija	5
Bilanca vode u tlu	6
III TLO I VODA	7
Opća fizička svojstva tla	9
Poroznost tla	10
Kategorije vode u tlu i vodne konstante	10
Vodne konstante tla i njihova primjena u navodnjavanju	12
Zrak u tlu	14
Kapacitet za zrak	14
Infiltracija	15
Brzina provodljivosti vode kroz tlo	15
Poteškoće u navodnjavanju	16
a) Poteškoće u navodnjavanju sa stanovišta tla	16
b) Poteškoće u navodnjavanju sa stanovišta korištenja sustava za navodnjavanje	17
Zaključna razmatranja	18
Literatura	18

Uvod

Navodnjavanje je dodavanje vode tlu s ciljem povećavanja njenog sadržaja u tlu, a time i osiguravanja biljaka lakopristupačnom vodom u slučajevima prirodnog nedostatka potrebne vode za normalan rast i razvoj biljaka. Temeljem navedenog navodnjavanje zavisi o brojnim čimbenicima i njihovom međudjelovanju: klimi, svojstvima tla kao i potrebe za vodom pojedine kulture.

Pišemo li o racionalnom korištenju vode za potrebe poljoprivrede, neizostavno trebamo spomenuti i pravilno projektiranje (Vučić, 1976., Gereš, 1996a., Kos., 1996a., 1996b., 1996c., Plišić, 1996.) izgradnju i gospodarenje hidrotehničkim objektima (Marušić, 1999., Marušić i sur. 1999., 2004., Kos, 1996a., Šoštarčić i sur. 1994.) koji se osim za odvodnju mogu koristiti i za navodnjavanje.

Riječ racionalno (franc. *ration* = dnevni obrok ili porcija hrane za određeno vrijeme; lat. *ratio, -onis* = između ostalog znači svrsishodan, dobro organiziran, potkrijepljen iskustvom, znanstveno utvrđen, Klaić, 1990.) u poljoprivredi ukazuje da trebamo sa vodom dobro gospodariti. Izvođenjem riječi lat. racionalni je skup mjera za popravljavanje, pojednostavljenje i pojeftinjenje procesa proizvodnje, povećanje proizvodnosti rada, postizanje proizvodnje visoke kakvoće. Voda je velika blagodat čovječanstva koja je istovremeno i nužna za njegov opstanak. U poljoprivrednoj proizvodnji su nam vrlo značajne padaline kao i njihov raspored, ali i drugi klimatski elementi. Stoga je potrebno podatke o cijelom klimatskom potencijalu na pojedinom slivu, vodnom području i teritoriju države uključiti u planske dokumente za strategiju korištenja voda (Josipović i sur., 1994., 2003., Petrićec i Margeta 2003., Petrović i sur. 1994.), zaštitu voda i zaštitu od štetnog djelovanja voda (Gajić-Čapka i Zaninović, 2004.).

Vječita su pitanja i dvojbe u praksi i znanosti navodnjavanja: Kako navodnjavati racionalno? Kada početi navodnjavati? Koliko vode dodati tlu? Koje elemente koristiti za obračun potrebne količine vode? Kada smo sigurni da smo dodali dovoljno vode za biljku? Treba li uopće navodnjavati ako to značajno povećava troškove? Navodnjavamo li na temeljima održive poljoprivrede i štedimo li vodu dovoljno?

Analizom i opisom bitnih čimbenika kojima treba posvetiti pozornost pri navodnjavanju približiti ćemo značaj tla i njegovih važnijih svojstava za navodnjavanje. Obzirom na veliku raznolikost tala, a time i brojne specifičnosti glede vodnih svojstava, zahtjeva kultura za vodom i načinom navodnjavanja brojne su mogućnosti i kombinacije uspješnog navodnjavanja poljoprivrednih kultura.

Osnove racionalnog navodnjavanja

Potreba za racionalnim korištenjem vode je rodilo ideju o “Conservation irrigation” u SAD, “Novuju sistemu orošenja” u SSSR-u i “Irrigazione razionale” u Italiji. Spomenute ideje obuhvaćaju sve agrotehničke i hidrotehničke mjere kojima se postiže pravilno i uspješno navodnjavanje bez štetnih posljedica, koje se nikako ne mogu i ne smiju smatrati neizbježnim pratiteljima navodnjavanja, već su pretežno rezultat neracionalnog gospodarenja vodom (Vučić, 1976).

“*Novuju sistema orošenja*” u SSSR-u na prvom mjestu je uvođenje sezonskih kanala u okviru unutrašnje kanalske mreže, tako da kao stalni ostaju magistralni i dionični kanali. Tu je i kompleks mjera koje se odnose na primjenu suvremenih načina navodnjavanja i poboljšane tehnike navodnjavanja, novu agrotehniku uz poboljšanje kakvoće obrade i njege usjeva. “*Novuju sistema orošenja*” ima sljedeće prednosti: obrađuju se površine koje su ranije bile pod stalnim kanalima, i na taj način povećava se površina obradivog tla za 4—6%, a

u nekim slučajevima čak za 10—12%. Time se uklanja i pravi rasadnik korova, jer su stalni kanali to bili u velikoj mjeri, i to ne samo na njihovim kosinama i obodima, već je širenje korova vršeno i pri navodnjavanju; znatno se smanjuju gubici vode filtracijom u unutrašnjoj kanalskoj mreži; stvaraju se uvjeti za poboljšanje organizacije rada i povećanje produktivnosti (Vučić, *ibid.*).

Naziv “*Conservation irrigation*” je dio stručne terminologije navodnjavanja. Jednostavno prevedeno “*Conservation irrigation*” je primjena vode i korištenje navodnjavanih površina na način koji omogućava visoku proizvodnju bez štetnih posljedica, danas je poznato i pod nazivom održiva poljoprivreda “*sustainable agriculture*”.

Za američkog farmera “*Conservation irrigation*” znači štednju vode, sprječavanje erozije, bolje urode, manje troškove proizvodnje i osiguranje stabilne proizvodnje navodnjavanih kultura. Za mnoge poljoprivredne proizvođače to znači početak rješavanja problema zasljanjivanja i drugih brojnih poteškoća u praksi navodnjavanja. Svuda gdje su problemi navodnjavanja u bilo kojem vidu izraženi principi “*Conservation irrigation*” se postavljaju kao hitna nužnost. Do skoro jedina preokupacija farmera u USA bila je davanje što većih količina vode biljkama. Malo je pažnje posvećivano čuvanju tla i štednji vode, a rasipništvo u vodi stvara pustoš na tlu. “*Conservation irrigation*” se uspostavlja na gospodarstvu sljedećim postupkom (Agricultural Handbook, 61, 1954): inventarizacija tla i vode na farmi. Zemljište se mora ispitati u pogledu moćnosti slojeva, teksture, strukture, vodnih svojstava, plodnosti. Na karti se trebaju prikazati nagibi terena, ranija erozija. Količine vode moraju biti poznate radi općeg razvoja farme i navodnjavanja. Izbor načina navodnjavanja prilagođen je zemljištu i uzgajanim kulturama. Izrađuje se plan korištenja i raspodjele vode, priprema tla i racionalno se primjenjuje voda pri navodnjavanju — odgovarajući obroci navodnjavanja, odgovarajuća jačina umjetne kiše, umjereno jaka brzina vode pri navodnjavanju brazdama, intenzitet kišenja je u skladu sa infiltracijom.

“*Irrigazione razionale*” u osnovi obuhvaća iste elemente koji teže većem koeficijentu korisnog djelovanja sustava, racionalnim normama i obrocima navodnjavanja sa ciljem da se određenom količinom vode kojom se raspolaže proširi navodnjavana površina.

Održiva poljoprivreda “*sustainable agriculture*” je noviji naziv ali su ideje i pravci racionaliziranja u poljoprivredi kada su u pitanju tlo, voda, čuvanje okoliša, umjerena potrošnja vode pri navodnjavanju, socijalna stanovišta proizvodnje, kontinuirana nazočnost struke u proizvodnji, ekonomski pristup proizvodnji, zapravo, većim djelom bile sadržane u navedenim pravcima racionalizacije u svijetu. U održivoj poljoprivredi se uključuje značajno više čimbenika koje treba kontrolirati, dakle, prisutna je sveobuhvatnost i još širi pristup poljoprivredi od dosadašnjih.

Racionalno navodnjavanje ogleda se u svim segmentima proizvodnog procesa (Tomić i Mađar, 1989., Tomić i sur. 1991., Tomić, 1992., Tomić i Marušić 1994., Kos, 1992., 1993b.) kao i svim radovima koji prethode proizvodnji (Kos i sur., 1993., Kos, 1996a., 1997a., 1997b., Tomić i sur. 1994., Marušić, 1999., Marušić i sur. 1999., Gereš, 1996b.), a u njenoj su funkciji.

I Utvrđivanje čimbenika koji opravdavaju navodnjavanje

Razlog poljoprivredne proizvodnje je svakako postizanje uroda poljoprivrednih kultura i vječita težnja da on bude što veći, a da se pri tome ne naruši njegova kakvoća. O klimatskim prilikama zavisi prirodno pritjecanje vode u tlo kao i veličina evapotranspiracije, o tlu i njegovim svojstvima ovisi kako će padaline biti prihvaćene i kako će tlo njima "gospodariti" tijekom godine, a uzgajane kulture imaju određene potrebe za vodom ovisno o pojedinoj fazi razvoja i razvijenosti korijenovog sustava u zavisnosti od klime i tla. Dakle, navedeno ukazuje da se pojedinačnom analizom navedenih čimbenika ne može dobiti prava predstava o potrebi za navodnjavanjem određenog područja, već sveobuhvatnom analizom svih čimbenika koji su međusobno povezani.

Uobičajena analiza klimatskih čimbenika za potrebe poljoprivrede uglavnom obuhvaća padaline, temperaturu zraka, relativnu vlagu zraka i vjetar. Posebna pozornost posvećuje se padalinama jer od njih zavisi količina vode u tlu i količina pristupačne vode u tlu za normalan rast i razvoj biljaka. Za uspješnu poljoprivrednu proizvodnju je bitna ukupna količina padalina tijekom godine, ali je značajnija količina tijekom vegetacije kao i njihova raspodjela (Mađar 1987., Mađar i sur., 1995.).

Za procjenu potreba za navodnjavanjem su poznati različiti koeficijenti suše ili "kišni faktori" koji uz padaline uključuju i temperature zraka. Vrlo su praktične i pouzdane analize količine padalina i njihove vjerojatnosti po dekadama tijekom vegetacije, ali i pojava sušnih razdoblja i njihova učestalost.

Za izračun bilance vode sliva, područja ili utvrđivanje raspoloživosti vode (Gereš, 1997., Bonacci i Horvat, 2003., Vidaček i sur. 1993., Brnić-Levanda, 1994., Romić i sur., 1994.) i norme navodnjavanja pri projektiranju sustava navodnjavanja važni su podaci o vjerojatnosti pojave (Vučić, 1976., Tomić, 1988.) određenih količina padalina. Stoga se, u zavisnosti o količini vode kojom raspoložemo i planiranom intenzitetu korištenja tla koristi različita sigurnost vjerojatnosti padalina od 25 do čak 90%.

Srednje mjesečne temperature zraka su obično dovoljne za obračun temperaturne sume za vrijeme vegetacije jer je temperatura zraka stabilan klimatski element analizirajući višegodišnje podatke.

II Potrebe biljaka za vodom i evapotranspiracija

U Svijetu su brojni autori u znanstvenim radovima, studijama ili stručnim radovima izračunavali potrebe biljaka za vodom ili potrebu navodnjavanja, a u Hrvatskoj su navedeno područje značajnije radili slijedeći autori Tomić i Marinčić 1987., Tomić, 1988., Tomić i Romić., 1992., Romić i sur., 1996., Romić i Tomić 1997., Šošarić, 1996., Bonacci, 1992., 2003., Gereš, 1997., Josipović i sur. 1995., Kos., 1993., 1984., Mađar i sur., 1996., Pušić i Vidaček 1971.

Prije projektiranja sustava za navodnjavanje potrebno je utvrditi koja je količina vode neophodna za zadovoljavanje potreba transpiracije pojedinih biljaka i isparavanje iz tla. Pri tome se postavlja kao osnovni zahtjev optimalno snabdi-

jevanje biljaka vodom tijekom vegetacije. *Pravilno određivanje potreba biljaka za vodom je prvi korak racionalizacije navodnjavanja.*

Transpiracijski koeficijenti

Još 1848. godine prvi pokušaj utvrđivanja korelativne veze između uroda pojedinih biljaka, izraženog u vidu ukupno proizvedene suhe tvari i utrošene vode proveo je Lawes Rothamstedu u Engleskoj. Nakon njega je to uz brojne modifikacije metoda istraživalo puno znanstvenika što je rezultiralo brojnim podacima i obimnim istraživačkim materijalom.

Spomenuti odnos (suha tvar biljke: utrošena voda) izražen kao transpiracijski koeficijent pokazivao je koliko je vode potrebno za proizvodnju iste količine suhe tvari, računajući pri tome sve biljne dijelove (korijen, list, stabljiku, cvijet i plod).

Bez obzira što se vrlo brzo utvrdilo da na vrijednost transpiracijskog koeficijenta utječu mnogi čimbenici (klimatski, pedološki, agrotehnički), transpiracijski koeficijenti dobiveni ovom metodom dugo su se upotrebljavali u obračunima (vjerojatno zbog jednostavnosti). *Međutim, kada je riječ o obračunima potrebnih količina vode u navodnjavanju transpiracijski koeficijenti predstavljaju samo jednu etapu u nastojanjima da se približimo što točnijim vrijednostima količina vode koje treba osigurati biljkama.* Obračuni su uvijek opterećeni većim ili manjim pogreškama. Primjerice, transpiracijski koeficijent se smanjuje povećanjem plodnosti tla odnosno povećanjem uroda: što je veća plodnost tla, bolji uvjeti ishrane biljaka, bolja agrotehnika, što je veći urod i struktura tla, to je potrebna manja količina vode za jedinicu uroda (Kostjakov, cit. Vučić 1976.).

Isparavanje sa slobodne vodene površine

Skupina autora je u svojim istraživanjima pokušala potrebe biljaka za vodom povezati sa isparavanjem sa slobodne vodene površine, a izračun bi bio lak jer je svugdje u svijetu rasprostranjen sustav meteoroloških postaja. Osnova navedenom polazištu je transpiracija, pri optimalnom snabdjevanju biljaka vodom, kao i isparavanje sa tla i slobodne vodene površine da podliježu zakonima fizike — isparavanje. Transpiracija neosporno zavisi od uvjeta vanjske sredine kao i od svojstava biljke. Stoga je ona, biofizički proces te ukupnu potrebu biljaka za vodom (transpiracija + isparavanje) treba razumjevati kao “približno ekvivalentnom isparavanju sa slobodne vodene površine”. Temelje za ove pretpostavke postavio je Dalton još prije više od 180 godina kada je postavio osnovni zakon isparavanja sa slobodne vodene površine. Obavljena su brojna istraživanja temeljena na Daltonovom zakonu uz razne modifikacije. Rezultate temeljene na evaporaciji kao osnovi za izračun potreba biljaka za vodom bez obzira na eventualne koeficijente korekcije, nije moguće prihvatiti kao precizne. Potrebe za vodom je potrebno odrediti preciznije i tada utvrditi korelativne veze dobivenih vrijednosti i isparavanja sa slobodne vodene površine. *Ovako dobivene formule i odnosi imaju regionalni značaj, ali i veliku praktičnu vrijednost za određeno područje.*

Evapotranspiracija

Stvarna potrošnja ili najtočnija potrošnja je u prirodnim uvjetima jer biljka potroši onoliko koliko joj je na raspolaganju u tlu i iz rezervi koje su bile u tlu prije početka vegetacije u skladu i uvjetima okoline. Stvarne ili vrlo približne stvarnoj vrijednosti potrebe biljaka za vodom mogu se dobiti istraživanjem odnosno mjerenjem različitim metodama. Pri tome je svakako bitno odvojiti potrošnju vode od strane biljke i ukupnu vodu koja je potrošena. Drugim rječima biljke u prirodnim uvjetima obično nemaju dovoljno vode i često ne mogu u potpunosti zadovoljiti potrebe za vodom. Ovako, u prirodnim uvjetima utrošenu količinu vode, na transpiraciju i evaporaciju, zovemo stvarna evapotranspiracija (ETR).

Kada omogućimo biljci optimalno snabdjevanje vodom, dakle, prema njezinim potrebama u određenoj sredini, navedena količina vode potrošena za transpiraciju i evaporaciju naziva se potencijalna evapotranspiracija (ETP). U Američkoj literaturi se potencijalna ETP izražava na razvijenom usjevu lucerne u navedenim uvjetima pa se za druge kulture vrši preračunavanje ili korekcija. Pridržavajući se definicije u američkoj literaturi se ETP naziva “consumptive use”, u svjetskoj literaturi “water consumption”, u sovjetskoj literaturi “vodopotreblenie”.

Vrijednosti potencijalne evapotranspiracije koriste nam kao osnova gotovo svih obračuna u melioracijama (odvodnji i navodnjavanju) odnosno kao neophodan čimbenik u bilanci vode, pri utvrđivanju nedostatka odnosno viška vode tijekom vegetacije. Direktno mjerenje ETP-a je manje istraživano zbog njegove zahtjevnosti, dok su indirektni načini određivanja ETP-a više korišteni od znanstvenih i stručnih radova do brojnih studija za potrebe navodnjavanja ili raznih elaborata.

Određivanje ETP nije jednostavno, jer zahtjeva određenu opremu, preciznost i pouzdanost podataka, stoga, su razrađene brojne metode za indirektno izračunavanje ETP. Indirektna određivanja ETP-a se uglavnom temelje na rezultatima mjerenja klimatskih elemenata koji se uvrštavaju u formule i modele. Bez obzira na dorađivanje metoda i značajan napredak pri određivanju istog, nije utvrđena ili inovirana indirektna metoda koja bi imala univerzalnu primjenu, već su one isključivo pogodne za lokalnu ili regionalnu primjenu (Vučić, 1976., Kos i sur., 1993., Romić i sur. 1994., 1996.).

Određena “provjera” izračuna ETP-a je najbolja u vrlo povoljnim odnosno rodnim godinama, dakle, kada se u prirodnim uvjetima postignu približno idealni uvjeti i visoki urodi. Ukoliko je u takvim uvjetima izračun stvarne i izračunate ETP približan, tada se metoda može smatrati približno točnom za navedeno područje. Ovakvu provjeru je svakako potrebno obaviti za svaku kulturu pojedinačno i za više “optimalnih” ili “rodnih” godina.

Direktne metode koriste padaline, padaline i navodnjavanje, navodnjavanje i podzemnu vodu za mjerenje vrijednosti ETP-a (Kos, 1993a.). Od direktnih metoda mjerenja ETP-a najpoznatije su: lizimetri i evaporimetri; mjerenje ETP-a u poljskim — prirodnim uvjetima; utvrđivanje ETP-a mjerenjem sadržaja vode u tlu; utvrđivanje ETP-a mjerenjem osciliranja podzemne vode; integralna

metoda utvrđivanja ETP-a: metoda mjerenja priljeva i otjecanja vode. Tu pripadaju i brojne metode koje nisu u literaturi zabilježene, a pogodne su za određene lokalne uvjete i mogu biti vrlo učinkovite.

Povezanost ili veliki utjecaj klimatskih čimbenika (temperature zraka, relativne vlage, tlaka vodene pare, deficita vlage zraka, sati sijanja sunca i dr.) na vrijednosti ETP-a rezultirao je nastankom brojnih indirektnih metoda za njegovo određivanje. Neke metode su uzimale nekoliko klimatskih čimbenika (Penman, Turck), a brojne su metode koristile samo jedan element (uglavnom temperaturu zraka). U većini slučajeva su se koristili samo klimatološki čimbenici, ne vodeći računa o biljci koja također obzirom na svoje specifičnosti ima značajan utjecaj (izuzetak je metoda Blaney-Criddle-a). Indirektne metode utvrđivanja ETP-a su daleko brojnije, a najznačajnije su: metoda Thornthwaitea; Blaney i Criddle-a; Penman-a; Turc-a; Bouchet-a; Šarov-a; Alpatjev-a; Šaumjan-a. Na području Hrvatske su brojni autori u različite svrhe koristili brojne izračune ETP-a (Bonacci, 1992., 1993., 2003., Gereš 1993a., 1993b., Josipović i sur., 1995., Kos, 1993a., 1993b., Romić i sur., 1996., Tomić, 1988, Vidaček i sur., 1993. Prikazujući nazive i kriterije čak 38 metoda određivanja ETP-a Kos (1993a i 1993b.) navodi da svaku metodu treba analizirati i kalibrirati za pojedino područje.

Danas su rasprostranjeni različiti modeli i kompjutorski programi koji uključuju više čimbenika pri izračunu ETP-a, a prednost je i u bržem izračunu. Koristeći klimatološke podatke sa satelita ili sa klimatološke postaje u polju moguće je direktno izračunavati potrebe kultura za vodom na temelju pokazatelja u polju. Temeljni polazni podaci za takav izračun su trenutni sadržaj vode u tlu, temperatura zraka, relativna vlaga zraka, brzina vjetra, insolacija i podaci o potrebama kulture unešeni u kompjutorski program.

Bilanca vode u tlu

Bilanca vode agropedološkog sloja tla predstavlja kvantitativne promjene u sadržaju vode u određenom razdoblju na određenom području, pri čemu se obračunava svaki priljev i potrošnja vode iz kojih su proizašle navedene promjene. U melioracijama, a stoga i u utvrđivanju bilance vode u tlu, potencijalna evapotranspiracija je osnova od koje se polazi. Kada je ukupan priljev vode manji od ETP tada postoji potreba za navodnjavanjem, no ukoliko je vodna bilanca znatno veća od ETP treba obaviti odvodnju vode iz tla. Pri tome se obavlja detaljna analiza priljeva vode: učinkovitost padalina, priljev od podzemne vode, otjecanje, filtracija u dublje slojeve. Ukoliko ne postoje podaci direktnog mjerenja ETP, već se koriste obračunske metode bez potrebnih korekcija, dolazi do ozbiljnih pogrešaka u bilanci vode. Najbolji primjer su velike razlike u vrijednostima ETP izračunate za isto područje različitim metodama (Tablica 1.). *Što je točniji obračun bilance vode u tlu, to ćemo točnije projektirati, što će rezultirati i racionalnijom izgradnjom sustava za navodnjavanje i korištenjem vode.* Primjer izračuna bilance vode prema Thornthwaiteu za više mjesta u istočnoj Hrvatskoj temeljem prosječnih višegodišnjih vrijednosti pokazuje variranje od 111 mm u Đakovu do 156 u Brestovcu (Tablica 2.). Nedostaci vode za Osijek su u pojedinim godinama (za

razdoblje 1961—1990.) varirali od 41 do 299 mm (Josipović i sur., 1995), a slične su vrijednosti dobili i Tomić i sur. (1993). Navedeno ukazuje koliko je variranje potreba za vodom u samo tridesetogodišnjem razdoblju i kako eventualno različiti kriteriji sigurnosti osiguranja vodom mogu značajno promjeniti proračun potreba za vodom.

Tablica 1. *Obračun ETP (mm) za područje Rennes (Bretagna), prema raznim autorima (de Saint Foulcu, 1967., cit. Vučić, 1976.)*

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Blaney - Cridlle			72	87	119	123	132	120	95			
Hargreaves			5	17	31	44	47	43	30	11		
Thornthwaite	14	18	31	49	79	101	115	103	78	46	12	16
Olivier t/mm/mjesec	6	13	29	52	60	73	82	61	40	19	6	4
Turc				69	89	110	120	114	86			

III TLO I VODA

Za uspješno racionalno navodnjavanje u biljnoj proizvodnji neophodno je dobro poznavanje odnosa u sustavu tlo–voda. Poznajući temeljne zakone fizike koji se odnose na upijanje, zadržavanje i kretanje vode u tlu moguće je realno sagledati bitne elemente projekta sustava za navodnjavanje, a pri tome vodeći računa o kontroli dinamike sadržaja vode u tlu i racionalno korištenje sustava. Uvođenje biljke u ovaj sustav upotpunjuje i naglašava značaj proučavanja vodno — fizičkih svojstava tla. Posebno je važna primjena navedenih rezultata u praksi. Značaj tla u biljnoj proizvodnji sastoji se u staništu za biljke i kao jedini izvor vode, čija izdašnost (pogotovo ukoliko nema navodnjavanja) značajno ovisi o fizikalnim svojstvima tla. U cilju što potpunijeg i kompleksnijeg sagledavanja vodnih svojstava tla dati će se kratki pregled osnovnih fizikalnih svojstava. Variranje sadržaja vode u pojedinom tlu primjetno je u tablicama 3. i 4. Obzirom da obrada tla vrlo značajno utječe na poroznost i infiltraciju tla (Vučić, 1976., Cameira i sur. 2003.), potrebno je obradi posvetiti značajnu pozornost. Cameira je također utvrdio da u podoraničnom sloju tla postoji “mreža” pora koje provode vodu u sustavu klasične i minimalne obrade tla u usjevu kukuruza. Shirmohammadi i Skaggs (1984., cit. Cameira i sur. 2003) su istražujući propusnost tla za vodu na goloj i zasijanoj površini utvrdili 80% veću propusnost na zasijanoj površini, navodeći pri tome učinkovitost propusnosti zbog korijenovog sustava koji prožima tlo. Procesi vlaženja i sušenja tla tijekom vegetacije (Messing i Jarvis, 1993. cit. Cameira i sur.) i aktivnosti faune tla (Ehlers, 1975. cit. Cameira i sur. ibid.) mogu također doprinijeti boljem provođenju vode kroz tlo.

Pri reguliranju vodnog režima nekog tla sa stanovišta poljoprivredne proizvodnje vrlo je važno napomenuti da je važna pretpostavka kvalitetna odvodnja

suvišne vode sa tla/iz tla tijekom vegetacije (Petošić i sur., 1987., Tomić i sur., 1994., Šimunić i sur., 1994., Šoštarić i sur., 1994., Tomić i Marušić 1994., Josipović, 1996., Mađar i Dadić, 1989., 1991., Mađar i sur. 1993., Marušić, 1999., Marušić i sur. 1999., 2004.)

Tablica 2. Bilanca vode za mjesta u istočne Hrvatske
 (Thornthwaite, 1961-1990, Josipović i sur. 1995.)

element	MJESEC												ukupno prosjek	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Veg	God
OSIJEK														
ETP _k	0	3	23	54	99	123	137	121	81	45	15	2	615	703
O	47	40	44	54	59	88	65	56	45	41	57	52	367	650
O-ET	47	37	21	0	-40	-35	-72	-65	-36	-4	42	50	—	—
R	100	100	100	100	60	25	0	0	0	0	42	92	—	—
ETP_s	0	23	23	54	99	123	90	56	45	46	15	2	467	551
N	0	0	0	0	0	0	47	65	36	4	0	0	148	152
V	39	21	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	97
VUKOVAR														
ETP _k	0	3	22	62	94	123	132	120	85	45	16	2	614	704
O	47	44	43	53	61	95	67	66	46	40	57	54	388	673
O-ET	47	39	21	-9	-33	-28	-65	-54	-39	-5	41	52	—	—
R	100	100	100	91	58	30	0	0	0	0	41	93	—	—
ETP_s	0	3	22	62	94	123	97	66	46	40	16	2	488	571
N	0	0	0	0	0	0	35	54	39	5	0	0	133	133
V	40	39	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
ĐAKOVO														
ETP _k	0	4	24	54	95	121	133	121	82	46	16	2	606	697
O	48	43	48	59	67	87	75	63	49	53	63	57	392	696
O-ET	48	39	24	5	-28	-34	-58	-58	-33	7	47	55	—	—
R	100	100	100	100	72	38	0	0	0	7	54	99	—	—
ETP_s	0	4	24	54	95	121	113	63	49	16	2	495	587	—
N	0	4	0	0	0	0	20	58	33	0	0	0	111	111
V	47	39	24	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
VINKOVCI														
ETP _k	0	5	24	55	97	122	136	121	81	45	13	2	612	700
O	39	39	42	54	58	86	69	58	45	42	57	51	371	639
O-ET	39	34	18	-1	-39	-36	-63	-67	-36	-3	44	49	—	—
R	100	100	100	99	60	24	0	0	0	0	44	93	—	—
ETP_s	0	5	24	55	97	122	93	58	45	42	13	2	470	556
N	0	0	0	0	0	0	43	63	36	3	0	0	142	145
V	32	34	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	84
BRESTOVAC														
ETP _k	0	3	22	52	98	121	134	120	80	45	13	2	605	689
O	41	36	40	50	63	85	64	51	40	41	51	44	354	605
O-ET	41	33	18	-2	-35	-36	-70	-69	-40	-4	38	42	—	—
R	100	100	100	98	63	63	0	0	0	0	38	80	—	—
ETP_s	0	3	22	52	98	98	91	51	40	41	13	2	453	534
N	0	0	0	0	0	0	43	69	40	4	0	0	152	156
V	21	33	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	72
DONJI MIHOLJAC														
ETP _k	0	4	23	54	96	122	138	122	82	45	13	2	615	701
O	54	43	50	55	64	81	72	68	49	44	63	58	392	709
O-ET	54	39	27	1	-32	-41	-66	-54	-33	-1	50	56	—	—
R	100	100	100	100	68	27	0	0	0	0	50	100	—	—
ETP_s	0	4	23	54	96	122	99	68	49	44	13	2	488	574
N	0	0	0	0	0	0	39	54	33	1	0	0	126	127
V	54	39	27	1	0	0	0	0	0	0	0	6	1	127

ETP_k=evapotranspiracija korigirana, mm; O=mjesečne oborine, mm; P-ETP=razlika oborina i ETP-a, mm; R=rezerve vode u tlu, mm; ETP_s=ETP stvarna, mm; N=nedostaci vode, mm; V=višak vode, mm

Opća fizička svojstva tla

Mehanički sastav predstavlja izdvajanje mineralnih elementarnih čestica tla po veličini i grupiranju u dvije, tri ili više frakcija čiji se sadržaj izražava u postotku. Tlo je polidisperzni sustav i sastoji se od čestica različitih promjera, ali se one obično grupiraju u tri skupne (ili frakcije): pijesak, prah i glina. Podjela na dvije frakcije odnosi se na ukupni pijesak (ili “fizički pijesak”) — čestice veće od 0,02 mm i ukupnu glinu (ili “fizičku glinu”) — čestice manje od 0,02 mm. Relativni odnos frakcije u tlu čini ono što se naziva teksturom tla i predstavlja osnovu za brojne pedološke ili namjenske klasifikacije tla. Prve klasifikacije tala poznate su prije skoro 2000 godina (Columella, 1948., cit. Vučić, 1976.), a spominje se još i ranije (III vijek pr.n.e.) u dijelu Catona (1964., cit. Vučić 1976.). Brojni autori osim drugih čimbenika ističu veliki značaj mehaničkog sastava na vodna svojstva, posebice snagu držanja vode za čestice tla (Vučić, 1976., Razc, 1986., Messing i Jarvis, 1993.).

Struktura tla. Čestice tla vrlo rijetko zadržavaju svoju individualnost, već su uglavnom među sobom sljepljene u strukturne agregate različitih veličina i oblika. Nestrukturna tla sastoje se iz pojedinih elementarnih čestica, kao pijesak, npr., ili iz kompaktnih grudica kod teških glinovitih tala. Osnovni oblici strukture su: prizmatični, stubasti, grudasti, mrvičasti, pljosnati-lamelarni. Spomenuti oblici strukture su rezultat određenih uvjeta pedogeneze i daju određena svojstva fizičkim svojstvima tla. Pored oblika i veličine strukturnih agregata, važna je i stabilnost strukturnih agregata u vodi. Nestabilna struktura smanjuje infiltraciju i brzinu vodopropustljivosti, povećava evaporaciju, smanjuje prozračnost, omogućuje stvaranje pokorice, a može intenzivirati eroziju. Stabilnost ovisi o sljepljivanju čestica, brzini prodiranja vode u agregate, stupnja navlaživanja i bubrenja čestica.

Struktura tla utječe na veličinu pora, posebno na odnos kapilarnih i nekapi-larnih pora. Od velikog praktičnog značaja je čuvanje i popravljavanje strukture navodnjavanih tala, prvenstveno putem agrotehničkih mjera, a po potrebi i primjenom posebnih umjetnih sredstava.

Specifična masa volumna i specifična masa prava dvije su vrlo važne veliči-ne. Specifična masa volumna predstavlja masu 1 cm³ apsolutno suhog tla u prirodnom stanju. Prije svega ona je neophodna za izračun ukupne poroznosti tla, a u praksi se koristi za obračun sadržaja vode u tlu i za obračun norme navod-njavanja. Također se koristi za određivanje trenutnog sadržaja vode u tlu u težinskim %, sadržaja hranjivih elemenata (mg/100 g tla), % humusa.

Specifična masa tla je podložna promjenama, posebice u oraničnom sloju gdje su njene promjene neprekidne, a povezane su sa svakim agrotehničkim zahvatom. Promjene ovise i od uzgajane biljke: na černozeu je utvrđeno u sloju 0—10 cm u tijeku vegetacije povećanje specifične mase volumne pod kukuruzom za oko 25% (odnosno za 0,29), pod pšenicom oko 8% (0,10), a

najmanje oko 5 % (0,08). Kod donjih slojeva (10—14 cm) promjene su znatno manje (Vučić, Dobrenov, cit. 1976).

Specifična masa volumna određuje se valjcima volumena od 100 do 1000 cm³. Pri njenom određivanju je osnovno izbjeći deformiranje, sabijanje tla pri uzimanju uzoraka (Iovenko, 1960, cit. Vučić 1976. i smanjiti pogreške uslijed bubrenja tla (Sideri, 1936., cit. Vučić 1976.). Kao konstanta i za obračun ukupne poroznosti specifična masa volumna se određuje pri vlažnosti bliskoj poljskom vodnom kapacitetu, a kod praćenja dinamike sadržaja vode u tlu — pri trenutnoj vlažnosti tla. Za gornje rastresite slojeve potrebno je određivanje u 5 ponavljanja sa cilindrima od 100 cm³, a za donje slojeve dovoljna su 3 ponavljanja (Rode, 1960., cit. Vučić 1976.).

Poroznost tla

Volumen svih pora u jedinici volumena tla definira se kao ukupna poroznost, opća poroznost ili volumen pora. Čestice tla i agregati ne ispunjavaju cijeli volumen tla, već između njih, a također i u agregatima, ostaju određene šupljine ili pore koje su ispunjene zrakom ili vodom. Veličine pora, oblik i odnosi među njima su vrlo različiti i rezultat su rasporeda čestica i strukturnih agregata tla, djelovanja korjenja biljaka i faune tla. Pore predstavljaju pravi labirint između dijelova čvrste faze tla. Poroznost tla je promjenjiva veličina, naročito u slojevima koji podliježu obradi i u kojima se razvija veći dio korjenovog sustava biljaka.

Ukoliko mehanički sastav tla sadrži više “finijih čestica”, to je veća ukupna poroznost. Pijesak ima 39—40% pora, pjeskulja 44—45%, ilovača 47—50%, a glina 52% i više (Pljusin, 1964, cit. Vučić, 1976.). Sa povećanjem dubine se ukupna poroznost smanjuje kao rezultat sabijanja donjih slojeva tla pod težinom gornjih.

Brojna vodno-zračna svojstva tla nisu u direktnoj zavisnosti od ukupne poroznosti, već više od veličine pora i njihove međusobne zavisnosti. Ukupna poroznost “glinenih” tala je znatno veća od “pjeskovitih”, ali to ne znači da glinovito tlo brže upija vodu i da ima povoljnije uvjete prozračnosti (aeracije). U tome se ogleda značaj određivanja tzv. diferencijalne poroznosti, odnosno utvrđivanja sadržaja pora različitog promjera.

Za preciznija proučavanja vodno-zračnih svojstava tla potrebno je izdvajanje i grupiranje pora po veličini. Može se pretpostaviti da tlo ne sadrži pravilne pore, već one predstavljaju mozaik vrlo različitih pora po promjeru, po dužini i obliku. Tako se u stvari i ne može govoriti o bilo kakvom postupku koji bi stvarno dao pravu predstavu o veličinama pora u tlu. Zbog toga se diferencijalna poroznost određuje indirektnim putem s tim što se pretpostavlja da se voda iz pora određenog promjera istiskuje pod odgovarajućim tlakom.

$$b = \frac{3}{H}$$

gdje je: b — promjer pora, mm
H — tlak izražen u cm vodenog stupca

Kategorije vode u tlu i vodne konstante

Mjerenjima odnosno određivanjima vodnih konstanti treba što je moguće točnije utvrditi pojedine konstante, a posebice ih odrediti točno kada su u pitanju podaci za izradu pojedinih modela. Idealno je zapravo, ulazne parametre temeljiti koliko je više moguće na egzaktnim mjerenjima u polju (Cameira i sur, 2003), ne narušavajući pri tome prirodost uzorka tla (Bouma i sur. 1977., cit. Vučić, 1976., Josipović 1996).

Kategorije vode u tlu i određene pojave povezane sa njenim zadržavanjem i kretanjem nazivaju se u literaturi i praksi vodnim konstantama, iako pojam konstante ovdje ne treba izjednačiti kao u matematici. Poznato je da tlo predstavlja rezervoar za vodu, no čim voda dospije u tlo podliježe određenim zakonima fizike u pogledu zadržavanja i kretanja. Voda koja kao slobodna dođe putem padalina ili navodnjavanja u tlo ona djelomično mijenja svoja svojstva i postaje vezana manje ili više, u zavisnosti od svojstava tla i količine. Za njeno ponovno izvlačenje iz tla potrebno je primijeniti izvjesnu silu i utrošiti određenu energiju. Pokretljivost vode je od posebnog značaja, pa se i osnovni agrotehnički i melioracijski zahvati dovode u vezu sa kretanjem vode u tlu.

Iako se sadržaj vode jedne konstante nalazi u ravnoteži pod određenim uvjetima ima i vrlo promjenjivih konstanti, tako da suštinu vodne konstante tla treba više vezati za određenu definiciju, a manje za apsolutne vrijednosti. Pogotovo, ako se prisjetimo činjenice da je svako tlo vrlo dinamičan sustav. Obzirom da pojedina svojstva tla i vodne konstante uglavnom ovise o mehaničkom sastavu, sadržaju humusa, strukturi, agrotehnici, normalno je da se promjene u bilo kojem spomenutom elementu odražavaju i na vrijednosti vodnih konstanti. Struktura pokazuje u izvjesnim svojstvima (stabilnost) određenu dinamiku tijekom godine, što znači da i konstante koje su u zavisnosti od nje pokazuju veću ili manju dinamičnost. Obogaćivanjem tla organskom tvari, može se poboljšati struktura, kao i brojnim agrotehničkim mjerama, posebice površinskog sloja (obrada, rigovanje, podriranje, sabijanje valjanjem, ravnanjem, navodnjavanjem).

Kemijski vezana voda je u stvari dio čvrste faze tla, ne sudjeluje u fizičkim procesima i ne isparava pri temperaturi od 100°C. Javlja se kao konstitucijska i kristalizacijska voda i nije korisna za biljke.

Higroskopna voda se apsorbira na površini zemljišnih čestica iz vodene pare u zraku. To je fizički vezana voda. Tlo je kao svaka porozna tvar higroskopno. Količina apsorbirane vode je upravo proporcionalna specifičnoj površini tla, a ovisi o relativnom naponu vodene pare u zraku. To je jedna od vodnih konstanti, za čestice tla se drži molekularnim i električnim silama privlačenja i premješta se u obliku pare, a nije korisna za biljke.

Opnena voda je pokretna u tekućem stanju, iako vrlo sporo, i kreće se od čestice sa debljom opnom ka čestici koja ima tanju opnu (kada su čestice iste veličine), odnosno ka čestici čije je zasićenje vodom manje, i to pod utjecajem sila adsorpcije.

Slobodna voda u tlu posjeduje svojstva “obične” vode i u potpunosti može biti korisna za biljku.

Kapilarna voda se dugo zadržava u tlu, ne otječe i predstavlja prijelaz između vezane vode i potpuno slobodne, koju u užem smislu predstavlja gravitacijska voda. Ova voda se kreće u svim pravcima pod utjecajem menisknih ili kapilarnih sila. Kapilarno kretanje vode je složen proces i ovisi o površinskom naponu vode, pojave menisknih sila u kapilarama i specifične površine tla.

Funikularna voda je također pokretna na veće udaljenosti, lako je pristupačna biljkama, ali u usporedbi sa kapilarnom vodom, njena pristupačnost je manja.

Dodirna voda je malo pokretna na maloj udaljenosti i to samo u granicama od jednog do drugog meniska. Biljke ju mogu lako koristiti i usvajati, ali je dostupna samo korjenovim dlačicama, koje su u direktnom dodiru sa njom (praktično je skoro nepokretna).

Kapilarno-viseća voda predstavlja vodu čiji je sadržaj veći od kapilarne vode u užem smislu i javlja se na prijelazu iz jednog u drugi horizont, kada su oni različitog mehaničkog sastava, a uvjetuje ju razlika menisknih sila. Isto tako javlja se u površinskim slojevima obradivog tla i iznad slojeva slabije vodosprovodljivosti.

Voda koja se u tlu kreće u porama pod utjecajem sile teže naziva se **gravitacijska voda**. Javlja se poslije kiše, topljenja snijega, navodnjavanja, ali je prisutna u tlu samo kratko vrijeme i lako je pristupačna biljkama. Veće količine ovakve vode dolaze u vodonosni horizont, popunjavaju sve pore i stvaraju podzemnu vodu.

Lebedev (cit. Rozov, 1956. cit. Vučić, 1976.) je 1912—1913. godine eksperimentalno utvrdio kondenzaciju vode u tlu iz vodene pare zraka pri povoljnim uvjetima od 0,3 do 2,6 mm na dan, što tijekom godine može iznositi čak od 60—100 mm (na području Hrvatske su te količine značajno manje).

Vodne konstante tla i njihova primjena u navodnjavanju

Važno je napomenuti da između pojedinih vodnih konstanti nema oštih granica, one se često međusobno preklapaju tako da jedna konstanta — “višeg reda” sadrži u sebi sve konstante “nižeg reda”. Pored toga, napomene koje su date u vezi promjenjivosti vrijednosti pojedinih vodnih konstanti odnose se na suštinsko razmatranje ovog pitanja, ali su obično za praktične svrhe ove promjene bez posebnog značaja, pa se u mnogim obračunima primjenjuju određene vrijednosti kao konstante. Inače bi obračuni bili nemogući. Tlo ima sposobnost da upija vodu, da propušta dubinom profila dio slobodne vode i da zadržava vodu različitih kategorija, a kvantitativnu karakteristiku pojedinih svojstava daju vodne konstante.

Poljski vodni kapacitet. Za sva tla, osim gdje je razina podzemne vode visoka, jedini izvor vode su prirodne padaline. Od sposobnosti tla da padaline primi, zadrži ih kao rezervu u dužem intervalu, ovisi o velikom stupnju brojna svojstva koja pripadaju kompleksu plodnosti tla. Stoga su ova pitanja privlačila pažnju brojnih istraživača i predmet su intenzivnih istraživanja već oko 180 go-

dina. Objasniti ćemo neke definicije i nazive koji se susreću u literaturi i koji se koriste u navodnjavanju.

Svakako je od prvorazrednog značaja poznavanje one maksimalne količine vode koju tlo može u sebi sadržati u poljskim uvjetima. Ova konstanta naziva se poljski vodni kapacitet (PVK), iako se sreće čitav niz termina kao: retencijski kapacitet, opneno-kapilarni kapacitet, maksimalni vodni kapacitet, minimalni vodni kapacitet, itd. Jedino je mjerodavna ona vrijednost koja se dobije u polju pod određenim uvjetima, pa je zato i najprikladnije da se ova konstanta i naziva poljski vodni kapacitet. *Po definiciji to je najveći sadržaj vode u ispitivanim slojevima tla u prirodnim uvjetima, koji se duže zadržava poslije ocjeđivanja gravitacijske vode, uz uvjet da je spriječeno isparavanje i da ne postoji kapilarno vlaženje iz podzemne vode* (Vučić, 1976). Poljski vodni kapacitet predstavlja gornju granicu vlaženja određenog tla kao i sve veće količine vode, koje bi eventualno došle prirodnim padalinama ili navodnjavanjem, procjedile bi se u donje slojeve. Tu se ogleda značaj koji ova konstanta ima u navodnjavanju (Tomić, 1987., Tomić i Mađar, 1989., Tomić i sur., 1991., Tomić i Romić, 1992.) jer ona predstavlja osnovu za utvrđivanje racionalnog obroka navodnjavanja. Sadržaj humusa i debljina humusnog horizonta utječu pozitivno na vrijednosti poljskog vodnog kapaciteta. Plića i lakša tla imaju manji kapacitet za vodu.

Struktura tla se također pozitivno odražava na vodni kapacitet, a postoji i određena zavisnost od kulturnog stanja tla. Promjene koje se javljaju u vrijednostima poljskog vodnog kapaciteta pod utjecajem raznih agrotehničkih mjera nisu od značaja sa praktičnog gledišta, pa se stoga i ne zahtjeva često određivanje PVK i njegovih promjena, izuzev u određenim znanstvenim studijima.

Poljski vodni kapacitet pjeskovitih tala iznosi 4—10% težinskih, kod pjeskulja 10—20%, lakših i srednjih ilovača 20—30%, i kod teže ilovače i glinovitih tla 30—40% težinskih. Organsko-mineralna i tresetna tla imaju znatno veći PVK.

Vlažnost venjenja. Vlažnost venjenja kao vodna konstanta odvaja zemljišnu vodu pristupačnu biljkama i korisnu za njihov rast i razvoj, od vode vrlo teško pristupačne za biljke, jer je novijim ispitivanjima utvrđeno da, pod izvjesnim uvjetima, biljke mogu koristiti vodu iz tla i ispod vlažnosti venjenja, čak do maksimalnog higroskopiciteta. Dugo vremena je u praksi navodnjavanja ovoj konstanti pridavan izuzetan značaj koji je ona izgubila novijim saznanjima o pristupačnosti vode biljkama. Prvi radovi o određivanju ove konstante datiraju iz 1859. godine (J. Sachs, cit. Vučić 1976.), a zatim proučavanje nastavljaју Šiškin, 1876., cit. Vučić 1976., Mayer, 1875., cit. Vučić 1976., Bogdanov, 1889., cit. Vučić 1976., Briggs i Schantz, 1912., cit. Vučić 1976., daju metode određivanja koji se uz neznatne izmjene zadržao do danas. Za ove autore vezana je konstatacija, na temelju praktičnih podataka, da veličina vlažnosti venjenja na jednom tlu ne zavisi od biljne vrste, već sve biljke venu kod iste vlažnosti. Relativan odnos vrijednosti vlažnosti venjenja različitih grupa biljaka to najbolje ilustrira. Srednja vrijednost svih određivanja, kojih je bilo preko 1300, uzeta je kao 1,00 i bez obzira što su ispitivanja vršena na 20 različitih tala sa rasponom vlažnosti venjenja od 0,86% (pijesak) do 17,1% (teška glina), raspon relativnog odnosa je mali: 0,94—1,10.

Ovim se ne osporavaju i gledišta pojedinih autora (Federovskij, 1948., cit. Vučić 1976.) o zavisnosti vlažnosti venjenja od biljne vrste, pa čak i od sorte, ali ima također i novijih istraživanja koja stoje na pozicijama venjenja većine biljaka kod približno iste vlažnosti jednog tla. Za praksu navodnjavanja i eventualne minimalne razlike u vlažnosti venjenja kod pojedinih gajenih kultura su bez značaja, mada ovo pitanje sa teorijskog stajališta može biti zanimljivo. Briggs i Schantz su također utvrdili radeći sa pšenicom, da vlažnost venjenja ne ovisi o uzrastu biljke jer se relativne vrijednosti kreću od 0,98—1,00 kod biljaka starih od 20 do 104 dana.

U polju biljke venu pri većem sadržaju vode u tlu, pa stoga vlažnost venjenja određen u posudama treba primiti sa određenom rezervom. Tlo u posudama (od 50 do 500 g) je potpuno prožeto korjenčićima korjenovog sustava što u prirodi nije slučaj, pa je i iskorištavanje vode različito. U maloj količini tla u posudama brzina pritjecanja vode ka mjestu potrošnje nije od posebnog značaja, ali u prirodnim uvjetima je od posebne važnosti.

Lentokapilarna vlažnost. Pridajući veliku važnost brzini kretanja vode u tlu u snabdjevanju biljaka vodom Widtsoe i Mc. Laughlin (cit. Stebut, 1949) uvode novu konstantu — lentokapilarnu vlažnost — koja odvaja lakopokretnu od teže pokretne “sporije” vode. Naziv potječe od latinske riječi *lentos*, što znači ljep-ljiv, ili francuski *lent* = spor, tako da se voda u tlu ispod ove konstante kreće sporo i ne osigurava normalno snabdjevanje biljaka vodom. Prema navedenim autorima veličina lentokapilarne vlažnosti odgovara približno $2H_y$ i drži se u tlu snagom od 6,25 bara. Ova konstanta ima značajniju primjenu u suhom ratarenju, ekološkoj poljoprivredi, ali i u navodnjavanju. Posebni značaj joj pridaje Stebut (1949) — “njom se određuje granica između čvrsto vezane vode i vode koja se slobodno kreće, slobodno se odvaja od koloidnog jezgra”. Lentokapilarni sadržaj vode u tlu se određuje pomoću uređaja pri djelovanju tlaka 626,2 kPa bara.

Kapilarni potencijal. Proučavajući razne oblike vode u tlu vidjeli smo da se one drže različitom snagom za čestice tla ili u porama tla, pa im je u vezi s tim i pokretljivost različita. U težnji da izrazi snagu kojom se voda drži u tlu pri različitom sadržaju vode u njemu Buckingham uvodi 1907. godine naziv kapilarni potencijal — kao izraz određene energije. Kapilarni potencijal kao pojam je šire prihvaćen, iako se ne odnosi samo na kapilarnu vodu, već i na sve druge oblike vode u tlu.

Kapilarni potencijal izražava snagu kojom se voda drži u tlu ili snagu koja je potrebna da se odvoji, istisne voda iz njega. To znači da je potencijal slobodne vode ravan nuli. Kapilarni potencijal raste sa smanjenjem sadržaja vode u tlu zato što u suhom tlu ostaju oni oblici vode koji se drže većom snagom. Stoga kapilarni potencijal utječe na kretanje vode tako da se ona kreće u pravcu od manjeg ka većem potencijalu, što na prvi pogled izgleda suprotno općem zakonu o kretanju topline ili elektriciteta — od većeg ka manjem potencijalu. Međutim, u suštini i voda se tako kreće — od mjesta gdje se slabije drži, gdje je vlažnost veća, ka mjestu gdje su sile privlačenja veće odnosno gdje je vlažnost manja, u težnji izjednačenja potencijala u svim točkama. Isto je i sa

toplinskom energijom koja se kreće od točke sa većom ka točki sa nižom temperaturom.

Iz definicije kapilarnog potencijala proizlazi i postupak za njegovo određivanje, ali tehnika za utvrđivanje pojedinih pF vrijednosti može biti različita, što je uostalom slučaj i kod ostalih određivanja fizičkih i kemijskih svojstava tla. Obično se kombinira više metoda za izradu pF krivulje. To je sasvim i razumljivo, jer se kod pF vrijednosti preko 5 radi o velikom tlaku. Ima više takvih kombinacija sa uređajima za izradu pF krivulje, koje se mogu primijeniti prema opremljenosti laboratorija (Vučić, 1976). Količina vode u vol. % u rasponu od pF 2 do pF 3 predstavlja volumen pora odgovarajućeg promjera od 0,03 do 0,003 mm ili od 30 do 3 mikrona. Od pF 3 do pF 4 su pore promjera 3 do 0,3 mikrona itd.

Zrak u tlu

Pore koje nisu ispunjene vodom sadrže plinove koji čine zrak tla. U kvalitativnom pogledu male su razlike između atmosferskog zraka i zraka u tlu, ali kvantitativne razlike mogu biti značajne. Za biljke su podjednako važni i količina zraka u tlu i njegov sastav. Obzirom da se navodnjavanjem mijenja vodni režim tla vrši se i veliki utjecaj na zrak u tlu, pa je važno u osnovnim crtama pojasniti elemente zračnog režima u tlu. Zrak se nalazi u nekapilarnim porama tla kao slobodan, zatim može biti vezan za čestice tla i rastopljen u vodi. Veliki značaj obrade tla i prometa po oranici (utjecaj kotača) na samu makroporoznost osim činitelja vremena naglašavaju u svojim istraživanjima Vučić, 1976.

Sadržaj zraka u tlu neprestano se mijenja, ne samo po količini nego i po sastavu, u zavisnosti od uvjeta. Naročito su podložne promjenama količine kisika i ugljičnog dioksida. Obzirom da se kisik zraka troši tijekom disanja korjena biljaka i aerobnih mikroorganizama njegov sadržaj se smanjuje, a povećava količina CO₂. Što su potrebe za kisikom veće, i intenzivniji mikrobiološki procesi tim je i smanjenje sadržaja kisika izrazitije.

Količina CO₂ u zraku tla je veća tijekom ljeta, a manja zimi. U nedostatku O₂ u tlu, pri visokoj razini podzemne vode, uslijed preobilnog vlaženja bilo od padalina ili većih oborka navodnjavanja, javljaju se CH₄, H₂S i drugi plinovi koji su štetni za biljke.

Kapacitet za zrak

Pri stanju vlažnosti poljskog vodnog kapaciteta dio ukupne poroznosti tla ispunjen zrakom naziva se kapacitet za zrak. Prema Astapovu, 1958. cit. Vučić 1976., zbroj pora sa ekvivalentnim dijametrom većim od 3 mikrona, koja inače predstavlja tzv. aktivnu poroznost tla, daje i veličinu kapaciteta za zrak.

Kod teških tala kapacitet za zrak može biti vrlo mali 2—5% dok kod lakših pjeskovitih tla čak i preko 30%. Strukturna tla pored visokog kapaciteta tla za vodu imaju i vrlo povoljan kapacitet za zrak, oko 15—20%. Na osnovu vrijednosti kapaciteta za zrak ne može se jednostavno donositi sud o pogodnosti tla za biljnu proizvodnju, jer je sadržaj zraka u tlu vrlo dinamična i promjenljiva veličina, ali to može biti indikacija o mjerama za stvaranje “kulturnog” tla.

Mali kapacitet za zrak ukazuje na mali sadržaj krupnih pora, na slabu sposobnost tla da upija i provodi vodu. *Niti jedna vodna i uopće pedološka konstanta ne može se promatrati izolirano, jer su one međusobno povezane.*

Poroznost aeracije je termin koji je uveo Rode, 1955., cit. Vučić 1976., i kojim se izražava dinamika sadržaja zraka u tlu. To znači da ovo nije neko određeno svojstvo tla, neka karakteristična veličina, ali je pravi pokazatelj uvjeta prozračnosti tla tijekom vegetacije. Svaki sadržaj vode u tlu ima svoju poroznost aeracije. Ipak određenu važnost poroznost aeracije ima kod razmatranja utjecaja podzemne vode na porast, razvoj i urod biljaka. Tada se pored kapilarnog kapaciteta analiziraju uvjeti aeracije, odnosno veličina poroznosti tla. Od poroznosti aeracije u većem stupnju nego od visine kapilarnog penjanja ovisi tolerantna razina podzemne vode.

Infiltracija

Infiltracija je od izvanrednog značaja za navodnjavanje, jer od nje ovisi: a) pogodnost tla za navodnjavanje, b) izbor načina navodnjavanja, c) dužina brazde i prelivne leje, d) jačina zaljevne struje, e) intenzitet kiše pri navodnjavanju kišenjem.

Upijanje vode je vrlo promjenjivo svojstvo tla i ovisi ne samo od trenutnog stanja parcele i njene geneze, već i od svakog agrotehničkog zahvata. Osim toga na infiltraciju utječe čitav niz ostalih svojstava tla — mehanički sastav, struktura i stabilnost strukturnih agregata, veličina aktivne poroznosti, prisustvo iluvijalnog horizonta, alkalizacija tla. Povoljan utjecaj na infiltraciju ima unošenje stajnjaka i vapna po potrebi, plodored, posebno uzgoj lucerne i trava i stanje vlažnosti tla, Josipović 1991. To znači da je infiltracija vrlo dinamična veličina i da se mijenja tijekom godine, odnosno vegetacije, što ukazuje da vrijednost infiltracije predstavlja trenutno stanje.

Mjerenje infiltracije vrši se ili kišenjem ili infiltrimetrima, pri čemu posljednji dominiraju u svijetu. Iako je u suštini mjerenje infiltracije vrlo jednostavno, i po opremi i po tehnici, Bayer upozorava “da je tehnika mjerenja infiltracije još uvijek u eksperimentalnoj fazi”. Neal (cit. Bayer, 1956) je konstatirao da su infiltrimetri dali 2—3 puta veće vrijednosti infiltracije utvrđenih prirodnom kišom. Neal navodi energiju udara kišnih kapi za objašnjenje ove pojave, ali i između tipova infiltrimetra postoje također znatne razlike u vrijednostima infiltracije. Navode razlike u infiltraciji između cilindričnih infiltrimetara (Haise i sur., 1956., cit. Vučić *ibid.*) i kvadratnih ramova (Astapov, 1958., Vučić *ibid.*), a također i utjecaj dubine utiskivanja infiltrimetra u tlo na visinu upijanja. Visina stupa vode u infiltrimetru je također značajna.

Infiltracija se prikazuje grafički pri čemu se razlikuju dvije krivulje infiltracije — sumarna infiltracija (cm) i krivulja trenutne infiltracije (cm/h). Vrijednost infiltracije (cm/h) u četvrtom ili petom satu mjerenja predstavlja maksimalno dozvoljeni intenzitet kiše pri navodnjavanju umjetnom kišom. Ako su obrocima navodnjavanja manji, dozvoljava se intenzitet na razini trećeg sata upijanja (Vučić, 1976, Josipović 1991), a razlikuje se o tipu tla i njegovim svojstvima.

Brzina provodljivosti vode kroz tlo

Poznavanje brzine provodljivosti kroz tlo ili vodoprovodljivosti, kretanje vode kroz tlo zasićeno vodom, važno je pri proučavanju navodnjavanja potapanjem i donekle podzemno navodnjavanje ili subrigacija. Posebno je važno kod svih pitanja vezanih za odvodnjavanje, gubitke vode i ne obloženoj kanalskoj mreži, u umjetnim ribnjacima. U struci je uobičajen i naziv brzina filtracije i definira se obično kao k -Darcy — a izražava se u cm/sec , mm/h ili m/dan . Vrlo često ne samo u našoj literaturi, susreće se izraz “koeficijent filtracije” ili “Darcyjev koeficijent” što nije u skladu sa principom terminologije, jer se ne radi ni o kakvom koeficijentu, već izmjerenoj brzini vodoprovodljivosti koja je različita za različita tla.

Brzina vodoprovodljivosti je u početku mjerenja najveća, a zatim postupno opada tako da poslije nekoliko sati (obično 3—5) postaje stabilna. Ova vrijednost uzima se kao mjerodavna. Opadanje brzine vodoprovodljivosti u vremenu uslovljeno je bubrenjem koloida čime se sužavaju pore, raspadanjem strukturnih agregata itd. U osnovi brzina vodoprovodljivosti je ovisna o granulometrijskom sastavu tla i diferencijalnoj poroznosti.

Tablica 3. *Orijentacijske vrijednosti sadržaja vode u tlu za najznačajnije tipove tala (Kos, 1993.c)*

Vrsta tla	Raspoloživa količina vode kod usisne sile bara: (u % volumena)				Sniženje raspoložive količine vode kod usisne sile bara: (u % volumena)			
	0,2	0,5	2,5	16,0	0,2	0,5	2,5	16,0
glina teška	18	15	8	0	0	17	55	100
glina praškasta	19	17	10	0	0	10	45	100
prah	20	15	7	0	0	25	65	100
prah fini	25	19	5	0	0	25	80	100
prah glinovito fini	16	12	7	0	0	25	55	100
prah glinovito pjeskoviti	14	11	6	0	0	20	55	100
prah pjeskoviti	13	8	3	0	0	40	75	100
pijesak fini praškasti	14	11	5	0	0	20	65	100
pijesak srednje fini	6	3	2	0	0	50	65	100

Tablica 4. *Temeljna vodna svojstva tla pri izradi hidropedološke studije za potrebe navodnjavanja (rudina "Puškaš", PIK Belje 1988.)*

Pedosiste- matska jedinica	Dubin a tla cm	Postotni udjel vode, težinski pri tlaku, bara			Spec mas a vol.	Postotni udjel vode, volumni pri tlaku			Sadržaj vode u tlu, mm pri tlaku, bara			Fiziološk i aktivna voda mm
		0,33	6,25	15		0,33	6,25	15	0,33	6,25	15	
Hipoglej	0-35	31,14	20,20	19,20	1,34	41,72	27,07	25,73	146	95	90	56
	35-100	26,65	14,17	13,84	1,47	39,18	20,82	20,34	255	135	132	123
Amfoglej	0-30	34,28	21,46	20,26	1,22	41,82	26,18	24,72	126	79	74	52
	30-100	38,88	19,10	21,53	1,33	51,71	25,40	28,64	361	178	201	160
Aluvij	0-30	26,87	13,78	12,63	1,12	30,09	15,43	14,15	90	46	42	48
	30-100	29,14	10,24	9,84	1,35	39,34	13,82	13,28	275	97	93	182

Poteškoće u navodnjavanju

a) Poteškoće u navodnjavanju sa stanovišta tla

Obzirom na veliko iskustvo već sredinom 50-ih godina prošlog stoljeća Thorne i Peterson, 1954., opisali su važnije poteškoće u navodnjavanju, a na području Europe su spomenuti slijedeći: mala plodnost tla; slaba dreniranost tla; ispiranje hraniva; nedostatak vode; erozija tla vodom; zaslanjivanje tla; ispiranje dušika; akumulacije vode. Poteškoće navodnjavanja mogli bi se izdvojiti u nekoliko skupina: a) zamočvarenje i zaslanjivanje tla; b) ispiranje hranjiva i osiromašenje oranice i c) pogoršanje strukture tla, smanjenje infiltracije i erozija vodom. Navedene poteškoće treba imati u vidu pri educiranju korisnika sustava navodnjavanja. Eksploatacija sustava navodnjavanja također ima svoje specifičnosti i poteškoće.

Potencijale tla u postrojnoj sjetvi je potrebno vrlo pažljivo proučiti jer se sjetva odvija obično pri neobičajeno visokim temperaturama kada je isparavanje iz tla vrlo veliko, a potpomaže ga nepokrivenost tla usjevom. Pravilnom pripremom tla, gnojidbom, zaštitom usjeva i navodnjavanjem može se ostvariti i dvije žetve (Mađar i sur., 1985a, 1985b., 1986.). Treba imati u vidu intenzivnije korištenje hraniva iz tla, veliki intenzitet razgradnje organske tvari i pojačati gnojidbu, posebice organsku.

Jedan od bitnih potencijala vode u budućnosti će biti korištenje otpadnih voda za navodnjavanje je će se voda višestruko iskoristavati (Gereš, 1996b., Kos, 1997a., 1997b., 1997c., Tadeschi 1997a., 1997b., 1997c.) kao i upotreba zaslanjenih voda (Romić i Tomić 1997.).

b) Poteškoće u navodnjavanju sa stanovišta korištenja sustava za navodnjavanje

Poznate su činjenice da ima površina koje se navodnjavaju stoljećima, i još uvijek se nalaze u intenzivnom korištenju bez primjetnih negativnih promjena. Ovdje su svakako drugačiji uvjeti u pogledu kvalitete vode, svojstva tla, dreniranosti terena, veličine norme navodnjavanja i broja navodnjavanja vjerojatno i u pogledu agrotehnike, što sve zajedno ne daje osnove niti stvara mogućnost da se bilo kakve negativne posljedice jave u oštrijoj formi. Štoviše mogu utjecati pozitivno i na promjene u tlu.

Bitno je razlikovati i odvojiti direktan utjecaj vode i navodnjavanja kao dijela agrotehnike od ostalih pratećih činitelja i uvjeta. Ne može se pojava zaslanjivanja na nekom području pripisivati navodnjavanju ako je kakvoća vode koja se upotrebljava loša, odnosno ako je voda slana ili ako se neracionalnim normama podiže razina slane podzemne vode. Loša drenaža tla, neregulirana odvodnja, mali koeficijent korisnog djelovanja sustava su uzroci pojave zabarivanja, na navodnjavanim površinama, ali to ne znači da je navodnjavanje uzrokovalo ovu pojavu, već je ona samo indirektna posljedica određenih nepovoljnih okolnosti.

Pored toga, treba različito promatrati i dopunsko navodnjavanje sa određenim prirodnim uvjetima u kojima mnogi autori bilježe pozitivan učinak navod-

njavanja na izvjesna svojstva tla. Brojna istraživanja ukazuju da nisu utvrđene negativne promjene i posljedice na kvalitetnijim tlima (černozemi i druga kvalitetna tla), već naprotiv sadržaj humusa je povećan, a također je poboljšana i struktura tla na parcelama sa lucernom u plodoredu. Na sličan zaključak upućuju istraživanja u pogledu utjecaja lucerne i trava na poboljšanje strukture i povećanje stabilnosti strukturnih agregata navodnjavanih zemljišta. Smanjenje ili povećanje infiltracije navodnjavanog tla ovisi o plodoredu i zastupljenosti lucerne i višegodišnjih trava u njima, uporabe stajnjaka u dvo i tropoljnim plodoredima ili zelene gnojidbe. Iako je ovo kratko poglavlje naslovljeno na poteškoće naprijed su navedeni pozitivni primjeri koji ukazuju da se pravilnim gospodarenjem tlom mogu osim koristiti u navodnjavanju u smislu većeg uroda kultura dobiti i značajni pozitivni učinci na tlo.

Ovim se ne negiraju negativne posljedice, naročito na fizičkim svojstvima tla, koja su rezultat navodnjavanja, čime se potvrđuje da je nemoguće sve promjene uočavati i pripisivati samo jednom jedinom čimbeniku — vodi i navodnjavanju. Stoga su Minašina i Penman, 1967, 1967a, cit. Vučić 1976., i Kovda, 1967., cit. Vučić 1976., potpuno u pravu kada probleme navodnjavanja i promjene u zemljištu promatraju posebno u uvjetima pravilnog i nepravilnog navodnjavanja i korištenja tla (Vučić, 1976). Zakonska regulativa u navodnjavanju je vrlo bitna (Ćosić-Flajsig., 1999.) ali ju kontinuirano treba mjenjati uklanjajući nedostatke, jer ne bi smjela kočiti razvoj navodnjavanja.

Zaključna razmatranja

Proučavajući različite povjesne činjenice (Bonacci, 1996., Kos, 1992, Vučić, 1976), metode koje osuvremenjuju i poboljšavaju spoznaje i pristup navodnjavanju, lakše rješavamo novonastale poteškoće i u novijem vremenu, jer mi i danas proizvodimo hranu na i u tlu, navodnjavamo, svakako, suvremenijom tehnikom, ali stalno imamo novih i nepoznatih poteškoća koje trebamo riješiti. *Racionalno navodnjavanje u poljoprivredi između brojnih definicija možemo opisati kao skup mjera koje poduzimamo u određenoj proizvodnji da bi ona bila što uspješnija, ali istovremeno i što dugotrajnija.* Pri čemu trebamo voditi računa o sljedećem: proučiti tlo i njegova vodna i fizička svojstva; proučiti biljku koju uzgajamo i njene potrebe za vodom; temeljem višegodišnjih vrijednosti analizirati klimu odnosno najvažnije elemente za poljoprivrednu proizvodnju; projektirati sustav za navodnjavanje uvažavajući što veći broj čimbenika i prioriteta; ekonomično proizvoditi; u cijelom sustavu proizvodnje gdje god je moguće opremiti se tehnikom i elektronikom i pojeftiniti proizvodnju (gdje nije na štetu narušavanja održivosti sustava); gospodariti sustavom i vodom prema uputama stručnjaka; unapređivati svaki element proizvodnje tijekom svake proizvodne godine; biti pripravnici na interveniranje u izvanrednim prilikama odnosno ekstremnim situacijama (suša ili poplava); sugerirati farmerima (proizvođačima) da nauče stalno učiti. Obzirom na brojne skupine i podskupine navedenih čimbenika kao i na veliki broj mogućih međusobnih kombinacija, razvidno je da treba dobro poznavati proizvodnju i o

brojnim detaljima voditi računa, ali po kriteriju od važnijeg prioriteta prema manje važnom.

Literatura

1. Bonacci, O. (1992): Regionalna hidrološka analiza potreba natapanja u Republici Hrvatskoj. Priručnik za hidrotehničke melioracije. Navodnjavanje. Knjiga 1. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci. p. 61—88. Rijeka.
2. Bonacci, O. (1993): Metoda sunčanog zračenja (radijacije), Metoda isparitelja. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i HDON. Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Navodnjavanje. Knjiga 2. Potrebe vode za navodnjavanje. p.77—88. Rijeka.
3. Bonacci, O. (1996): Povijest razvoja i metode dizanja vode (crpljenja). Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i HDON. Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Navodnjavanje. Knjiga 5, Planiranje, projektiranje i organizacija natapnih sustava, p.141—159. Rijeka.
4. Bonacci, O., Horvat, B. (2003): Bilanca voda Hrvatske: dostignuća i potrebe. 3 Hrvatska konferencija o vodama. Hrvatske vode u 21. stoljeću. 28.—31. p. 33—43. Osijek.
5. Brnić—Levanda, D. (1994): Uloga tla u bilanciranju potreba vode za navodnjavanje. Znanstveni skup. Hrvatsko društvo za zaštitu voda i mora i dr. Bizovačke toplice, 17—19. 11. p. 363—369.
6. Cameira, M.R., Fernando, R.M., Pereira, L.S. (2003): Soil macropore dynamics affected by tillage and irrigation for a silty loam alluvial soil in southern Portugal. *Soil & Tillage Research* 70. p. 131—140. Lisabon.
7. Ćosić—Flajsig, G. (1999): Koncesije u vodnom gospodarstvu. 2. Hrvatska konferencija o vodama, 19.—22. V. 1999. Zbornik radova p.3—621—627. Dubrovnik.
8. Ehlers, W. (1975): Observations on earthworms channel and infiltration on tilled and untilled loess soil. *Soil Sci.* 119, p. 242—249.
9. Gajić—Čapka, M. i Zaninović, K. (2004.): Klimatske prilike slivova Save, Drave i Dunava. Hrvatske vode, 12 49, 297—312.
10. Gereš, D. (1993a): Penmanova metoda. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i HDON. Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Navodnjavanje, Knjiga 2. Potrebe vode za navodnjavanje. p.23—44. Rijeka.
11. Gereš, D. (1993b): Turcova metoda određivanja potencijalne evapotranspiracije. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i HDON. Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Navodnjavanje. Knjiga 2. Potrebe vode za navodnjavanje. p. 45—55. Rijeka.
12. Gereš, D. (1996a): Projektiranje i optimalizacija mreže otvorenih kanala, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i HDON. Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Navodnjavanje. Knjiga 5, Planiranje, projektiranje i organizacija natapnih sustava, p. 87—120. Rijeka.
13. Gereš, D. (1996b): Zaštita mreža od agresivnih tala i voda. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i HDON. Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Navodnjavanje. Knjiga 5, Planiranje, projektiranje i organizacija natapnih sustava, p.121—125. Rijeka.
14. Gereš, D. (1996c): Gospodarske analize investicijskog projekta, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i HDON. Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Navodnjavanje. Knjiga 5, Planiranje, projektiranje i organizacija natapnih sustava, p.127—139. Rijeka.

15. Gereš, D. (1997): Raspoloživost vode u Republici Hrvatskoj. Priručnik za hidrotehničke melioracije. II Kolo. Navodnjavanje. Knjiga 6. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci. p. 93—123. Rijeka.
16. Josipović, M., Mađar, S., Lazanin, Ž. (1995): Suša i potrebe natapanja u istočnoj Hrvatskoj. Poljoprivredne aktualnosti. Vol. 30. 2—4. p. 639—649. Zagreb.
17. Josipović, M., Mađar, S., Šošarić, J. (1994): Vodni potencijali i njihovo korištenje na PIK-u Đakovo. Znanstveni skup. Hrvatsko društvo za zaštitu voda i mora i dr. Bizovačke toplice, 17—19. 11. p. 345—352.
18. Josipović, M. (1996): Utjecaj obroka i dubine natapanja dreniranog tla na svojstva kukuruza. Disertacija. Poljoprivredni fakultet Osijek. p. 119. Osijek.
19. Josipović, M., Romić, D., Danjek I., Mađjar, S., Marušić, J., Šošarić, J., Plavšić, H. (2003): Stanje navodnjavanja u Hrvatskoj 2002. godine. 3. Hrvatska konferencija o vodama – Hrvatske vode u 21. stoljeću. Osijek, 28-31 Svibnja 2003. p. 797-804.
20. Klaić, B. (1990): Rječnik stranih riječi, tuđice i posuđenice. Nakladni zavod Matice hrvatske. Zagreb. p.1123.
21. Kos, Z. (1992): Povijesni pregled razvoja navodnjavanja – History review of irrigation developing. Priručnik za hidrotehničke melioracije. Navodnjavanje. p. 1—60. Rijeka.
22. Kos, Z. (1993a): Direktne metode određivanja evapotranspiracije. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i HDON. Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Navodnjavanje, Knjiga 2. Potrebe vode za navodnjavanje. p.12—22, Rijeka.
23. Kos, Z. (1993b): Analiza utjecajnih faktora na et usjeva. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i HDON. Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Navodnjavanje, Knjiga 2. Potrebe vode za navodnjavanje. p.103—120. Rijeka.
24. Kos, Z. (1993c): Proračun potreba za vodom, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i HDON. Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Navodnjavanje, Knjiga 2. Potrebe vode za navodnjavanje. p. 121—155. Rijeka.
25. Kos, Z. (1996a): Projektiranje i optimalizacija mreža pod tlakom, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i HDON. Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Navodnjavanje, Knjiga 5, Planiranje, projektiranje i organizacija natapnih sustava, p. 51—86. Rijeka.
26. Kos, Z. (1996b): Osnovne podloge za planiranje natapnih sustava, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i HDON. Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Navodnjavanje, Knjiga 5, Planiranje, projektiranje i organizacija natapnih sustava, p. 7—25. Rijeka.
27. Kos, Z. (1996c): Organizacija i održavanje natapnih sustava, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i HDON. Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Navodnjavanje, Knjiga 5, Planiranje, projektiranje i organizacija natapnih sustava, p. 207—246. Rijeka.
28. Kos, Z. (1997a): Upotreba otpadne vode za natapanje, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i HDON. Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Navodnjavanje, Knjiga 6, Kvaliteta i raspoloživost vode za natapanje, p. 155—194. Rijeka.
29. Kos, Z. (1997b): Kriteriji kvalitete vode za natapanje, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i HDON. Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Navodnjavanje, Knjiga 6, Kvaliteta i raspoloživost vode za natapanje, p. 5—68. Rijeka.
30. Kos, Z. (1997c): Iskustva i standardi nekih zemalja u korištenju voda niže kakvoće za natapanje, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i HDON. Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Navodnjavanje, Knjiga 6, Kvaliteta i raspoloživost vode za natapanje, p. 209—232. Rijeka.
31. Mađar, S., Mušac, I., Kovačević, V., Jurić, I., Žugec, I. (1985a): Istraživanja postrnog kukuruza uz navodnjavanje i bez njega u Slavojiji i Baranji 1983. godine.. Znan. prak. poljopr. tehnolog.. 15(3—4). p. 505—526. Osijek.

32. Mađar, S., Kovačević, V., Mušac, I., Jurić, I., Žugec, I. (1985b): Rezultati istraživanja s postnom sjetvom u Slavoniji i Baranji 1984. godine. Znan. prak. poljopr. tehnolog. 15(3—4). Osijek.
33. Mađar, S., Šeput, M., Kičić, Ž., Buljan, Ž., Grubačević, Ž., Duvnjak, V. (1986): Mogućnosti i perspektive natapanja u Slavoniji i Baranji. Poljoprivredne aktualnosti. Sv. 25. Vol. 1—2. Zagreb.
34. Mađar, S. (1987): Rezultati natapanja u Slavoniji i Baranji u 1986. godini. Poljoprivredne aktualnosti. Sv. 28. Vol. 3—4. Zareb.
35. Mađar, S., Dadić, M. (1989): Kretanje razina podzemnih voda u dreniranim tlima na PPK "Županja". Znan. prak. polj. tehnol. God. XIX 19 (3—4). str. 182—202. Osijek.
36. Mađar, S., Dadić, M. (1991): Utjecaj mjera odvodnje na prinose ratarskih kultura na županjskom području. Znan. prak. polj. tehnol. 19 (1—2). Osijek.
37. Mađar, S., Dadić, M., Josipović, M. (1993): Kretanje razine podzemnih voda u poljoprivrednim tlima županjskog područja. Znan. prak. polj. tehnol. 23 (1—2). p. 147—163. Osijek.
38. Mađar, S., Šoštarić, J., Josipović, M. (1995): Phenomen on drought in Eastern Croatia. Proceedings of the International Workshop on Drought in the Carpatians' Regions. Hungarian National Committee and oth. p. 121 130.
39. Marušić, J., Tadić, L., Tadić, Z., Romić, D., Josipović, M. (2004): Navodnjavanje — zanemarena djelatnost u Hrvatskoj. Sabor hrvatskih graditelja 2004. Hrvatski savez građevinskih inženjera. Cavtat. 993—1004.
40. Marušić, J., Balić, Z., Šturlan, S. (1999): Značenje i stupanj razvoja vodnogospodarskih djelatnosti u Hrvatskoj. 2. Hrvatska konferencija o vodama. 19.—22. V. 1999. Zbornik radova. str. 3—13. Dubrovnik.
41. Marušić, J. (1999): Održavanje melioracijskih kanala i vodnog režima poljoprivrednih tla. 2. Hrvatska konferencija o vodama. 19.—22. V. 1999. Zbornik radova. str. 674—680. Dubrovnik.
42. Messing, I., Jarvis, N. (1993): Temporal variation in the hydraulic conductivity of a tilled clay soil as measured by tension infiltrometers. J. Soil. Sci. 44, p. 11—24.
43. Petošić, D., Marčetić, A., Trbojević, M., Crljenković, F. (1987): Melioracijski zahvati i njihov utjecaj na prinose ratarskih kultura na površinama PIK-a Nova Gradiška, Poljoprivredne aktualnosti, 1—2, Zagreb.
44. Petrićec, M., Margeta, J. (2003): Izrada vodnogospodarske osnove Hrvatske – okvir i temeljne značajke. 3. Hrvatska konferencija o vodama. Hrvatske vode u 21. stoljeću. 28.—31. V. 2003. Zbornik radova. str.633.—644. Osijek.
45. Petrović, M., Đuroković, Z., Crnčan, I., Očelić, I., Tadić, Z. (1994): Stanje i planovi razvoja navodnjavanja na vodnom području Drave i Dunava. Znanstveni skup. Hrvatsko društvo za zaštitu voda i mora i dr. Bizovačke toplice, 17—19. 11. 1994. str. 353—362.
46. Plišić, I. (1996): Dimenzioniranje tlačnih vodoopskrbnih mreža — program za dimenzioniranje, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i HDON. Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Navodnjavanje, Knjiga 5, Planiranje, projektiranje i organizacija natapnih sustava, p.183—205. Rijeka.
47. Pušić, B., Vidaček, Ž. (1971): Prikaz općih potreba i mogućnosti navodnjavanja u dolini Save. Savjetovanje o Posavini. Zagreb.
48. Racz, Z. (1986): Agrikulturna mehanika tla. knjiga. Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. p.131. Zagreb
49. Romić, D., Tomić, F., Romić, M., Kaučić, D. (1994): Procjena potreba vode za navodnjavanje u Hrvatskoj – primjenom modela i test kulture. Znanstveni skup. Hrvatsko društvo za zaštitu voda i mora i dr. Bizovačke toplice, 17—19. 11. 1994. str. 391—398.
50. Romić, D., Šoštarić, J., Tomić, F., Madjar, S. (1996): Program "cropwat" — primjena u planiranju i projektiranju natapanja, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i

- HDON. Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Navodnjavanje, Knjiga 5, Planiranje, projektiranje i organizacija natapnih sustava, p. 161—182. Rijeka.
51. Romić, D., Tomić, F. (1997) : Značajke vode Vranskog jezera u Dalmaciji kao kriteriji procjene pogodnosti za natapanje, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i HDON. Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Navodnjavanje, Knjiga 6, Kvaliteta i raspoloživost vode za natapanje, p. 243—257. Rijeka.
 52. Šimunić, I., Tomić, F., Petošić, D., Stričević, I., Rus, B. (1994): Utjecaj različitih razmaka cijevne drenaže sa dodatnim agrotehničkim mjerama na reguliranje vodnog režima hidromelioriranog pseudoglej-glejnog tla. Znanstveni skup. Hrvatsko društvo za zaštitu voda i mora i dr. Bizovačke toplice, 17—19. 11. 1994. str. 399—411.
 53. Šoštarić, J., Mađar, S., Josipović, M. (1994): Stanje uređenosti i posljedice ratnog razaranja u slivu rijeke Vuke. Znanstveni skup. Hrvatsko društvo za zaštitu voda i mora i dr. Bizovačke toplice, 17—19. 11. 1994. str. 337—343.
 54. Šoštarić, J. (1996): Suša u poljoprivredi i potrebe za navodnjavanjem u istočnoj Hrvatskoj. Disertacija. poljoprivredni fakultet u Osijeku.
 55. Tedeschi, S. (1997a): Količina i kvaliteta otpadnih voda u Republici Hrvatskoj, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i HDON. Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Navodnjavanje, Knjiga 6, Kvaliteta i raspoloživost vode za natapanje, p. 145—154. Rijeka.
 56. Tedeschi, S. (1997b): Upotreba otpadne vode za natapanje, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i HDON. Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Navodnjavanje, Knjiga 6, Kvaliteta i raspoloživost vode za natapanje, p. 195—208. Rijeka.
 57. Tedeschi, S. (1997c) : Iskustva i standardi nekih zemalja u korištenju voda niže kakvoće za natapanje, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i HDON. Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Navodnjavanje, Knjiga 6, Kvaliteta i raspoloživost vode za natapanje, p.233—241. Rijeka.
 58. Thorne, D.W., Peterson, H.B. (1954): Irrigated soils, Their Fertility and Management. knjiga. p.389. New York.
 59. Tomić, F., Marinčić, I. (1979): Detaljna odvodnja teških tala, savjetovanje, uređenje površina s gledišta hidromelioracije i agromelioracije, knjiga II, Zadar.
 60. Tomić, F. (1987): Detaljna odvodnja u ovisnosti o vrsti tla, Priručnik za hidrotehničke melioracije, I kolo, odvodnjavanje, knjiga 4, detaljna mreža, Društvo za odvodnjavanje i navodnjavanje Hrvatske, Zagreb.
 61. Tomić, F. (1988.): Navodnjavanje, Udžbenik, Savez polj. inženjera i tehničara Hrvatske i Fakultet poljoprivrednih znanosti Zagreb.
 62. Tomić, F., Marinčić, I. (1987): Potrebe i mogućnosti primjene natapanja u Republici Hrvatskoj, Poljoprivredne aktualnosti, 1—2, Zagreb.
 63. Tomić, F., Mađar, S. (1989): Stanje i perspektiva navodnjavanja u Hrvatskoj. Vodoprivreda. Br. 21. p. 177—181. Beograd.
 64. Tomić, F., Kos, Z., Mađar, S. (1991): Navodnjavanje – dio suvremene poljoprivrede, Poljoprivredne aktualnosti, Vol 39, br. 3—4/91., Zagreb.
 65. Tomić, F. (1992): Istraživački rad i podloge za projektiranje i izvođenje sustava natapanja, Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Natapanje, knjiga 1, opći dio, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i Društvo za odvodnju i navodnjavanje Hrvatske, Zagreb.
 66. Tomić, F., Romić, D. (1992): Utjecaj natapanja na prirod važnijih poljoprivrednih kultura, Istraživački rad i podloge za projektiranje i izvođenje sustava natapanja, Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Natapanje, knjiga 1, opći dio, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i Društvo za odvodnju i navodnjavanje Hrvatske. p. 89—112. Rijeka.
 67. Tomić, F., Marušić, I. (1994): Stanje i perspektive melioracija u Hrvatskoj. Poljoprivreda i gospodarenje vodama. Znanstveni skup. Bizovačke toplice 17—19. studenoga 1994.

68. Tomić, F., Petošić, D., Šimunić, I. (1994): Reguliranje suvišnih voda tla u svrhu ostvarivanja održive poljoprivrede, *Poljoprivredne aktualnosti*, 30, 3—4, str. 295—310.
69. Tomić, F., Vidaček, Ž., Romić, D. (1993) : Metoda Thornthwaite, Metoda Blaney-Cridlle, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i HDON. Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Navodnjavanje, Knjiga 2. Potrebe vode za navodnjavanje, p. 57—76. Rijeka.
70. Vučić, N. (1976): Navodnjavanje poljoprivrednih kultura. knjiga. p. 440. Poljoprivredni fakultet Novi Sad
71. Vidaček, Ž., Tomić, F., Romić, D. (1993): Bilanca vode u tlu, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i HDON. Priručnik za hidrotehničke melioracije, II kolo, Navodnjavanje, Knjiga 2. Potrebe vode za navodnjavanje. p.157—172. Rijeka.

9

AKTUALNI VODNOGOSPODARSKI ASPEKTI RAZVOJA NAVODNJAVANJA NA PRIMJERU HIDROMELIORACIJSKOG SUSTAVA ČEPIĆ POLJA

*Mr.sc. Josip Rubinić, dipl.ing.grad.
Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci*

1. Uvod	2
2. Aktualni problemi navodnjavanja hidromelioracijskih sustava u Hrvatskoj	
3. Prikaz stanja i razvoja hidromelioracijskog sustava Čepić polja i postojeće planske dokumentacije	
4. Ocjena potrebnih prioriteta aktivnosti na operacionalizaciji planova navodnjavanja na području općine Kršan	20
5. Zaključna razmatranja	21
6. Literatura	

1. UVOD

U radu je, s vodnogospodarskog aspekta, analizirana problematika planiranog razvoja navodnjavanja u Hrvatskoj. Kao primjer je uzeto područje hidromelioracijskog sustava Čepić polja u Istri, a šire i područja gornjeg dijela sliva Raše koji prostorno pripada Općini Kršan koja je početkom 2004. g. i inicirala pokretanje programa navodnjavanja na svome području. Ta je inicijativa koincidirala s u isto vrijeme od Vlade Republike Hrvatske 2004. g. pokrenutim Nacionalnim projektom »Navodnjavanje i gospodarenje poljoprivrednim zemljištem i vodama u Republici Hrvatskoj«. Prema očekivanjima, taj bi program trebao rezultirati s osiguranjem primjerene osnove za realizaciju konkretnih aktivnosti na povećanju udjela navodnjavanih površina u Hrvatskoj, a sve u cilju osiguranja primjerenih uvjeta za poticanje planiranog razvoja poljoprivrede u tržišnim uvjetima koji vladaju na području Europske unije i njenog okruženja. Obzirom na s jedne strane istaknutu inicijativu Općine Kršan za pokretanje razvoja navodnjavanja pred kakvim su zadatkom i druge sredine i lokalne zajednice na čijim se prostorim analize površine pogodne za razvoj navodnjavanja, te s druge strane okolnost da su na tom hidromelioracijskom sustavu prisutni problemi vezani uz pokretanje aktivnosti na razvoju navodnjavanja, uz svo uvažavanje

specifičnih lokalnih uvjeta, svojstveni i za mnoge druge slične lokalitete u Hrvatskoj, pridonijeli su uvjerenju da bi analizirana problematika hidromelioracijskog područja Čepić polja bila pogodna i za javnu prezentaciju i uz nju vezanu diskusiju i u vidu prezentiranog rada.

Time se dani rad, usmjeren na tematiku razvoja navodnjavanja, konceptijski nastavlja na ranije analiziranu problematiku odvodnje hidromelioracijskih sustava, obrađenu u okviru članka »Problemi rada melioracijskog sustava Donje Raše u Istri« (Rubinić, 1996). Obzirom na proteklo vrijeme od gotovo 10 godina od publiciranja tog članka, uložena sredstva u održavanje sustava i još uvijek nedefinirani modalitet međudnosa razvoja poljoprivrede i vodnogospodarskog okruženja, kako na području Donje Raše, tako i šire, za poželjeti je da započeti Nacionalni projekt razvoja navodnjavanja osigura toliko nužan iskorak u smislu konkretizacije razvoja navodnjavanja na za to pogodnim područjima u Hrvatskoj.

Općina Kršan jedna je od vrlo pogodnih sredina za pokretanje obnove razvoja poljoprivrede, i to ne samo na razini područja Istre, nego i šire. Naime, na tom se području nalazi već izgrađeni hidromelioracijski sustav Čepić polja, koji je u vodnogospodarskom smislu jedan od najcjelovitije uređenih odvodnih hidromelioracijskih sustava na području Jadranskog sliva u Hrvatskoj. Nažalost, sustav nije kompletiran i navodnjavanjem, a zbog promjene korisničke strukture i zastoja u poljoprivrednoj proizvodnji na tom prostoru, te neodržavanja sustava sekundarnih odvodnih kanala i kanalske mreže nižeg reda, i znatno devastiran. Zbog toga je prioritarno potrebna njegova rekonstrukcija u cilju dovođenja u nulto projektirano stanje čak i njegove odvodne funkcije. Čepić polje karakterizira postojanje dijelom zapuštenog hidromelioracijskog odvodnog sustava (zbog promjene korisničke strukture nakon prestanka djelovanja PIK-a početkom devedesetih zapušteno je održavanje sekundarne kanalske mreže). Ocijenjeno je da se bez rekonstrukcije tog sustava i razvoja navodnjavanja, ne može osigurati primjerena valorizaciju postojećih poljoprivrednih površina. U tom kontekstu provedene su i analize prisutnih problema i mogućih rješenja, te dane preporuke za realizaciju pojedinih aktivnosti.

No, taj sustav ima i niz komparativnih prednosti – uzvodno od Čepić polja već je izgrađena akumulacija Boljunčica (volumena cca 7 mil. m³), no koja zbog izraženih gubitaka iz zaplavnog prostora funkcionira zasad samo kao retencija za zaštitu od poplava Čepić polja. Uz to, Hrvatske su vode tijekom posljednjih 7—8 godina provele opsežne radove na uređenju glavnog korita Boljunčice, obuhvatnih kanala te osnovne kanalske mreže kao nužno potrebnom preduvjetu za ozbiljniji razvoj poljoprivrede na tom prostoru, kao i inicirale realizaciju više studijsko-istražnih programa vezanih uz analizirano područje, najvećim dijelom vezanih upravo za osiguranje vodnih resursa potrebnih očekivanom razvoju navodnjavanja.

Sukladno dogovoru s predstavnicima Općine Kršan početkom 2004. g., od strane Građevinskog fakulteta Rijeka pripremljen je inicijalni izvještaj Aktualni vodnogospodarski aspekti razvoja navodnjavanja na području općine Kršan i prijedlog potrebnih aktivnosti (Rubinić, 2004), na osnovu kojega je i pripremljen dati rad. Namjera predmetnog izvještaja bila je pružiti lokalnoj zajednici osnovne informacije o aktualnim vodnogospodarskim sagledavanjima problematike obnove hidromelioracijskih sustava i razvoja navodnjavanja u Hrvatskoj, tekućoj

problematici hidromelioracijskog sustava Čepić polja (i dijelova Potpićanskog polja koje također dijelom pripada Općini Kršan), projektima vezanim uz problematiku navodnjavanja na analiziranom području, te u tom smislu potrebnim daljnjim aktivnostima koje je od strane Općine Kršan nužno inicirati u cilju osiguranja razvoja navodnjavanja na njezinom području. Te će aktivnosti u nastavku njihove realizacije biti kanalizirane prema konceptu koga će definirati spomenuti Nacionalni projekt »Navodnjavanje i gospodarenje poljoprivrednim zemljištem i vodama u Republici Hrvatskoj«, odnosno po njegovom donošenju na osnovu njega donesene odluke.

Za istaknuti je da je Općina Kršan među prvima lokalnim zajednicama prepoznala važnost sustavnog gospodarenja poljoprivrednim zemljištem kao preduvjetom i za primjeren razvoj poljoprivredne proizvodnje na svom području i za uz to nužno vezane potrebne vodnogospodarske aktivnosti. Tako je u tom cilju formirana poljoprivredna udruga »Čepić polje«, a očekuje se i participacija Ministarstva poljoprivrede, šumarstva i vodnog gospodarstva, Hrvatskih voda, Istarske županije, kao i ostalih institucija neposredno vezanih uz problematiku navodnjavanja i gospodarenja vodama na tom području. Naime, razvoj navodnjavanja pretpostavlja postojanje cjelovitog uređenja čitavog niza pitanja – počev od uređenja vlasničkih i korisničkih odnosa vezanih uz korištenje poljoprivrednih površina, načina dovodenja hidromelioracijskog odvodnog sustava u "nulto" stanje, pa do operativnog planiranja sustava za navodnjavanje, načina rješenja osiguranja vode za navodnjavanje, kao i upravljanja i financiranja kako aktivnosti na izgradnji tog sustava, tako i samim sustavom po njegovom kompletiranju.

2. Aktualni problemi navodnjavanja hidromelioracijskih sustava u Hrvatskoj

Prema aktualnoj analizi Hrvatskih voda (2002) melioracijska područja zauzimaju relativno značajne površine u Hrvatskoj – ukupno oko 1.673.792 ha, odnosno oko 30% od ukupnog državnog kopnenog teritorija. Od toga oko 43,3% čine površine s potpuno izgrađenim melioracijskim sustavima, a oko 19,4% površine s djelomično izgrađenim sustavima, a 37,3% površina zauzimaju neizgrađena melioracijska područja, tj. područja na kome su potrebni opsežniji zahvati na izgradnji hidromelioracijskih objekata za odvodnju, zaštitu od vanjskih voda kao i zaštitu od procesa erozije. Daleko najveći dio melioracijskih područja lociran je kontinentalnom području Hrvatske, a svega oko 5,5% su melioracijske površine locirane na području primorsko-istarskih i dalmatinskih slivova, gdje su pak klimatski uvjeti i vezano uz turizam blizina tržišta pogodniji. Melioracijski sustavi s riješenom podzemnom odvodnjom vrlo su slabo zastupljeni – od ukupno 822.350 ha melioracijskih površina na potrebna podzemna odvodnja (drenaže), takva je odvodnja riješena na svega 14,8% površina, dijelom riješena na cca 3,3% a čak cca 81,9% površina zahtijeva izgradnju sustava za podzemnu odvodnju (Marušić, 2003).

Izgradnja sustava za odvodnju poljoprivrednih površina bila je intenzivirana nakon II sv. rata, kada je usporedno rješavana i komasacija zemljišta, i to najviše na području Slavonije i Baranje. Razvoj izgradnje novih hidromelioracijskih sustava bio je prisutan do sredine osamdesetih prošlog stoljeća, nakon čega nastupa on prestaje, slabi i održavanje postojećih hidromelioracijskih sustava na kojima nekadašnji PIK-ovi i poljoprivredne zadruge u procesima transformacije nakon uspostave Hrvatske države prestaju biti nositelji razvoja poljoprivrede. Ratne su prilike u Hrvatskoj, kao i smanjenje korištenja obradivog zemljišta utjecale na drastično smanjenje priliva sredstava slivne vodne naknade iz kojih je financirano održavanje postojećih sustava, a dodatni je udar na razvoj hidromelioracijskih sustava bila Odluka zastupničkog doma Hrvatskog državnog sabora od 24. lipnja 1998. kojom je ukinut vodni doprinos i zamijenjen sredstvima državnog proračuna. No, takva supstitucija smanjila je priliv sredstava, a što je rezultiralo smanjenjem radova i daljnjim pogoršanje stanja na zaštitnim hidromelioracijskim objektima.

Nažalost, kako god je situacija u pogledu odvodnje poljoprivrednog zemljišta loša u usporedbi sa stanjem u drugim zemljama s razvijenom poljoprivredom, pa i u odnosu na stanje prije 1990.g., situacija u pogledu navodnjavanja još je teža. Naime, u Hrvatskoj se sada navodnjava samo minoran dio – prema raspoloživim saznanjima (Josipović i dr., 2003) svega 7.159,5 ha, od čega je 62 % navodnjavanih površina u spomenutim priobalnim vodnim područjima. Navodnjavane površine u odnosu na navedenu ukupnu površinu potpuno izgrađenih melioracijskih sustava imaju udio od svega oko 1%, u odnosu na ukupno raspoložive melioracijske površine svega 0,4%, a u odnosu na ukupnu površinu Hrvatske svega 0,1%. Iako je broj neregistriranih korisnika i po njima navodnjavane površine ipak takav da donekle povećava iznijete podatke o navodnjavanim površinama, iznijeti podaci ukazuju na katastrofalno stanje navodnjavanja u Hrvatskoj. S druge strane, prema najnovije provedenim procjenama vodne bilance Hrvatske (Bonacci, Horvat, 2003), Hrvatska ima 26.080 mil. m³/god vlastitih voda, odnosno oko 5.879 m³/st/god. Iz danih je podataka vidljivo da u odnosu na mnoge druge više ili manje razvijene zemlje, Hrvatska vrlo slabo ili nikako ne koristi niti tlo niti vode kao svoje prirodne resurse, iako za to ima vrlo dobre klimatske preduvjete.

U cilju prevladavanja tog stanja pokrenuto je nekoliko inicijativa stručnjaka vezanih uz problematiku hidromelioracijskih sustava, među kojima je posljednji bio održavanje skupa »Stanje i održivi razvoj hidromelioracijskih sustava u Hrvatskoj – preduvjet razvoja poljoprivrede«, održan u Zagrebu 28. i 29. listopada 2003. u organizaciji Hrvatskog društva za odvodnju i navodnjavanje u suradnji s Ministarstvom poljoprivrede i šumarstva, Hrvatskim vodama i Državnom upravom za vode. Provedene analize i zaključci s tog skupa održanog upravo na kraju ekstremno sušne 2003.g., poslani na brojne adrese relevantnih institucija u Hrvatskoj, objavljeni i u časopisu Hrvatske vode 11(2003)45, pridonijeli su na razini države stvaranju pogodnog ozračja za pokretanje razvoja navodnjavanja kao temeljnog preduslova za razvoj poljoprivrede kao strateškog zadatka Hrvatske u procesu njezina približavanja i pridruživanja Europskoj Uniji. U tom je smislu Ministarstvo poljoprivrede, šumarstva i vodnog gospodarstva koje je novim ustrojem Hrvatske vlade kooptirano u to ministarstvo upravo u cilju poticanja razvoja navodnjavanja, provelo niz pripremnih aktivnosti, a

proteklih je dana najavljeno osnivanje posebnog državnog povjerenstva za navodnjavanje na najvišoj razini. U tom kontekstu i predmetna inicijativa Općine Kršan, temeljena na prirodnim resursima i postojećem hidromelioracijskom sustavu, ima priliku da saživi u praksi. No, u cilju osiguranja njene uspješnosti, nužno je operacionalizirati potrebne aktivnosti svih zainteresiranih sudionika i nadležnih institucija.

3. Prikaz stanja i razvoja hidromelioracijskog sustava Čepić polja i postojeće planske dokumentacije

Hidromelioracijski sustav Čepić polja izgrađen je tridesetih godina prošlog stoljeća, i to najvećim dijelom na prostoru nekadašnjeg Čepićkog jezera. Jezero je isušeno prokopom cca 4,5 km dugačkog tunela Čepić—more, planiranog kapaciteta $35 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Kos, 2001), no zbog neizvedene obloge stvarni je protočni kapacitet oko $24 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Zbog potrebe redukcije vodnog vala na ulazu u tunel, s desne obale Boljunčice, izvedena je retencija s dvije ekspanzijske zone ukupne površine oko 100 ha i kapaciteta oko 2 mil. m^3 . Izgradnjom tog sustava osigurano je oko 1800 ha melioracijskih površina u slivu Boljunčice, no zbog ograničenog kapaciteta tunela Čepić javljali su se učestali problemi vezani uz pojave velikih voda Boljunčice, a uvidjelo se i da odvodni sustavi bez osiguranog navodnjavanja ne mogu osigurati primjerenu poljoprivrednu proizvodnju. Zbog toga su sedamdesetih godina prošlog stoljeća provedeni daljnji zahvati na sustavu u okviru kojih je izgrađena akumulacija Boljunčica.

Ta je akumulacija, osim zaštite od poplava nizvodnog područja Čepićkog polja, trebala služiti i za navodnjavanje, no zbog prisutnih gubitaka vode iz zaplavnog prostora koji pri višim vodostajima u akumulaciji dosežu i preko $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, nikada nije uspjela služiti i za tu namjenu. Ukupan volumen izgrađene akumulacije bio je cca 6,5 mil. m^3 , od čega je za obranu od poplava bio predviđen prostor od 2,5 mil. m^3 , a za osiguranje vode za navodnjavanje oko 4,0 m^3 . Zbog intenzivnih procesa erozije u slivu posljedica čega je i taloženje nanosa u akumulaciji, volumen zaplavnog prostora akumulacije Boljunčica smanjen je za cca 0,5 mil. m^3 (Rubinić, 2001). No, s obzirom da se zbog izostanka navodnjavanja navodnjavanja cijeli raspoloživi volumen vode u akumulaciji koristio za zadržavanje vodnoga vala, učinak akumulacije na obranu od poplava bio je i veći od planiranog prilikom izgradnje akumulacije. To se očitovalo posebice tijekom listopada 1993. g. kada je prilikom pojave katastrofalnog vodnog vala kojega je karakterizirao volumen od oko 6,5 mil. m^3 (dakle, veći i od volumena potpuno prazne akumulacije), akumulacija djelovala na njegovo spljoštenje tako da je prelijevalo svega oko $23 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Rubinić, 1995). No, ukupni dotoci u Čepić polje u toj situaciji (dotoci Boljunčicom, vanjske i unutrašnje vode hidromelioracijskog sustava) premašivali su kapacitet odvodnih sustava, tako da je polje ipak bilo poplavljeno.

Napuštanje organizirane poljoprivredne proizvodnje koje je nekad na Čepić polju vodio nekadašnji PIK Agrolabin rezultiralo je usitnjavanjem korisnika poljoprivrednih površina i njihovim djelomičnim zapuštanjem, te potpunim zapuštanjem održavanja kanala sekundarnih unutarnje odvodnje poljoprivrednih po-

vršina. U tim Općina Kršan, u suradnji s Coin d.o.o. iz Pule i Tehničkog studija C. Chiodin iz Treviza, pokreće inicijativu za izradom projekta »Potapanje Čepić polja radi ponovnog vraćanja jezera« (Kršan, 1995). Koliko je poznato, osim u kontekstu izrade spomenutog inicijalnog programa za kandidiranje u okviru programa Svjetske banke METAP III, projekt formiranja samoga jezera površine 700—800 ha na južnom dijelu sadašnjeg polja, te još k tome formiranja oko 900—1000 ha zamočvarenog – vlažnog područja na uzvodnijem području polja nije dalje razrađivan, a Općina Kršan i Županija istarska se orijentirala na budući razvoj poljoprivrede na tim prostorima. Uz takav koncept vezane su i do sada provedene aktivnosti Hrvatskih voda na tom prostoru, prije svega orijentirane na pojačano održavanje glavne kanalske mreže hidromelioracijskog sustava Čepićkog i Potpićanskog polja te pripremu podloga vezanih uz moguće buduće korištenje voda na tom prostoru o čemu je detaljniji osvrt dan na kraju ovog poglavlja. Također vezano uz koncept budućeg razvoja poljoprivrede na prostoru Čepićkog polja bila je izrada i provedba programa zamjene zaštitnih vjetrobranskih nasada topola na Čepić polju sredinom devedesetih, no s neprimjerenim rezultatom.

Sredinom devedesetih počinju se izrađivati i kompleksniji planski dokumenti vezani uz perspektivni razvoj toga područja. U »Strategiji razvoja Labinšćine 1997.—2010.« (Tim za strateški razvoj Labinšćine, Labin, 1997) planiran je razvoj poljoprivrede na analiziranom prostoru, ali je dan osvrt i na scenarij potapanja Čepić polja, te istaknuta kompleksnost takvog rješenja. U Prostornom planu Istarske županije donesenom 2002.g., kao i u skladu s njime izrađenim prostorno-planskim dokumentima nižega reda dijelom su revitalizirane ranije spomenutu programske postavke o potapanju Čepić polja, te je usvojeno rješenje djelomičnog potapanja polja – samo njegovih južnih dijelova s obje strane korita Boljunčice, s namjenom da tako formirane akumulacije imaju višenamjensku funkciju – za navodnjavanje (posebno planiranog golf igrališta) i taloženje, a sekundarno i za poluintenzivni uzgoj riba te rekreacijske potrebe (lov i ribolov). Prilikom izrade plana samo rješenje nije i tehnički razrađivano (npr. kako bi se akumulacije punile vodom s obzirom na visinske međuodnose na tom području), a nije razmatran ni utjecaj takvih akumulacija na uzvodni dio polja gdje je planiran razvoj poljoprivrede, za što bi postojeći hidrotehnički sustav trebalo radikalno rekonstruirati. U prostornom je planu predviđena rekonstrukcija akumulacije Boljunčica, odnosno kako se u planu navodi retencije Letaj (imenovane prema nazivu njene brane Letaj), za zaštitu od poplava i za osiguranje vode za navodnjavanje.

Aktualizaciju istraživanja akumulacije Boljunčica pokrenulo je JVP istarskih slivova iz Labina (1993, 1996), te Hrvatska vodoprivreda (kasnije Hrvatske vode) započevši istraživanja u cilju uspostave akumulacije na tom prostoru (Hidroinženjering, 1994, 1995, 1996, 2000a, 2000b, 2001, 2002a, 2002b) te Hrvatske vode (VGO Rijeka, 1996; VGI Labin, 2001). Usporedno s aktivnostima vezanima uz akumulaciju Boljunčicu, Hrvatske su vode inicirale novelaciju negdašnjeg Plana navodnjavanja istarskih slivova (UNDP, 1979), a što je provedeno u suradnji Hrvatskih voda (1998) i Građevinskog fakulteta Rijeka (1998). Isto tako, započeti su i vodoistražni radovi na širem analiziranom području vezani uz moguće korištenje jamskih voda nekadašnjih ugljenokopa (JVP istarskih slivova Labin, 1993; Institut za geološka istraživanja Zagreb,

2002), a po predloženom konceptu istraživanja podzemnih voda u kome se po prvi puta spominje i širi prostor Čepić polja kao potencijalno pogodno područje za zdenačko kaptiranje, za spomenuti je i studiju Idejno rješenje sustava izvorišta vode u regionalnom prostoru (Hidroprojekt-ing, 2000).

Novelirani plan navodnjavanja iz 1998.g. razmatrao je mogućnost navodnjavanja 1400 ha poljoprivrednog zemljišta na Čepić polju te 702 ha u Gornjoj Raši te Potpićanskom i Posertskom polju. Uz analizu korištenja akumulacije Boljunčica u slučaju njezina mogućeg otješnjenja, analizirane su i mogućnosti osiguranja vode iz nekoliko uzvodnije lociranih potencijalnih akumulacija među kojima je kao najpovoljnija izdvojena lokacija Frlanići na glavnom toku Boljunčice. Isto tako, analiziran je i potencijalni pregradni profil akumulacije Grobnik na Poseru, te korištenje jamskih voda. S obzirom da su istražni radovi na analizi mogućnosti otješnjenja akumulacije Boljunčica vođeni usporedno s izradom predmetne studije, nije ih se moglo respektirati. No, načelno je rješenje s otješnjenom akumulacijom Boljunčica ocijenjeno najpovoljnijim, s time da je ukazano da bi i rješenje s akumulacijom Grobnik moglo biti povoljnije, kako financijski zbog moguće manjih troškova, tako i zbog uloge te akumulacije u zaštiti od poplava Posertske i Potpićanske polje. Procijenjeni troškovi sanacije akumulacije Boljunčica analizirani u okviru projekta »Navodnjavanje Čepić polja – Akumulacija Letaj – Idejno rješenje sanacije i uspostave akumulacije« (Hidroinženjering, 2002) bitno su veći od procjena temeljenih prije provedbe detaljnih hidrogeoloških i hidroloških istraživanja, tako da je pitanje mogućeg osiguranja vode iz akumulacije Grobnik, a koja bi ujedno služila i za zaštitu Posertske i Potpićanske polje od velikih voda i dalje aktuelno. No, lokacija te akumulacije nije uključena u važeći Prostorni plan istarske županije, tako da bi ponovno razmatranje te varijante moralo uključivati i aktivnosti oko eventualne izmjene prostornog plana.

Nakon 1993. g. inicijalno započetog istraživanja vodnog potencijala jamskih voda, u uvjetima potopljene jame Pićan i tada još aktivne jame Tupljak, Hrvatske su vode 2001. g. obnovile taj projekt, čija je realizacija povjerena Institutu za geološka istraživanja iz Zagreba. Ta su istraživanja temeljena uglavnom na prethodnim rezultatima, poglavito u pogledu kakvoće voda (2002, 2004), tako da bez provedbe kompletnijih novijih kvantitativnih i kvalitativnih praćenja nije moguće dati konačne odgovore u smislu ocjene pogodnosti njihova zahvaćanja za planirane namjene.

Program istraživanja usmjeren na ispitivanje mogućnosti osiguranja vododrživosti akumulacije Boljunčice ima najdulji kontinuitet, te je nakon istraživanja općih hidrogeoloških odnosa i odnosa površinskih i podzemnih voda na tom prostoru doneseno i Idejno rješenje sanacije i uspostave akumulacije (Hidroinženjering, 2002). Razmatrana su tri načina mogućeg rješenja (injekcijska zavjesa, površinsko brtvljenje i pojedinačno brtvljenje ponora), a kao najpovoljnije rješenje predložena je varijanta s površinskim brtvljenjem ponora, s procijenjenim troškovima takvog zahvata od 30,3 mil. kn.

Osim na studijskoj razini (Građevinski fakultet Rijeka, 1998), ostala moguća rješenja osiguranja vode za navodnjavanje nisu detaljnije tehnokonomski razrađivana, te ih stoga i nije moguće financijski usporediti sa navedenim rješenjem za akumulaciju Boljunčicu.

Grube računice u okviru spomenute studije iz 1998. troškove sanacije Boljunčice procijenjivale su na dvostruko manji iznos – 15,7 milijuna kuna, dok je ukupni investicijski trošak za akumulaciju Grobnik procijenjen na 20,1 milijuna kuna, dakle manje nego li su po idejnom rješenju procijenjeni troškovi sanacije akumulacije Boljunčica. No, spomenuti su investicijski troškovi izgradnje vodozahvata samo dio ukupnih troškova sustava za navodnjavanje, u koje ulaze i troškovi održavanja tog zahvata, kao i troškovi izgradnje i održavanja natapne mreže, te crpnih postaja i uređaja za navodnjavanje. Uzimajući i njih u obzir, ukupni godišnji troškovi vezani uz cjelovito izgrađen sustav i utrošak od cca 2,784 mil. m³ vode u studiji iz 1998.g. proračunati su kod akumulacije Boljunčica (Letaj) cca 1,55 mil. DEM, a Grobnika 1,51 mil. DEM. To u konačnici rezultira cijenom vode koja je za akumulaciju Boljunčicu proračunata na 2,17 kn/m³, odnosno za akumulaciju Grobnik 2,0 kn/m³. Obzirom na praktički dvostruki iznos novoprocijenjenih troškova sanacije u Idejnom rješenju iz 2002. u odnosu na 1998.g. pretpostavljene troškove prilikom izrade gornjih kalkulacija, očito je da bi jedinična cijena vode kod akumulacije Boljunčica mogla biti i značajnije veća. Ta bi jedinična cijena i inače mogla biti veća kod svih razmatranih lokacija ukoliko bi se iz planiranih sustava navodnjavao samo dio potencijalno pogodnih površina za navodnjavanje.

No, na jediničnu cijenu utječu kako troškovi izgradnje sustava za osiguranje vode za navodnjavanje i njezinu distribuciju, već i količina vode koja se koristi za navodnjavanje. Prethodno dane pretpostavke odnose se na maksimalno izgrađen sustav za navodnjavanje (2102 ha, od toga 1400 ha na Čepićkom polju, a preostalih 702 ha na području Gornje Raše, Potpićanskog i Čepićkog polja), a što u postojećim uvjetima gospodarenja zemljištem obzirom na rascjepkanu strukturu vlasnika i korisnika poljoprivrednog zemljišta na tom prostoru teško da može biti realizirano u neko kraće vrijeme. Formiranje udruge poljoprivrednih proizvođača Čepić polje, koju je inicirala Općina Kršan, dobar je iskorak u tom smislu. No, u cilju racionalnog planiranja daljnjih aktivnosti vezanih uz realizaciju projekta navodnjavanja, bilo bi nužno objektivno sagledati kolike su sadašnje realne mogućnosti objedinjavanja zainteresiranih korisnika za navodnjavanje poljoprivrednog zemljišta (s kojim ukupnim površinama i na kome području su te površine zastupljene). Naime, zainteresirani korisnici poljoprivrednog zemljišta moraju biti pripravnici na participaciju plaćanja navodnjavane vode. Naime, država može i mora, respektirajući proizvodnju hrane kao djelatnost od strateške važnosti, sudjelovati pri izgradnji sustava za osiguranje vode i objekata njezine distribucije. No, i sami korisnici navodnjavanja, kroz povećanu proizvodnju i dobit, moraju snažati barem troškove održavanja hidromelioracijskog sustava, a koji u sebi uključuju i troškove navodnjavanja, i troškove održavanja odvodnih sustava, pa i sami neposredno održavati dio kanalske mreže nižega reda. To je i regulirano postojećoj zakonskom regulativom — Zakonom o vodama i Zakonom o financiranju vodnog gospodarstva (NN 107/95).

Naime, i sami troškovi održavanja odvodnog sustava su vrlo značajni. Primjera radi, na području Čepićkog polja Hrvatske vode održavaju sustav Čepićkog polja na način da se uz održavanje 3,5 km toka Boljunčice uzvodno od tunela Čepić, održavaju i obuhvatne kanale locirane po rubu polja — (desni) obuhvatni kanali br. 2 (8,21 km) i (lijevi) obuhvatni kanal br. 3 (4,93 km), glavne sabirne kanale u polju (4,16 km — sabirni kanal Velo polje; 4,0 km —

sabirni kanal br. 1, 1,73 km — sabirni kanal br. 7), kao i sabirne kanale br. 29 (1,10 km) i sabirni br. 30 (1,30 km) locirane unutar retencijske zone pred tunelom Čepić. Sveukupno se održava oko 29 km kanalske mreže, a što ukupno godišnje iznosi oko 600.000 kn, odnosno s PDV-om oko 730.000 kn. S obzirom da se na Čepić polje zauzima oko 2000 ha, od čega melioracijske površine oko 1800 ha, to bi ukoliko bi se rasporedilo samo na korisnike u polju, iznosilo oko 400 kn/ha.

No, kako se Županija istarska oporedjelila za primjenu minimalni iznos jedinične cijene slivne vodne naknade koji Odlukom vlade iznosi 75 kn/ha, sredstva za održavanje tog melioracijskog sustava sakupljaju se solidarno na razini slivnog područja. Ukupni troškovi održavanja sustava su još i veći jer u prethodno navedene troškove nisu uključeni troškovi održavanja kanalskog sustava i bujica koji gravitiraju obuhvatnim kanalima te troškovi vezani uz planiranje i provedbu stručno-tehničkih aktivnosti (npr. geodetski radovi, projektiranje, nadzor...) koji se financiraju iz programa lokalnih voda na razini slivnog područja, kao i troškovi održavanja sustava koji se financiraju iz programa državnih voda kakav karakter u slivu Boljunčice imaju akumulacija Boljunčica i tunel – Čepić. Vidljivo je da su ti troškovi relativno održavanja samo kanalske mreže koja je u ingerenciji Hrvatskih voda relativno veliki, a što je posljedica velikih dimenzija korita Boljunčice i kanalske mreže. Oni su takvi iz dva razloga – velikog stupnja bujičnosti vodotoka čije vode gravitiraju tim kanalima, kao i zbog projektnog koncepta sustava da se zbog ograničenog kapaciteta tunela Čepić i korita spomenutih vodotoka predimenzioniraju i na taj način slobodan volumen u koritu Boljunčice i kanalskog sustava koristi kao retencijski prostor.

Sadašnje stanje sustava Čepić polja je takvo da je dio sustava koji je u ingerenciji Hrvatskih voda održavan na za stanje u polju primjeren način, ali je kanalska mreža koju bi trebali održavati sami korisnici sustava, uglavnom potpuno zapuštena i obrasla višegodišnjom drvenastom vegetacijom. Kanalska mreža nižega reda nekada je bila u ingerenciji bivšeg PIK Agrolabin, no novi korisnici nisu bili ni organizirani ni spremni za realizaciju te obveze. Stoga će biti nužno da razvoj sustava za navodnjavanje bude popraćen cjelovitim uređenjem odvodnog sustava, kako svih sabirnih kanala, tako i obnovom drenaže. Naime, Čepić polje je na oko 740 ha imalo izgrađeni sustav kombinirane odvodnje (površinska odvodnja i podzemna drenaža), koja je nužna zbog relativno loših pedoloških svojstava tla koje je pred sedamdesetak godina većim dijelom bilo dno Čepićkog jezera. Tu će drenažnu mrežu biti potrebno također rekonstruirati, posebno zbog okolnosti da je zbog zapuštanja sekundarne kanalske mreže došlo do začepljivanja i drenskih izvoda i cijevi. Znači, predstoje i značajni radovi i inicijalni troškovi na privođenju sekundarne kanalske mreže svojoj svrsi te rekonstrukciji drenažne mreže, a kasniji troškovi održavanja tih sustava morati će biti ukalkulirani u troškove vezane uz poljoprivrednu proizvodnju. Prema gruboj procjeni danoj u članku »Stanje hidromelioracijskih sustava na melioracijskim područjima Sjevernojadranskih slivova« (Pavletić i dr., 2003), troškovi rekonstrukcije osnovnih melioracijskih objekata za odvodnju Čepić polja iznose 0,14 mil. €, no s obzirom da će trebati, kako je spomenuto, i niz detaljnih objekata sustava odvodnje, ti će troškovi vjerojatno biti i značajnije veći.

S druge strane, za očekivati je da troškove poljoprivredne proizvodnje neće opterećivati troškovi zaštite sliva od erozije i vanjskih voda. Naime, Čepić polju gravitira niz vrlo intenzivnih bujičnih vodotoka, čiju su sanaciju i dogradnju Hrvatske vode intenzivirale tijekom posljednjih 5—6 godina. Potpunija zaštita od vanjskih voda Čepić polja uključuje i potrebu povećanja protočne moći tunela, pa su tako ukupni troškovi zaštite melioracijskog područja Čepić polja od vanjskih voda u spomenutom članku procijenjeni na 2,0 mil. €, a ukupno potrebni troškovi za planirani razvoj melioracijskog odvodnog sustava procijenjeni na 2,27 mil. €. Za spomenuti je da bi kao alternativu poboljšanja protočne moći tunela sanacijom, odnosno izvedbom obloge tunela, trebalo razmotriti i kombinirana mogućnost povećanja protočnog kapaciteta produbljivanjem tunela, čime bi se stvorili povoljniji uvjeti dreniranja i samih polja. Naime, režim odvodnje polja ovisan je o visini vode u koritu Boljunčice ispred tunela, tako da se u situacijama trajanja visokih voda Boljunčice aktiviraju čepovi na utocima glavnih odvodnih kanala u Boljunčicu, te time onemogućavaju slobodno dreniranje polja.

Vidljivo je dakle da i bez razvoja navodnjavanja hidromelioracijski sustava Čepić polja zahtijeva provedbu značajnih zahvata, kako u domeni problematike odvodnje analizirane u radu (Pavletić i dr., 2003), tako i u kontekstu inicijalno sagledanih i predloženih rješenja u aktualnoj prostorno-planskoj dokumentaciji, ali koja nisu vodnogospodarski sagledavana niti u jednom dokumentu. S druge strane, vjerovatno se ulaganja u odvodni sustav sama po sebi ne bi isplatila ukoliko se u rješenja razvoja poljoprivrede ne uključi i razvoj sustava za navodnjavanje. Zbog toga je nužno cjelovito vodnogospodarski razmatrati problematiku odvodnje, navodnjavanja i drugih aktivnosti planiranih prostornim planom na području Čepić polja, pa i šireg područja sliva Raše i Potpićanskog polja.

4. Ocjena potrebnih prioritetnih aktivnosti na operacionalizaciji planova navodnjavanja na području općine Kršan

Iz danog je prikaza u okviru prethodnih točaka vidljiva kompleksnost problema razvoja navodnjavanja na analiziranom području. Nime, unatoč izrađene relativno brojne dokumentacije vezane uz problematiku navodnjavanja, a u koju, uz već navedenu, spadaju i neke detaljnije razrađivane varijante rješenja navodnjavanja kao npr. u elaboratu Navodnjavanje Čepić polja (OVP Rijeka, 1982.g.), ne postoji nikakav dokument po kome bi bar na razini idejnog rješenja bio riješeno pitanje osiguranja najprihvatljivijeg izvorišta vode za navodnjavanje, dovoda vode do navodnjavanih površina, te potrebne rekonstrukcije odvodnog sustava i uklapanja u rješenja iz prostornog plana. Problem je i što su svi dosadašnji pa i aktualni planovi razvoja navodnjavanja u Istri bili vezani samo uz velike hidromelioracijske sustave i velike akumulacije kao izvorišta tih voda, a što je s obzirom na postojeću strukturu poljoprivredne proizvodnje na području Istre teško ostvarivo.

Po mnogočemu bi Čepić polje ipak moglo biti suprotan primjer i upravo bi se na tom području možda i najprimjerenije mogao primijeniti koncept izgradnje

i funkcioniranja takvih u našim uvjetima velikih hidromelioracijskog sustava i sustava za navodnjavanje vezanih uz velike akumulacije. No, s obzirom na očekivano dulji vremenski rok za njegovu pripremu i cjelovitu izgradnju, ocjenjujem primjerenim da se kao međufaza razmotri i mogućnost osiguranja nekih alternativnih rješenja osiguranja izvora vode za navodnjavanje (podzemne vode iz jamskih prostora i zdenci za zahvat podzemnih voda na širem prostoru Čepić polja), barem za nekoliko manjih navodnjavanih sustava na pojedinim dijelovima polja. Ti bi sustavi za navodnjavanje s jedne strane mogli biti za taj dio Istre pilot područja čime bi se moglo animirati i ostale korisnike poljoprivrednih površina za participiranjem u razvoj cjelovitog sustava za navodnjavanje. S druge bi se strane tijekom takve eksploatacije mogli dobiti vrlo važni podaci o dinamici kretanja podzemnih voda i njihovoj povezanosti s jamskim vodama i procesima njihova pročišćavanja, te bi se na taj način ograničeno korištenje voda za navodnjavanje moglo iskoristiti i kao dio istražnih aktivnosti.

Naime, podzemne jamske vode napuštenih ugljenokopa Potpićan i Tupljak predstavljaju značajan vodonosnik, ali s još neistraženom razinom komunikacije s okolnim prostorom. Naime, u uvjetima eksploatacije ugljena voda se crpila iz relativno dubokih horizonata, a jamski su prostori predstavljali duboke i široko rasprostranjene drenove podzemnih voda. Nažalost, prilikom zatvaranja rudnika zone pojačanih komunikacija na kojima su bila ugrađena tzv. vodna vrata nisu ostavljene otvorenima, tako da bi u slučaju ugradbe crpki u jamske prostore crpljenja bila ograničena na crpljenje vode prikupljene unutar glavnih okana i na njih neposredno vezanih jamskih prostora s relativno malim dotocima podzemnih voda u gornjim zonama. Zbog slabe komunikacije nema ni značajnijih izmjena voda, tako da se onečišćenja preostala kao posljedica eksploatacije ugljena dugotrajno zadržavaju u tom jamskom prostoru. Crpljenja bi mogla popraviti tu situaciju – osigurala bi se izmjena vode, a na osnovu podataka o dinamici opadanja vode tijekom crpljenja moglo bi se dobiti zaključke o komunikaciji tih voda s vodama iz okolnog prostora, te na osnovu toga definirati i količinu crpljenja te pogodnu dubinu urona crpki.

Izvedba zdenaca (ili kaptažnih galerija) za zahvat podzemnih voda na području Čepić polja do sada nije razmatrana niti u kakvim istražnim radovima, iako s hidrološkog aspekta ima mnogo indicija da bi to moglo biti i ostvarivo (geološka struktura tog područja, mala dubina od površine polja do podzemne vode, postojanje izvora Beka u središtu Čepićkog polja, rezultati osmatranja pijezometarskih bušotina na širem prostoru akumulacije Boljunčica i sjevernog ruba Grobničkog polja, pojave voda na južnom rubu polja i Plominskom zaljevu gdje je i izvorište Bubić jama, pojava istjecanja podzemnih voda u tunel Čepić pri određenim hidrološkim stanjima ...). Inicijalna istraživanja podzemnih voda na prostoru Čepićkog polja bi u slučaju pozitivnih rezultata dovela poljoprivrednike na tom prostoru u situaciju u kojoj se nalaze i neka druga područja u Istri gdje se navodnjavanje jedino i počelo razvijati (npr. U zaleđe Pule i Rovinja), i gdje takvo korištenje vode za navodnjavanje potencira i generira donošenje novijih cjelovitijih rješenja.

Podzemne se vode, zbog niske temperature, ne mogu neposredno koristiti za navodnjavanje, tako da je jedno od mogućih rješenja za navodnjavanje kombinacija podzemnih i površinskih voda, a za što bi se trebalo preispitati

moгуćnosti akumuliranja vode u malim akumulacijama čije je formiranje predviđeno prostornim planom. Trebalo bi detaljnije, u kontekstu postojeće topografije terena i visinskih odnosa vodnih pojava, analizirati mogućnost punjenja tih akumulacija s obzirom da neposredno punjenje iz korita Boljunčice nije moguće bez precrpljivanja ili stvaranja povremenih uspora, a za što bi trebalo izgraditi zapornicu pred tunelom Čepić, ili pak rješenje punjenja tih akumulacija tražiti u dotocima iz obuhvatnih kanala.

No, detaljnija razradu mogućih rješenja predmet je obrade dokumentacije koja će svakako morati pratiti danu inicijativu za osiguranjem navodnjavanja, a u kojoj će morati biti obrađeni i ostali aspekti – prije svega agronomski. Agonomski je dio vezan uz problematiku navodnjavanja analiziranog Čepić polja, te Potpićanskog i Posertskeg polja, primjereno obrađen na studijskoj razini u okviru Plana navodnjavanja iz 1998.g., a na toj je obradi sudjelovao Agronomski fakultet u Zagrebu. No, pri planiranju i razradi detaljnijih rješenja navodnjavanja svakako je neophodno sudjelovanje agronomskih stručnjaka. Isto tako, u pripremnoj dokumentaciji trebati će riješiti i pitanje osiguranja odgovarajućih vjetrobranskih pojaseva — zaštite tla od eolske erozije koja je, zbog jakih vjetrova, prisutna na analiziranom području i izvanvegetacijske sezone. Vjetrobranski nasadi topola zasađeni prilikom formiranja hidromelioracijskog sustava s obje strane dijela kanalske i putne mreže dosegli su biološku zrelost i sigurno je nužna njihova sukcesija, no pri planiranju njezine obnove trebalo bi voditi računa o pristupačnosti suvremenih mehaniziranih tehnologijama održavanja kanala, jer će u protivnom održavanje kanala biti višestruko veće od mogućeg.

Ne manje važna aktivnost je i sređivanje vlasničkih odnosa na području obuhvaćenom hidromelioracijskim sustavom, a što podrazumijeva točnu rasčlanbu postojećih površina i objekata, ali i područja planiranih novih objekata. Naime, osim poljoprivrednog zemljišta, sve ostale zemljišne čestice kategorizirane su uglavnom kao “putevi i vode”. To je i bilo primjereno u početno vrijeme, kada su hidromelioracijski sustavi na području Raše i Boljunčice funkcionirali kao jedinstvena upravljačka organizacija. No, s obzirom na aktualno stanje (vodama gospodare Hrvatske vode, putevima vjerojatno lokalna zajednica...) nužno je rasčlaniti zemljišno-vlasničke odnose. U tom su smislu Hrvatske vode prema određenim prioritetima počele rješavati pitanje osiguranja vodnoga dobra, no ukoliko se namjerava intenzivirati razvoj hidromelioracijskog sustava, te ga dodatno opremiti infrastrukturom vezanom uz navodnjavanje, taj proces sređivanja vlasničkog i zemljišno-knjiškog stanja mora se intenzivirati i u njega uključiti i predstavnici drugih institucija vezanih uz analiziranu problematiku.

Kako bi se prethodno nabrojene aktivnosti mogle planirati, te osigurati njihova koordinacija i provođenje, u nastavku je dan načelni plan potrebnih početnih aktivnosti za osiguranje navodnjavanja hidromelioracijskih sustava na području općine Kršan. Te su aktivnosti dane načelnim vremenskim slijedom njihove moguće realizacije, no neke od njih bi se trebale i mogle istovremeno odvijati, za što će trebati sačiniti detaljniji gantogram njihove realizacije. Taj plan bi trebao biti poduprt koordiniranim aktivnostima Općine Kršan prema državnim i županijskim institucijama koje trebaju biti uključene u taj posao (Ministarstvo poljoprivrede, šumarstva i vodnog gospodarstva; Hrvatske vode;

Stručne službe Istarske županije), susjednim općinama na čijem se prostoru nalaze dijelovi hidromelioracijskog sustava (Općine Pićan i Lupoglav), kao i sadašnjim i zainteresiranim budućim korisnicima. Kao inicijalni korak svaka bi institucija trebala napraviti inventarizaciju stanja vezanog uz problematiku analiziranog prostora, kao i reviziju dokumentacije vezane uz moguća rješenja.

Plan bi trebale sačinjavati slijedeće početne aktivnosti:

- Inventarizacija i revizija postojeće aktualne dokumentacije vezane uz problematiku postojećih i izgradnje planiranih hidromelioracijskih sustava na području Općine Kršan – posebno u domeni vodnogospodarskih i agronomskih podloga.
- Analiza zemljišno-vlasničkih na analiziranom prostoru hidromelioracijskih sustava i zonama planirane izgradnje novih akumulacijskih objekata.
- Agronomsko preispitivanje obnove drenaža na analiziranom području te učinaka navodnjavanja na povećanje prinosa i prihoda, analiza strukture poljoprivredne proizvodnje koja bi opravdala ulaganja u izgradnju sustava za navodnjavanje, odnosno pokrivala troškove održavanja tog sustava.
- Ocjena pogodnosti korištenja jamskih voda za navodnjavanje i izrada idejnog rješenja mogućnosti njihova zahvata.
- Provedba hidrogeoloških istraživanja u cilju ocjene mogućnosti zahvata podzemnih voda za osiguranje vode za navodnjavanje dijela analiziranog područja hidromelioracijskog sustava Čepić polja – u slučaju povoljnog ishoda izrada zdenaca i provedba probnih crpljenja.
- Uključenje u razradu rješenja uređenja analiziranog područja i korisnika izvan poljoprivrede, a vezano uz prostornim planom predviđene sadržaje (navodnjavanje golf igrališta, HEP...)
- Novelacija dosadašnjih podloga i izrada varijantnih vodnogospodarskih rješenja uređenja Čepić polja i gornjeg dijela sliva Raše i osiguranja vode za navodnjavanje u kontekstu novih spoznaja o mogućnostima sanacije akumulacije Boljunčica i planiranih rješenja novih akumulacija prema novom prostornom planu Istarske županije. Izbor najpovoljnijih rješenja primjenom višekriterijske optimalizacije. U sklopu tih rješenja nužno je razmotriti i vodnogospodarske aspekte održavanja sustava, kao i obnove vjetrobranskih pojaseva.
- Izrada detaljnog rješenja sustava za navodnjavanje na osnovu odabrane varijante osiguranja izvorišta vode za tu namjenu.
- Izrada tehnoekonomske analize opravdanosti uređenja hidromelioracijskog sustava za navodnjavanje.
- Usklađenje rada osnovane udruge poljoprivrednika “Čepić polje” s propisima i obvezama iz Zakona o vodama (NN 107/1995) vezanim uz problematiku melioracijskog navodnjavanja (članci 44.–48.), melioracijske odvodnje (Članci 96–105), te člankom 174. spomenutog zakona, te koordinacija provođenja daljnjih aktivnosti u toj domeni.
- Izrada plana realizacije izgradnje konkretnih zahvata na analiziranom području, podjela stručno-tehničkih i financijskih obveza te izrada izvedbene dokumentacije za odabrana rješenja, koordinacija aktivnosti oko osiguranja

potrebnih uvjeta, suglasnosti, dozvola i drugih akata vezanih uz izgradnju objekata sustava.

- Realizacija odabranih rješenja, nadzor i praćenje izgradnje planiranih objekata.
- Preuzimanje izgrađenih objekata i sustava, koordinacija upravljačkih aktivnosti oko njihova funkcioniranja i održavanja.

Za učinkovitu realizaciju prethodno nabrojanih inicijalno planiranih aktivnosti potreban je partnerski odnos između zainteresiranih korisnika, posebno između predstavnika zainteresiranih poljoprivrednih proizvođača koje bi trebala prezentirati Općina Kršan i po njoj formirana udruga poljoprivrednika »Čepić polje«, Ministarstva poljoprivrede, šumarstva i vodnog gospodarstva, Županijskih struktura te Hrvatskih voda. Iako je iz danog prikaza vidljivo da realizaciji planiranog navodnjavanja predstoji rješavanje brojnih stručno-tehničkih, pa i pravno-financijskih poteškoća, okolnosti da se nakon dugoga vremena kao predstavnik zainteresiranih poljoprivrednika javlja jedna institucija — Općina Kršan i po njoj osnovana udruga poljoprivrednika »Čepić polje«, te s druge strane organizacijske promjene u vodnom gospodarstvu na način da je ono prema novom ustroju neposredno integrirano u područje djelovanja Ministarstva poljoprivrede, šumarstva i vodnog gospodarstva, mogu imati značajan doprinos da takve prepreke mogu biti uspješno prevladane.

5. Zaključna razmatranja

U predmetnom je radu dana analiza stanja i pregled mogućih rješenja osiguranja navodnjavanja na području Općine Kršan, kao i u tu svrhu potrebne obnove hidromelioracijskih sustava. Iz danog je načelnog pregleda vidljivo da je, ukoliko se želi realizirati projekt navodnjavanja analiziranog područja, potreban čitav niz koordiniranih aktivnosti velikog broja zainteresiranih i nadležnih institucija. Radi se o vrlo skupim projektima, ali dugoročno isplativim ukoliko se na odgovarajući način vrednuju ukupne dobiti od njihove realizacije. Iznaseni pristup pri obrađivanoj problematici u danom primjeru može poslužiti i kao podloga za raspravu prilikom razrade koncepta planiranja aktivnosti na razvoju navodnjavanja na nekim drugim hidromelioracijskim sustavima u Hrvatskoj. U tom je smislu u datom radu iznesene ocjene, dileme i moguće alternative su nam se učinile pogodnima da se i šire prezentiraju kao uvod u problematiku za koju će se rješenja morati tražiti u okviru budućeg koncepta tijekom 2004.g. pokrenutog Nacionalnog projekta »Navodnjavanje i gospodarenje poljoprivrednim zemljištem i vodama u Republici Hrvatskoj«.