
KLIMATSKE PROMJENE I HIDROLOŠKE PODLOGE ZA PROJEKTIRANJE



Hrvatska komora
inženjera građevinarstva



Hrvatska komora
inženjera građevinarstva

KLIMATSKE PROMJENE I HIDROLOŠKE PODLOGE ZA PROJEKTIRANJE

Svibanj, 2024.

KLIMATSKE PROMJENE I HIDROLOŠKE PODLOGE ZA PROJEKTIRANJE

Copyright © Hrvatska komora inženjera građevinarstva

Izdavač:

Hrvatska komora inženjera građevinarstva

Ulica grada Vukovara 271

Za izdavača:

Nina Dražin Lovrec, dipl. ing. građ., predsjednica Komore

Autori:

dr. sc. Ranko Žugaj, dipl. ing. građ.

mr. sc. Ivana Ivanković, mag. ing. aedif.

Recenzentica:

Prof. dr. sc. Nevenka Ožanić, dipl. ing. građ.

Naslovna stranica:

Oton Gliha, akademski slikar

Gromače 25-74, ulje na platnu

Likovno oblikovanje i prijelom:

Goran Vlahović, dipl. ing. graf.

Tisak:

PRINTERA grupa

Položnica 2a, Sveta Nedelja

Naklada:

1000

ISBN 978-953-49360-4-7

Zagreb, svibanj 2024.

SADRŽAJ

UVODNA RIJEČ PREDsjedNICE HKIG	5
1 UVOD	7
2 OPĆENITO O HIDROLOŠKIM PODLOGAMA	8
2.1 Osnovni statistički parametri	9
2.2 Općenito o obradi podataka	10
3 PRISTUP HIDROLOŠKIM IZRAČUNIMA	17
4 PROTOČNA KRIVULJA	19
4.1 Definiranje protočne krivulje	19
4.2 Produljivanje protočne krivulje	25
5 KOEFICIJENTI OTJECANJA, SPECIFIČNI DOTOCI I MODULNI KOEFICIJENTI ...	27
6 OSNOVNI GRAFIČKI PRIKAZI U HIDROLOGIJI	32
7 RAZMATRANJE KARAKTERISTIČNIH PROTOKA	41
8 KRIVULJE TRAJANJA PROTOKA	51
9 VELIKE VODE	55
9.1 Općenito o velikim vodama	55
9.2 Određivanje velikih voda primjenom statističkih metoda	57
9.3 Popravak sigurnosti	67
9.4 Iskustvene (empirijske) formule	69
9.5 Hidrogrami velikih vodnih valova	77
9.6 Ocjenjivanje realnosti primjene iskustvenih formula	82
10 MALE VODE I MALOVODNA RAZDOBLJA	86
11 UTJECAJ KLIMATSKIH PROMJENA NA HIDROLOŠKE VELIČINE	91
12 PREPORUKE ZA PROJEKTIRANJE	92
13 LITERATURA	94

UVODNA RIJEČ PREDsjedNICE HKIG

U novije vrijeme, zbog različitih uzroka, klima na Zemlji postupno se mijenja. Klimatske promjene izravno utječu na hidrološke veličine koje su neophodne podloge za projektiranje objekata za korištenje voda, zaštitu voda i zaštitu od štetnog djelovanja voda. Zbog toga je potrebno definirati osnovni pristup razmatranju njihovoga utjecaja, a i njihov utjecaj na dotoke vode u vodotocima.

Sadržaj ovoga priručnika određen je u Hrvatskoj komori inženjera građevinarstva, u skladu sa zahtjevom realnoga definiranja, odnosno određivanja dovoljno sigurnih, hidroloških veličina. Na taj se način inženjerima obrazlaže pristup razmatranju, provjeravanju i ocjenjivanju pouzdanosti hidroloških podloga potrebnih za projektiranje.

Na početku su definirane i ukratko opisane osnovne hidrološke podloge potrebne za projektiranje. Obrazložen je pristup određivanju utjecaja klimatskih promjena na hidrološke veličine koje treba odrediti na način da one budu dovoljno pouzdane za projektiranje. Na primjerima odabranih hidroloških profila na vodotocima u Hrvatskoj prikazan je utjecaj klimatskih promjena na veličine karakterističnih protoka vode (srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih).

Opisani su pristupi izračunima velikih voda:

- (1) na primjeru kada ima dovoljno podataka maksimalnih godišnjih protoka od motrenja i mjerenja pa je moguće primijeniti metode matematičke statistike i
- (2) u slučaju kada ima premalo ili uopće nema temeljnih hidroloških podataka. Opisan je teorijski oblik velikoga vodnog vala i prikazani su odgovarajući stvarni primjeri.

Kod obrađivanja malih voda prikazani su i komentirani rezultati odabrane statističke obrade minimalnih godišnjih protoka. Također je razmatrano pojavljivanje suša i malovodnih razdoblja.

Na temelju provedenih razmatranja zaključno su sustavno prikazani utjecaji klimatskih promjena na hidrološke veličine i dane odgovarajuće preporuke za projektiranje.

U Zagrebu, svibanj 2024.



Nina Dražin Lovrec, dipl. ing. građ.
Predsjednica Hrvatske komore inženjera građevinarstva

1 UVOD

Ovaj tekst izrađen je za Program stručnoga usavršavanja za razdoblje (2024. – 2025.), koja provodi Hrvatska komora inženjera građevinarstva (HKIG). Predavanja imaju za cilj obuhvatiti osnovne hidrološke podloge potrebne za projektiranje hidrotehničkih građevina za korištenje voda, zaštitu voda i zaštitu od štetnoga djelovanja voda. Pritom je usvojen pristup kojim se razmatra i ocjenjuje mogući utjecaj klimatskih promjena na rezultate hidroloških obrada.

Za razliku od **teorijske hidrologije** koja izučava ključne geofizičke procese, područje koje se ovdje obrađuje pripada **inženjerskoj hidrologiji**. Zadatak je inženjerske hidrologije da na temelju motrenja i bilježenja podataka, te nužnih mjerenja, utvrdi i analizira hidrološke veličine koje su osnova svih vodoprivrednih aktivnosti. To prvenstveno omogućuje sigurnost pri projektiranju i korištenju hidrotehničkih objekata prema njihovoj veličini, svrsishodnosti, ekonomičnosti i sigurnosti protiv oštećenja ili rušenja. Nadalje, kada se radi o izgrađenim objektima ili o objektima predviđenima za izgradnju na osnovi provedenih hidroloških analiza, potrebno je sagledati njihov utjecaj na vodni režim i to naročito na onaj nizvodno od njih.

U ovim je materijalima dijelom korištena literatura jednoga od autora ovih predavanja: R. Žugaj: *Hidrologija*, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2015. te se njezino korištenje u tekstu neće posebno navoditi.

Razmatranjima se nastojalo obuhvatiti vodotoke na kojima se provode hidrološka motrenja i mjerenja te male, neizučene slivove bez ili s premalo podataka od motrenja i mjerenja hidroloških veličina. Pritom su u ovom tekstu iz područja inženjerske hidrologije definirani glavni pojmovi, opisane bitne značajke otjecanja i prikazani praktični inženjerski postupci za izračunavanje hidroloških parametara.

Svakako treba imati na umu da prirodne pojave koje proučava hidrologija ne podliježu tako preciznim analizama uobičajenim u građevinarstvu. U hidrologiji je područje razmišljanja vrlo široko, u hidrološkim se analizama rabe različite metode, a često se tek ocjenjuje realnost rezultata hidroloških izračuna.

Nježna plava boja odraza neba na grubim gromačama velikoga hrvatskog slikara Otona Glihe koja se nalazi na naslovnici, podsjeća nas da se prema vodi trebamo uvijek pažljivo odnositi. Prof. Ireni Bašić zahvaljujemo na odobrenju da prvi pogled na ovaj priručnik bude lijep.

Recenzentici prof. dr. sc. Nevenki Ožanić, dipl. ing. građ. zahvaljujemo na korisnim primjedbama i sugestijama.

Kod razmatranja odabranih hidroloških nizova za odabrane profile, korišteni su podaci Državnoga hidrometeorološkog zavoda RH (DHMZ). Podaci su preuzeti od Hrvatskih voda, kojima ovom prilikom zahvaljujemo na suradnji.

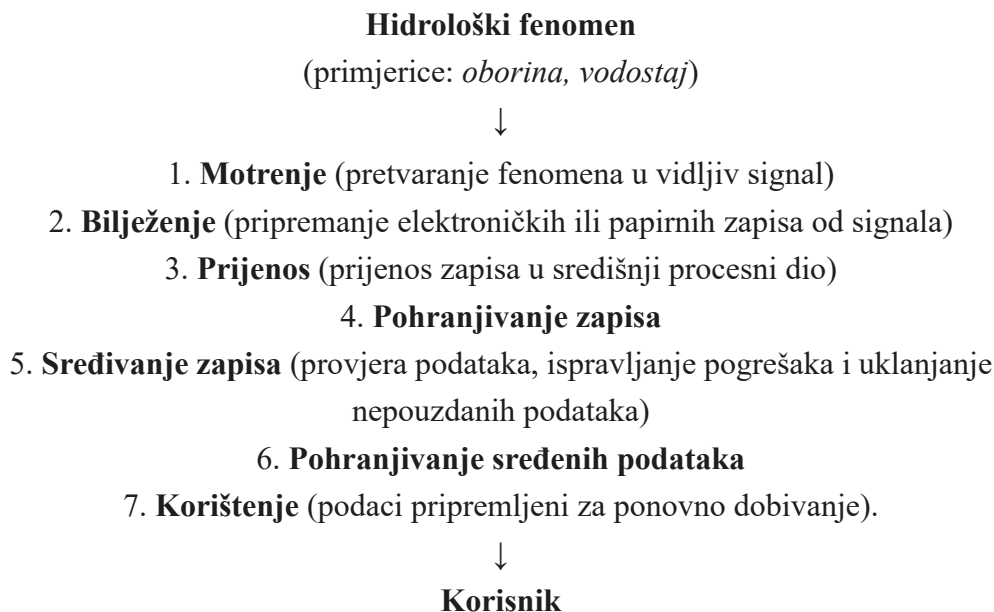
2 OPĆENITO O HIDROLOŠKIM PODLOGAMA

Dostignuća hidrologije primijenjuju se u vodoopskrbi, iskorištavanju vodnih snaga, navodnjavanju, odvodnji, zaštiti od poplava, regulaciji rijeka, uređivanju plovnih putova i luka, bujičarstvu, ribarstvu, rekreaciji i svim ostalim elementima života koji su u vezi s vodama.

U *Republičkome hidrometeorološkom zavodu RH* u Zagrebu, od 1991. godine Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ) RH osnovana je 1980. **Banka hidroloških podataka** (BHP) kao dio Hidrološkoga informacijskog sustava (HIS) (I. Mlaker i S. Komar 1980.).

U **Banci hidroloških podataka** pohranjuju se podaci u niz katalogiziranih zapisa, koji se čuvaju u nekom mediju za čuvanje podataka, koji ne mora biti nužno na dohvat ruke. U Banci hidroloških podataka Državnoga hidrometeorološkog zavoda RH nalazi se vrlo velik fond dnevnih i satnih podataka o vodostajima i protocima prikupljenih sa svih hidroloških stanica u Hrvatskoj, zatim protočne krivulje, temperature vode, koncentracije i pronosi lebdećega nanosa. Te je podatke svake godine potrebno nadopunjavati s novim vrijednostima vodostaja, protoka i ostalih podataka. Hidrološki istraživački radovi velikim se dijelom provode za potrebe Hrvatskih voda i Hrvatske elektroprivrede, koje su uz DHMZ osnivači BHP.

Kada se od prirodnoga fenomena, čiju se veličinu izmjerilo, dolazi do podatka pripremljenoga za korisnika, neophodno je provjeriti, odnosno revidirati izmjerene i obrađene hidrološke podatke. Za tu se svrhu preporuča provesti sljedeću proceduru (V. T. Chow i dr., 1988.):



Hidrološki parametar općenito je veličina koja opisuje neko svojstvo obrađenih podataka, primjerice: prosjek hidrološkoga niza, standardno odstupanje, koeficijent varijacije, koeficijent asimetrije, modulni koeficijent itd. **Modulni koeficijent** je karakteristična vrijednost – najčešće protok – podijeljena s prosječnom vrijednošću niza. Modulni su koeficijenti naročito pogodni za uspoređivanje vodnih režima različitih vodotoka. Hidrološki parametar može biti i koeficijent u nekim hidrološkim modelima i formulama ili drugi odnos, koji se može podesiti da bi se mogao primijeniti opći model na pojedine slučajeve itd. Primjerice, kalibriranje modela oborina – otjecanje za jedan sliv – uključit

će određujuće vrijednosti parametara koji odgovaraju upravo tom slivu, odnosno bitni su za realan opis glavnih karakteristika otjecanja vode.

Kod hidroloških analiza potrebno je proces obrade i analizu, kao što navodi V. Jevđević (1993.), provoditi kroz tri osnovne faze:

1. **Procjena kakvoće osnovnih (ulaznih) meteoroloških i hidroloških podataka.** Pod tim se podrazumijeva razmatranje slučajnih i sustavnih pogrešaka u biranju uzoraka te ispitivanje pojava nehomogenosti u nizovima raspoloživih osnovnih podataka. Temeljna je pretpostavka da rezultati kasnijih obrada – matematičkoga modeliranja, simulacija i optimalizacija – ne mogu biti bolji nego što to dopušta kakvoća ulaznih podataka.

2. **Strukturalna analiza hidroloških sustava i procesa te studije unutar sustava i razvoja.** U to su uključena i raščlanjivanja složenih sustava na jednostavnije podsustave te procesa na njihove komponente uz definiranje njihovih unutarnjih odnosa. Na temelju takvih razmatranja moguće je usvojiti modele koji realno oponašaju obilježja otjecanja u prirodi.

3. **Modeliranje procesa i obilježja prirodne sredine u hidrologiji** pravilnim definiranjem matematičkih izraza za modele, te izborom odgovarajućih metoda za određivanje njihovih parametara.

Svaka od navedenih triju faza istraživanja vrlo je važna i sve njih treba u radu s hidrološkim podacima redovito provoditi i to sljedećim redoslijedom: od procjene kakvoće ulaznih podataka, preko strukturalne analize, do modeliranja procesa. No kod današnjih hidroloških istraživanja često se puta najviše pozornosti posvećuje trećoj fazi cjelokupne obrade, odnosno razvijanju modeliranja hidroloških procesa. Pritom se često zanemaruju prve dvije faze – studija osnovnih podataka i strukturalna analiza. Zbog toga nepouzdana osnovni podaci i pogreške uslijed nehomogenosti nizova osnovnih podataka mogu utjecati na izbor modela i rezultate modeliranja. Izostajanje temeljite analize strukture sustava ili procesa, kao i bitnih obilježja podsustava ili komponenata, također mogu biti uzroci većih neslaganja između stvarnoga otjecanja u prirodi i rezultata primjene matematičkoga modela. Razlog što se svim fazama obrade ne posvećuje ista pažnja jest to što je treća faza – modeliranje – često najprivlačnija, a prva je faza složena, pa i najteža, a profesionalno (bolje rečeno financijski) donosi najmanje, iako je neophodna.

2.1 Osnovni statistički parametri

Kod razmatranja podataka hidroloških nizova od podataka prikupljenih na terenu (hidroloških stanica) bitne su ekstremne vrijednosti (minimalna i maksimalna vrijednost) te od izvedenih vrijednosti prosjek i osnovni statistički parametri koji se ovdje opisuju:

1. **Centar**, sredina niza, prosjek ili aritmetička sredina:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.1)$$

gdje je n broj članova niza, a x_i je i -ti član niza.

2. **Srednje kvadratno odstupanje**, varijanca ili moment drugoga reda:

$$\sigma^2 = m_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.2)$$

3. **Standardno odstupanje** ili standardna devijacija:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.3)$$

Za mali broj podataka umjesto σ koristi se nepristrana procjena:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.4)$$

Ako je kod hidroloških nizova $n \geq 30$, a vrijednosti σ i s se redovito međusobno vrlo malo razlikuju pa je svejedno koji od njih se koristi.

4. **Koeficijent varijacije:**

$$c_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (2.5)$$

5. **Koeficijent asimetrije:**

$$c_s = \frac{m_3}{\sigma^3} \quad (2.6)$$

gdje je m_3 moment trećega reda:

$$m_3 = \frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^3 \quad (2.7)$$

Vrijednosti koeficijenta asimetrije mogu biti pozitivne i negativne. Koeficijent asimetrije c_s je mjera za asimetriju. Na temelju njegovih apsolutnih vrijednosti ocjenjuje se asimetričnost raspodjele. Obično se uzima (V. Vranić, 1965.) da je:

- kada nema asimetrije: $0,00 < c_s < 0,10$
- kada je asimetrija mala: $0,10 < c_s < 0,25$
- kada je asimetrija srednja: $0,25 < c_s < 0,50$
- kada je asimetrija velika: $c_s > 0,50$

Formula (2.6) za koeficijent asimetrije sadrži centralni moment trećega reda (2.7) s eksponentom 3, pa su zbog velika utjecaja ekstremnih vrijednosti potrebni što dulji nizovi za njegovo pouzdano određivanje. Taj je problem manje izražen za srednje godišnje protoke (nizovi s ujednačenijim vrijednostima), ali do izražaja dolazi za nizove maksimalnih i naročito minimalnih godišnjih protoka u slučajevima kada se jedan član niza ili nekoliko njih znatno razlikuju od prosjeka.

2.2 Općenito o obradi podataka

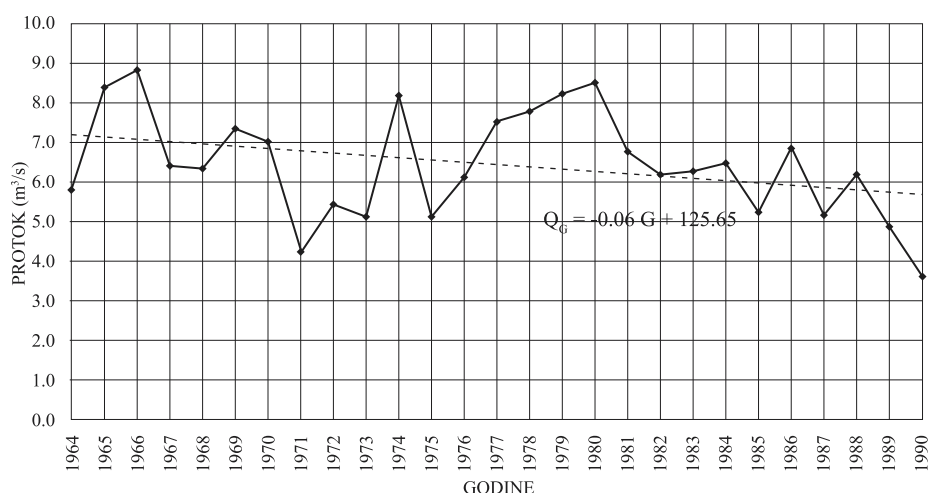
Meteorološke i hidrološke podloge sačinjavaju podaci dobiveni motrenjem i mjerenjem. Od prikupljenih podataka sastavlja se **sljed podataka**, koji predstavlja podatke poredane redosljedom kojim su bili opaženi ili izmjereni. Primjeri sljedova podataka su: maksimalne godišnje oborine različitih intenziteta (jedno-, dvo- i trodnevne), ukupne godišnje oborine, maksimalni, srednji i minimalni godišnji protoci i sl. Sljed se podataka može prihvatiti kao **niz** ili niz vrijednosti slučajne varijable (promjenljive veličine), koji predstavlja podatke o nekim pojavama po redosljedu (kronološki) ili veličini i na njega se mogu primijeniti metode matematičke statistike ako su ispunjeni sljedeći uvjeti:

1. **Članovi niza su slučajne veličine.** Meteorološke i hidrološke veličine može se smatrati slučajnim zbog vrlo velika broja različitih utjecaja o kojima one 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.

3. **Niz mora biti homogen.** Homogenost ili istovrsnost podataka je potrebno ispitati, ako postoje razlozi za to (primjerice promjene u vodnom režimu, promjene u profilu vodotoka i sl.). Ispitivanja homogenosti provode se različitim testovima, primjerice Wilcoxonovim testom, Kolmogorovljevim testom i sl., a nehomogenost u nizu podataka se također može ustanoviti i metodom **dvostrukih sumarnih količina** (double-mass analysis) opisanoj u poglavlju 5. **Nehomogenost je razlika između stvarne vrijednosti i vrijednosti varijable kakva bi bila da nije bilo promjene.** Wilcoxonov test homogenosti ili test rangova opisan je nakon navođenja ovih pet uvjeta koje niz mora ispunjavati da bi se na njega moglo primjeniti statističke metode.

4. **Članovi niza moraju biti stacionarni.** Različite promjene uzrokuju nestacionarnost koja se na podatke odražava 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 hidrološkoga niza **periodičnost predstavljaju pravilni ili promjenljivi oblici koji se dnevno, sezonski, godišnje ili višegodišnje pravilno izmjenjuju.** Zbog nestacionarnosti tijekom vremena može doći do značajnih promjena veličina karakterističnih parametara (prosjeak, koeficijent varijacije, koeficijent asimetrije itd.). Periodičnost se ispituje različitim testovima, primjerice Fischerovim testom. Na slici 2.1 prikazan je opadajući trend srednjih godišnjih protoka rijeke Butišnice u profilu Golubić u razdoblju od 1964. do 1990. godine. Na istoj je slici dana i jednadžba trenda u kojoj je nezavisna varijabla G kalendarska godina, a zavisna varijabla Q (m^3/s) je srednji godišnji protok.



Slika 2.1 Trend srednjih godišnjih protoka Butišnice u profilu Golubić u razdoblju (1964.-1990.)

5. **Niz mora biti dovoljno dug.** Kada se primjenjuju hidrološki postupci temeljni problem predstavlja procjenjivanje jesu li raspoloživi nizovi osnovnih hidroloških podataka dovoljno dugi za donošenje pouzdanih zaključaka. U raspoloživoj literaturi preporučuju se različita minimalna razdoblja motrenja i mjerenja, koja su prikazana u tablici 2.1.

Duljina hidrološkoga niza može se provjeriti na osnovi veličine pogreške koeficijenta varijacije σ_{cv} , prema formuli koju preporuča UNESCO (1982.):

$$\sigma_{cv} = c_v \sqrt{\frac{1 + 2c_v^2}{2n}} \quad (2.8)$$

gdje je c_v koeficijent varijacije, a n broj članova niza. Ukoliko je $\sigma_{cv} \leq 0,10$, niz se može smatrati dovoljno dugim za korištenje.

Tablica 2.1 Minimalan broj godina motrenja i mjerenja hidroloških veličina prema različitim autorima

Autor	Minimalan broj godina motrenja	Napomena
V. Jevđević (1956.)	srednji protoci: 10 maksimalni protoci: 30	za hidrološke obrade
D. Srebrenović (1970.)	srednji protoci: 25 maksimalni protoci: 40	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, ali ne manje od 5	Za regionalne hidrološke analize
R. S. Gupta (1989.) prema T. Darlympleu (1960.)	5 ili više	za regionalne hidrološke analize

Uz isti kriterij ($\sigma_{cv} \leq 0,10$) može se prema D. Srebrenoviću (1970.) rabiti nešto stroža Kricky-Menkelova formula (s istim oznakama kao u prethodnoj formuli):

$$\sigma_{cv} = \frac{c_v}{\sqrt{2(n-1)}} \sqrt{1 + 3c_v^2} \quad (2.9)$$

Kada se primjenjuju formule (2.8) ili (2.9), moraju se poštivati tri uvjeta:

- članovi niza međusobno su neovisni
- razmatrani je niz homogen
- raspodjela članova niza je asimetrična.

Ispitivanja duljine homogenih hidroloških nizova moguće je provesti na temelju varijacija njihovih članova oko prosjeka.

Minimalni broj godina motrenja (od 5 do 15) koji se, prema podacima iz tablice 2.1, preporučuje za regionalnu analizu, uvelike se razlikuje od uobičajenoga pravila u hidrološkoj praksi, da se, kada se primjenjuju metode matematičke statistike, u hidrologiji koriste nizovi ulaznih podataka od najmanje 30 godina.

U praksi hidrološke stanice često rade mnogo kraće od 30 godina. Kraćim je nizovima moguće u regionalnim analizama obuhvatiti više stanica neke regije, pa stoga i bolje definirati glavna obilježja otjecanja vode. Pritom treba ispravno ocijeniti realnost rezultata i pouzdanosti dobivenih zakonitosti, jer se preporuke iz literature najčešće ne odnose na pojedinačne regije. Prema tome, minimalan broj godina motrenja potrebno je posebno analizirati za svako pojedino područje, ovisno o svrsi obrade (R. Žugaj, 1993.).

Kada razmatrani hidrološki niz zadovoljava navedenih pet uvjeta, na njegove se podatke mogu primijeniti metode matematičke statistike.

Između karakterističnih hidroloških parametara (deskriptora), kao najvažniji u određivanju karakteristika niza izdvajaju se prosječna vrijednost, standardno odstupanje, te koeficijenti varijacije i asimetrije (\bar{X} , σ , c_v i c_s).

Primjerice, prosječne vrijednosti protoka \bar{Q} su najbolje procjene očekivanih vrijednosti (osim \bar{Q} srednja voda se može označavati i kao Q , SQ , Q_{sp}). Uspoređeni međusobno srednji protoci izmjereni u različitim razdobljima u istoj hidrološkoj stanici osnovni su pokazatelji značajnih razlika između razmatranih nizova. Nedostatak prosjeka kao deskriptora je utjecaj ekstremnih vrijednosti na njega

(primjerice u kraćim nizovima vrlo velik ili vrlo malen ekstrem može biti posve slučajan, što nepovoljno utječe na realnost procjene prosjeka takvoga niza). Standardno odstupanje σ , odnosno s , s istom dimenzijom kao i članovi niza, najčešće je upotrebljavan parametar u opisivanju rasipanja članova niza. Koeficijent varijacije c_v , definiran kao $c_v = \frac{s}{Q}$ bezdimenzionalan je parametar, koji može poslužiti za uspoređivanje različitih nizova jer isključuje utjecaj veličina srednjih vrijednosti. Ranije opisani koeficijent asimetrije c_s , o čijoj veličini i predznaku ovisi nagib raspodjele, pri određivanju je opće raspodjele vjerojatnosti, uz prosjek i standardno odstupanje, važan parametar koji se upotrebljava u hidrologiji (V. Jevđević, 1977.).

Važnu informaciju pri uspoređivanju dvaju hidroloških nizova iz različitih razdoblja daje ocjena čine li razmatrani nizovi iz različitih razdoblja homogeni niz. Za ispitivanje homogenosti pogodan je, zbog svoje objektivnosti i jednostavnosti, Wilcoxonov neparametarski test (test rangiranja), stoga je on ovdje ukratko opisan. Osnovne pretpostavke za provođenje toga testa su:

- članovi osnovnih skupova međusobno su neovisni
- raspoređeni osnovnih skupova su neprekinuti
- oblici rasporeda skupova su nepoznati (K. A. Browniee, 1960.)

Kada se primjenjuje ovaj test, oblici rasporeda razmatranih skupova ne pretpostavljaju se unaprijed. U tome je njegova praktična prednost u odnosu na većinu klasičnih metoda parametarskih testiranja homogenosti, koje polaze od pretpostavke da je razmatrana varijabla ili normalno raspoređena ili da prati neku drugu raspodjelu s poznatim parametrima.

Osnovni skupovi – originalni, s n_1 članova, i modificirani, s n_2 članova – izdvajaju se iz ukupnoga skupa od $n = n_1 + n_2$ članova.

Dokazano je da suma rangova modificiranoga niza velikih skupova slijedi normalnu raspodjelu, a takva aproksimacija je prihvatljiva kada su n_1 i n_2 veći od 7 (A. A. Mood i F. A. Graybill, 1963.). Uz ovu pretpostavku očekivana vrijednost sume rangova modificiranoga niza $E_{(s)}$ je:

$$E = \frac{n_2(n_1 + n_2 + 1)}{2} \quad (2.10)$$

Standardno odstupanje sume rangova modificiranoga niza σ_s je:

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}} \quad (2.11)$$

a suma rangova modificiranoga niza S_0 je:

$$S_0 = \sum_{j=1}^{n_2} k_j \quad (2.12)$$

k_j je rang člana modificiranoga niza kada se članovi modificiranoga i originalnog niza poredaju po veličini.

Na temelju (2.10), (2.11) i (2.12) opaženo standardno jedinično odstupanje U_0 je:

$$U_0 = \frac{S_0 - E_{(s)}}{\sigma_s} \quad (2.13)$$

Nultoj ili osnovnoj pretpostavci – da nema značajnih promjena u podacima – suprotstavlja se alternativna pretpostavka – da postoje značajne promjene uzrokovane prirodnim ili umjetnim načinom.

Uz uvažavanje razine povjerenja $\alpha = 0,05$, donja i gornja granica prihvaćanja nulte pretpostavke usvajaju se prema normalnoj raspodjeli:

$$\left(U_{\frac{1}{2}\alpha} = -1,96 \right) \leq U_0 \leq \left(U_{1-\frac{1}{2}\alpha} = +1,96 \right) \quad (2.14)$$

Prema tome, ako se vrijednosti opaženoga standardnog jediničnog odstupanja U_0 nalaze unutar donje i gornje granice $\pm 1,96$ (unutar kritičnih vrijednosti), može se s vjerojatnošću većom od 95 posto usvojiti da je niz homogen (95 posto vrijednosti standardne normalne raspodjele je u intervalu od $z = -1,96$ do $z = +1,96$). Ukoliko je vrijednost U_0 izvan granica $\pm 1,96$, vjerojatnost za prihvaćanje nulte pretpostavke je manja od 95%, pa je takav niz, prema usvojenome kriteriju, nehomogen (R. Marković (1971.)).

Opisani je postupak prikazan na primjeru ispitivanja homogenosti niza srednjih godišnjih protoka Krke u profilu Marasovine u razdoblju rada te stanice od 1963. do 1990. godine (tablica 2.2).

Kada se ispituje homogenost, prvenstveno treba utvrditi razlog ispitivanja, odnosno podijeliti osnovni niz na originalni i modificirani. Najčešći razlozi su promjene u vodnome režimu ili postojeće sustavne pogreške pri određivanju protoka. U primjeru srednjih godišnjih protoka Krke u profilu Marasovine razlog za ispitivanje homogenosti niza bila je pojava duga sušnog razdoblja nakon 1980. godine. (R. Žugaj, 1995.).

Prosjek sume rangova modificiranoga niza:

$$E_s = \frac{n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{2} = \frac{10 (18 + 10 + 1)}{2} = 145$$

Standardno odstupanje sume rangova modificiranoga niza:

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}} = \sqrt{\frac{18 \times 10 (18 + 10 + 1)}{12}} = 20,86$$

Suma rangova modificiranoga niza:

$$S_0 = \sum_{j=1}^{n_2} k_j = 12 + 14 + 16 + 19 + 21 + 23 + 24 + 25 + 27 + 28 = 209$$

Standardno jedinično odstupanje:

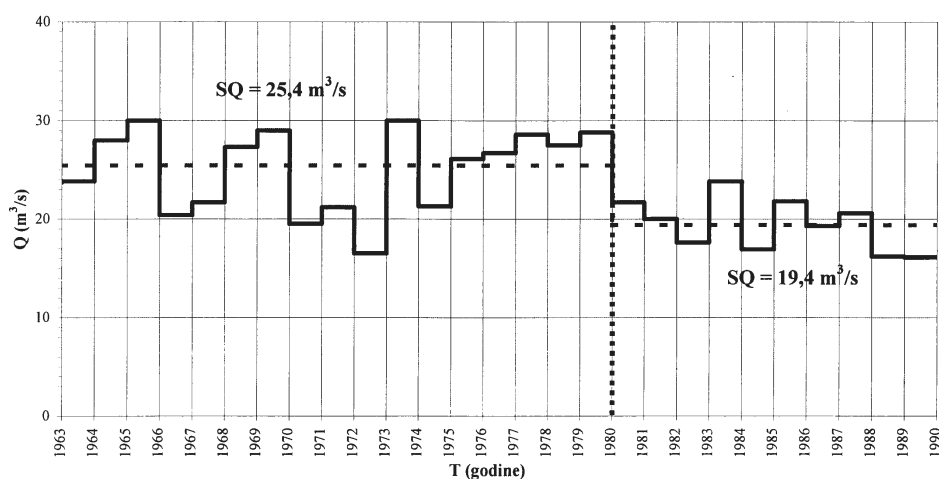
$$U = \frac{S_0 - E_{(s)}}{\sigma_s} = 3,07 > U_0 = 1,96$$

Na osnovi provedenoga testa može se zaključiti da razmatrani niz srednjih godišnjih protoka nije homogen. Prema tome, srednji godišnji protoci Krke u profilu Marasovine iz razdoblja (1963.-1990.) čine dva niza: jedan iz razdoblja (1963.-1980.), a drugi u razdoblju (1981.-1990.) (slika 2.2).

Dok se za članove niza srednjih godišnjih protoka redovito može usvojiti da su međusobno neovisni, za nizove ekstremnih godišnjih protoka treba obratiti pozornost na datume njihova pojavljivanja. Primjerice, ako su se maksimalni godišnji protoci pojavili krajem prosinca jedne i na samome početku druge godine, sigurno je da je velika voda iz prosinca prethodne godine imala određeni utjecaj na maksimalni protok u siječnju, pa taj podatak nije neovisan o prethodnome. Takve se situacije mogu izbjeći obradom hidroloških godina.

Tablica 2.2 Srednji godišnji protoci Krke Q u profilu Marasovine u razdoblju (1963.-1990.), ispitivanje homogenosti Wilcoxonovim testom (izvor podataka: BHP, DHMZ RH)

Godina	Q (m ³ /s) kronološki	Q (m ³ /s) po veličini orig. i mod. niz	Q (m ³ /s) po veličini zajednički niz	Rang k	Broj članova originalnoga i modificiranog niza
1963.	23,7	30,0	30,0	1	originalni niz: $n_1 = 18$ $SQ = 25,4$ m ³ /s $\sigma = 4,10$ m ³ /s $c_v = 0,16$ SQ (srednji protok razdoblja)
1964.	23,8	30,0	30,0	2	
1965.	28,0	29,3	29,3	3	
1966.	30,0	28,8	28,8	4	
1967.	20,4	28,6	28,6	5	
1968.	21,7	28,0	28,0	6	
1969.	27,3	27,5	27,5	7	
1970.	29,2	27,3	27,3	8	
1971.	19,5	26,7	26,7	9	
1972.	21,2	26,1	26,1	10	
1973.	16,5	23,8	23,8	11	
1974.	30,0	23,7	23,8	12*	
1975.	21,3	21,7	23,7	13	
1976.	26,1	21,3	21,8	14*	
1977.	26,7	21,2	21,7	15	
1978.	28,6	20,4	21,7	16*	
1979.	27,5	19,5	21,3	17	
1980.	28,8	16,5	21,2	18	
1981.	21,7	23,8	20,6	19*	modificirani niz: $n_2 = 10$ $SQ = 19,4$ m ³ /s $\sigma = 2,64$ m ³ /s $c_v = 0,14$ SQ (srednji protok razdoblja)
1982.	20,0	21,8	20,4	20	
1983.	17,6	21,7	20,0	21*	
1984.	23,8	20,6	19,5	22	
1985.	16,9	20,0	19,3	23*	
1986.	21,8	19,3	17,6	24*	
1987.	19,3	17,6	16,9	25*	
1988.	20,6	16,9	16,5	26	
1989.	16,2	16,2	16,2	27*	
1990.	16,1	16,1	16,1	28*	


Slika 2.2 Hidrogram srednjih godišnjih protoka Krke u profilu Marasovine; nizovi u razdobljima (1963.-1980.) i (1981.-1990.)

Jesu li nizovi srednjih godišnjih protoka Krke u profilu Marasovine dovoljno dugi za statističku obradu, jednostavno je provjeriti na temelju izraza (2.8) ili (2.9). Primjerice, za niz od 1963. do 1980. godine, gdje je koeficijent varijacije $c_v = 0,16$, a broj članova $n = 18$, pogreška koeficijenta varijacije σ_{c_v} je prema izrazu (2.2):

$$\sigma_{c_v} = \frac{c_v}{\sqrt{2(n-1)}} \sqrt{1+3c_v^2} = \frac{0,16}{\sqrt{2(18-1)}} \sqrt{1+3 \times 0,16^2} = 0,028 < \sigma_{c_v}^0 = 0,10$$

Prema provedenome ispitivanju, niz srednjih godišnjih protoka Krke u profilu Marasovine iz razdoblja od 1963. do 1980. godine je dovoljno dug da bi se na njega mogle primijeniti metode matematičke statistike.

Primjenom statističkih metoda na nizove koji zadovoljavaju navedenih pet uvjeta određuju se različite vjerojatnosti pojavljivanja sa sljedećim ciljem:

Osnovni cilj primjene računa vjerojatnosti u hidrologiji je definiranje povratnoga razdoblja neke određene veličine (meteorološke ili hidrološke) iz niza izmjerenih podataka ili, pak, ekstrapolacijom, ako je ta veličina veća od najvećega izmjerenog podatka.

3 PRISTUP HIDROLOŠKIM IZRAČUNIMA

U proučavanjima hidroloških značajki nekoga sliva najvažniji element predstavlja otjecanje. Otjecanje vode (po potrebi i nanosa) proučava se i analizira u pojedinim protjecajnim profilima razmatranoga vodotoka. Pritom je redovito najjednostavnije definirati dotoke vode na temelju mjerenja u protjecajnome profilu vodotoka. Zbog složena odnosa između palih oborina i otjecanja znatno je teže, a u nekim slučajevima čak i nemoguće, realno odrediti otjecanje na osnovi oborina izmjerenih na meteorološkim stanicama na slivu (A. Stepinac, 1976.).

Otjecanje vode nije konstantno po količini – čak ni u kratkim vremenskim razdobljima – a nagle i snažne promjene su česte. Maksimalni protoci pojedinih rijeka mogu biti nekoliko desetaka puta, pa sve do nekoliko tisuća puta veći od minimalnih. Odnos između maksimalnoga i minimalnog godišnjeg protoka može biti bitno različit u pojedinim godinama. Obično se prosjeci malo mijenjaju, no srednji protoci u nekim različitim vremenskim razdobljima (primjerice: 5, 10, 20, 30 godina) mogu se međusobno značajno razlikovati.

Prema tome, za pouzdano utvrđivanje dugogodišnjega vodnog režima nekog vodotoka, pri rješavanju inženjerskih hidrotehničkih – i ne samo hidrotehničkih problema – potrebno je poznavati kronologiju protjecanja za odgovarajuće razdoblje ili biti upućen u odnose između poznatih podataka o oborinama i protjecanja vode u vodotoku, kako bi to protjecanje moglo biti određeno sa zadovoljavajućom točnošću. U nekim slučajevima u profilu vodotoka u kojem treba definirati otjecanje nema nikakvih mjerenja protoka vode. Tada treba pronaći veze s nekim manje ili više udaljenim protjecajnim profilom čije su hidrološke veličine poznate, a hidrološki režim sličan. Takve se veze istražuju i u slučajevima kad se želi produljiti ili nadopuniti prekratke nizove protoka u jednome profilu na osnovi duljih nizova u drugom profilu. Pritom treba imati na umu da zadovoljavajuće hidrološko rješenje zahtijeva poznavanje odgovarajućih hidroloških pravila.

Osnovni podaci ili osnovne podloge za hidrološke izračune mogu se podijeliti na dvije skupine:

Prva skupina sadrži uglavnom nepromjenjive podloge kao što su topografske, geološke i pedološke karte.

Druga skupina sadrži motrenja i mjerenja promjenljivih veličina u koje spadaju oborine, vodostaji, protoci vode i nanosa, svi oblici isparavanja i faktori vezani uz to (tlak zraka i vodene pare, temperature, vlaga, vjetrovi) te podzemne vode. Ove veličine vremenom pokazuju promjene po količini i kakvoći, a njihovo sustavno prikupljanje i analiziranje je redovito složen posao.

U nekim slučajevima hidrološke obrade pokazuju određene nedostatke. Citira se zapažanje o hidrološkim nedostacima iz neobjavljenoga rukopisa prof. A. Stepinca:

Poznavanje hidroloških nedostataka i njihovih izvora pruža često važne informacije, koje u hidrologiji mogu izvanredno dobro poslužiti, a proizlaze često iz nedovoljnoga razumijevanja hidroloških principa. Brojni nedostaci hidrotehničkih rješenja objekata i njihovih dimenzija, pripisuju se hidrološkim nedostacima, pa se često uzimaju sigurnosni faktori veći, nego što bi to hidrološki bilo ikada dopustivo.

Ranije su uzimani sigurnosni faktori 3 – 4, no novi principi ekonomičnije izgradnje, ne dozvoljavaju ovako visoke faktore sigurnosti, ali se zato traži veći stupanj hidrološke točnosti. Hidrološki nedostaci očitovali su se kod objekata iskorištenja vodnih snaga, dolinskih pregrada u njihovim eva-

kuacijskim organima, vodoopskrbnih sustava, kanalizacija, drenažnih sustava, kod saobraćajnica s neopravdanom veličinom mostovnih otvora itd.

Osnovni princip i zahtjev, morao bi biti, da objekt zadovoljava vodi koja se ikada može pojaviti, samo onda, kada se radi o zaštiti ljudskih života i izvanrednoj zaštiti od velikih šteta koje bi mogle nastati. U svim drugim slučajevima, problemi hidrotehničkih rješenja moraju obuhvatiti i ekonomsku stranu. Kod toga se često postavlja pitanje, koja veličina troškova je opravdana s ekonomskoga staništa. Naime, može se dogoditi da najbolje projektirana i izgrađena hidrotehnička građevina nema dovoljan kapacitet za vrlo velike vode, ako je projektirana skromno iz ekonomskih razloga. (A. Stepinac, 1976.)

U sadašnjemu razdoblju, može zbog neznanja ili površna poznavanja hidrologije kao primijenjene znanosti, doći do krupnih tehničkih propusta, ukoliko se smatra nepotrebnim iskoristiti sve raspoložive hidrološke podatke. Ne smije se zaboraviti ili zanemariti činjenica da veličine mjerodavnih hidroloških parametara nisu konstantne, nego variraju oko prosječnih vrijednosti. Te se prosječne vrijednosti s vremenom mogu značajno promijeniti. Razlozi za promjene mogu biti dulji nizovi prikupljenih podataka – koji redovito daju pouzdanije rezultate obrada, zatim klimatske promjene i promjene u vodnome režimu zbog utjecaja čovjekova rada na slivu i sl.

Danas nisu rijetki slučajevi osuvremenjivanja ili noveliranja neizvedenih projekata nekih, znatno ranije projektiranih hidrotehničkih objekata. Nažalost se često smatra nepotrebnim naručiti obrade novih hidroloških podloga pa se koriste rezultati starih obrada. Stare hidrološke obrade u svjetlu ranijih raspoloživih podloga mogu predstavljati vrijedna dostignuća, pogotovo ako su ih izradili tadašnji vrhunski stručnjaci, ali zbog mogućih promjena hidroloških prilika ili zahvaljujući novim spoznajama one više ne moraju biti mjerodavne. Zanemarivo mala ušteda financijskih sredstava ostvarena nauštrb obrada novih hidroloških podataka može se nakon izvedbe projekta osvetiti, jer postoji velika vjerojatnost da će pojedini dijelovi objekta biti krivo dimenzionirani. Prema tome, da bi se moglo tehnički ispravno pristupiti projektiranju i općenito korištenju hidroloških parametara, potrebno je obraditi sve raspoložive osnovne hidrološke podatke, tako da se ustanove i pri izračunavanju uzmu u obzir i sve moguće promjene nastale u vodnome režimu.

4 PROTOČNA KRIVULJA

4.1 Definiranje protočne krivulje

Protočna krivulja, krivulja protoka ili konsumpcijska krivulja je odnos između vodostaja i protoka u protjecajnome profilu vodotoka, koji se može izraziti u obliku jednadžbe, krivulje ili tablice (jedne ili više njih).

Opći izraz za određivanje protočne krivulje je:

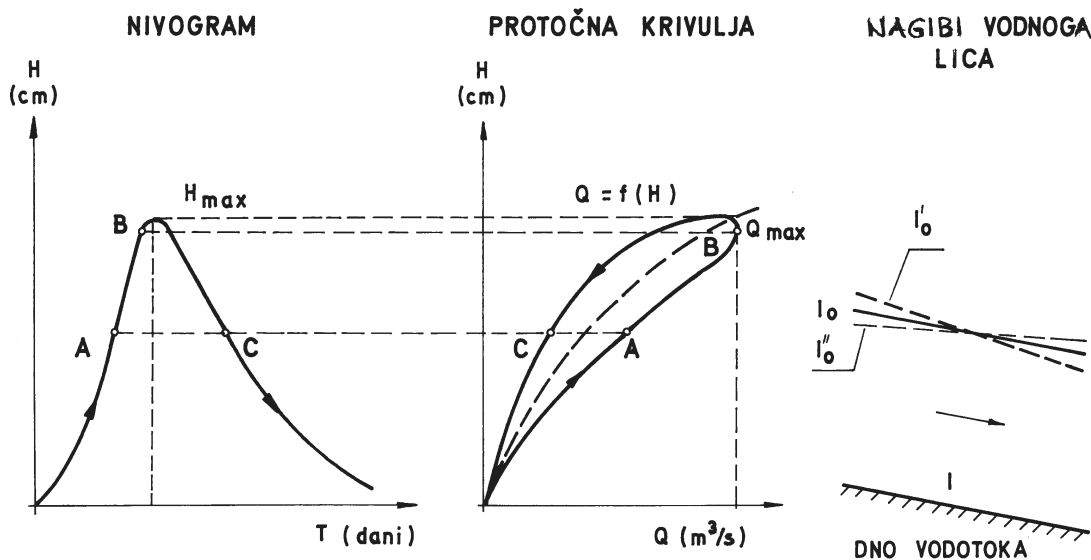
$$Q = f(H) \quad (4.1)$$

gdje je H (m) vodostaj; a Q (m^3/s), (l/s) protok.

Za definiranje protočne krivulje potrebno je poznavati (izmjeriti) neki minimalan broj protoka pri različitim vodostajima.

Protočna krivulja je vrlo važna zakonitost u hidrologiji, na osnovi koje se iz poznatih (zabilježeni) vodostaja određuju odgovarajući protoci vode. O protočnoj krivulji ovisi realnost srednjih dotoka (dnevni, dekadni, mjesečni, godišnji) i prosjeka cijeloga razdoblja motrenja vodostaja, te maksimalnih i minimalnih protoka.

Pri otjecanju vode u prirodnim je uvjetima redovito izražena nestacionarnost. Na slici 4.1. prikazano je stvaranje petlje protočne krivulje za vrijeme velikoga vodnog vala.



Slika 4.1 Stvaranje petlje protočne krivulje za vrijeme velikoga vodnog vala

Za vrijeme podizanja vodnoga vala nagib vodnoga lica je strm, a brzina vode raste, pa zbog toga raste i protok. Za vrijeme opadanja (recesije), nagib vodnoga lica je blaži nego kada val raste; brzina vode je manja, pa je za vodostaj jednak onome kada val raste protok znatno manji.

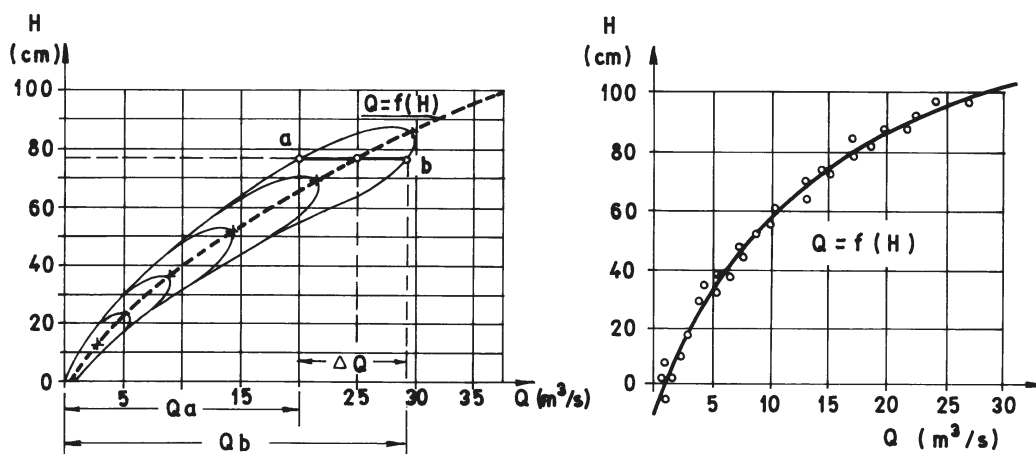
Prema tome, nagib vodnoga lica za vrijeme podizanja vodnoga vala veći je od nagiba vodnoga lica pri osrednjenome stanju: $I'₀ > I₀$ (točka A na slici 4.1). Za vrijeme opadanja (recesije) vodnoga

vala, nagib vodnoga lica je manji nego pri osrednjenome stanju: $I''_0 < I_0$ (točka *C* na slici 4.1). Prema tome, nagibi vodnoga lica izmjereni za vrijeme porasta ili opadanja vodostaja ne odgovaraju nagibu linije energije pri osrednjenomu stanju. Na toj se osnovi ne može realno definirati hrapavost korita pri osrednjenomu stanju u vodotoku (prema Chezyju ili Manningu), pa zbog toga nije moguće hidraulički odrediti protočnu krivulju.

Unutar petlje može nastati neograničeno mnogo protjecanja. Stoga je potrebno odrediti težišnicu sustava krivulja (petlji) i to je protočna krivulja $Q = f(H)$. Na slici 4.2 a prikazana je protočna krivulja kao težišnica vodnih petlji, a na slici 4.2 b je protočna krivulja konstruirana kao prosječna krivulja na osnovi izmjerenih protoka – vodomjerenja¹. Pri razmatranju podataka dobivenih mjerenjem protoka vode važno je ustanoviti je li vodostaj u trenutku mjerenja bio u porastu, mirovanju (što je najpovoljnije) ili opadanju.

Uz mjerenja protoka uobičajene su oznake:

- ↑ za vodostaj u porastu
- ↔ za vodostaj u mirovanju (stagniranju)
- ↓ za vodostaj u opadanju.



Slika 4.2 Protočna krivulja kao rezultat vodnih petlji (a) i izravno povučena protočna krivulja (b)

Izmjereni protoci redovito imaju veća rasipavanja oko osrednjene krivulje u području malih i velikih voda, nego u području srednjih voda (slika 4.3).

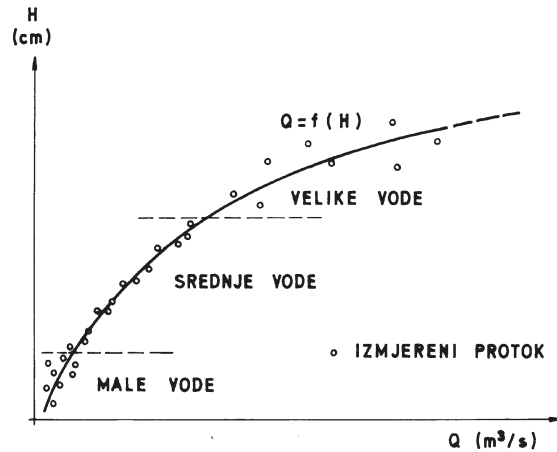
Načini predočavanja protočnih krivulja mogu biti:

I Grafičko određivanje

U slučaju da postoji dovoljan broj izmjerenih protoka pri različitim vodostajima, tako da rasipanje točaka nije veliko, može se izvući težišnica između tih točaka. Takva se krivulja može prihvatiti, ako su mjerenja obuhvatila cijelu amplitudu vodostaja – od najnižega do najvišega zabilježenog vodostaja (slika 4.2 b).

Približan grafički način određivanja protočne krivulje praktički se ne rabi, jer je uobičajeno pretpostaviti analitički oblik i izračunati krivulju iz izmjerenih parova vrijednosti (H , Q) metodom najmanjih kvadrata. Tako određena krivulja redovito se prikazuje grafički, zajedno s izračunskim podacima.

¹ Vodomjerenjem se određuje protok vode kroz hidrometrijski profil. U sklopu vodomjerenja treba za određeni vodostaj izmjeriti brzine vode u protjecajnome profilu i na temelju njih odrediti srednju profilsku brzinu. Umnožak srednje profilске brzine i površine protjecajnoga profila predstavlja protok vode kroz protjecajni profil.



Slika 4.3 Rasipavanje vodomjerenja oko protočne krivulje

II Analitičko određivanje

Analitički se protočna krivulja može definirati najčešće za dva oblika:

1. analitički oblik (kvadratna parabola):

Pretpostavi se da je protok Q funkcija vodostaja H i parametara a, b, c, \dots, n :

$$Q = f(H, a, b, c, \dots, n) \tag{4.2}$$

razvijanjem (4.2) u red dobije se:

$$Q = a + bH + cH^2 + dH^3 + \dots + nH^m \tag{4.3}$$

U izrazu (4.3) četvrti član i svi članovi iza njega su vrlo mali, pa ih se zbog toga može zanemariti. Tako se dobije 1. oblik protočne krivulje (kvadratna parabola):

$$Q = a + bH + cH^2 \quad H \text{ (m)}; Q \text{ (m}^3/\text{s)} \tag{4.4}$$

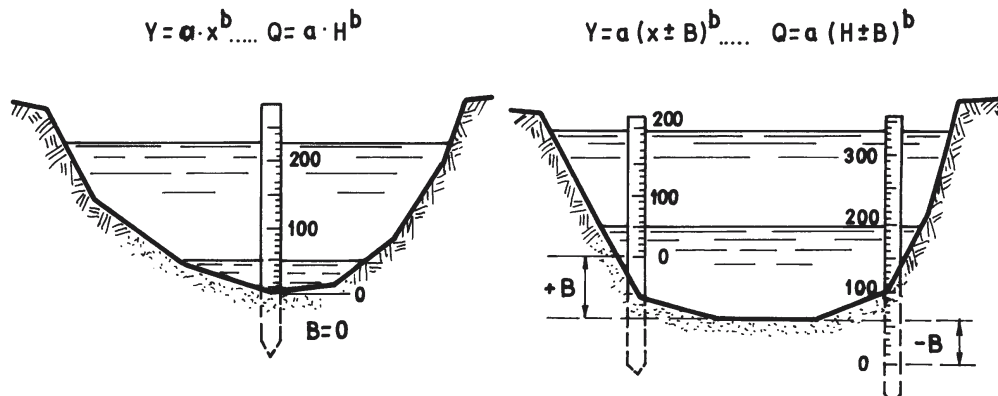
2. analitički oblik ($y = ax^b$):

Općenito se pretpostavi oblik:

$$Q = a V b \tag{4.5}$$

gdje je V dubina vode, a a i b su parametri.

S obzirom na položaj nule vodokaza, u profilu vodotoka mogu se pojaviti tri karakteristična slučaja, koji su prikazani na slici 4.4.



Slika 4.4 Položaj nule vodokaza u profilu vodotoka

Ako se nula vodokaza poklapa s dnom profila, dubina vode V jednaka je vodostaju H pa u tom slučaju vrijedi oblik:

$$Q = a H^b \quad (4.6)$$

Ukoliko se nula vodokaza ne poklapa s dnom profila nego je od dna udaljena za razmak B , općenito je:

$$Q = a (H \pm B)^b \quad (4.7)$$

ako je nula vodokaza iznad riječnoga dna:

$$Q = a (H+B)^b \quad (4.8a)$$

ako je nula vodokaza ispod riječnoga dna:

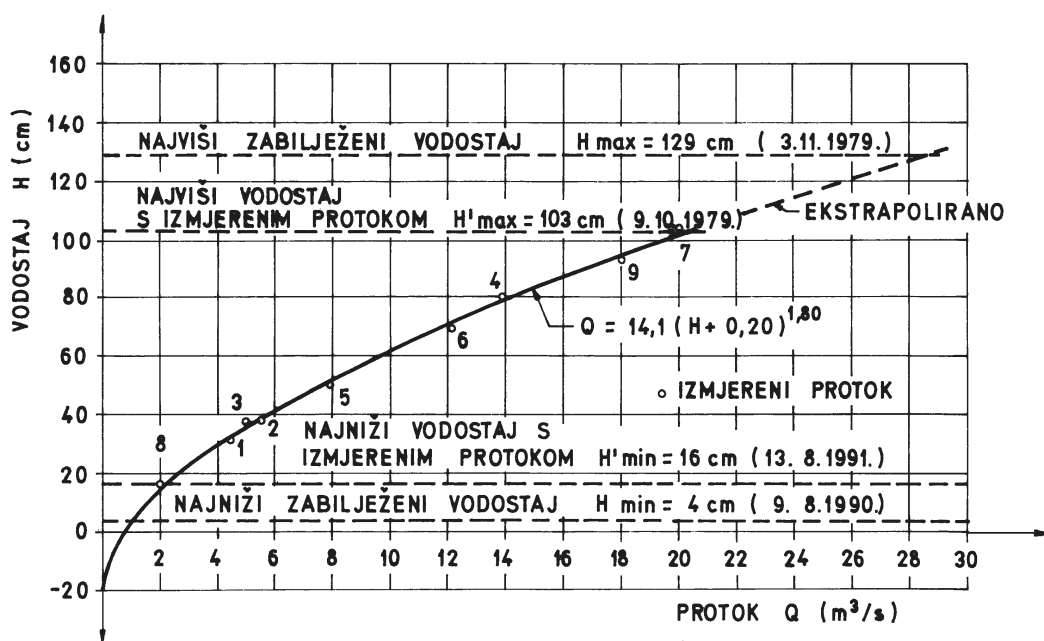
$$Q = a (H - B)^b \quad (4.8b)$$

Za analitičko određivanje nepoznatih parametara a , b i c protočne krivulje $Q = f(H)$, na osnovi izmjerenih podataka H i Q , najčešće se koristi metoda najmanjih kvadrata. Pri izabiranju analitičkoga izraza za protočnu krivulju (1. ili 2. oblik) prednost ima oblik koji se bolje prilagođava izračunskim podacima (vodomjerenjima). Nepoznate parametre (u prvom obliku a , b i c , a u drugom obliku a i b) određuje se metodom najmanjih kvadrata.

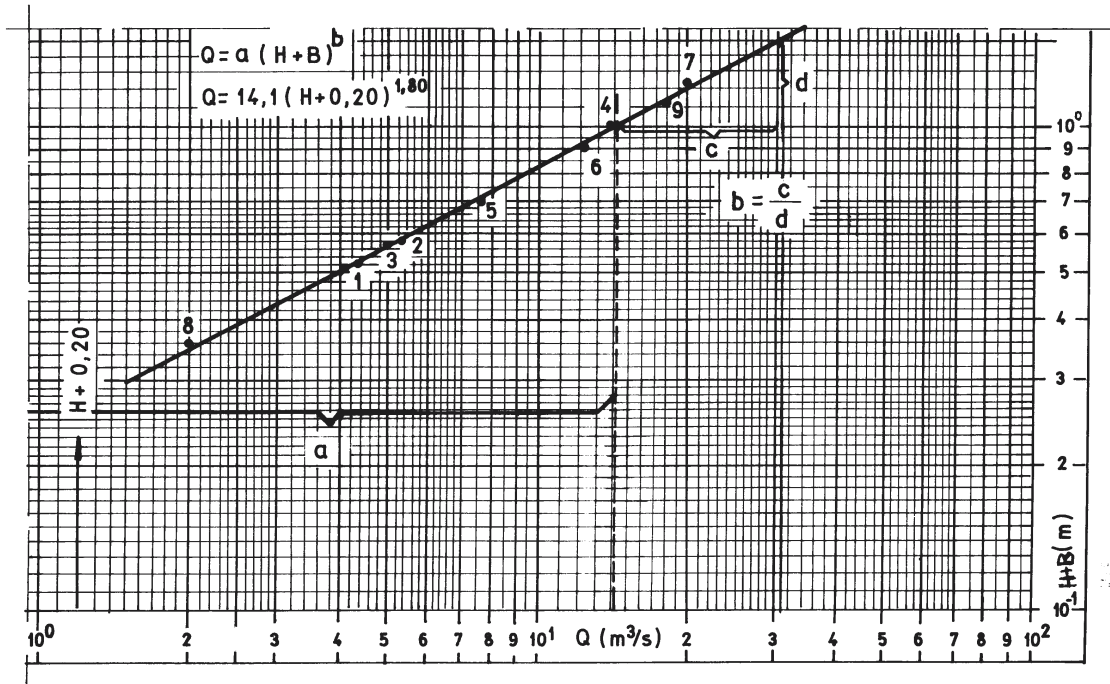
Protočna krivulja $Q = a (H \pm B)^b$ nacrtana u log-log koordinatnome sustavu, je pravac:

$$\log Q = \log a + b \log (H \pm B) \quad (4.9)$$

Protočna krivulja oblika $Q = a (H + B)^b$ u linearnome je koordinatnom sustavu prikazana na slici 4.5, a u log-log koordinatnome sustavu na slici 4.6.

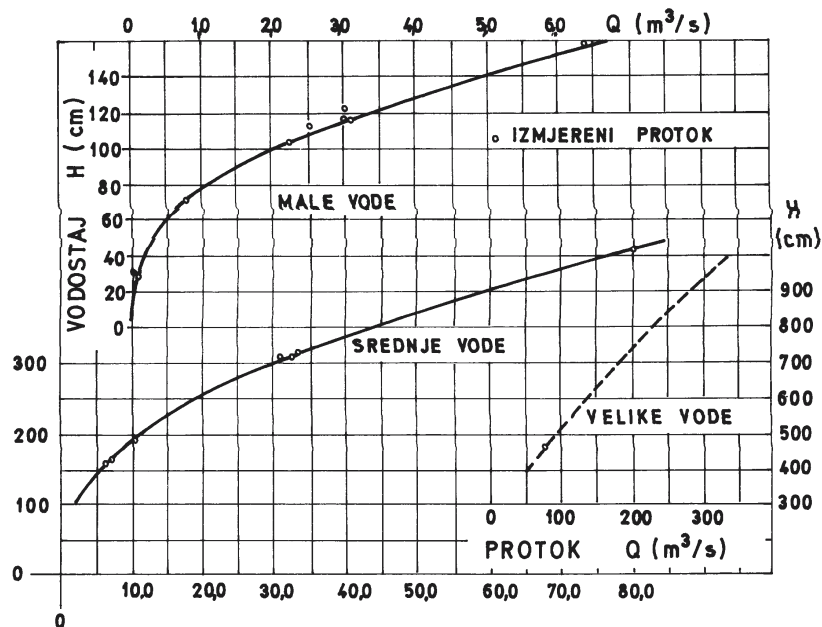


Slika 4.5 Protočna krivulja oblika $Q = a (H + B)^b$ u linearnome koordinatnom sustavu



Slika 4.6 Protočna krivulja oblika $Q = a (H + B)^b$ u log-log koordinatnome sustavu
 $c = \log Q - \log a$; $d = \log (H + B)$

Protočna se krivulja, radi preglednosti, može u različitim mjerilima vodostaja i protoka prikazati na jednome dijagramu. Takva je krivulja prikazana na slici 4.7, a na njoj su razdvojena područja malih, srednjih i velikih voda.

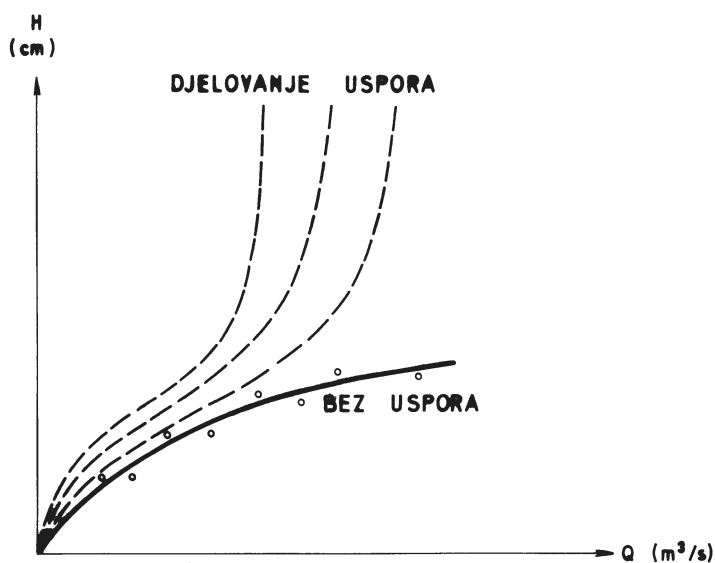


Slika 4.7 Protočna krivulja za područja malih, srednjih i velikih voda

U nekim se slučajevima protočna krivulja sastoji iz više dijelova, koji su definirani različitim jednadžbama. Na taj su način, ovisno o ulaznim izračunskim podacima (vodostaji i odgovarajući izmjereni protoci), bolje definirane zakonitosti $Q = f(H)$ po pojedinim područjima unutar amplitude u kojoj se kreću vodostaji u hidrometrijskome profilu. Pojedini dijelovi (segmenti) protočne krivulje

nadovezuju se jedan na drugi, pa se – ovisno o njihovom broju – takva krivulja naziva **dvo-**, **tro-** ili **višedijelnom protočnom krivuljom**.

U određenim hidrauličkim uvjetima, kada se u hidrometrijskome profilu stvori uspor uslijed nizvodnoga djelovanja, protočnu se krivulju ne može jednoznačno definirati. Na slici 10. prikazani su primjeri protočnih krivulja u hidrometrijskome profilu koji se nalazi uzvodno od ponora, a do njega djeluje uspor krškoga podzemlja. U slučaju kada je razina vode u podzemlju niska, protočnu je krivulju moguće realno definirati. No kada je kapacitet ponora premalen ili kada se razine podzemne vode dovoljno dignu, stvaraju se određeni uspori koji djeluju na konsumpcijski odnos u uzvodnome hidrometrijskom profilu. Tada se protočna krivulja ne može jednoznačno odrediti i poprima različite oblike (crtkano na slici 4.8).



Slika 4.8 Protočna krivulja u hidrometrijskome profilu krškoga vodotoka uzvodno od ponora

Pri određivanju protočne krivulje, pogotovo u slučajevima kada su izražena rasipavanja proračunskih parova vrijednosti H i Q oko izvedene zakonitosti $Q = f(H)$, preporuča se odrediti vjerojatno odstupanje unutar kojega se nalazi 95 posto ulaznih proračunskih podataka (razina povjerenja $\alpha = 5\%$).

U hidrologiji se vjerojatno odstupanje često definira kao interval u kojemu se pojavljuje 95 posto podataka, i njemu odgovara razina povjerenja $\alpha = \pm 5\%$ ($\alpha = 0,05$), jer se normalnom raspodjelom mogu dobro aproksimirati odstupanja ulaznih podataka od izvedene zakonitosti:

$$\sigma_p = \pm 1,96 \sigma_o \quad (4.10)$$

Razina povjerenja α je vjerojatnost da raspon povjerenja uključuje prave vrijednosti. σ_o je **relativno odstupanje**.

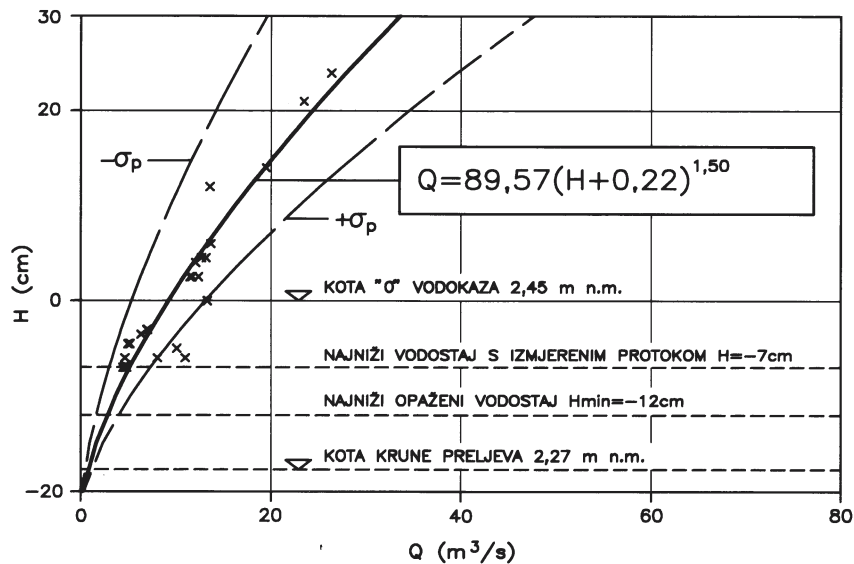
Kada se ustanovi vjerojatno odstupanje izračunskih podataka (izmjerenih protoka) σ_p od protočne krivulje (koja je izvedena na osnovi tih podataka), relativno odstupanje σ_{oQ} je:

$$\sigma_{oQ} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i - Q}{Q} \right)^2}{n}} \quad (4.11)$$

gdje je Q_i izmjereni protok vode, Q protok prema protočnoj krivulji $Q = f(H)$, a n broj mjerenja protoka.

Vjerojatno odstupanje unutar kojega se nalazi 95 posto ulaznih izračunskih podataka σ_{pQ} (razina povjerenja $\alpha = 5\%$ ili $\alpha = 0,05$) je:

$$\sigma_{pQ} = 1,96 \sigma_{0Q} \quad (4.12)$$



Slika 4.9. Protočna krivulja rijeke Omble u profilu Komolac u području malih voda ($\sigma_p = \pm 41,7\%$)

Donji dio protočne krivulje Omble u profilu Komolac s granicama vjerojatnoga odstupanja prikazan je na slici 4.9.

4.2 Produljivanje protočne krivulje

Produljivanje ili ekstrapolacija protočne krivulje je postupak određivanja protočne krivulje u području u kojemu nema protoka izmjenjenih u ovisnosti o vodostaju – za velike, a prema potrebi i za male vode.

Velike se vode rijetko pojavljuju – obično u uvjetima nepovoljnim za mjerenje protoka – a vrlo visoki vodostaji redovito kratko traju. Na većini hidrometrijskih profila zabilježi se tijekom godine razmjerno malo visokih vodostaja. Zbog toga moguće razlike između različitih pristupa produljivanju protočnih krivulja vrlo malo utječu na točnost srednjih godišnjih protoka. Odstupanja ne prelaze nekoliko postotaka vrijednosti srednjega protoka, što je redovito prihvatljivo kada se radi o veličinama srednjih voda.

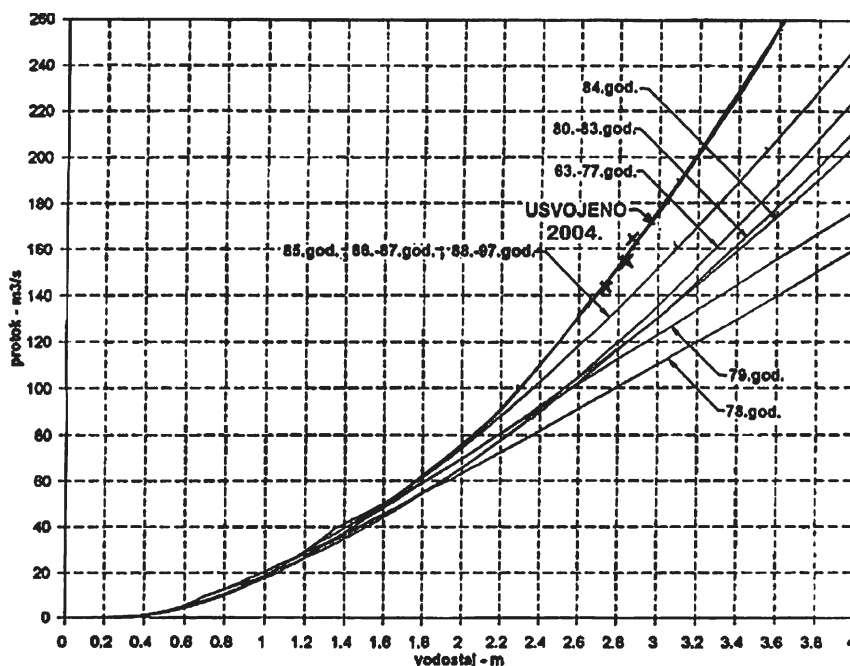
No kada se na osnovi ekstrapolacije protočne krivulje definiraju maksimalni godišnji protoci, koji predstavljaju ulazne podatke za izračunavanje maksimalnih godišnjih protoka različitih povratnih razdoblja, onda je nužno da odabrana metoda ekstrapolacije daje realne rezultate.

Standardni načini ekstrapoliranja protočnih krivulja u osnovi se razlikuju prema karakterističnim hidrauličkim parametrima na temelju kojih se definira ekstrapolirani dio protočne krivulje, zbog čega nastaju velike razlike u vrijednostima protoka ekstrapoliranih različitim metodama. U stručnoj se literaturi postupak preporučuje odabrati na temelju onoga hidrauličkog parametra koji ima najbolju

lineariziranu vezu s vodostajima ili protocima. **Ekstrapolirani dio protočne krivulje smatra se pouzdanim u području do 20 posto raspona vodostaja s izmjerenim protocima** (T. Petković, 1975.).

Ovakav pristup u obzir uzima isključivo podatke iz profila za koji se ekstrapolacija provodi. Osim toga, kriterij odabiranja načina ekstrapoliranja – na temelju najbolje linearizacije veza hidrauličkih parametara s vodostajima ili protocima – nije teorijski potvrđen. Ispravniji je pristup provjeravanje rezultata ekstrapolacije protočne krivulje usporedbom s podacima iz profila sličnih obilježja otjecanja u sklopu regionalnih hidroloških analiza. Na temelju odgovarajućih regionalnih zakonitosti moguće je podacima dobivenima ekstrapolacijom i podacima iz profila u kojima postoje mjerenja protoka velikih voda potvrditi ekstrapolaciju, koja pri ovakvu pristupu može biti znatno veća od 20 posto raspona vodostaja s izmjerenim protocima.

Primjerom rijeke Gornja Dobra u profilu Turkovići potkrepljuje se važnost ispravnoga definiranja protočne krivulje u području velikih voda (R. Žugaj i sur., 2019.). Na slici 4.10 prikazane su različite protočne krivulje po različitim razdobljima, s vrlo velikim međusobnim razlikama u produljenim dijelovima, na što je upozoreno prije provedenih mjerenja protoka velikih voda 2004. godine (B. Brkić, 2001.). Prihvatljiva protočna krivulja je određena na osnovi mjerenja kojima su bile obuhvaćene i velike vode (označena na slici 4.10), koja je provela i protočnu krivulju definirala tvrtka *Hydro-ing*, Zagreb, 2004. godine. Tek je na osnovi te protočne krivulje bilo moguće realno definirati velike vode različitih povratnih razdoblja koje ugrožavaju grad Ogulin (R. Žugaj i K. Pavlić 2015.)



Slika 4.10 Protočne krivulje Gornje Dobre u profilu Turkovići (prema B. Brkić, 2001. i R. Žugaj, K. Pavlić, 2015.)

5 KOEFICIJENTI OTJECANJA, SPECIFIČNI DOTOCI I MODULNI KOEFICIJENTI

Koeficijent otjecanja c je odnos efektivne (neto) oborine P_e i oborine koja padne na sliv (bruto oborine) P :

$$c = \frac{P_e}{P} \quad (5.1)$$

Koeficijent otjecanja sa sliva predstavlja postotak otjecanja u odnosu na bruto količinu oborine koja padne na neko slivno područje. Za srednji protok je:

$$c = \frac{QT}{PA} \quad (5.2)$$

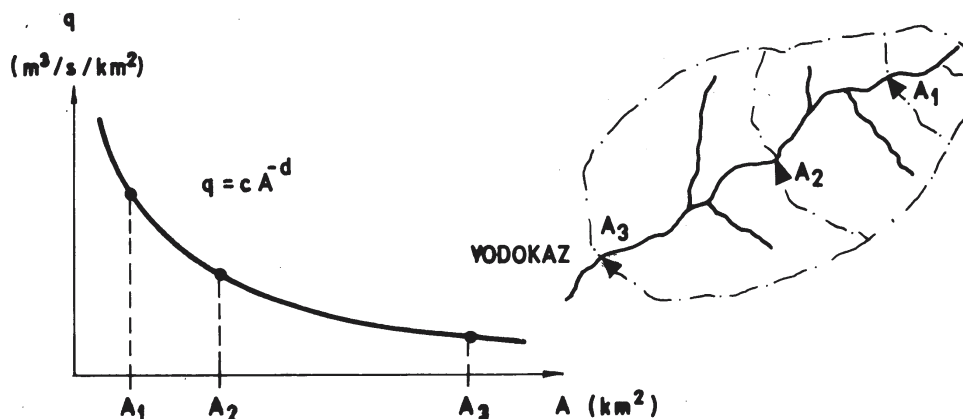
gdje je Q (m^3/s) srednji protok (mjesečni, godišnji, višegodišnji), T (s) trajanje srednjega protoka, P (m) oborina koja padne na sliv, a A (m^2) površina sliva. (Za izračun srednjega godišnjeg otjecajnog koeficijenta je $T = 31,54 \cdot 10^6$ s.)

Specifični dotok ili **specifično otjecanje** q je vrijednost protoka Q vode u protjecajnome profilu vodotoka podijeljena s površinom sliva do tog profila A .

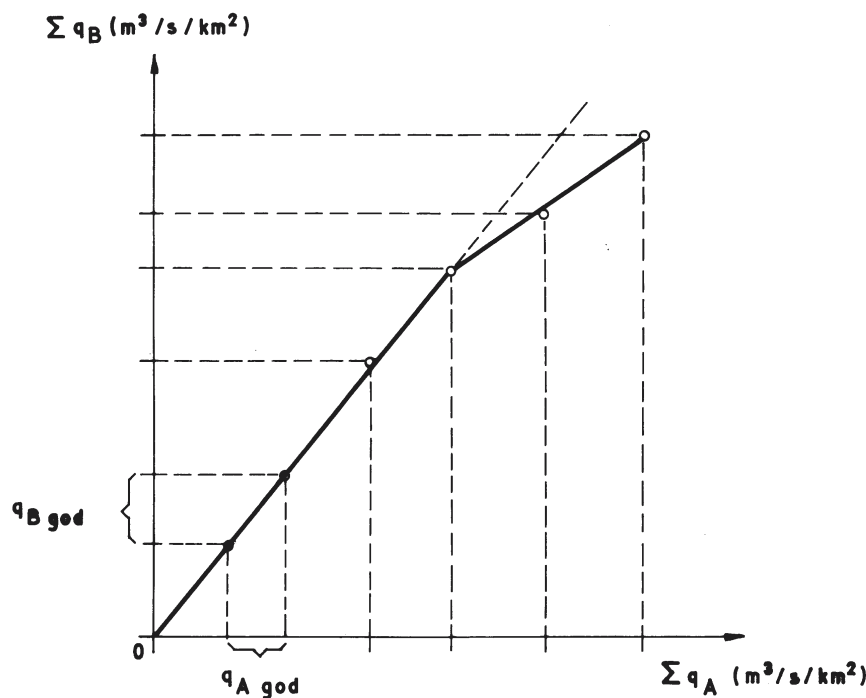
$$q = \frac{Q}{A} \quad (\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2), (1/\text{s}/\text{km}^2) \quad (5.3)$$

Mogu se razlikovati **prosječni** i **ekstremni (maksimalni i minimalni) specifični dotoci sa sliva**. Specifični dotoci su parametri pogodni za međusobnu usporedbu otjecanja u profilima duž vodotoka ili usporedbu otjecanja s različitim slivova.

Postoji li na slivu nekoga vodotoka nekoliko hidroloških stanica (barem tri), moguće je konstruirati krivulju specifičnih dotoka q u ovisnosti o veličini sliva A : $q = f(A)$. Najuzvodniji dio sliva je najbogatiji vodom pa, iako protoci vode duž vodotoka (s povećanjem sliva) redovito rastu, veličine specifičnih dotoka prema nizvodnome dijelu trebaju opadati (slika 5.1) – ukoliko voda nije dodana u vodotok u nizvodnome dijelu ili izgubljena iz njega u uzvodnome dijelu.



Slika 5.1 Krivulja specifičnih dotoka



Slika 5.2 Sumarni specifični dotoci

Uz sliku 5.1 se napominje da su A_1 , A_2 i A_3 površine sliva do pojedinih hidroloških profila.

Za slivove sa sličnim otjecanjem moguće je krivulju specifičnih dotoka sa sliva kojemu postoji više podataka koristiti na slivu o kojemu postoji manje podataka ili ih uopće nema. Na temelju krivulja specifičnih dotoka moguće je odrediti specifični dotok, odnosno odgovarajući protok na bilo kojemu dijelu vodotoka koji je obuhvaćen krivuljom $q = f(A)$. Zakonitost opadanja specifičnih dotoka duž vodotoka nije linearna, pa je zbog toga pogrešno određivati srednje protoke na temelju odnosa površina sliva:

$$Q_1 : Q_2 = A_1 : A_2 \quad (5.4)$$

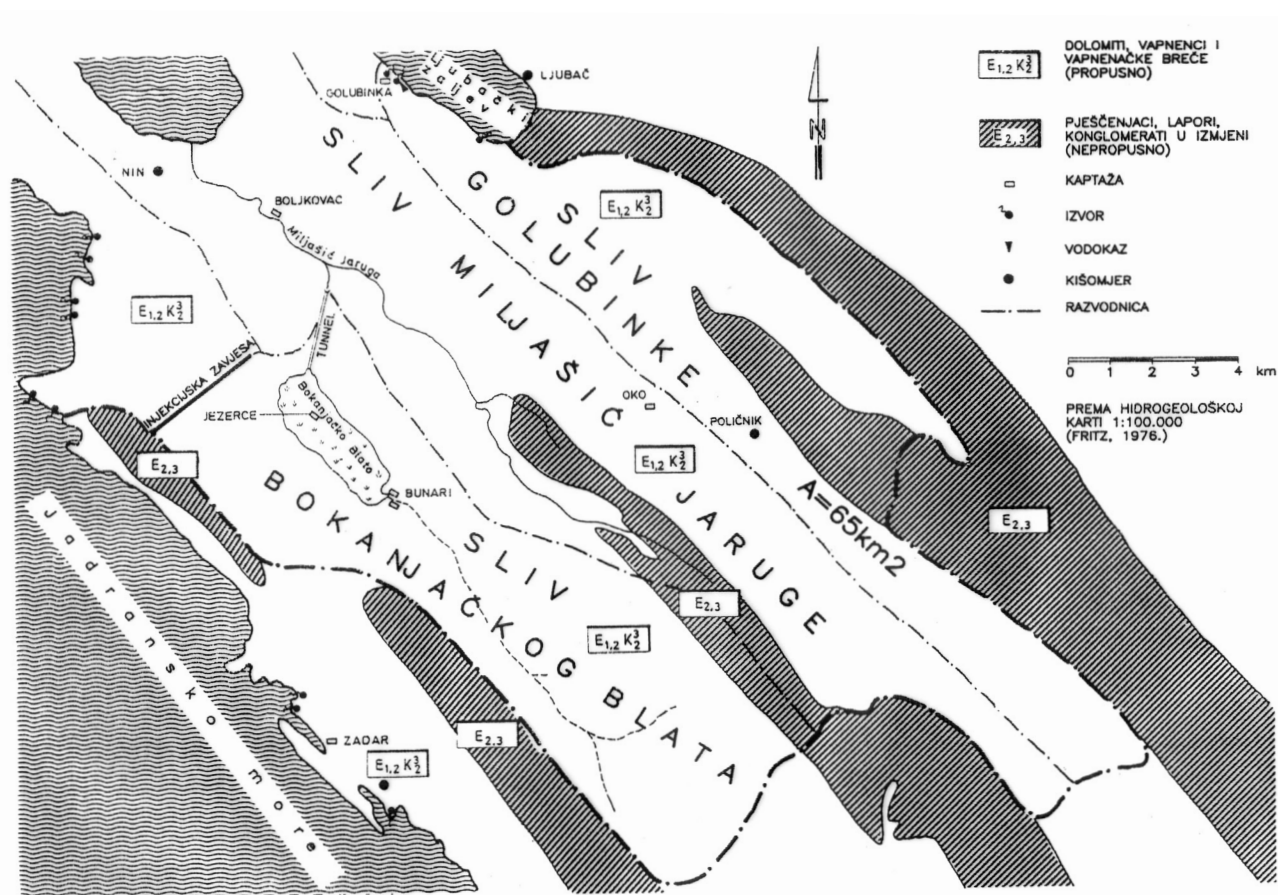
Kada se srednje godišnje specifične dotoke kronološki zbroji, dobije se **sumarne specifične dotoke** Σq . Istovremeni sumarni specifični dotoci u dva različita hidrološka profila sa sličnim vodnim režimima mogu se uspoređivati na temelju grafičke konstrukcije (slika 5.2). Ukoliko su protoci na razmatranim stanicama točni, pravac koji izjednačava sumarne dotoke prolazit će kroz ishodište koordinatnoga sustava, a otkloni prema osnovnoj liniji ne smiju biti veći od kuta od 5° . Niz se podataka na temelju osnovne linije može produljiti prema gore ili prema dolje ukoliko je niz jedne stanice kraći od niza druge stanice.

Ukoliko se ustanovi lom linije sumarnih dotoka, to je siguran znak da je u jednome od razmatranih hidroloških nizova došlo do značajne promjene, pa je potrebno kontrolirati osnovne hidrološke podatke, ustanoviti razlog promjene i provesti odgovarajuće popravke.

Ako se opisani postupak poopći, tako da vrijedi za nizove podataka koji se kronološki zbrajaju, dolazi se do pojma **dvostrukih sumarnih količina**, koje predstavljaju prikaz uzastopnih akumuliranih vrijednosti druge varijable (engl. *double-mass analysis* – što je fizikalno neispravno prevoditi kao dvostruke mase). Na temelju pravca koji prolazi kroz ishodište koordinatnoga sustava i kroz točke parova sumarnih količina, podatke se može provjeriti i potom provesti odgovarajuće nadopune nizova. Osim za prosječne dotoke, postupak je preporučljivo rabiti za provjeravanje i produljivanje nizova godišnjih oborina.

Ukoliko se članovi nekoga niza protoka podijele sa svojim prosjekom, onda se te vrijednosti nazivaju **modulnim koeficijentima protoka ili protocima u modulnim koeficijentima**. Protoci u modulnim koeficijentima pogodni su za usporedbu pojedinih hidroloških karakteristika u dvjema hidrološkim stanicama, a na toj je osnovi moguće uspoređivati i vrijednosti oborina i protoka. Najčešće se za određeno razdoblje obrade modulnim koeficijentima prikazuju srednji mjesečni i godišnji protoci, prosječni mjesečni i godišnji protoci, te maksimalni i minimalni godišnji protoci.

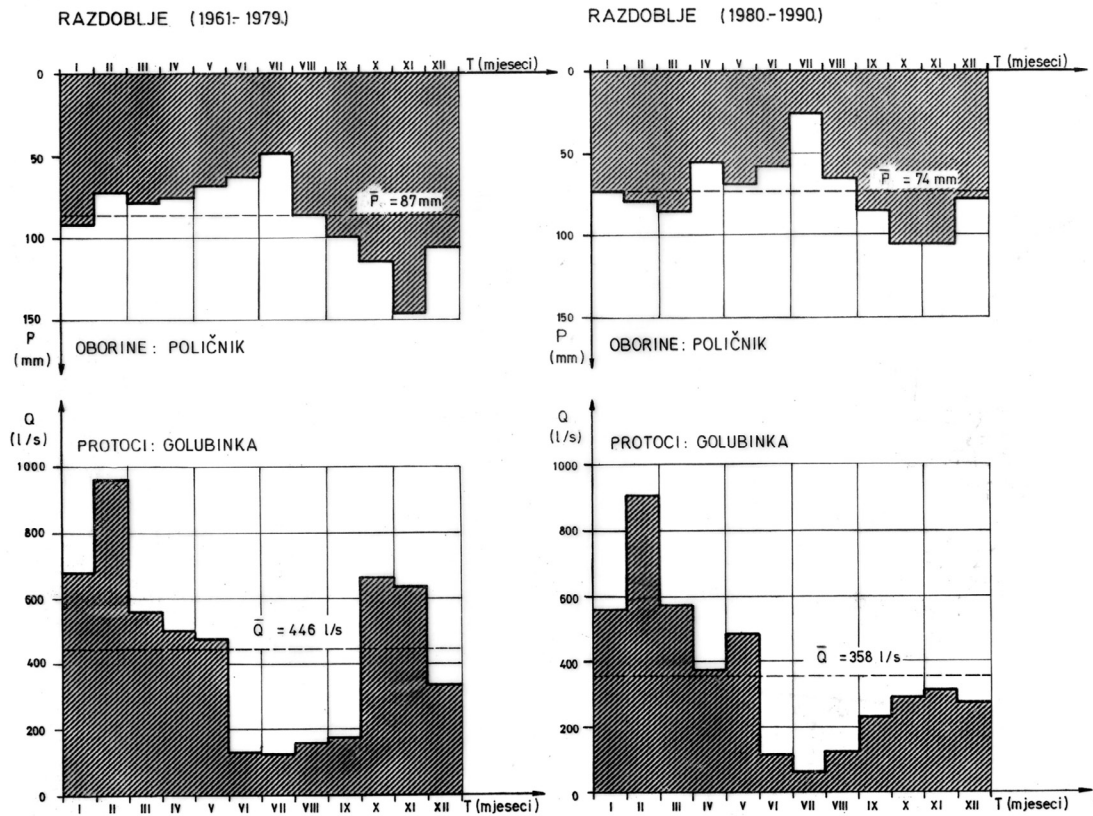
Modulni su koeficijenti vrlo pogodni za analiziranje promjene vodnoga režima na istome hidro-metrijskom profilu u dvama različitim razdobljima. Takav je primjer krškoga sliva Golubinka, koji je u Domovinskom ratu bio jedan od najvažnijih izvora pitke vode za grad Zadar. Situacija sliva s kojega voda podzemnim tokovima dolazi na izvor Golubinka prikazana je na slici 5.3. Na slivu se nalazi kišomjerna stanica Poličnik.



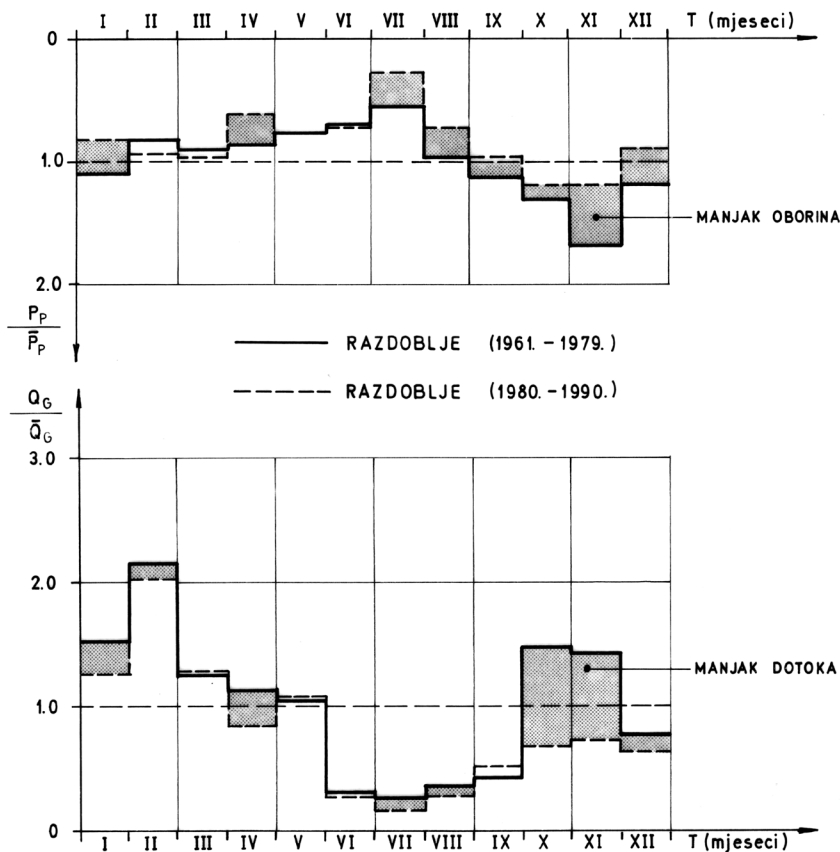
Slika 5.3 Utjecajni sliv izvora Golubinka (F. Fritz, 1976.)

Za Golubinku su obrađeni srednji mjesečni i srednji godišnji protoci u razdoblju od 1961. do 1990. Ispitivanjem homogenosti niza srednjih godišnjih protoka Golubinke ustanovljeno je da nizovi protoka iz razdoblja (1961.-1979.) i iz sušnoga razdoblja (1980.-1990.) ne tvore zajednički homogeni niz, pa su stoga razmatrani odvojeno.

Prosječni mjesečni hijetogrami mjerodavne kišomjerne stanice Poličnik (koja se nalazi na slivu Golubinke) pokazuju razlike u oborinama od prosječno 15 posto, a prosječni mjesečni hidrogrami Golubinke razlike od prosječno 20 posto između podataka iz sušnoga razdoblja (1980.-1990.) i razdoblja (1961.-1979.), kako je prikazano na slici 5.4. U prijašnjemu, vodom bogatijemu razdoblju (1961.-1979.), prosječni su mjesečni protoci četiri mjeseca uzastopce, od lipnja do rujna, te nakon vodom bogatijeg listopada i studenoga još i u prosincu, bili niži od prosjeka razdoblja. U novijemu



Slika 5.4 Prosječne mjesečne količine oborina P_p na kišomjernoj stanici Poličnik i prosječni mjesečni protoci Q_G na izvoru Golubinka u razdobljima (1961.-1979.) i (1980.-1990.)



Slika 5.5 Prosječne mjesečne oborine na kišomjernoj stanici Poličnik P_p i prosječni mjesečni protoci Golubinke Q_G u razdobljima (1961.-1979.) i (1980.-1990.), u modulnim koeficijentima

sušnom razdoblju (1980.-1990.) prosječni su mjesečni protoci čak sedam mjeseci uzastopce (lipanj – prosinac) bili niži od prosječnoga protoka toga razdoblja.

Nedostatak oborina i njegov utjecaj na otjecanje vode iz Golubinke prikazan je odnosom između modulnih koeficijenata prosječnih mjesečnih oborina kišomjerne stanice Poličnik i prosječnih mjesečnih protoka Golubinke u razdobljima (1961.-1979.) i (1980.-1990.), danima na slici 5.5.

Na slici 5.5 vidljiv je neprekidan nedostatak oborina u mjesecima od srpnja do prosinca. Smanjene količine ljetnih i jesenskih oborina uzrokovale su veliko smanjivanje dotoka u listopadu i studenome, koji su u prosjeku pali gotovo na polovicu svojih prijašnjih vrijednosti.

6 OSNOVNI GRAFIČKI PRIKAZI U HIDROLOGIJI

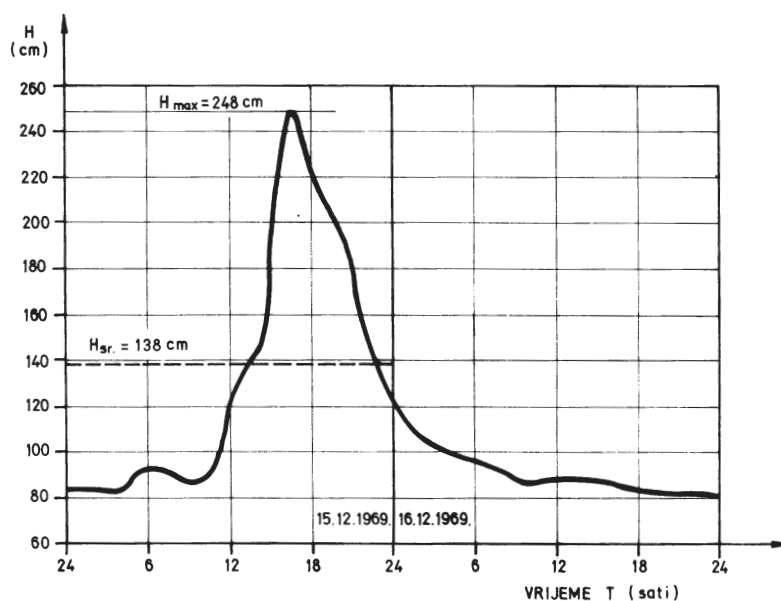
Osnovni grafički prikazi u hidrologiji su:

1. **hijetogram**
2. **nivogram ili hod vodostaja**
3. **hidrogram ili hod protoka**
4. **krivulje učestalosti i trajanja vodostaja**
5. **krivulje učestalosti i trajanja protoka.**

Za poznavanje varijabilnosti otjecanja vode u vodotocima važno je poznavati čimbenike koji utječu na glavne hidrološke parametre. Stoga je osnovno polazište hidroloških obrada i analiza poznavanje podataka o oborinama, isparavanju, transpiraciji, vlazi u zemljištu, infiltraciji i sl.

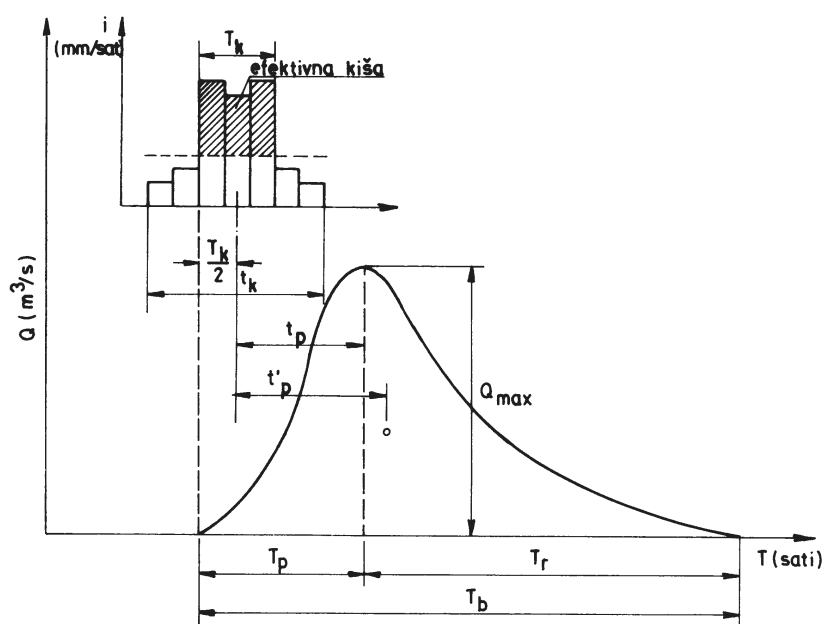
Procese otjecanja i njihova bitna obilježja najbolje prikazuju nivogrami i hidrogrami. Oni vizualan i stvarni prikaz promjena tečenja daju kronološkim redom.

Nivogram je osnovni hidrološki grafikon koji prikazuje vodostaje u ovisnosti o vremenu. Nivogramom se također smatra neprekidno bilježenje vodostaja što ga zapisuje poseban uređaj za bilježenje razina vode ili podizanje (elevaciju) slobodnoga vodenog objekta u odnosu na postavljenu razinu. Jednokratno čitanje vodostaja s vodokaza prikazuje se kao srednji dnevni vodostaj (kada nema drugih vrijednosti). Kada je bilježenje vodostaja na limnigrafu neprekidno, nakon obrade limnigrafskih traka definira se srednje dnevne vodostaje i nivogram se crta u obliku srednjih dnevnih vodostaja. *Neprekinuti zabilježeni vodostaji na limnigrafskoj traci nazivaju se limnigram.* Kada se za grafički prikaz usvoji neprekinute vodostaje, dobije se **neprekinuti** ili **kontinuirani nivogram** (slika 6.1). Iz nivograma se dobiju dvije temeljne hidrološke krivulje: **krivulja učestalosti vodostaja** i **krivulja trajanja vodostaja**.



Slika 6.1. Nivogram velikoga vodnog vala vodotoka Miljašić Jaruga u profilu Poljak (sjeveroistočno od Zadra).

Hidrogram ili **hod protoka** je grafički prikaz protoka vode u ovisnosti o vremenu, a dobije se kada se iz zabilježenih vodostaja preko protočne krivulje odrede odgovarajući protoci vode. Na temelju hidrograma određuju se **krivulja učestalosti protoka** i **krivulja trajanja protoka** (poglavlja 5 i 8). Na slici 6.2 prikazan je hidrogram otjecanja. Uz hidrogram vodnoga vala često se prikazuje i **hijetogram** (grafički prikaz količina ili intenziteta oborina u vremenu) koji je izazvao otjecanje vode definirano hidrogramom.



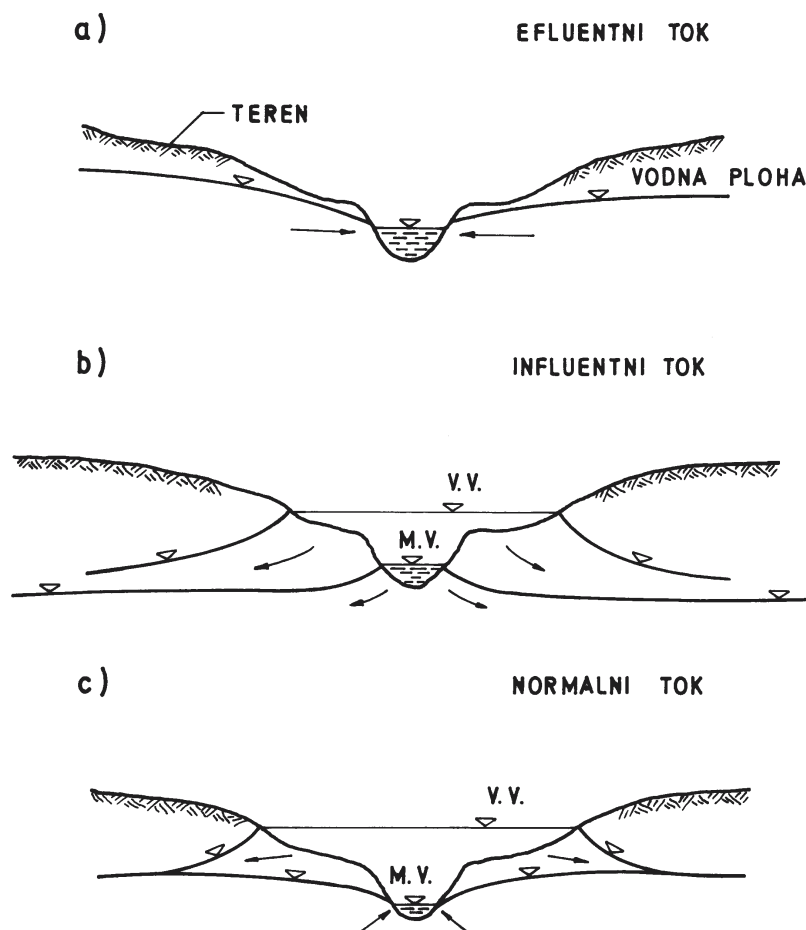
Slika 6.2. Hidrogram i hijetogram: t_k je trajanje kiše; T_k trajanje efektivne kiše; t_p vrijeme zakašnjenja sliva; Q_{max} vršni (maksimalni) protok; T_b vremenska baza hidrograma; T_p vrijeme podizanja hidrograma; T_r vrijeme recesije (opadanja) hidrograma (u nekima se slučajevima za vrijeme zakašnjenja sliva uzima razmak od težišta hijetograma do težišta hidrograma t'_p)

Dotjecanje vode u vodotok sastoji se iz dvaju glavnih dijelova: izravnoga dotoka, kada voda teče do korita po površini terena, i baznoga (temelnog) dotoka, koji dolazi u korito tečenjem ispod površine terena. Bazni se dotok sastoji od potpovršinskoga dotoka iz plićih zona i podzemnoga dotoka iz dubljih zona u tlu. Potpovršinski tok vode je onaj dio vode koji se infiltrira kroz površinu tla i teče gornjim horizontima tla dok ga ne preuzme korito vodotoka ili dok ne izađe na površinu na nekome drugom mjestu, nižem od mjesta infiltracije. Potpovršinska komponenta otjecanja svojstvena je svim slivovima, a ovisi o strukturi tla.

U područjima gdje tlo u zoni aeracije sadrži dovoljno vlage, tako da je moguć prolaz gravitacijske vode prema dolje, dio oborine dopijeva do razine podzemne vode. Dotok iz podzemne vode stiže do korita najsporije od svih komponenti, no njegov se doprinos vodotoku ne smije zanemariti.

Razlikuju se tri tipa strujanja vode iz podzemlja u vodotok i obrnuto, koja su prikazana na slici 6.3:

1. **efluentni tok** je strujanje vode iz podzemlja u vodotok
2. **influentni tok** je strujanje vode iz vodotoka u podzemlje
3. **normalni tok** nastaje kada se za niskih vodostaja vodotok prihranjuje iz podzemlja, a za srednjih i visokih vodostaja voda iz vodotoka struji u podzemlje.



Slika 6.3 Tipovi strujanja iz vodotoka u podzemlje i iz podzemlja u vodotok

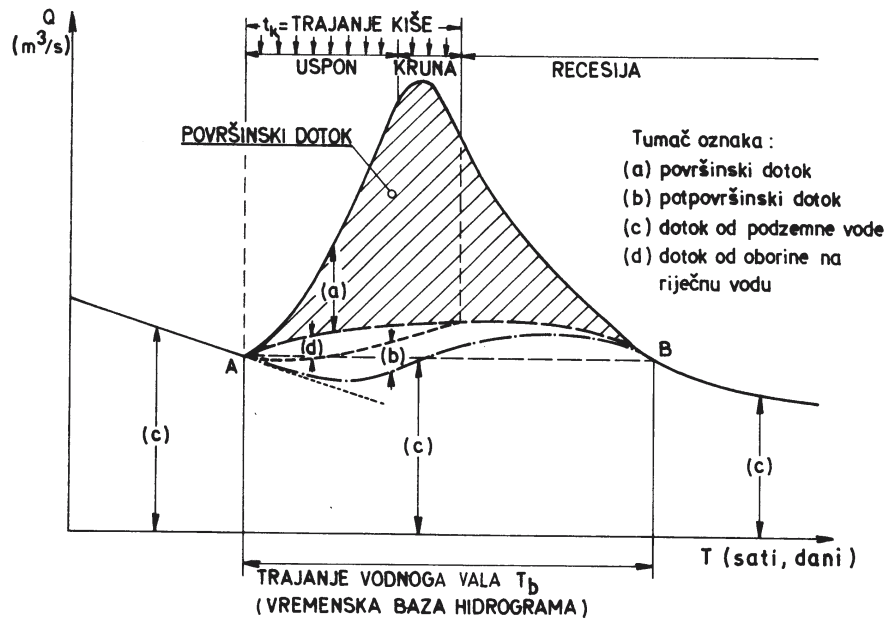
Vodotoci s efluentnim strujanjem općenito imaju razmjerno bogate male vode i razmjerno malenu razliku između niskih i srednjih protoka. U vodotocima s influentnim strujanjem razlike između srednjih i velikih voda su znatno veće nego u vodotocima s efluentnim strujanjem. Influentno strujanje se javlja kada je razina podzemne vode niža od razine vode u vodotoku, a za efluentno strujanje razina podzemne vode mora biti viša od vodostaja u vodotoku.

U različitim se hidrološkim profilima hidrogrami otjecanja redovito međusobno značajno razlikuju, pa ih je zbog toga potrebno obraditi i analizirati za svaki profil posebno.

Kada se hidrogramom prikazuju vodni valovi u znatno kraćemu vremenu nego što je godina, često je potrebno odvojiti izravni (površinski) dotok u vodotok od baznoga (potpovršinskog i podzemnog) dotoka. Hidrogram je općenito sastavljen iz dijelova, kako je prikazano na slici 6.4. Pritom su najveći intenziteti kiše za vrijeme podizanja vodnoga vala, a kiša može trajati i nešto duže od trajanja protoka definirana vrhom hidrograma.

Hidrogram je grafički prikaz protoka vode u odnosu na vrijeme. Prikazuje količine vode koje otječu vodotokom prije, za vrijeme i poslije kiše. Sastavljen je od jedne do četiriju bitnih komponenta, ovisno o tome kakvi su uvjeti otjecanja na slivu. Komponente hidrograma su:

- površinski (izravni) dotok**
- međudotok (potpovršinski)**
- podzemni dotok**
- oborina pala na korito vodotoka.**



Slika 6.4 Glavni dijelovi hidrograma otjecanja

U nekim slučajevima javlja se još jedna – dodatna komponenta: **oborina kondenzirana na slivu** (snijeg). Naglo otapanje snijega, pogotovo ako je u kombinaciji s jakim kišama, može izazvati velike vodne valove (primjerice na rijeci Lici).

Osnovni elementi hidrograma su uspon, kruna i recesija (opadanje). Oblik hidrograma ovisi o trajanju kiše, području sliva zahvaćena kišom, promjenljivosti intenziteta kiše i obliku sliva. Vremensku bazu hidrograma T_b definira vrijeme od početka porasta hidrograma do vremena kada je površinsko otjecanje gotovo jednako nuli.

Vrijeme podizanja vodnoga vala T_p je vrijeme od početka izravnoga dotoka iz oborine do vršnoga (maksimalnog) protoka vodnoga vala, a **vrijeme recesije** ili **opadanja vodnoga vala** T_r je vrijeme od vršnoga (maksimalnog) protoka vodnog vala do kraja vodnoga vala.

Vremenska baza ili trajanje hidrograma je prema tome:

$$T_b = T_p + T_r \quad (6.1)$$

Vrijeme podizanja hidrograma T_p razlikuje se od **vremena koncentracije sliva** T_c , koje predstavlja vrijeme potrebno da voda stigne od najudaljenije točke sliva do protjecajnoga profila vodotoka. Redovito je:

$$T_c < T_p \quad (6.2)$$

Prema L. D. Sokolovskom (1968.) je:

$$T_p = k T_c \quad (6.3)$$

koeficijent za kratke pljuskove iznosi $k \approx 1,0$, a za duge kiše $k = 1,30-1,60$.

Ako je poznata brzina putovanja vode duž glavnoga vodotoka v (m/s), vrijeme koncentracije je:

$$T_c = \frac{L_v}{v} \quad (s) \quad (6.4)$$

gdje je L_v (m) duljina vodotoka.

Izravni se dotok hidrograma sastoji iz površinskoga dotoka vode sa sliva i znatno manjega dotoka iz oborine koja padne izravno na površinu vode u vodotoku te brzoga potpovršinskog dotoka. Ta se, često razmjerno mala komponenta hidrograma, redovito ne uzima u obzir zasebno, nego se podrazumijeva da je ona sadržana u površinskome dotoku. Bazni se dotok sastoji iz podzemnoga i sporoga potpovršinskog dotoka i njih se u većini slučajeva razmatra zajedno. Prema tome, postupkom razdvajanja ili separacije hidrogram se gotovo uvijek dijeli na dva glavna dijela – na bazni i na izravni dotok.

Kada nema površinskoga dotoka iz oborina, vodotok se napaja vodom iz podzemlja – tada postoji samo bazni dotok, a dok nema novih oborina hidrogram je redovito neprekidno u opadanju. Oborine koje padnu na sliv uzrokuju porast ordinata hidrograma, a ordinate hidrograma predstavljaju bazni i izravni dotok zajedno. Kada hidrogram predstavlja bazni i izravni dotok, osnovni problem postaje definiranje vremena trajanja izravnoga dotoka i razdvajanje baznoga od izravnoga dotoka.

Tablica 6.1 Prosječna trajanja opadanja (recesije) N za različite veličine slivova A (prema E. M. Wilsonu, 1974.)

Veličina sliva A (km ²)	Vrijeme opadanja N (dani)
250	2
500	3
2000	4
5000	5
10.000	6

Različiti nagibi slivova i drugi čimbenici bitni za otjecanje uzrokuju odstupanja od prosječnih vrijednosti iz tablice 6.1. Za planinska područja preporučuje se vrijednosti N smanjiti, a za duge uske slivove s blagim nagibima N se može povećati i za 50 posto.

Napominje se da je u opisu ovoga pristupa za određivanje vremena opadanja (recesije) hidrograma zadržana izvorna oznaka N , dok se na drugim mjestima u ovome tekstu za vrijeme opadanja hidrograma rabi oznaka T_r .

R. K. Linsley i dr. (1949.) daju za vrijeme recesije N u danima jednostavnu formulu (koja ne odstupa značajno od vrijednosti N iz tablice 6.1):

$$N = A^{0,2} \quad (6.5)$$

gdje je A veličina sliva u četvornim miljama (1 mi = 1,6093 km).

Za površinu sliva A (km²) R. K. Linsley i dr. (1988.) daju približnu formulu:

$$N = 0,8 A^{0,2} \quad (6.6)$$

Izraz (6.6), gdje je površina sliva A dana u četvornim miljama, općenito se prikazuje:

$$N = A^n \quad (6.7)$$

a za vrijednost eksponenta n smatra se da se kreće oko 0,2 (M. P. Wanielista, 1990.).

Glavni nedostatak ovakva pristupa jest u razlikama koje nastaju u veličinama eksponenta n za pojedine slivove. Poseban problem predstavljaju slivovi u kršu s velikim podzemnim retencijama u zaleđima svojih izvorišta, koje zbog ograničenih kapaciteta izlaza imaju velik utjecaj na spljoštavanje vrha vodnoga vala i produljivanje padajućega dijela hidrograma. Kod takvih vodotoka površinski

dotok redovito dolazi s razmjerno male slivne površine i to za vrlo jakih oborina (preko 50, pa čak i preko 70 mm/dan), a dominantan doprinos dolazi iz podzemlja. No i na zaleđe krških izvora djeluju jake kiše, koje pojačavaju pražnjenje podzemlja i čine značajan dio vodnoga vala. Pretpostavi li se da se i njihov doprinos hidrogramu otjecanja sastoji u izravnom dotoku (izlaz iz prirodne retencije), vrijeme recesije hidrograma u takvim se slučajevima značajno produljuje, a eksponent n je znatno veći od 0,2. Pretpostavka da se izravni dotok u kršu sastoji od površinskoga dotoka i dotoka koji naglo izlazi iz podzemlja potkrijepljena je naglim promjenama nagiba u donjemu dijelu krivulje recesije, pa je zbog toga u takvim slučajevima teorijski prihvatljiva.

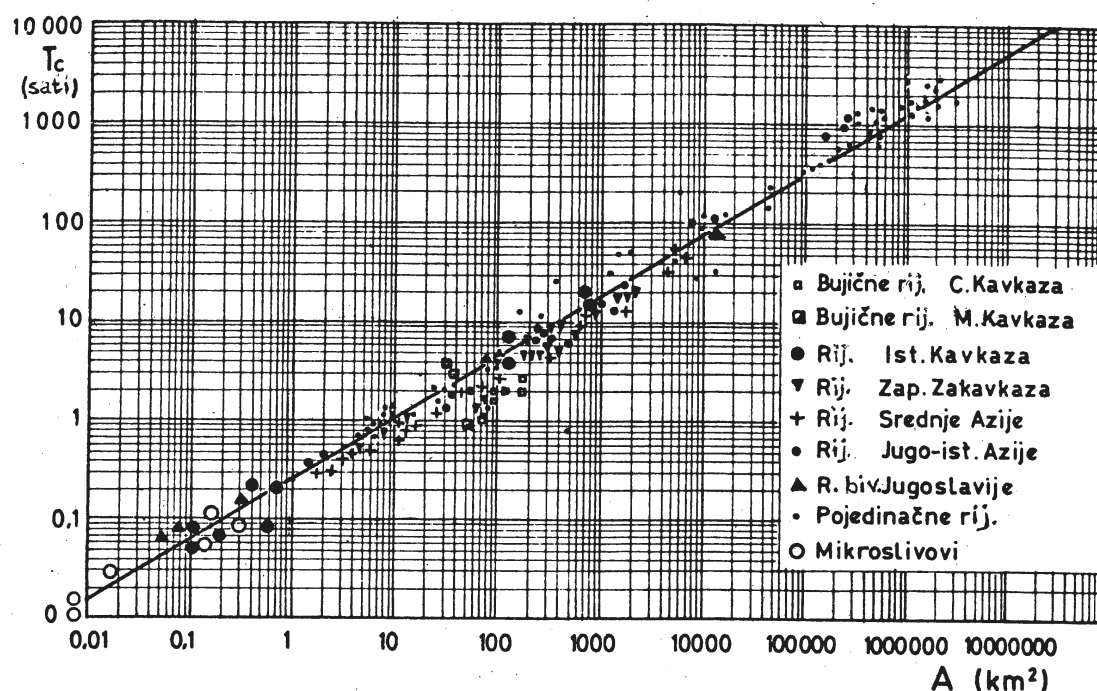
Vezano na otjecanje prikazano hidrogramom, potrebno je opisati jedan važan pojam vrijeme koncentracije.

Vrijeme koncentracije T_c je vrijeme koje je potrebno da voda, koja otječe površinski, stigne od najudaljenije točke sliva do izlaznoga profila sliva. Iako je ova definicija jednostavno i jasno određena, ovaj se pojam, često puta od raznih autora tumači na različite načine. Neki ga hidrolozi ne razlikuju od vremena podizanja vodnoga vala T_p . Glavni razlog neslaganja je u tome što se vrijeme koncentracije ne može odrediti izravno iz podataka motrenja i mjerenja. Ovo se naročito odnosi na slivove na kojima se otjecanja promatra u samo jednom profilu. Kod vodotoka na kojima postoji nekoliko hidroloških stanica, vrijeme koncentracije može se, razmjerno pouzdano, odrediti analizom putovanja (propagacije) vodnih valova (S. Jovanović, 1975.).

I. I. Herheulidze (1971.) prikazao je u logaritamskom mjerilu veličine vremena koncentracije u ovisnosti od veličine sliva $T_c = f(A)$ za različite slivove čije se veličine kreću u vrlo velikom rasponu – od 0,06 do 3.000.000 km². Na osnovi tih podataka, prikazanih na slici 6.5, Herheulidze je izveo sljedeću jednostavnu formulu za određivanje vremena koncentracije:

$$T_c = 0,268 A^{0,612} \text{ (sati)} \quad (6.8)$$

gdje je A (km²) veličina sliva.



Slika 6.5. Vremena koncentracije T_c u ovisnosti od veličina slivova A (I. I. Herheulidze, 1971.)

Rasipavanje ulaznih izračunskih podataka oko izvedene zakonitosti (6.8), kako je prikazano na slici 6.5, je vrlo veliko i prvenstveno upućuje da primjena izraza (6.8), čak i za određivanje približnih (orijentacijskih) procjena, može dati nerealne rezultate.

Kod velikih slivova vremena koncentracije T_c redovito su kraća od vremena podizanja hidrograma vodnih valova T_p . Međutim, kod malih se slivova vremena koncentracije i podizanja u dosta slučajeva međusobno vrlo malo razlikuju.

Često puta su mali slivovi, u hidrološkom smislu, neizučeni i za njih nema podataka temeljenih na hidrološkim mjerenjima, pa na toj osnovi nije moguće definirati maksimalne protoke i odgovarajuće hidrograme vodnih valova. Na malim slivovima veliki vodni valovi, a pogotovo njihovi vršni dijelovi, kratko traju, mjerni profili, ako uopće i postoje, mogu biti udaljeni od hidrometeoroloških centara, pa čak i teško pristupačni, a hidrometri samo iznimno mogu biti usmjereni na takva područja kada su na njima velike vode. Zbog toga vrijeme koncentracije kod velike većine malih slivova, a u nekim slučajevima i kod velikih slivova, treba definirati posrednim načinom – redovito na temelju iskustvenih (empirijskih) formula. Pritom se najčešće vodi računa o nagibu sliva i ostalim geometrijskim značajkama sliva (primjerice o veličini sliva i duljini vodotoka), pa onda o intenzitetu oborine, a znatno rjeđe o činjenici da brzina tečenja vode u vodotoka ovisi i od ispunjenosti korita, volumenu i obliku vodnoga vala, odnosno nestacionarnosti toka.

Bitno je svojstvo malih slivova da jaka oborina, koja je prethodila pojavljivanju velike vode, redovito pada na cijeli sliv, uz usvojenu pretpostavku za izvođenje iskustvenih izraza, da ga je cijeloga ravnomjerno prekrila. Kod malih slivova – pogotovo kada se radi o jakim pljuskovima koji uzrokuju velike vode – za ostvarivanje maksimalnoga (vršnog) protoka – redovito se usvaja da je vrijeme koncentracije T_c jednako vremenu podizanja vodnoga vala T_p , odnosno trajanju pljuska t_k :

$$T_c = T_p = t_k \quad (6.9)$$

Za određivanje vremena koncentracije T_c postoji vrlo velik broj formula, koje se ovdje neće navoditi, nego postoje u literaturi (R. Žugaj, Hidrologija, 2015.)

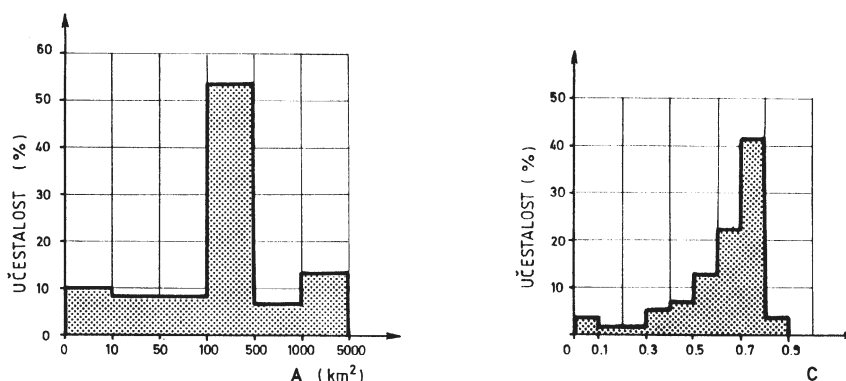
Razmatranje krivulja učestalosti i trajanja započinje definiranjem **učestalosti neke vrijednosti slučajne varijable** kao broja koji pokazuje koliko puta se ta vrijednost varijable pojavila. Prema tome, **učestalost** ili **frekvencija** je broj pojavljivanja neke vrijednosti prekidne (diskretne) varijable u nekome određenom razdoblju opažanja. Grafički prikaz učestalosti i prekidne varijable u koordinatnom sustavu zove se **raspodjela učestalosti** ili **histogram**. U hidrologiji histogrami predstavljaju vrlo važne grafičke prikaze, kojima se ilustrira zastupljenost pojedinih vrijednosti unutar raspona vrijednosti koje poprima pojedini razmatrani karakteristični parametar. Učestalosti je uobičajeno svrstati u razrede (klase) i grafički prikazati u obliku stepeničastih dijagrama, pa je u tom smislu UNESCO (1992.) dao vrlo preciznu definiciju histograma:

Histogram učestalosti je dijagram učestalosti jedne varijable s pravokutnicima. Ti su pravokutnici postavljeni na apscisnoj osi. Njihova je širina jednaka intervalu razreda, a visina predstavlja učestalost. Površina pravokutnika proporcionalna je učestalosti razreda (klase).

Na slici 6.6 prikazani su histogrami relativnih učestalosti dva karakteristična parametra regionalne analize provedene za 58 hidroloških profila u kršu Hrvatske (R. Žugaj 1995.).

Hidrološke obrade – čiji su sastavni dio grafički prikazi, prema tome i histogrami – trebaju prvenstveno dati dovoljno informacija. Na temelju histograma mogu se izvesti važni opći zaključci, kako to slijedi iz primjera sa slike 6.6.

U hrvatskome je kršu, prema histogramu učestalosti na slici 6.6 a, najveća zastupljenost slivova veličine $A = 100 - 500 \text{ km}^2$ – u 54 posto slučajeva (nepravilna je podjela na osi A na slici 6.6 a usvojena radi preglednosti).

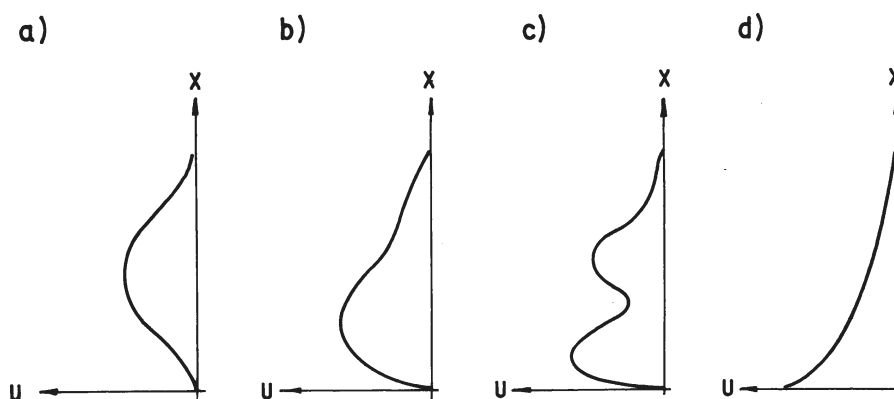


Slika 6.6 Histogrami karakterističnih parametara u hrvatskome kršu:
a) veličine slivova A . b) koeficijenti otjecanja srednjih voda c

Otjecajni koeficijenti c u 41 posto slučajeva su vrlo visoki – od 0,70 do 0,80 (slika 6.6 b) – i znatno su veći nego u nekrškim područjima. Glavni razlog tome jest da na većini krških slivova oborina brzo ponire i uglavnom teče kroz podzemlje, a površinska hidrografska mreža je rijetka i glavni vodotoci su kratki, pa su zbog toga gubici uslijed isparavanja manji nego na nekrškim slivovima.

Učestalosti pojavljivanja mogu se aproksimirati nekom neprekidnom krivuljom koja se naziva **krivulja učestalosti**.

Krivulje učestalosti mogu se pojaviti u različitim oblicima, četiri osnovna oblika prikazana su na slici 6.7.



Slika 6.7 Osnovni oblici krivulja učestalosti:
a) simetričan ili normalan oblik; b) asimetričan oblik s jakim maksimumom;
c) asimetričan oblik s dvama maksimumima; d) jednostran oblik

U analizama pojava u prirodi uglavnom se rabe asimetrične krivulje učestalosti. Jednostran oblik krivulje učestalosti (slika 6.7 d) rabi se u opisima vodotoka koji presušuju, pa je taj oblik čest u kršu.

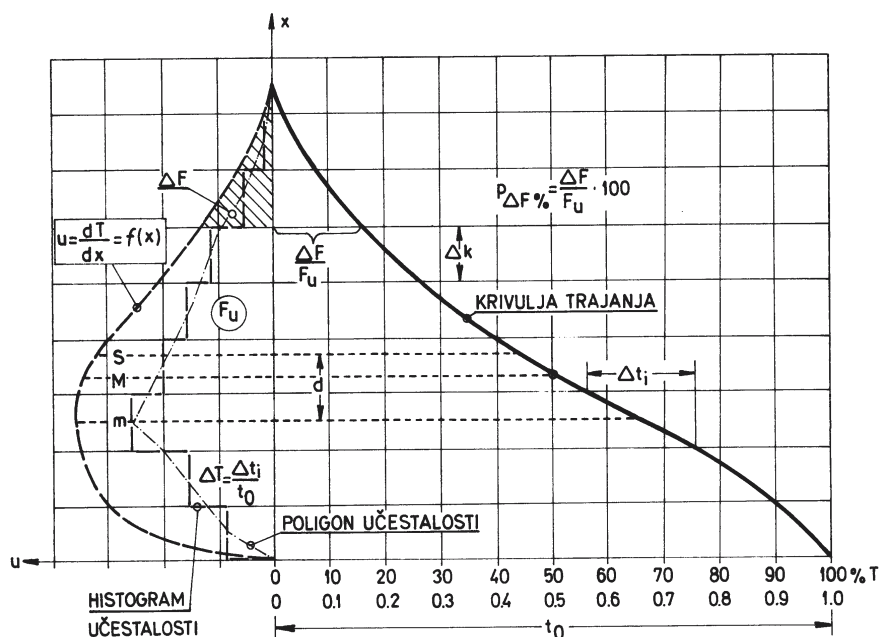
Krivulja trajanja je krivulja koja pokazuje postotak vremena ili broj dana u godini tijekom kojih je vodostaj ili protok jednak danim količinama ili veći od njih, bez obzira na kronološki red (kronologiju).

Na slici 6.8 općenito su prikazane krivulje učestalosti i trajanja.

Ako krivulja učestalosti ima jednadžbu:

$$U = f(x) \quad (6.10)$$

iz nje se može odrediti sljedeće karakteristične veličine:



Slika 6.8 Krivulje učestalosti i trajanja

1. **Sredina** S definira se kao prosjek
2. **Medijan** M je vrijednost koja odgovara 50-postotnoj vrijednosti integralne krivulje (krivulje trajanja):

$$\int_{-\infty}^{k_m} f(k) dk = \int_{k_m}^{+\infty} f(k) dk \quad (6.11)$$

3. **Mod** m je vrijednost najučestalijega pojavljivanja i odgovara maksimumu krivulje učestalosti:

$$\frac{d f(k)}{dk} = 0 \quad (6.12)$$

Razmak unutar kojega se kreću vrijednosti prosjeka, medijana i moda naziva se **radijus krivulje učestalosti** d .

Raspon uzorka k je razlika između najmanje i najveće vrijednosti.

Krivulja trajanja je integralna krivulja krivulje učestalosti, a krivulja učestalosti je diferencijalna krivulja krivulje trajanja. Prema tome, površina bilo kojega dijela pod krivuljom učestalosti ΔF određuje ujedno i trajanje T na osnovi te površine:

$$T = \frac{\Delta F}{F_u} 100 (\%) \quad (6.13)$$

gdje je F_u ukupna površina pod krivuljom učestalosti.

Jedinica koja se rabi za obračun trajanja je godina dana ili 100 posto trajanja.

U hidrotehnici je u nekim slučajevima neophodno razmatrati krivulje trajanja protoka (primjerice kod projektiranja višenamjenskih akumulacijskih jezera). Krivulje trajanja protoka pripadaju osnovnim grafičkim prikazima u hidrologiji, a osim što predstavljaju jednu od najvažnijih osnovnih hidroloških podloga pri razmatranju raspoloživih količina vode u nekom hidrološkom profilu, mogu poslužiti za zaključke o određenim značajkama vodnoga režima vodotoka. Radi toga ih se detaljnije opisuje u poglavlju 8.

7 RAZMATRANJE KARAKTERISTIČNIH PROTOKA

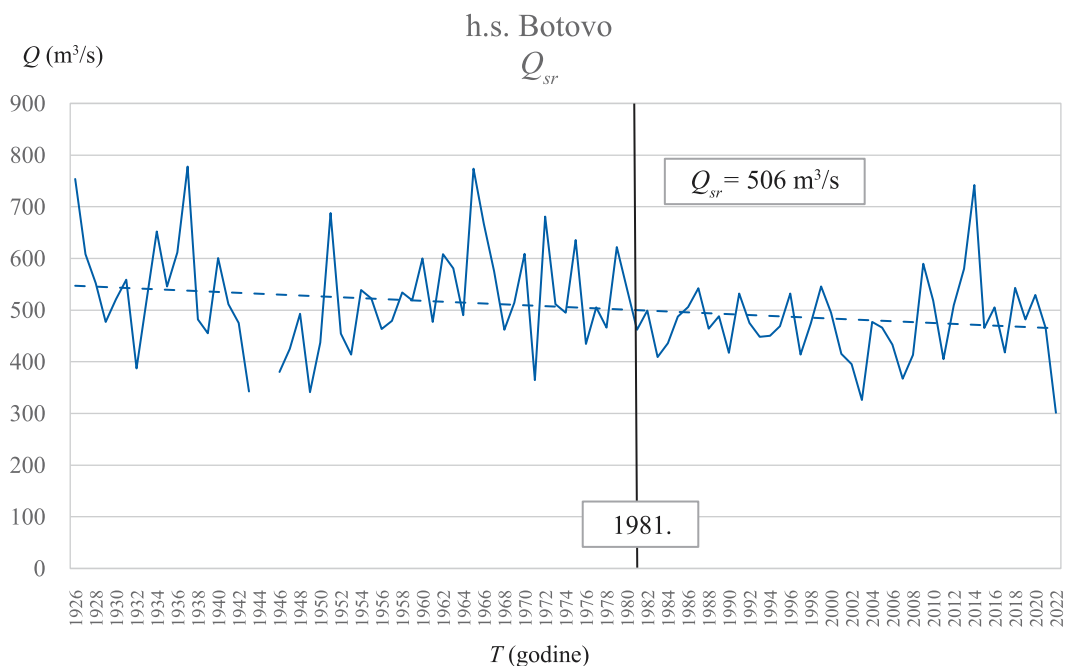
Redovito se razmatraju nizovi srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka. Vezano na moguće utjecaje klimatskih promjena na hidrološke režime vodotoka, odabrani su podaci od nekoliko hidroloških profila iz Baze hidroloških podataka Državnoga hidrometeorološkog zavoda (DHMZ). Željelo se je prostorno obuhvatiti karakteristične hidrološke profile na području Hrvatske: (1) Botovo na Dravi, (2) Slavonski Brod na Savi, (3) Kupljenovo na Krapini, (4) Pleternica na Orpljavi, (5) Mrzlo Polje na Mrežnici i (6) Han na Cetini.

Napominje se da je – kao prvi korak ove hidrološke analize – neophodno grafički prikazati svaki niz hidroloških podataka koji se želi koristiti u bilo kojem smislu. Pritom je uobičajeni redosljed da se prvo prikazuje niz srednjih godišnjih protoka, pa maksimalnih godišnjih protoka i onda minimalnih godišnjih protoka.

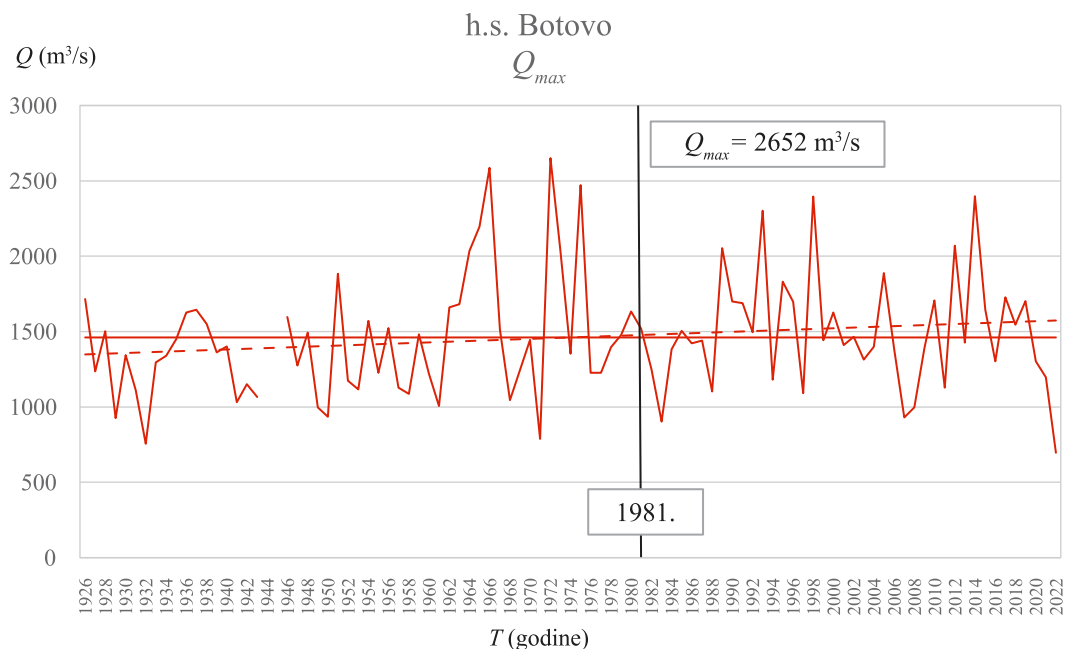
Na sljedećim slikama prikazani su hidrogrami srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka u navedenim profilima s trendovima označenima crtkanom linijom i/ili prosjecima razdoblja – puna linija. Nastajalo se obuhvatiti podatke od motrenja i mjerenja unutar 97-godišnjega razdoblja (1926.–2022.). Ranije je spomenuto da je kao moguće sušno razdoblje, pa prema tome ono razdoblje u kojemu se na dotoke vode odražavaju i određene klimatske promjene, prihvaćeno razdoblje s početkom 1981. godine (R. Žugaj, 1995.).

Hidrogrami srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka rijeke Drave u profilu Botovo prikazani su na slikama 7.1, 7.2 i 7.3.

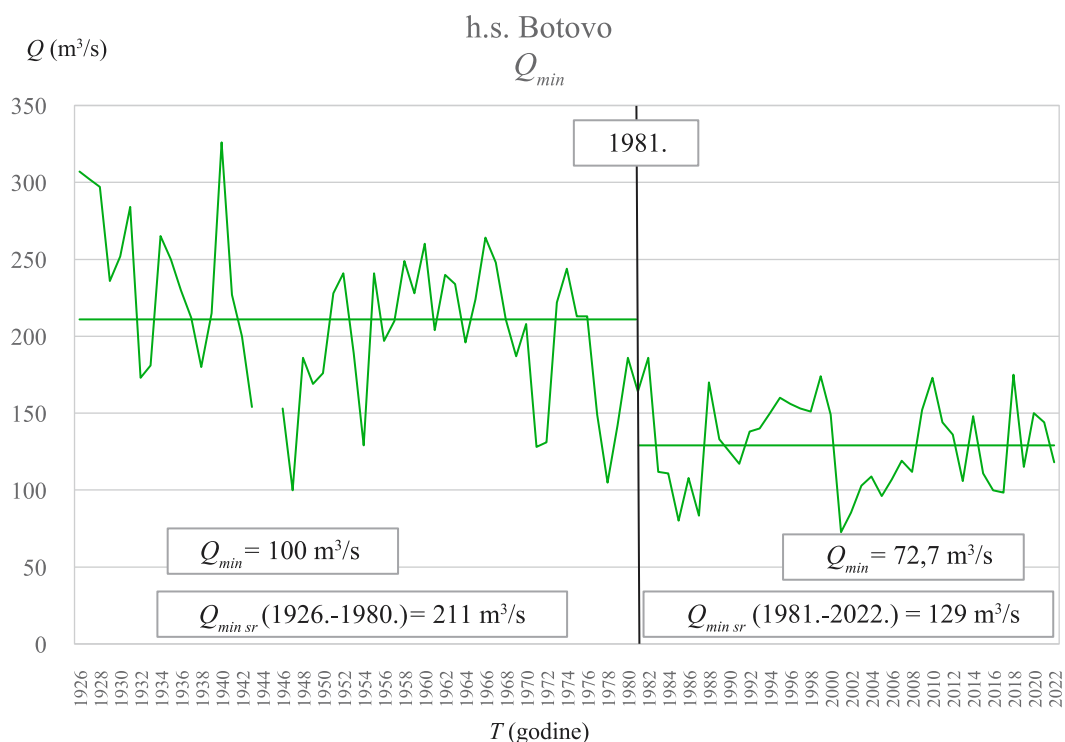
Raspoloživi nizovi srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka Drave u profilu Botovo imaju prekid u dvije godine (1944. i 1945.). S obzirom da su ukupni nizovi protoka vrlo dugi, za ovo se općenito razmatranje to nije uzelo u obzir.



Slika 7.1 Srednji godišnji protoci Drave u profilu Botovo (1926.–2022.)



Slika 7.2 Maksimalni godišnji protoci Drave u profilu Botovo (1926.-2022.)



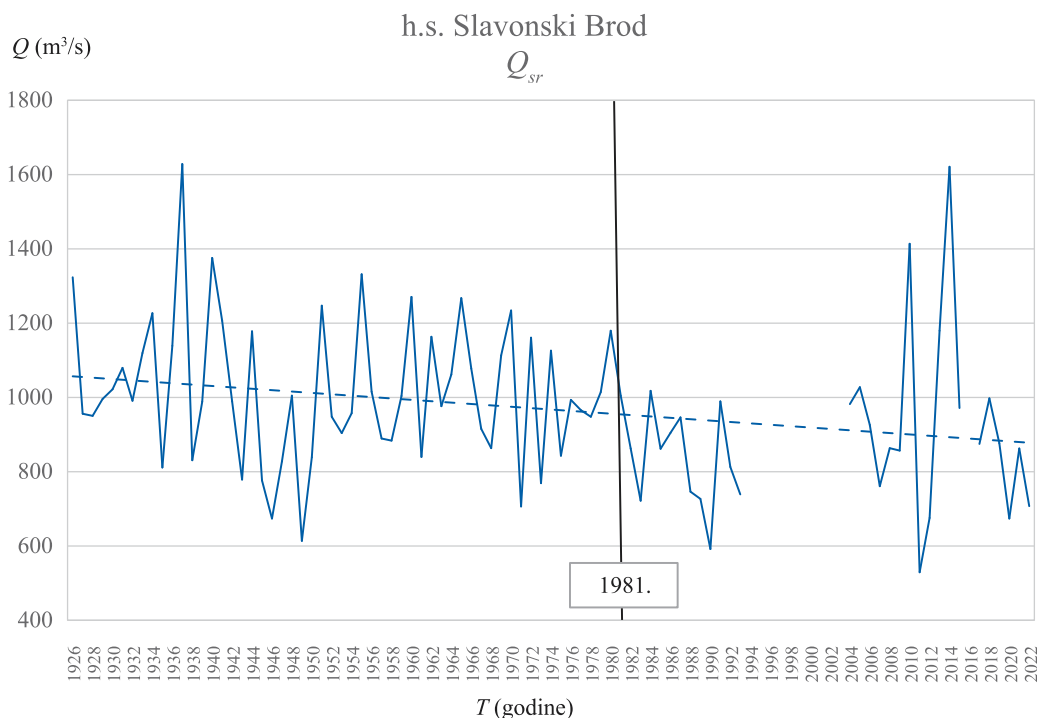
Slika 7.3 Minimalni godišnji protoci Drave u profilu Botovo (1926.-2022.)

Na osnovi hidrograma srednjih godišnjih protoka u profilu Botovo na Dravi (slika 7.1), vidljivo je da je niz homogen i da homogenost ne treba posebno ispitivati, a vidljiv je i blagi opadajući trend vrijednosti srednjih godišnjih protoka.

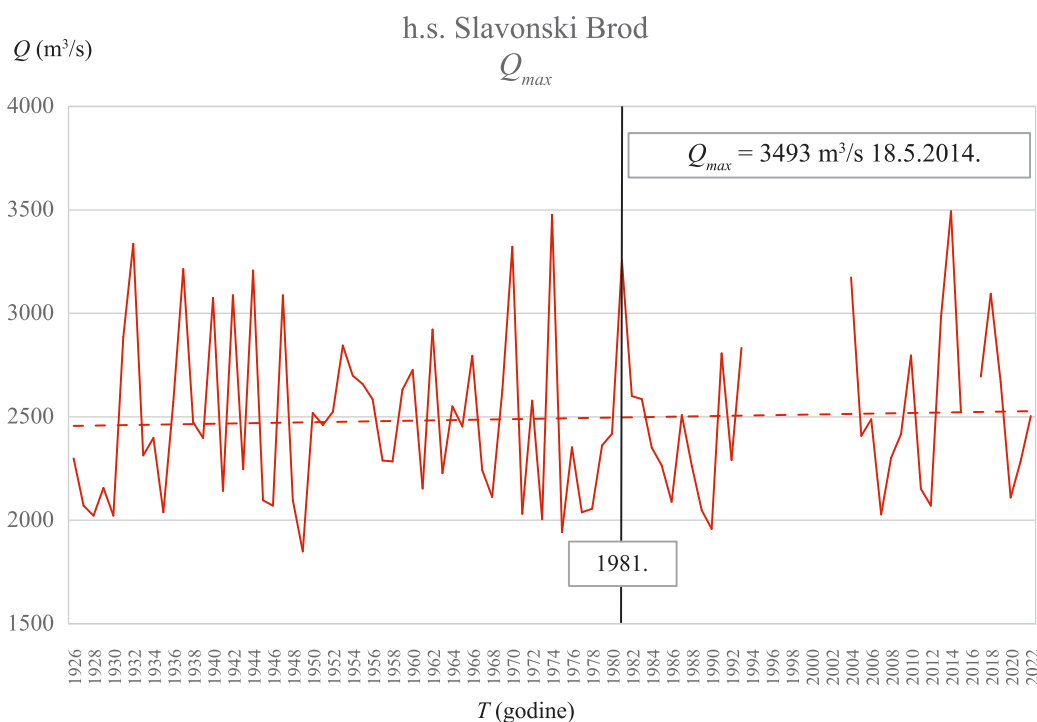
Maksimalni protoci Drave u profilu Botovo pokazuju blagi rastući trend. (slika 7.2) Vidljivo je da je niz homogen i da homogenost ne treba posebno testirati. Iako se u novijem razdoblju nisu pojavili maksimalni protoci, kakvi su zabilježeni u razdoblju do 1980. godine, ne bi trebalo isključiti mogućnost njihova pojavljivanja u budućem razdoblju.

Minimalni godišnji protoci Drave u profilu Botovo imaju izrazit opadajući trend na razini cijeloga razdoblja od 1926.-2022. godine (slika 7.3). Osim sve manjih zabilježenih godišnjih minimuma, posebno je važno analizirati sušna razdoblja, koja su vidljiva iz podataka o srednjim dnevnim protocima. Niz minimalnih godišnjih protoka (1926.-2022.) nije homogen, pa je za analizu pogodan niz iz razdoblja (1981.-2022.)

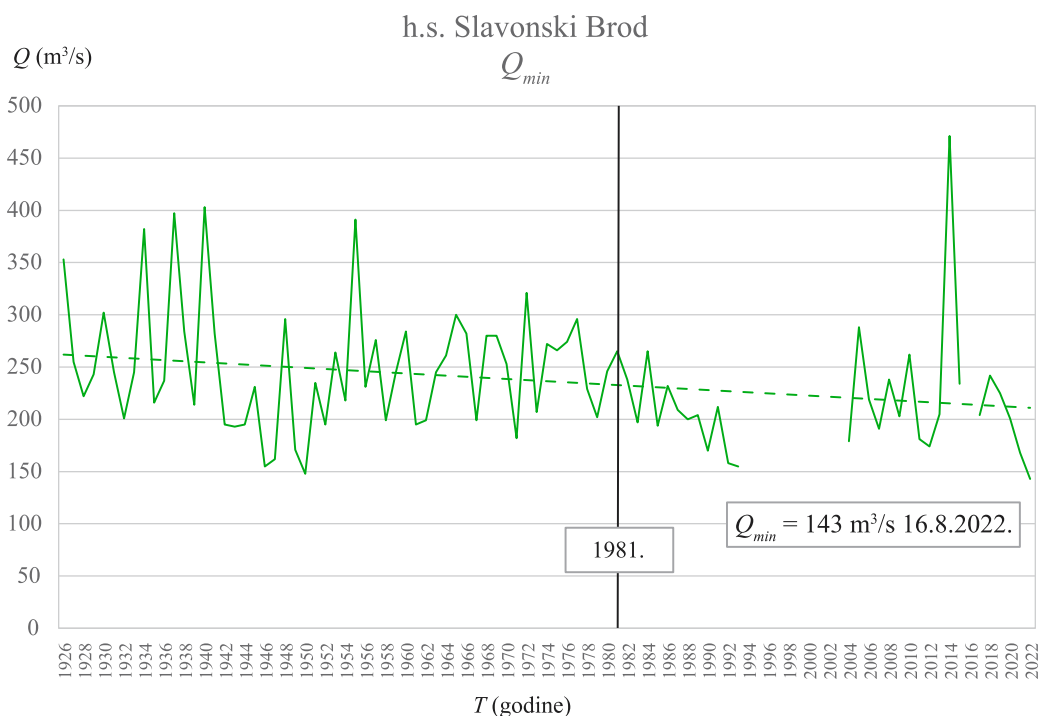
Hidrogrami srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka rijeke Save u profilu Slavonski Brod prikazani su na slikama 7.4, 7.5 i 7.6.



Slika 7.4 Srednji godišnji protoci Save u profilu Slavonski Brod (1926.-2022.)



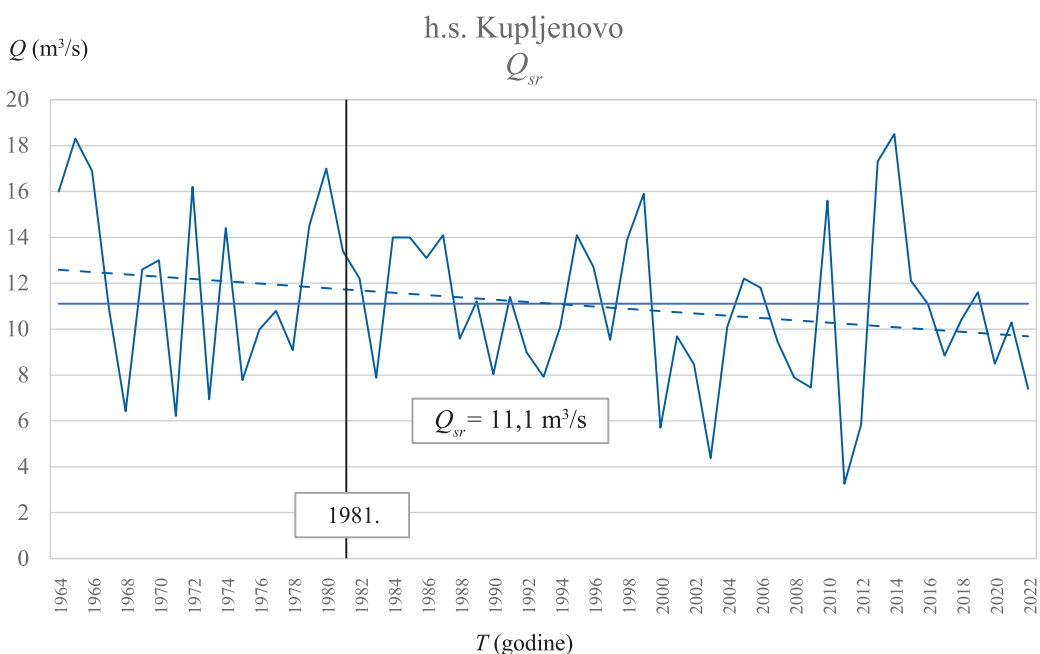
Slika 7.5 Maksimalni godišnji protoci Save u profilu Slavonski Brod (1926.-2022.)



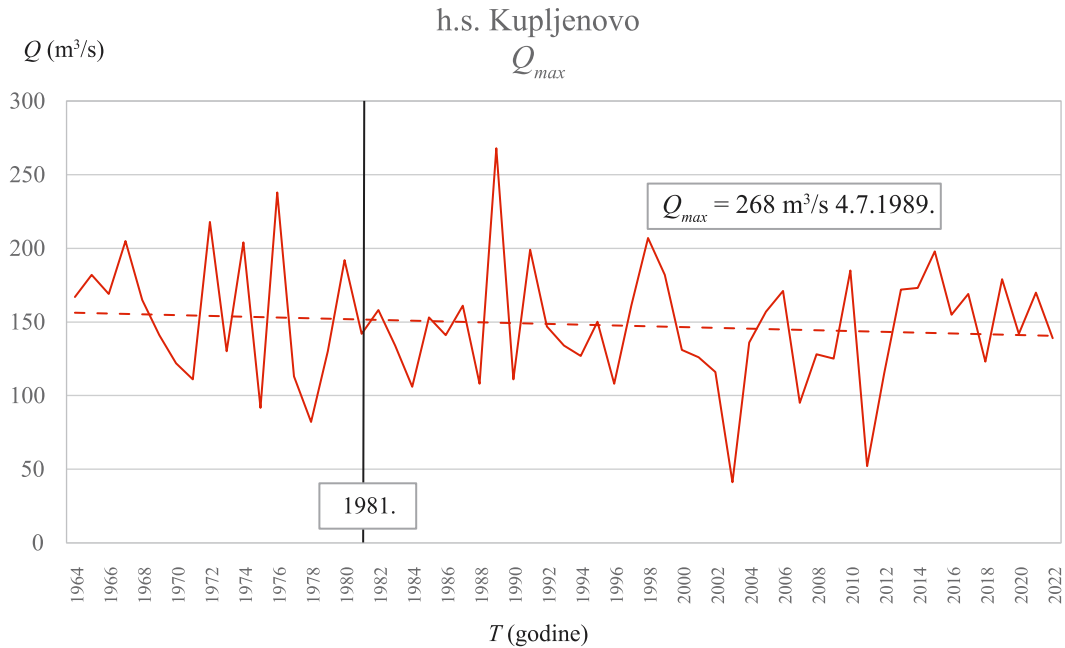
Slika 7.6 Minimalni godišnji protoci Save u profilu Slavonski Brod (1926.-2022.)

U profilu Slavonski Brod na rijeci Savi postoji značajan prekid u mjerenjima, koji se dogodio u razdoblju (1994.-2004.), a također nedostaje i protok za 2015. godinu (slike 7.4, 7.5 i 7.6). Podatke srednjih dnevnih protoka koji nedostaju, moguće je nadopuniti na osnovi raspoloživih podataka sa stanice u blizini ukoliko oni postoje, za što je prikladno korištenje korelacijske analize, ali bi se moglo prednost dati metodi dvostrukih sumarnih količina. Za ekstremne godišnje protoke, nisu preporučljiva nadopunjavanja u onolikoj mjeri kao za srednje.

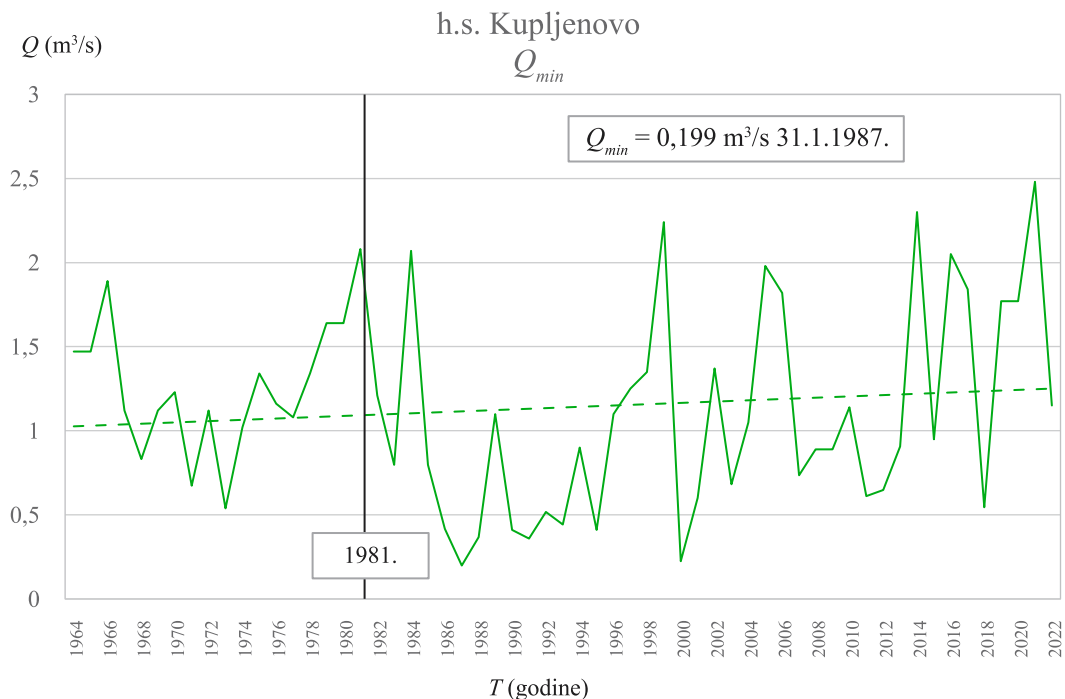
Uz ovakve prekide nizova, kao što je slučaj u profilu Slavonski Brod, izvođenje zaključaka za cijelo razdoblje (1926.-2022.) nije pouzdano kao kod neprekinutih nizova. Pogotovo jer je prekid niza ustanovljen u razdoblju nakon 1981. godine.



Slika 7.7 Srednji godišnji protoci Krapine u profilu Kupljenovo (1964.-2022.)



Slika 7.8 Maksimalni godišnji protoci Krapine u profilu Kupljenovo (1964.-2022.)



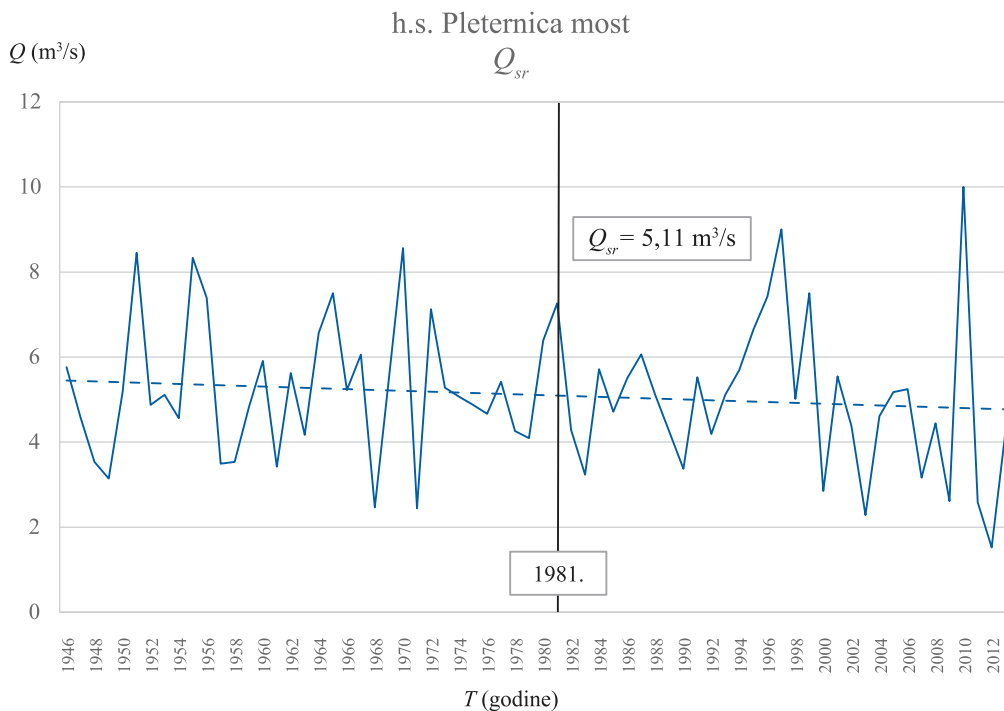
Slika 7.9 Minimalni godišnji protoci Krapine u profilu Kupljenovo (1964.-2022.)

Pritom je važno napomenuti da hidrološka stanica Slavonski Kobaš, koja se nalazi uzvodno, pri čemu rijeka Sava između Slavonskoga Kobaša i Slavonskoga Broda ne prima značajnije pritoke, u istom razdoblju (1994.-2004.) nema podataka o motrenjima i mjerenjima. Prema tome, u ovome slučaju potrebno je tek provesti razmatranja, koja bi stanica bila pogodna za nadopunjavanje podataka koji nedostaju. Napominje se da linearne trendove označene na slikama 7.4 – 7.6, treba shvatiti orijentacijski.

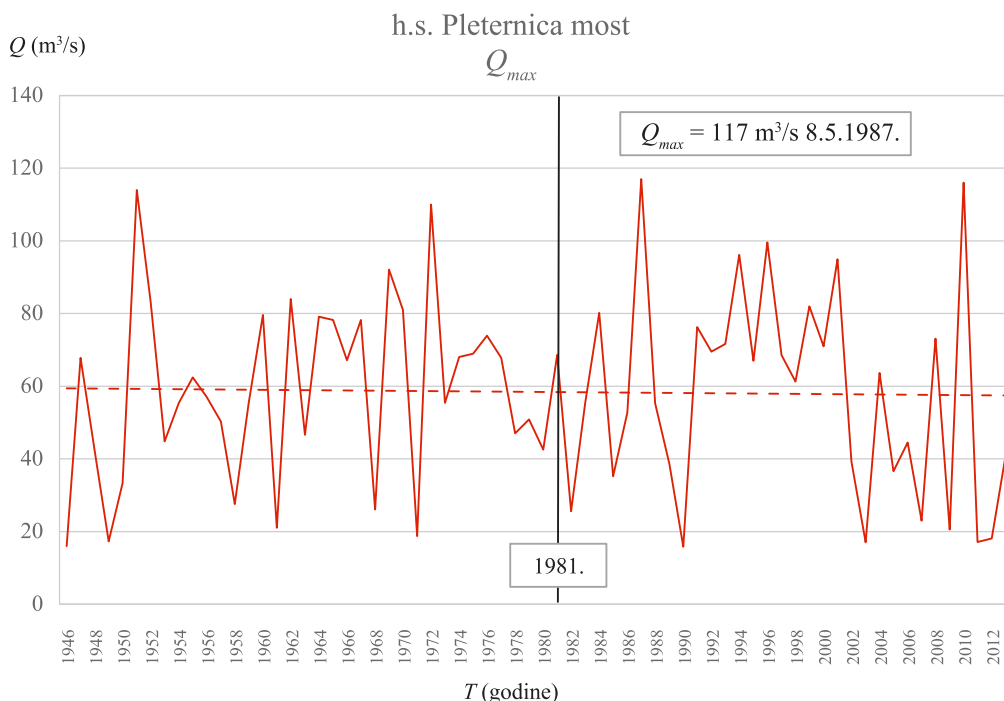
Hidrogrami srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka rijeke Krapine u profilu Kupljenovo prikazani su na slikama 7.7, 7.8 i 7.9.

Za hidrološku stanicu Kupljenovo na Krapini raspoloživi su podaci karakterističnih godišnjih protoka za znatno kraći niz u odnosu na nizove drugih, ovdje razmatranih, stanica (59, u odnosu na 97 godišnjih podataka).

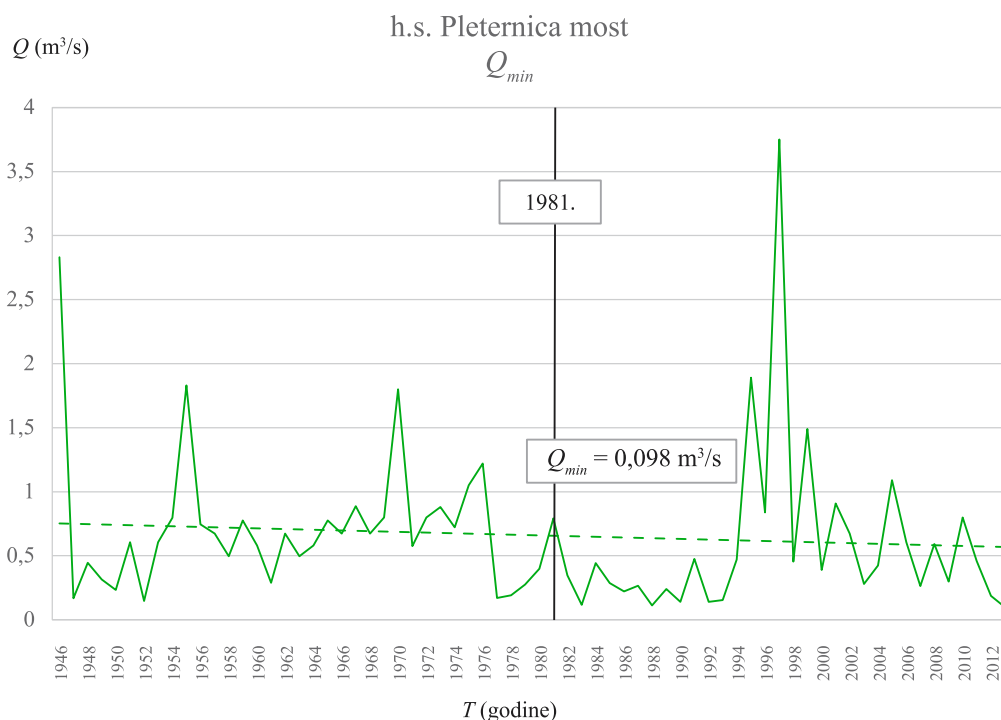
Nizovi srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka rijeke Krapine u profilu Kupljenovo iz razdoblja (1964.-2022.) su homogeni (slike 7.7, 7.8 i 7.9). Trendovi su vrlo blago izraženi: kod srednjih i maksimalnih godišnjih protoka opadajući, a kod minimalnih godišnjih protoka rastući.



Slika 7.10 Srednji godišnji protoci Orljave u profilu Pleternica most (1946.-2013.)



Slika 7.11 Maksimalni godišnji protoci Orljave u profilu Pleternica most (1946.-2013.)

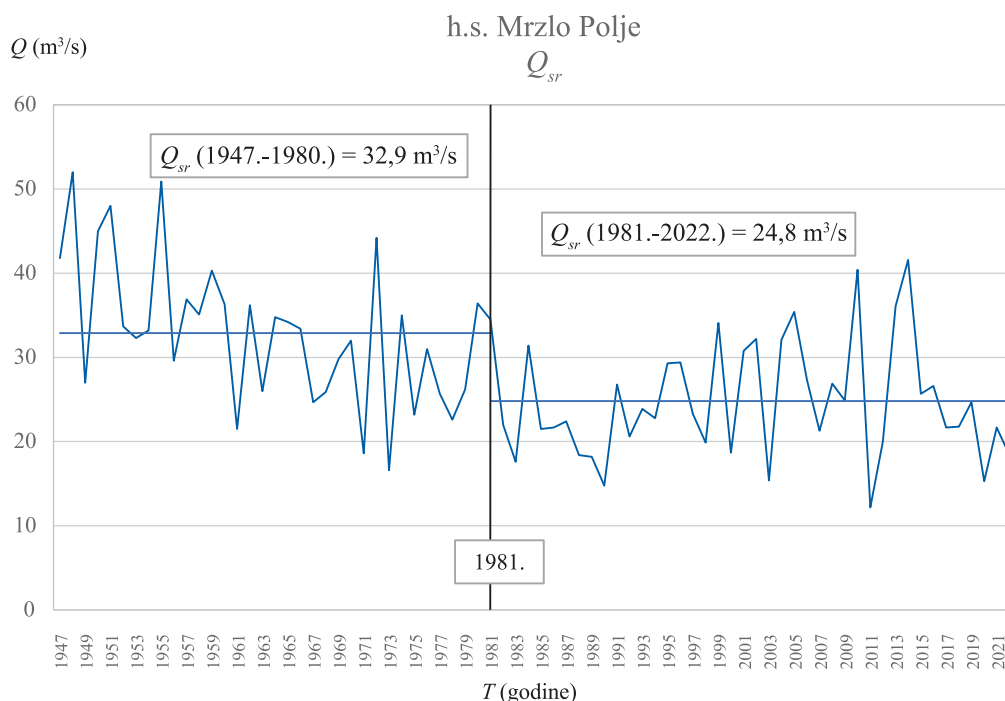


Slika 7.12 Minimalni godišnji protoci Orljave u profilu Pleternica most (1946.-2013.)

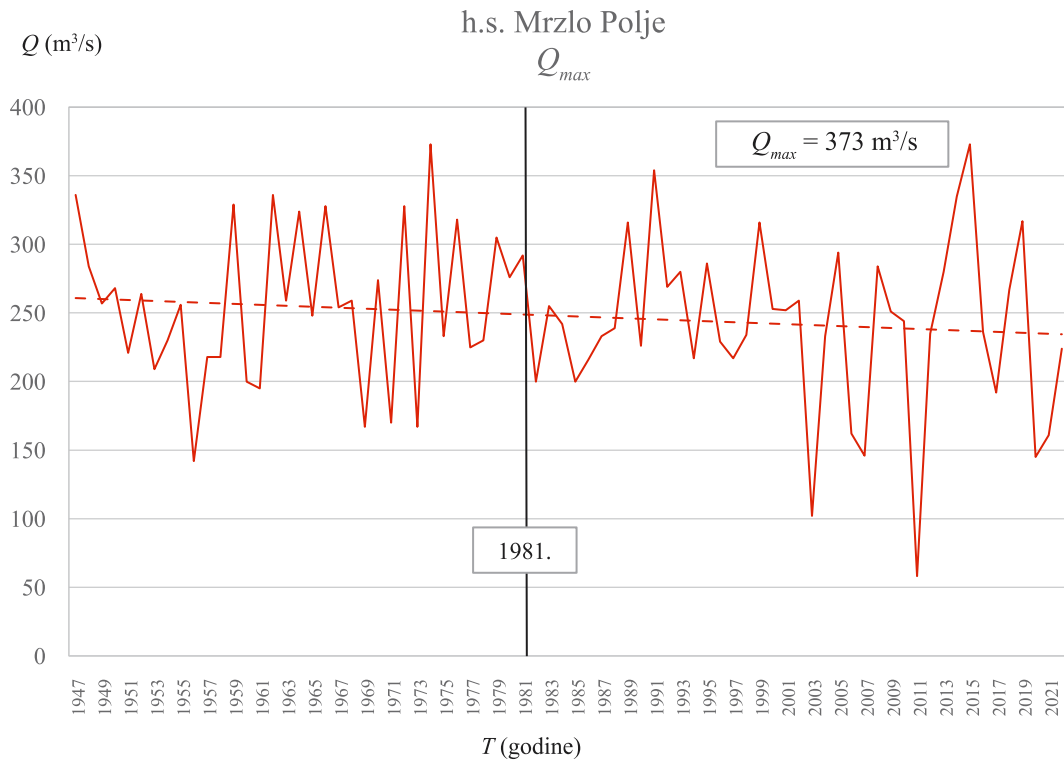
Hidrogrami srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka rijeke Orljave u profilu Pleternica most prikazani su na slikama 7.10, 7.11 i 7.12.

Za hidrološku stanicu Pleternica most na Orljavi raspoloživo je 68 podataka srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka iz razdoblja (1946.-2013.), što je unutar razdoblja razmatranja (1926.-2022.).

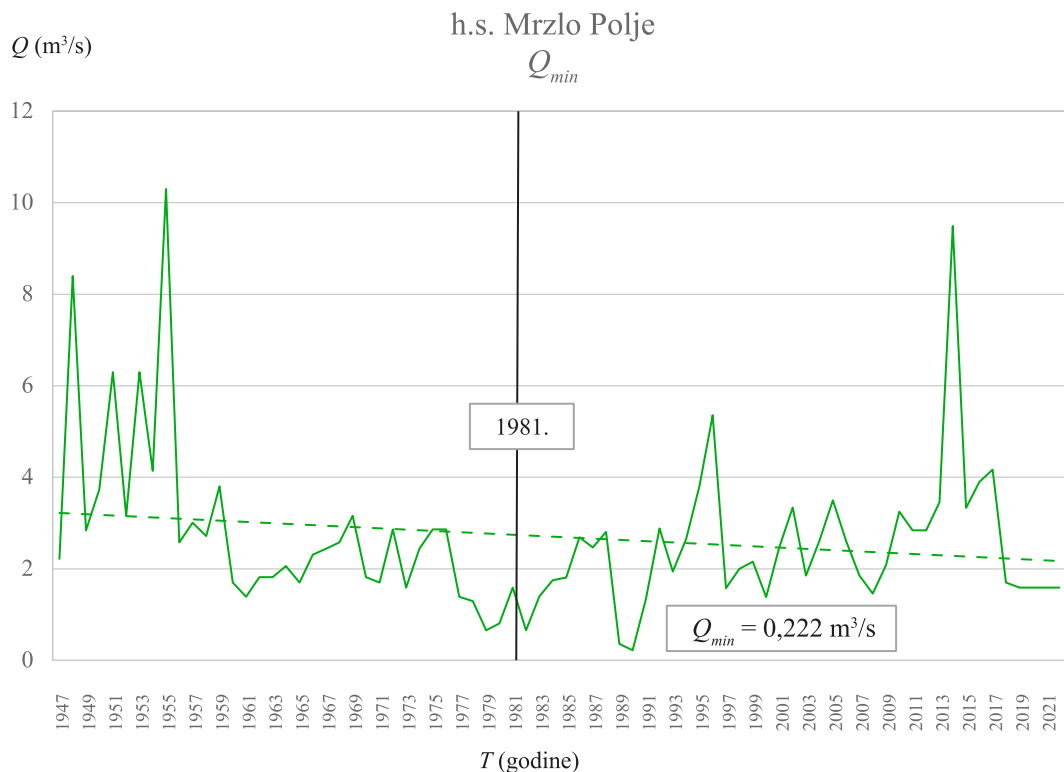
Sva tri niza karakterističnih protoka su homogeni i imaju vrlo blage opadajuće trendove (slike 7.10, 7.11 i 7.12).



Slika 7.13 Srednji godišnji protoci Mrežnice profilu Mrzlo Polje (1947.-2022.)



Slika 7.14 Maksimalni godišnji protoci Mrežnice u profilu Mrzlo Polje (1947.-2022.)



Slika 7.15 Minimalni godišnji protoci Mrežnice u profilu Mrzlo Polje (1947.-2022.)

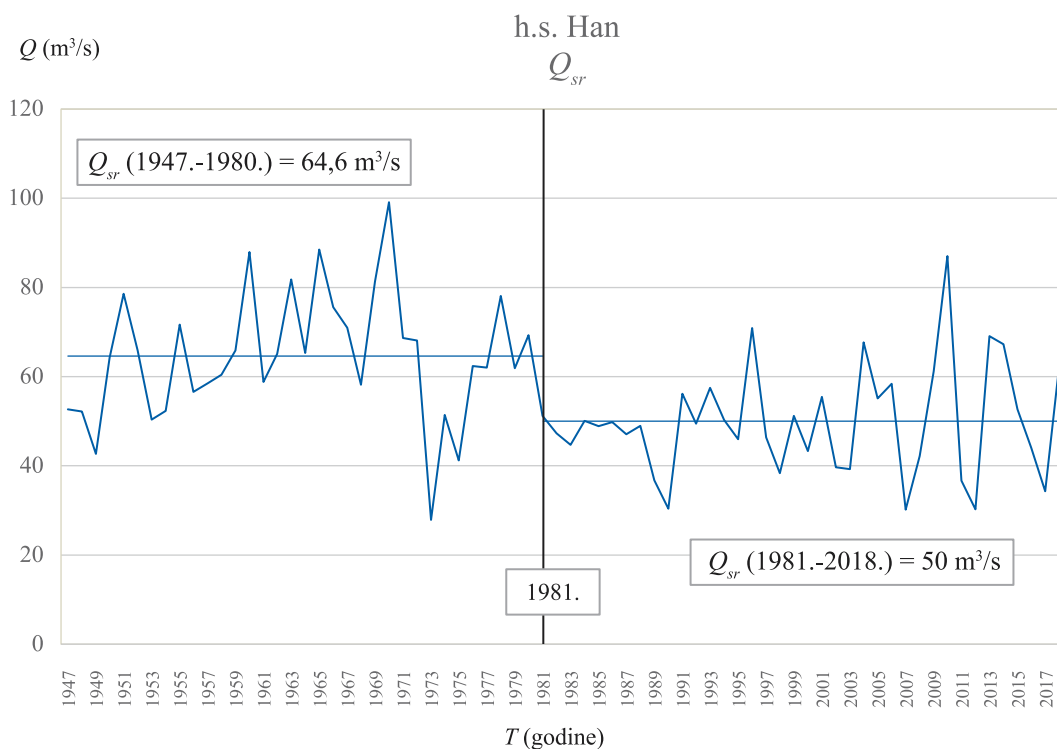
Za rijeku Mrežnicu u profilu Mrzlo Polje, na raspolaganju su nizovi srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka iz 76-godišnjega razdoblja (1947.-2022.). Srednji godišnji dotoci nakon 1981. godine znatno su niži od središnjih godišnjih dotoka iz ranijega razdoblja do 1980. godine (slika 7.13).

Ukoliko se za srednje godišnje protoke razmatra trend cijeloga razdoblja, onda je on opadajući. Razdvoji li se razdoblje, opadajući trend od 1947. do 1980. još je jače izražen, nego na razini cijelog razdoblja (1947.-2022.). Međutim, u razdoblju (1981.-2022.) trend srednjih godišnjih protoka je lagano rastući.

Niz maksimalnih godišnjih protoka u profilu Mrzlo Polje iz razdoblja (1947.-2022.) je homogen s vrlo slabo izraženim opadajućim trendom (slika 7.14).

Niz minimalnih godišnjih protoka Mrežnice u profilu Mrzlo Polje iz razdoblja (1947.-2022.) ima nekoliko izraženih visokih vrijednosti protoka (slika 7.15). Zanimljivo je da su između 1978. i 1992. u nekoliko godina zabilježene vrlo niske vrijednosti protoka, ispod $1,00 \text{ m}^3/\text{s}$.

Hydrogrami srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka rijeke Cetine u profilu Han prikazani su na slikama 7.16, 7.17 i 7.18.



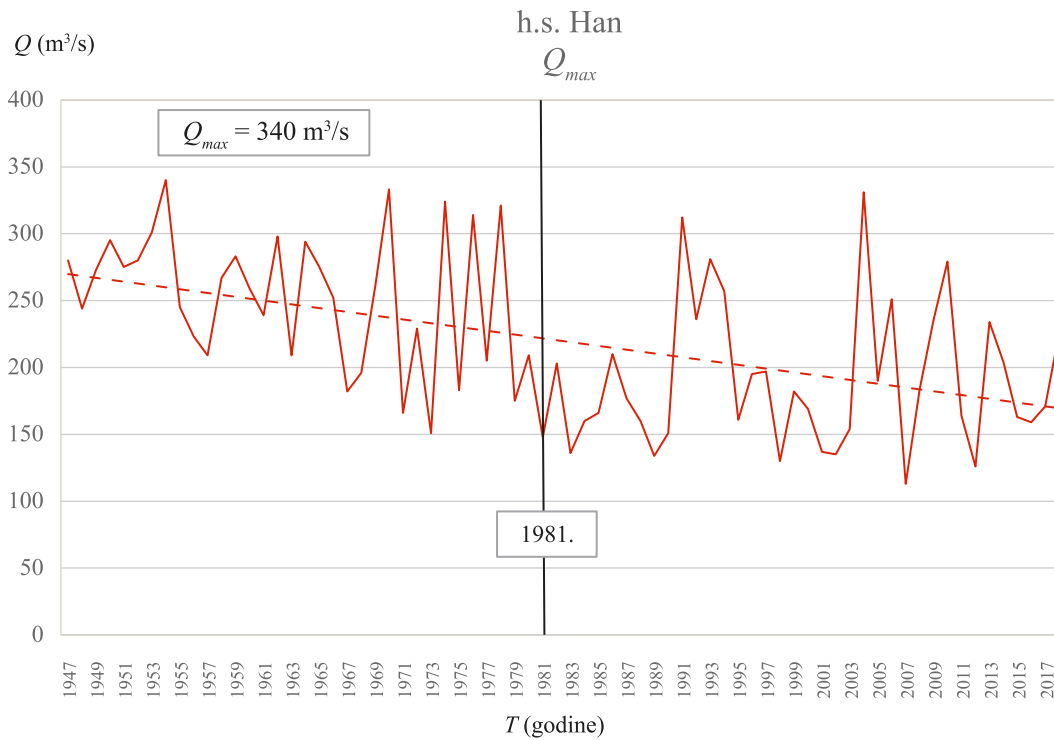
Slika 7.16 Srednji godišnji protoci Cetine u profilu Han (1947.-2018.)

Za rijeku Cetinu u profilu Han raspolagalo se sa 72 podatka iz razdoblja (1947.-2018.). Napominje se da je izgradnja brane Peruća dovršena 1960. godine i od tada je vodni režim nizvodno od brane Peruća, uključivo i profil Han, pod izravnim utjecajem rada HE Peruća i upravljanja akumulacijskim jezerom Peruća.

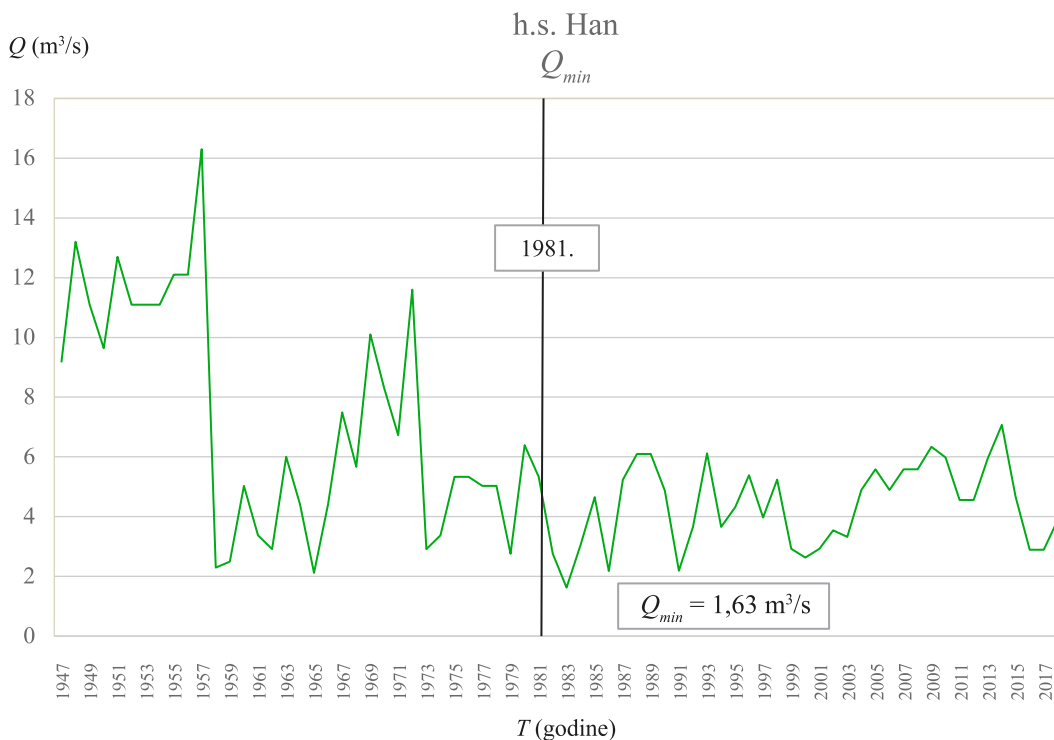
Za srednje godišnje protoke Cetine u profilu Han prikazane na slici 7.16, već su ranije analize pokazale da je razdoblje nakon 1980. sušnije od ranijega razdoblja do 1980. godine (Žugaj, 1995.).

Maksimalni godišnji protoci Cetine u profilu Han, u veličinama preko $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$, u razdoblju nakon 1980. javljaju se nešto rjeđe nego u razdoblju prije 1980. godine (slika 7.17). Naznačeni opadajući trend sa slike 7.17 mogao bi se krivo protumačiti, u smislu da su se maksimalni protoci smanjili. Međutim, oni mogu doseći vrijednosti kao i u razdoblju do 1980.

Iz pregleda minimalnih godišnjih protoka Cetine u profilu Han, vidi se da su oni pod utjecajem akumulacijskoga jezera Peruća (za vrijeme i nakon izgradnje brane Peruća) znatno manji, nego prije



Slika 7.17 Maksimalni godišnji protoci Cetine u profilu Han (1947.-2018.)



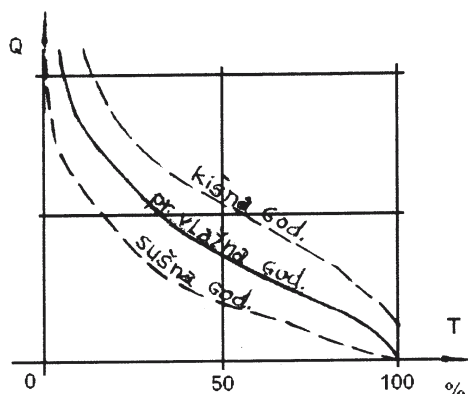
Slika 7.18 Minimalni godišnji protoci Cetine u profilu Han (1947.-2018.)

izgradnje akumulacijskoga jezera (slika 7.18). S izuzetkom 1969. i 1972. godine, kada su ti protoci iznad $Q_{min} = 10,0 \text{ m}^3/\text{s}$, vrijednosti minimalnih godišnjih protoka su u granicama od $Q_{min} = 2,00 \text{ m}^3/\text{s}$ do $Q_{min} = 8,00 \text{ m}^3/\text{s}$.

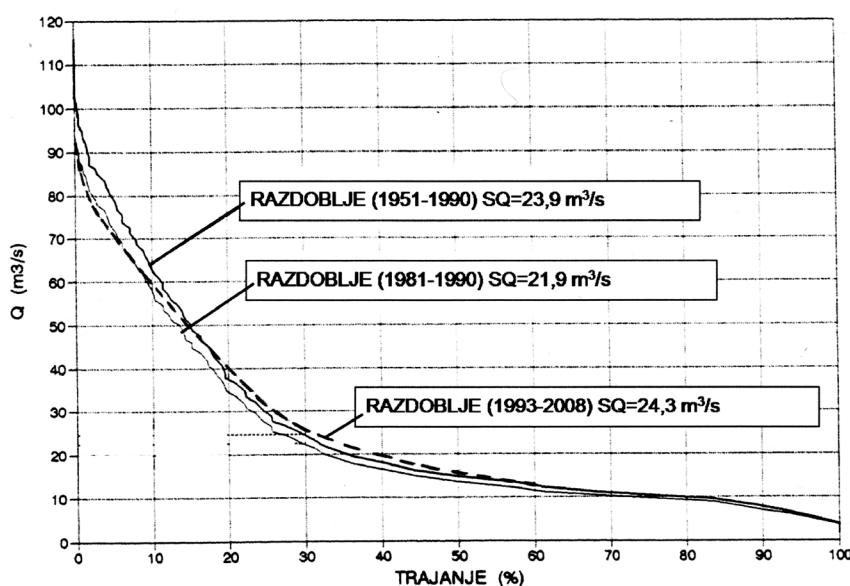
8 KRIVULJE TRAJANJA PROTOKA

Kao što je rečeno u poglavlju 6 uz sliku 6.8, općenito **krivulja trajanja** jest krivulja koja pokazuje postotak vremena ili broj dana u godini, tijekom kojih je vodostaj ili protok jednak danim količinama ili veći od njih bez obzira na kronološki slijed (kronologiju).

Kod detaljnih analiza raspoloživih dotoka za upotrebu, uz prosječnu krivulju trajanja protoka, važni su pokazatelji i krivulje trajanja protoka za pojedine karakteristične godine iz razmatranoga razdoblja: vlažnu, približno srednju i sušnu godinu. U takvim se slučajevima u literaturi preporučuje broj godina neprekidnih motrenja i mjerenja hidroloških veličina najmanje 25 (D. Srebrenović, 1970.), a još bolje 30 (V. Jevđević, 1956., D. Srebrenović, 1986.). Teorijski se krivulje za karakteristične godine redovito prikazuju kao na slici 8.1, ali u praksi, kako je prikazano na slici 8.3, njihovi su oblici često bitno drugačiji.



Slika 8.1 Teorijske krivulje trajanja protoka za vlažnu, približno prosječnu i sušnu godinu (M. Nikolić, 1984.)

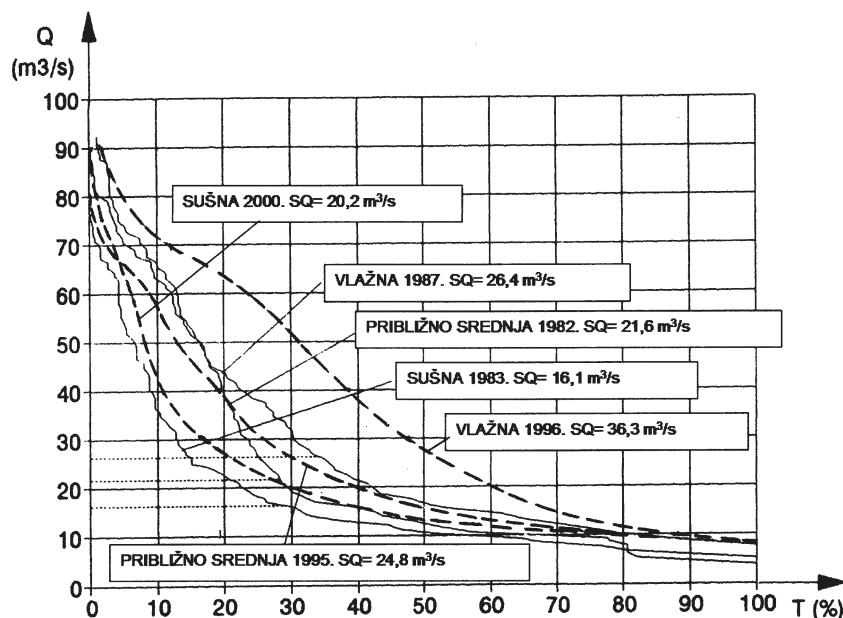


Slika 8.2 Krivulje trajanja protoka Omble u profilu Komolac u različitim razdobljima (R. Žugaj i Ž. Andreić, 2011.)

Sličnost krivulja trajanja protoka, definiranih za različita razdoblja, može se prikazati na primjeru krške rijeke Omble u hidrološkom profilu Komolac (do kojega je utjecajni sliv Omble veličine oko 600 km²).

Na slici 8.2 krivulje trajanja protoka Omble u profilu Komolac određene su za tri razdoblja. Ta je podjela uvjetovana promjenama veličina dotoka, nastalih zbog značajnih hidrotehničkih zahvata na slivu, vezano uz izgradnju akumulacijskih jezera Bileća i Gorica (za HE Dubrovnik) te oblaganje korita Trebišnjice betonom nizvodno od brane Gorica (za PHE Čapljina), a 1991. i 1992. godine nije u profilu Komolac bilo hidroloških mjerenja zbog Domovinskoga rata. Protoci za razdoblje (1951.-1980.) definirani su ARMAX (Auto-Regressive Moving Average with Exogenous Input) modela (M. Miličević, 1988.), a iz razdoblja (1951.-1990.) izdvojeno je sušno razdoblje (1981.-1990.) u kojem se stanje na slivu stabiliziralo, pa su protoci kao i za razdoblje (1993.-2008.) određeni na osnovi mjerenja i preuzeti od Državnoga hidrometeorološkog zavoda RH.

Oblici krivulja trajanja protoka Omble u profilu Komolac u različitim razdobljima na slici 8.2 vrlo su slični. Međutim, kada se razmatraju karakteristične godine, kako je za Omblu prikazano na slici 8.3, onda postoje određene razlike.

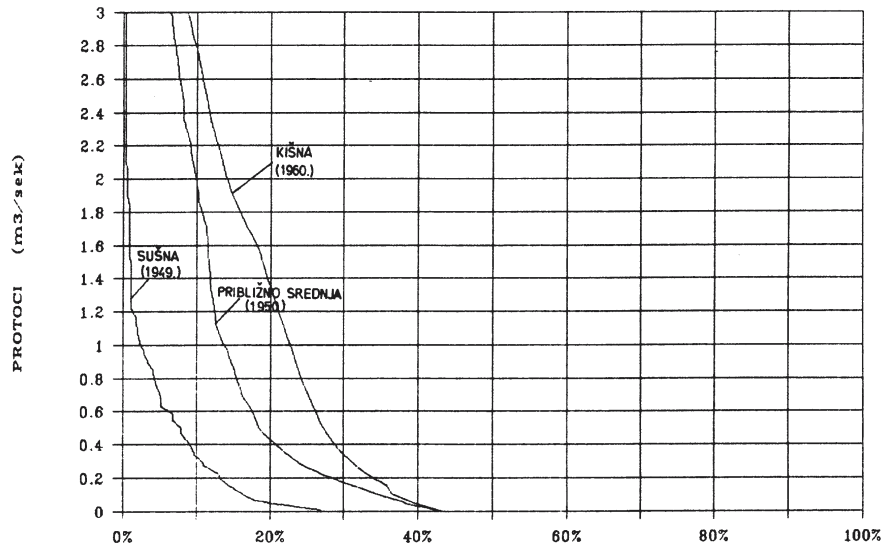


Slika 8.3 Krivulje trajanja protoka Omble u profilu Komolac za karakteristične godine (vlažnu, približno srednju i sušnu) u razdobljima (1981.-1990.) i (1993.-2008.) (R. Žugaj, Ž. Andreić, 2011.)

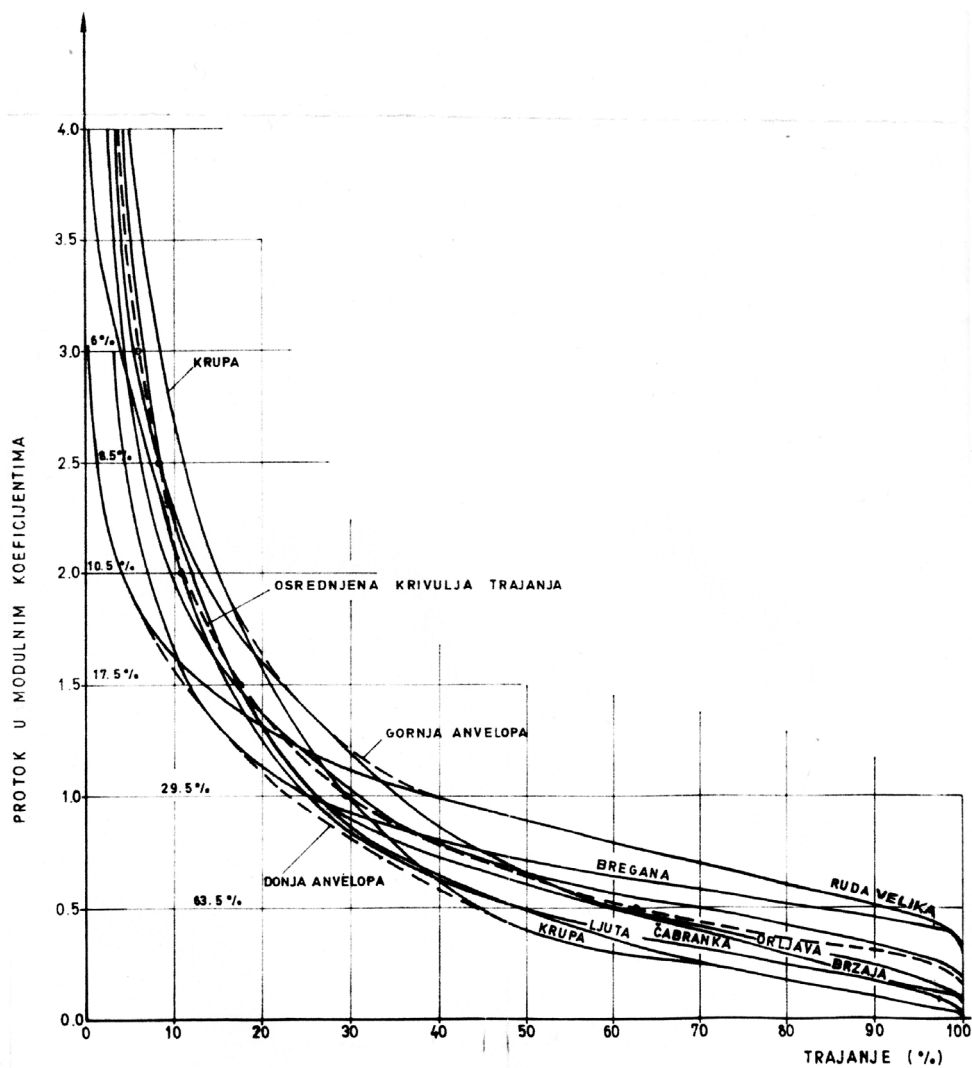
Grafički prikaz na slici 8.3 pokazuje da, osim razlika u oblicima krivulja trajanja protoka za karakteristične godine unutar pojedinoga razdoblja, postoje velike razlike i za pojedine karakteristične godine u različitim razdobljima. Ovo svojstvo izravno utječe na zaključivanja o mogućnosti iskorištavanja vode u pojedinim godinama.

Ako u pojedinom hidrološkom profilu dolazi do presušivanja, to se odražava na krivulju trajanja. Slučaj takvih krivulja trajanja prikazan je na primjeru najuzvodnijega hidrološkog profila krške rijeke Jadove (pritoka rijeke Like) na slici 8.4.

Do primjene računala, zbog velikoga broja ulaznih podataka, krivulje trajanja protoka, a i vodostaja, najčešće su se definirale po klasnim intervalima (R. K. Linsley i dr., 1949.). Također je moguće krivulje trajanja prikazati u posebnom mjerilu na papiru vjerojatnosti (*hydraulic probability paper*).



Slika 8.4 Krivulje trajanja protoka Jadove u profilu Gornja Ploča u karakterističnim godinama (R. Žugaj i Ž. Pavlin, 2009.)



Slika 8.5 Krivulje trajanja protoka za prototipove malih hidroelektrana u modulnim koeficijentima na rijekama: Bregana, Brzaja, Čabranka, Krupa, Ljuta, Orjlava i Ruda Velika

Krivulje trajanja protoka na različitim hidrološkim profilima moguće je međusobno uspoređivati ako se protoci svedu na modulne koeficijente (A. A. Morozov, 1954., V. T. Chow, 1964., R. Žugaj, 1984., S. Gupta, 1989.). (Protoci u pojedinim profilima pretvaraju se u modulne koeficijente tako da se njihove vrijednosti podijele s prosjekom razdoblja, pa je u tom slučaju prosjek jednak jedinici – kao što je opisano u poglavlju 5.)

Ako se ocjenjuju mogućnosti za upotrebu vode u zahvatima pojedinih profila na različitim vodotocima, onda je potrebno međusobno uspoređivati krivulje trajanja protoka definirane u razmatranim profilima.

Primjer takvoga stvarnog slučaja prikazan je na slici 8.5, a odnosi se na krivulje trajanja protoka u profilima sedam vodotoka u Hrvatskoj odabranih za prototipove malih hidroelektrana. Oni su bili usvojeni kao izrazito pogodni za projekte malih hidroelektrana na osnovi provedenih hidroloških istraživanja na 17 malih vodotoka u Hrvatskoj za 1. fazu Katastra malih hidroelektrana u Elektroprojektu, Zagreb (R. Žugaj i dr., 1989.).

Na slici 8.5 crtkanom su linijom označene gornja i donja anvelopa i osrednjena krivulja trajanja protoka, za koju su ujedno napisana trajanja za svakih 0,5 modulnoga koeficijenta. Primjerice, za srednji protok i protoke veće od njega, prosječna trajnost iznosi 29,5 posto vremena (prosječno: 108 dana na godinu). Srednji se protoci i protoci veći od njih, kako se na osnovi anvelopa vidi na slici 8.5, kreću u granicama od 22 do 40 posto trajanja. Bitno je svojstvo krivulja trajanja protoka u modulnim koeficijentima na slici 8.5 da se one po svojim oblicima međusobno znatno razlikuju.

9 VELIKE VODE

9.1 Općenito o velikim vodama

Prema Međunarodnome hidrološkom rječniku (UNESCO/WMO, 1992.) **velika voda** se može definirati na tri načina:

1. kao *povišenje – obično naglo – vode u vodotoku do najviše vrijednosti, od koje razina vode počinje polagano opadati.*
2. kao *velik tok vode mjeran visinom vodostaja ili veličinom protoka.*
3. kao *rastuća plima.*

Pod pojmom velika voda podrazumijevaju se pojave označene maksimalnim ordinatama nivo-grama ili hidrograma velikih vodnih valova, koje se očituju kao naglo izdizanje vodostaja ili protoka tijekom vremena. Oblici i volumeni velikih vodnih valova također su vrlo važni hidrološki pokazatelji, a izravno su povezani s maksimalnim vodostajima i protocima. Velika voda je ekstremna pojava definirana vodostajem, sekundnim protjecanjem ili volumenom u određenome vremenskom razdoblju opažanja ili je utvrđena kao vjerojatnost pojavljivanja u određenima vremenskim razdobljima. Prijelaz između obična visokoga vodostaja i vodostaja velike vode nije jasno određen. Stoga to u izvjesnoj mjeri stvara neodređenost u definiciji velike vode. No, kada je potrebno, granica iznad koje se bilježe velike vode može se odrediti na temelju prosječne visine obala i ekonomskoga utjecaja na okolinu. Velike se vode prema veličini mogu podijeliti na obične, koje se najčešće pojavljuju, te srednje i izvanredne – katastrofalne. Također se mogu podijeliti i prema razdobljima u kojima djeluju, primjerice, na velike vode u vegetacijskome razdoblju i velike vode u razdoblju građenja.

Vrlo je pogodan pokazatelj velikih voda, pogotovo ako se uspoređuju ekstremna otjecanja s raznih slivova, maksimalni specifični dotok s jednoga km² sliva q_M . On je određen omjerom između maksimalnoga protoka Q_M i površine sliva A .

$$q_M = \frac{Q_M}{A} \text{ (m}^3\text{/s/km}^2\text{)} \quad (9.1)$$

Maksimalni specifični dotok q_M opada s porastom površine sliva, i to ne linearno nego po nekom eksponencijalnom zakonu. Ta zakonitost se redovito prikazuje grafički, tako da se na dijagram $A - q_M$ nanesu vrijednosti q_M za odgovarajući A i na toj osnovi definira krivulja maksimalnih specifičnih dotoka.

Uzroci nastajanja velikih voda u riječnome toku su: jake kiše, topljenje snijega ili obje te pojave zajedno. Uz ove, pojave velike vode mogu biti uzrokovane i iznimnim događajima na slivu koji mogu biti izazvani različitim činiocima: odronom zemlje u umjetna ili prirodna jezera, rušenjem brana ili nasipa, nepravilnim rukovanjem evakuacijskim uređajima, otvaranjem barijera nastalim prikupljanjem leda ili naplavljenoga drveta itd. Veliki odroni zemlje u puno ili djelomično puno akumulacijsko jezero mogu uvjetovati prelijevanje preko brane ili rušenje brane i time izazvati katastrofalne poplave u nizvodnome području.

Raspored i veličina velikih voda ovise i o sezonama, odnosno sušnome i vodnome razdoblju unutar godine. Uvjeti i uzroci otjecanja se, ovisno o sezoni, mogu međusobno vrlo razlikovati. Ljeti

se, primjerice, velike vode javljaju pretežno uslijed pljuskova jaka intenziteta. Za zimu je, pak, karakteristično zadržavanje oborina na slivu u obliku snježnoga pokrivača. Porastom temperature dolazi do topljenja snijega pa, ovisno o njegovoj količini na slivu i intenzitetu topljenja, dolazi do povećana otjecanja. U odgovarajućim prilikama mogu se otjecanje uslijed topljenja snijega i otjecanje uslijed kiše pojaviti zajedno i izazvati vrlo jake velike vode (primjerice rijeka Lika).

Pojavama velikih voda pogoduju odgovarajući geološki sastav sliva (nepropusnost), topografski uvjeti (velik koeficijent koncentriranosti sliva i veliki nagibi sliva) i stupanj obraštenosti (slaba obraštenost sliva).

Stanje zemljišta također ima velik utjecaj na veličinu velikih voda. Zaleđenim zemljištem, kao i tлом zasićenim vodom, velik dio pale kiše otječe u vodotok. Suho zemljište, naprotiv, upija palu oborinu i na taj način u velikoj mjeri smanjuje površinsko otjecanje. Ovdje treba izuzeti slučaj kada jak ljetni pljusak padne na suh teren i prve velike kapi stvore na zemlji "koru", preko koje nesmetano otječe ostala voda.

Na velike vode znatno utječe i promjena (transformiranje) vodnoga vala u uzvodnim retencijama – ako one postoje na slivu – i spljoštenje vodnoga vala duž riječnoga toka.

I akumulacijska jezera imaju značajan utjecaj na velike vode. Pravilnim radom akumulacijska jezera mogu smanjiti veličine velikih voda, pa čak i broj njihova pojavljivanja. Ako se njima nepažljivo rukuje ili ako njihovo djelovanje na određenome slivu nije međusobno usklađeno, može doći do pojavljivanja nepovoljnih velikih voda sa štetnim posljedicama (D. Srebrenović, 1966.).

Bilo radi obrane od poplave, dimenzioniranja hidrotehničkih, odnosno drugih objekata, ili raspoređivanja vodnih količina, potrebno je znati koje se velike vode može očekivati u budućnosti. Zbog toga je nužno sa što većom sigurnošću odrediti veličine budućih velikih voda i to prvenstveno u prirodnu, neporemećenu stanju, a nakon toga ih različitim postupcima definirati za buduće – izgrađeno stanje.

Velike vode čiji su uzrok neki iznimni događaji, primjerice rušenje brane, obrađuju se prije svega hidraulički, na fizikalnim modelima, ili, uz određene aproksimacije, na matematičkim modelima.

Ovdje se razmatraju samo one velike vode koje se mogu svrstati u isključivo hidrološke pojave, a to su velike vode, koje su uzrokovane oborinama palim na sliv, te uvjetima tečenja ili slijevanja sa sliva.

U ovom radu, velike vode određuju se prema podacima iz prošlosti na temelju ovih osnovnih pristupa:

1. Određivanjem velikih voda različita reda pojavljivanja metodama matematičke statistike na osnovi niza opaženih velikih voda.
2. Upotrebom različitih iskustvenih (empirijskih) formula.

Pri određivanju mjerodavnih velikih voda može se naići na dva pojma: **najveća moguća voda** i (znatno češće korišten pojam) **velike vode različitih povratnih razdoblja**.

Uz pojam velike vode vezani su i pojmovi poplave, poplavnoga vala i povodnja. **Poplava** je *pojava velike vode na površini Zemlje nakon što ona izađe iz određenoga korita*. **Poplavni val** je *veliki vodni val (jednostruk ili višestruk) u vrijeme trajanja poplave*. **Povodanj** je *pojava velike vode koja prelazi granice korita površinskih voda ili uobičajene gornje razine podzemnih voda*.

Z. W. Kindzewicz (1998.) analizira hidrološke prilike devedesetih godina, nastale promjenom klime uslijed povećanja koncentracije stakleničkih plinova. Smatra se da je to glavni uzrok povećanja kišnih intenziteta s posljedicama povećanja velikih voda. Osim učinka staklenika na promjene veličina protoka vode utječu i drugi čimbenici – prvenstveno izgradnja velikih hidrotehničkih sustava koji uvjetuju određene promjene u vodnim režimima. Na nekim su područjima ustanovljena skrać-

nja povratnih razdoblja pojavljivanja poplava. Primjerice, na osnovi ranijih podataka određena poplava 100-godišnjega povratnog razdoblja postaje sada, zbog češćih pojavljivanja, 10-godišnja ili čak pojava nižega reda pojavljivanja. Zbog ove se činjenice postavlja pitanje jesu li hidrološki nizovi iz prošlosti, na osnovi kojih su velike vode bile definirane, u odnosu na podatke iz ranijih godina homogeni i stacionarni. Ovo će biti moguće ustanoviti tek nakon prikupljanja dovoljna broja podataka, a do tada je najprihvatljivije velike vode definirati sa stajališta ostvarivanja veće sigurnosti.

9.2 Određivanje velikih voda primjenom statističkih metoda

Rezultat statističkih obrada su velike vode različitih povratnih razdoblja, a to su parametri koji se zahtijevaju od današnjih hidroloških obrada. Ovim se pristupom redovito određuju mjerodavne velike vode, ukoliko su na raspolaganju dovoljno pouzdani nizovi podataka dobiveni motrenjem i mjerenjem hidroloških veličina.

Svaka pojava u prirodi zbiva se kao posljedica uzroka koji ju je izazvao. To znači da u prirodi postoje određene zakonitosti po kojima se događaji zbivaju. U okviru toga postoje događaji koji se zbivaju kao posljedica mnogih uzroka, koji se ne mogu ni obuhvatiti, niti ispitati. Takve se pojave zovu slučajnim pojavama ili slučajnim događajima. Ukoliko takvih pojava ima dovoljno, onda se preko njih, na osnovi statističkih zakonitosti, može statističkim metodama istraživati buduće stanje. Statističke se metode primjenjuju kada se pojedine dijelove neke pojave ne može proučavati odvojeno, nego se može promatrati samo cjelokupna pojava. Iz nje se onda može izvesti moguća zakonitost.

Značajke sliva i klime uvjetuju otjecanje vodotokom. Uzroci postanka svake velike vode su mnogobrojni i toliko složeni, da se ona s toga stajališta slobodno može smatrati slučajnom pojavom. Polazeći od toga, iz nizova najvećih međusobno neovisnih pokazatelja velikih voda (pod čime se misli na maksimalne vodostaje, protoke ili volumene velikih vodnih valova) može se, uz primjenu metoda matematičke statistike, odrediti buduće velike vode različita reda pojavljivanja.

Za praktične potrebe zanimljive su prvenstveno iz ekonomskih razloga, velike vode 10.000-, 1.000-, 500-, 100-, 50-, 25-, 10- i 2-godišnjih povratnih razdoblja i upravo zbog toga se u hidrološkim obradama teži što pouzdanijem određivanju njihovih veličina.

Kada se metode matematičke statistike primjenjuju u hidrologiji, mogu nastupiti izvjesne poteškoće. Često ulazni podaci nemaju istu težinu i nisu određeni s jednakom točnošću, iako se u izračunu tretiraju statistički ravnopravno. Određeni upliv može imati i mijenjanje stanja na slivu ili u koritu rijeke. U pojedinima se slučajevima hidrološki podaci dobiveni nakon nekoga značajnog zahvata na slivu ne smiju statistički obrađivati zajedno s podacima dobivenima prije toga zahvata.

Dobiveni će rezultati biti realni ako su u razdoblju motrenja i mjerenja bile zabilježene dovoljno visoke vrijednosti velikih voda, a same statističke obrade provedene određenim redoslijedom i ispravno primijenjene. Uvjeti koje hidrološki nizovi trebaju zadovoljavati da bi se na njima mogle primijeniti metode matematičke statistike opisani su u poglavlju 2.

U prvome redu treba ispitati međusobnu neovisnost članova niza, jer ulazne podatke treba tretirati kao međusobno neovisne slučajne događaje. Također je potrebno da takvih međusobno neovisnih ulaznih podataka bude dovoljan broj, odnosno niz treba biti dovoljno dug. To je potrebno zbog toga što se zakonitosti statističkih metoda u svojoj suštini zasnivaju na zakonu velikih brojeva.

Poslije toga je potrebno ispitati homogenost niza. Niz se može statistički obrađivati samo ako unutar njega nije tijekom vremena nastupila neka statistički značajna promjena. To znači da je potrebno ustanoviti jesu li se događaji u jednome dijelu niza zbivali s nekim dodatnim, statistički značajnim utjecajem, koji nije postojao u drugome dijelu vremenskoga niza. Nakon što je ustanov-

ljeno da su ulazni podaci međusobno neovisni, a niz dovoljno dug i homogen, treba odrediti mjero-davnu krivulju raspodjele, koja mora dobro odgovarati opaženome materijalu. Preko izraza mjero-davne krivulje raspodjele moguće je tada odrediti velike vode malih vjerojatnosti pojavljivanja.

Riječna su korita, pogotovo korita bujičnih vodotoka, podložna promjenama tijekom godina. Takve 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 prvenstveno mogu ukazati različite protočne krivulje unutar dužega vremenskog razdoblja. U takvim slučajevima je bolje umjesto niza maksimalnih vodostaja razmatrati niz maksimalnih protoka, koji su preko odgovarajućih protočnih krivulja izvedeni iz maksimalnih vodostaja. Na taj se način izravno dobiju maksimalni protoci različita reda pojavljivanja, a to su ujedno i najčešći parametri velikih voda, koje hidrologija treba osigurati kao podloge. Postoji li pouzdana ekstrapolacija protočne krivulje, mogu se, ukoliko je to potrebno, iz maksimalnih protoka odrediti i maksimalni vodostaji različita reda pojavljivanja.

Vrlo važni i često neophodni podaci su oblici i volumeni vodnih valova različitih povratnih razdoblja. Na malim slivovima, bujičnih osobina, gdje vodni valovi često nastaju uslijed djelovanja jakih kiša, može se kroz određeni niz godina prikupiti zadovoljavajući broj vodnih valova nastalih površinskim otjecanjem. Ako su hidrogrami vodnih valova po oblicima slični, pogotovo je korisno statistički obraditi njihove volumene. Naime, volumeni vodnih valova su izravno povezani s oborinama palima 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 prikazi velikih vodnih valova mnogo više govore o ekstremno velikom otjecanju i njihovom se daljnjom analizom mogu dobiti glavni pokazatelji za obranu od poplave, dimenzioniranje akumulacijskih jezera, evakuacijskih organa itd.

Osnovni skup maksimalnih voda, odnosno niz ulaznih podataka koji će se statistički obrađivati, može se sastaviti na dva načina:

- 1) Na temelju niza maksimalnih godišnjih voda, a to su najveći protoci ili, u nekim slučajevima, vodostaji, od kojih je svaki zabilježen u jednoj hidrološkoj ili kalendarskoj godini.
- 2) Na temelju niza najvećih zabilježenih protoka u razdoblju motrenja, gdje se uzimaju sve velike vode iznad neke unaprijed određene vrijednosti – repernoga protoka.

Polazeći od činjenice da i jedan i drugi niz imaju dovoljan broj članova, potrebno je ustanoviti koji od razmatranih dvaju nizova daje veće velike vode. To se može na jednostavan način ispitati tako da se na logaritamski papir vjerojatnosti (logaritmi – vjerojatnost) nanesu vrijednosti obaju nizova. Pravac koji prolazi kao težišnica strmijega niza u ekstrapoliranome dijelu – daje veće velike vode. Prema tome, rezultati dobiveni na osnovi strmijega niza omogućavat će veću sigurnost.

Osnovna mana niza 2) jest da pojedini susjedni članovi mogu biti vrlo blizu, što pokazuje da je drugi član u većoj ili manjoj mjeri ovisan o prvome, a to nije u skladu s osnovnom pretpostavkom da su ove pojave slučajne i međusobno neovisne.

Međutim, niz maksimalnih godišnjih protoka može sa stajališta statističke obrade biti prekratak, što se vrlo često događa u slučaju malih slivova. U tome slučaju nije na odmet, ukoliko statistička obrada podataka uopće dolazi u obzir, usporediti oba niza.

U nizu maksimalnih godišnjih protoka razmak između pojedinih članova redovito je tako dug, da je uzajamni utjecaj gotovo isključen, pogotovo ako se radi o hidrološkim godinama.

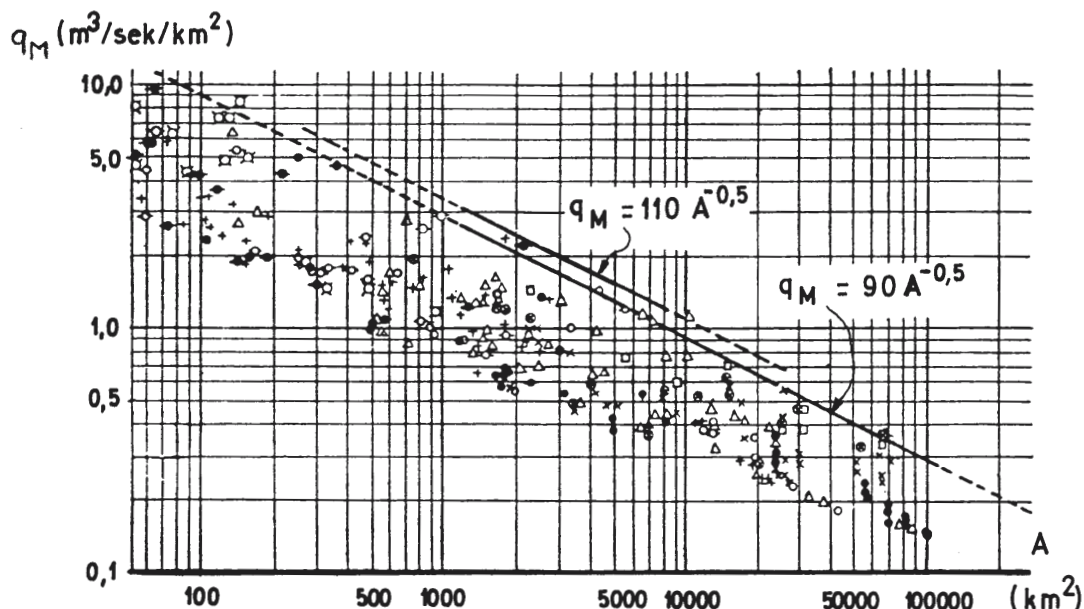
Prije svega je potrebno ispitati je li se unutar promatranoga vremenskog razdoblja pojavila barem jedna reprezentativna velika voda. Naime, moguće je da su unutar razdoblja motrenja bile zabilježene samo razmjerno male velike vode, a da su se izvan toga razdoblja pojavljivale znatno veće vrijedno-

sti. Njih bi svakako trebalo uzeti u obzir, jer bi u suprotnom izračunane vrijednosti velikih voda sasvim sigurno bile preniske. Zbog toga je potrebno ustanoviti jesu li u razdoblju opažanja bile zabilježene dovoljno velike vrijednosti velikih voda.

To se može provjeriti preko odgovarajućih dijagrama na koje su nanoseni najveći opaženi specifični dotoci različitih slivova u funkciji površina slivova. Jedan takav dijagram, u log-log koordinatnome sustavu, prikazan je na slici 9.1. Dijagram na slici 9.1 izrađen je na osnovi podataka o najvećim opaženim protocima na različitim slivovima u istočnome dijelu SAD-a. Na slici 9.1 konstruirane su i dvije anvelopne krivulje, kod kojih donja anvelopa obuhvaća najveći dio velikih voda, a gornja anvelopa krajnje opažene maksimume (V. Jevđević, 1956.).

Za slivna područja u bivšoj Jugoslaviji anvelopne krivulje najvećih opaženih specifičnih dotoka definirao je D. Srebrenović (1970.). Te su anvelope, zajedno s podacima o najvećim opaženim specifičnim dotocima i anvelopama krških slivova u Hrvatskoj, opisane su u njegovoj knjizi *Problemi velikih voda*, pa se zainteresirane upućuje na to djelo.

Izračun velikih voda primjenom statističkih metoda predstavlja određivanje mjerodavne funkcije raspodjele na temelju ulaznih izračunskih podataka dobivenim hidrološkim motrenjima i mjerenjima.



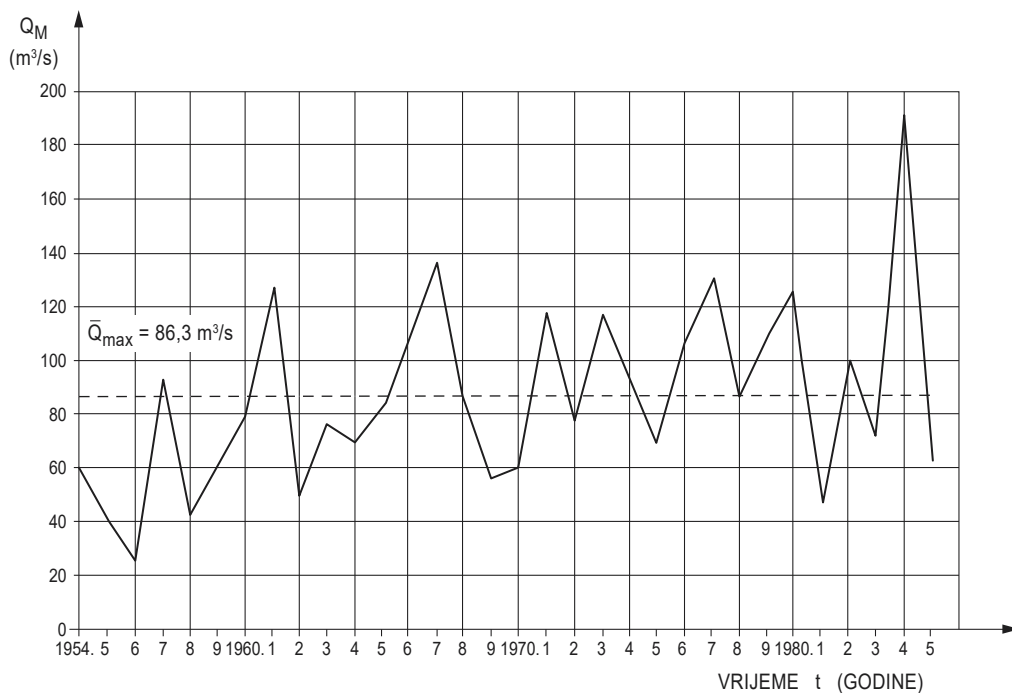
Slika 9.1 Najveći opaženi maksimalni specifični dotoci q_M u funkciji površina slivova A (V. Jevđević, 1956.)

Funkcija raspodjele ili funkcija raspodjele vjerojatnosti pojavljivanja slučajne promjenljive veličine je način na koji su učestalosti članova neke populacije raspodijeljene prema vrijednostima varijabli koje prikazuju. U hidrologiji se funkcije raspodjele najviše primjenjuju pri definiranju veličina velikih i malih voda različitih povratnih razdoblja, koje se određuju na osnovi mjerodavne funkcije raspodjele – ekstrapolacijom za različita povratna razdoblja (primjerice: 2-, 5-, 10-, 25-, 100-, 1000-, 10.000-godišnji maksimalni protok).

Grafički prikaz funkcije raspodjele naziva se **krivuljom raspodjele**. Na osnovi članova niza izračunskih podataka poredanih po veličini, određenom se teorijskom krivuljom raspodjele definira krivulja trajanja. Za velike vode najčešće se obrađuju maksimalni godišnji protoci i volumeni maksimalnih vodnih valova (s obzirom na vršni protok ili najveći volumen), a mogu se obrađivati i maksimalni protoci iznad nekoga repnog protoka, te maksimalni vodostaji.

Velike se vode rijetka reda pojavljivanja određuju na temelju ekstrapolacije krivulje raspodjele i zbog toga je potrebno definirati mjerodavnu krivulju raspodjele. Nakon izračunavanja, krivulje se raspodjele grafički prikazuju na papiru vjerojatnosti (slika 9.3).

Za analizu raspodjele u hidrologiji se rabi velik broj jedno-, dvo- ili višeparametarskih krivulja raspodjele. Ovdje su prikazane Gaussova (normalna), logaritamsko-normalna (Galtonova) i Gumbelova raspodjela te raspodjela Pearson 3. Izračun krivulja raspodjela opisan je na primjeru niza maksimalnih godišnjih protoka rijeke Čabranke u profilu Zamost II iz razdoblja od 1954. do 1985. godine, koji je prikazan na slici 9.2.



Slika 9.2 Maksimalni godišnji protoci Čabranke Q_M u profilu Zamost II u razdoblju od 1954. do 1985.

Nakon provedenih ispitivanja neovisnosti, homogenosti i stacionarnosti, ustanovljeno je da se na članove niza mogu primijeniti statističke metode. Osnovni statistički parametri razmatranoga niza su, prema izrazima (2.1), (2.3), (2.5) i (2.6):

- prosjek niza: $\bar{Q}_M = 86,3 \text{ m}^3/\text{s}$
- standardno odstupanje: $\sigma = 35,2 \text{ m}^3/\text{s}$
- koeficijent varijacije: $c_{vM} = 0,41$
- koeficijent asimetrije: $c_{sM} = 0,80$

Nakon što se maksimalni godišnji protoci Čabranke u profilu Zamost II poredaju po veličini, definira se vjerojatnost pojavljivanja svakoga pojedinog člana. U ovome je slučaju usvojena vjerojatnost pojavljivanja prema N. N. Čegodajevu. Prema tome je vjerojatnost pojavljivanja prvoga člana (najvećega maksimalnog godišnjeg protoka u razmatranome nizu):

$$p = \frac{m - 0,3}{n + 0,4} = \frac{1 - 0,3}{32 + 0,4} = 0,0216 = 2,016\%$$

Vjerojatnost pojavljivanja drugoga člana niza po veličini je:

$$p = \frac{2-0,3}{32+0,4} = 0,0525 = 5,25\%, \text{ itd.}$$

pri čemu je m član niza po redoslijedu, a n je ukupni broj članova niza.

Članovi niza s odgovarajućim vjerojatnostima pojavljivanja prikazani su na papiru vjerojatnosti na slici 9.3.

Nakon što su izračunani osnovni statistički parametri, pristupa se izračunavanju maksimalnih godišnjih protoka različitih povratnih razdoblja prema odabranim krivuljama raspodjele.

Gaussova (normalna) krivulja raspodjele je simetrična i dvoparameterska. Velike vode, kao i većina hidroloških pojava, redovito imaju nesimetričnu raspodjelu, ali Gaussova se raspodjela često obrađuje uz druge raspodjele radi njihove međusobne usporedbe.

Ukoliko se u Gaussovu funkciju uvede reducirano odstupanje z kao nova nepoznanica, a ona se u razmatranome slučaju maksimalnih godišnjih protoka označava kao:

$$z = \frac{Q_M - \bar{Q}_M}{\sigma} \quad (9.2)$$

dobije se Gaussova krivulja bez parametara, određena izrazom:

$$p = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{1}{2}z^2} dz \quad (9.3)$$

Na taj se način postupak svodi na to, da se iz podataka osnovnoga skupa, a u ovome slučaju su to 32 maksimalna godišnja protoka, izračunaju dva parametra: aritmetička sredina \bar{Q}_M i standardno odstupanje σ . Nakon toga se za razne vjerojatnosti pojavljivanja p iz tablice Gaussove funkcije (u priručniku) odrede vrijednosti reduciranoga odstupanja z . Veličine protoka velikih voda različitih vjerojatnosti pojavljivanja dobiju se iz izraza:

$$Q_{Mp} = \bar{Q}_M + z\sigma \quad (9.4)$$

Izračun maksimalnih protoka različitih povratnih razdoblja Čabranke u profilu Zamost II prema Gaussovoj krivulji dan je u tablici 9.1.

Tablica 9.1 Izračun maksimalnih godišnjih protoka Čabranke u profilu Zamost II Q_{Mp} prema Gaussovoj krivulji raspodjele

Povratno razdoblje (god.)	Vjerojatnost pojavljivanja p (%)	z	$z\sigma$	Q_{Mp} (m ³ /s)
10.000	0,01	3,715	131	217
1000	0,1	3,090	109	195
100	1	2,326	81,9	168
50	2	2,054	72,3	159
25	4	1,752	61,7	148
10	10	1,281	45,1	131
5	20	0,842	29,6	116
2	50	0,000	0,0	86,3
1,25	80	-0,842	-29,6	56,7
1,1111	90	-1,281	-45,1	41,2
1,0417	96	-1,752	-61,7	24,6
1,0204	98	-2,054	-72,3	14,0
1,0101	99	-2,326	-81,8	4,4
1,0010	99,9	-3,090	-109	-
1,0001	99,99	-3,715	-132	-

Ako se vrijednosti članova niza izraze logaritmima, njihov niz može slijediti dvoparametarsku **logaritamsko-normalnu** ili **Galtonovu raspodjelu**. Funkcija vjerojatnosti tada je dana izrazom:

$$P_{(\bar{q})} = \frac{1}{\bar{\sigma} \sqrt{2\pi}} \int e^{-\frac{1}{2} \frac{(\bar{q} - \bar{q}_o)^2}{\sigma^2}} d\bar{q} \quad (9.5)$$

Oznake u izrazu za raspodjelu su:

– logaritam maksimalnoga protoka:

$$\bar{q} = \log Q_M \quad (9.6)$$

– aritmetička sredina logaritama niza $\log Q_M$:

$$\bar{q}_o = \frac{\Sigma \bar{q}}{n} = 1,8999 \quad (9.7)$$

Aritmetička sredina logaritama \bar{q}_o je također:

$$\bar{q}_o = \frac{1}{2} \log \left(\frac{\bar{Q}_M^4}{\bar{Q}_M^2 + \sigma^2} \right) \quad (9.7 \text{ a})$$

gdje je \bar{Q}_M aritmetička sredina, a σ standardno odstupanje članova niza maksimalnih godišnjih protoka.

– standardno odstupanje logaritama:

$$\bar{\sigma} = \pm \sqrt{\frac{\Sigma (\bar{q} - \bar{q}_o)^2}{n}} = \pm 0,18577 \quad (9.8)$$

$e = 2,7183$ – baza prirodnih logaritama.

Standardno odstupanje logaritama $\bar{\sigma}$ je također:

$$\bar{\sigma} = \pm \sqrt{\frac{1}{2} \log \left(\frac{\bar{Q}_M^2 + \sigma^2}{\bar{Q}_M^2} \right)} \quad (9.9)$$

U ovoj raspodjeli reducirano odstupanje je:

$$z = \frac{(\bar{q} - \bar{q}_o)}{\bar{\sigma}} \quad (9.10)$$

Prema tome, vrijednost logaritma maksimalnih protoka različita reda pojavljivanja dobije se prema izrazu:

$$\bar{q}_p = \bar{q}_o + z \bar{\sigma} \quad (9.11)$$

Kada se vrijednosti \bar{q}_p antilogaritmiraju, dobiju se vrijednosti maksimalnih protoka različitih povratnih razdoblja. Za određene vrijednosti z iz tablice za Gaussovu krivulju mogu se izračunati učestalosti maksimalnih godišnjih protoka. Rezultati izračuna na primjeru niza maksimalnih godišnjih protoka Čabranke u profilu Zamost II dani su u tablici 9.2.

Od 14 Pearsonovih funkcija raspodjele u hidrologiji se najčešće koristi 3. tip Pearsonove funkcije. **Raspodjela Pearson 3** je nesimetrična troparametarska raspodjela. Budući da je izvorni oblik ove raspodjele dosta složen, a rad sa njime dugotrajan, u hidrološkoj praksi se upotrebljava modificirani oblik, prema Foster-Ribkinu. Taj je oblik vrlo pogodan da se s osnovnim parametrima – aritme-

tičkom sredinom \bar{Q}_M koeficijentom varijacije c_{vM} i koeficijentom asimetrije c_{sM} – može raditi brzo i jednostavno. Foster-Ribkinova modifikacija dana je izrazom:

$$Q_{Mp} = (c_v \varphi + 1) \bar{Q}_M \quad (9.12)$$

Funkcija φ definirana je kao:

$$\varphi = f(c_s, p) \quad (9.13)$$

U tablici 9.3 dane su vrijednosti funkcije φ za različite vjerojatnosti pojavljivanja p i različite koeficijente asimetrije c_{sM} prema Foster-Ribkinovim tablicama. (Veličine φ u Foster-Ribkinovim tablicama izvedene su za koeficijent varijacije $c_{vM} = 1$, prosjek niza $\bar{X} = 1$, a u ovome je slučaju prosječni godišnji maksimalni protok $\bar{Q}_M = 1$).

Tablica 9.2 Izračun maksimalnih godišnjih protoka Čabranke u profilu Zamost II Q_{Mp} prema logaritamsko-normalnoj (Galtonovoj) raspodjeli

Povratno razdoblje (god.)	Vjerojatnost pojavljivanja p (%)	$z\bar{\sigma}$	z	\bar{q}_p	Q_{Mp} (m ³ /s)
10.000	0,01	3,715	0,6901	2,5900	389
1000	0,1	3,090	0,5740	2,4739	298
100	1	2,326	0,4321	2,3320	215
50	2	1,054	0,3816	2,2815	191
25	4	1,752	0,3255	2,2254	168
10	10	1,281	0,2380	2,1379	137
5	20	0,842	0,1564	2,0563	114
2	50	0,000	0,000	1,8999	79,4
1,25	80	-0,842	-0,1564	1,7435	55,4
1,1111	90	-1,281	-0,2380	1,6619	45,9
1,0417	96	-1,752	-0,3255	1,5744	37,5
1,0204	98	-2,054	-0,3816	1,5183	33,0
1,0101	99	-2,326	-0,4321	1,4678	29,4
1,0010	99,9	-3,090	-0,5740	1,3259	21,2
1,0001	99,99	-3,715	-0,6901	1,2098	16,2

Rezultati izračuna maksimalnih godišnjih protoka različitih povratnih razdoblja Čabranke u profilu Zamost II dani su u tablici 9.3. Izračun je proveden s ulaznim parametrima:

$$\bar{Q}_M = 86,3 \text{ m}^3/\text{s}, c_{vM} = 0,41 \text{ i } c_{sM} = 0,80.$$

Gumbelova raspodjela je nesimetrična i dvoparameterska. Prema Gumbelu je na primjeru maksimalnih godišnjih protoka vjerojatnost pojavljivanja definirana eksponencijalnom funkcijom:

$$P_{(Q_M)} = a e^{-a(Q_M - Q^*)} e^{-e^{-a(Q_M - Q^*)}} \quad (9.14)$$

gdje su Q^* i a parametri Gumbelove raspodjele. Q^* je mod Gumbelove krivulje i definiran je izrazom:

$$Q^* = \bar{Q}_M - \frac{0,577}{a} \quad (9.15)$$

U izrazu (9.15), $\bar{Q}_M = 86,3 \text{ m}^3/\text{s}$ je prosječan maksimalni godišnji protok, veličina 0,577 je Eulerova konstanta, a parametar a je definiran izrazom:

Tablica 9.3 Veličine funkcije ϕ prema Foster-Ribkinu

c_{sM}	Vjerojatnost pojavljivanja p (%)														
	0,01	0,1	1	2	4	10	20	50	80	90	96	98	99	99,9	99,99
-2,0		1,00	0,99	0,98	0,96	0,90	0,78	0,31	-0,6	-1,3	-2,3	-3,0	-3,6	-5,9	
-1,5		1,31	1,26	1,23	1,15	1,02	0,82	0,24	-0,7	-1,3	-2,0	-2,9	-3,3	-5,2	
-1,0		1,79	1,59	1,37	1,22	1,13	0,85	0,16	-0,8	-1,3	-2,0	-2,7	-3,0	-4,5	
-0,8		2,02	1,74	1,65	1,42	1,17	0,85	0,13	-0,8	-1,3	-1,9	-2,6	-2,9	-4,2	
-0,6		2,27	1,88	1,76	1,51	1,20	0,85	0,10	-0,8	-1,3	-1,9	-2,5	-2,8	-4,0	
-0,4		2,54	2,03	1,90	1,60	1,23	0,85	0,07	-0,8	-1,3	-1,8	-2,3	-2,6	-3,7	
-0,2		2,81	2,18	1,98	1,67	1,26	0,85	0,03	-0,8	-1,3	-1,8	-2,2	-2,5	-3,4	
0,0	3,72	3,09	2,33	2,04	1,75	1,28	0,84	0,00	-0,9	-1,3	-1,7	-2,1	-2,3	-3,1	-3,7
0,2	4,16	3,38	2,47	2,16	1,81	1,30	0,83	0,00	-0,9	-1,3	-1,6	-1,8	-2,2	-2,8	-3,3
0,4	4,61	3,66	2,61	2,26	1,87	1,32	0,82	-0,1	-0,9	-1,2	-1,5	-1,7	-2,0	-2,5	-2,9
0,6	5,05	3,96	2,76	2,35	1,94	1,33	0,80	-0,1	-0,9	-1,2	-1,5	-1,7	-1,9	-2,3	-2,5
0,8	5,50	4,24	2,89	2,45	2,00	1,34	0,78	-0,1	-0,9	-1,2	-1,4	-1,6	-1,7	-2,0	-2,2
1,0	5,96	4,53	3,02	2,54	2,05	1,34	0,76	-0,2	-0,9	-1,1	-1,3	-1,4	-1,6	-1,8	-1,9
1,2	6,41	4,81	3,15	2,62	2,09	1,34	0,73	-0,2	-0,8	-1,1	-1,3	-1,4	-1,5	-1,6	-1,6
1,5	7,09	5,26	3,33	2,74	2,15	1,33	0,69	-0,2	-0,8	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,3	-1,3
2,0	8,21	5,91	3,60	2,91	2,23	1,30	0,61	-0,3	-0,8	-0,9	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0
2,5	9,30	6,60	3,83	3,04	2,28	1,24	0,53	-0,4	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
3,0	10,4	7,25	4,02	3,16	2,30	1,18	0,42	-0,4	-0,6	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7

$$\frac{1}{a} = 0,780 \sigma \quad (9.16)$$

gdje je u razmatranome primjeru standardno odstupanje $\sigma = 35,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Prema tome, u obradi maksimalnih godišnjih protoka Čabranke u profilu Zamost II veličine parametara Gumbelove raspodjele su: $\frac{1}{a} = 27,5 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q^* = 70,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ako se uzme:

$$z = a (Q_M - Q^*) \quad (9.17)$$

i uvrsti u izraz za učestalost, dobije se:

$$p_{(Q_M)} = a e^{-z} e^{-e^{-z}} \quad (9.18)$$

Prema tome je vjerojatnost:

$$p_{1(Q_M)} = e^{-e^{-z}} \quad (9.19)$$

zato što je:

$$p_{1(Q_M)} = 1 - p_{(Q_M)} \quad (9.20)$$

Gumbel je u tablici dao odnos $p_{1(Q_M)}$ i z , pa se protoci različita reda pojavljivanja mogu odrediti na temelju izraza:

$$Q_{Mp} = Q^* + \frac{1}{a} z \quad (9.21)$$

Izračun se provodi tabelarno, kao što je prikazano u tablici 9.5.

Gaussova, log-normalna, Pearson 3 i Gumbelova krivulja raspodjele, zajedno su s ulaznim izračunskim podacima (maksimalni godišnji protoci Čabranke u profilu Zamost II) grafički prikazane na papiru vjerojatnosti na slici 9.3.

Tablica 9.4 Izračun maksimalnih godišnjih protoka različitih povratnih razdoblja Čabranke u profilu Zamost II Q_{Mp} prema raspodjeli Pearson 3

Povratno razdoblje (god.)	Vjerojatnost pojavljivanja p (%)	φ	Q_{Mp} (m ³ /s)
10.000	0,01	5,50	281
1000	0,1	4,24	236
100	1	2,89	189
50	2	2,45	173
25	4	2,00	157
10	10	1,34	134
5	20	0,78	114
2	50	-0,13	81,7
1,25	80	-0,86	55,9
1,1111	90	-1,17	44,9
1,0417	96	-1,47	34,3
1,0204	98	-1,60	29,7
1,0101	99	-1,74	24,7
1,0010	99,9	-2,02	14,8
1,0001	99,99	-2,18	9,17

Tablica 9.5 Izračun maksimalnih godišnjih protoka različitih povratnih razdoblja Čabranke u profilu Zamost II Q_{Mp} prema Gumbelovoj raspodjeli

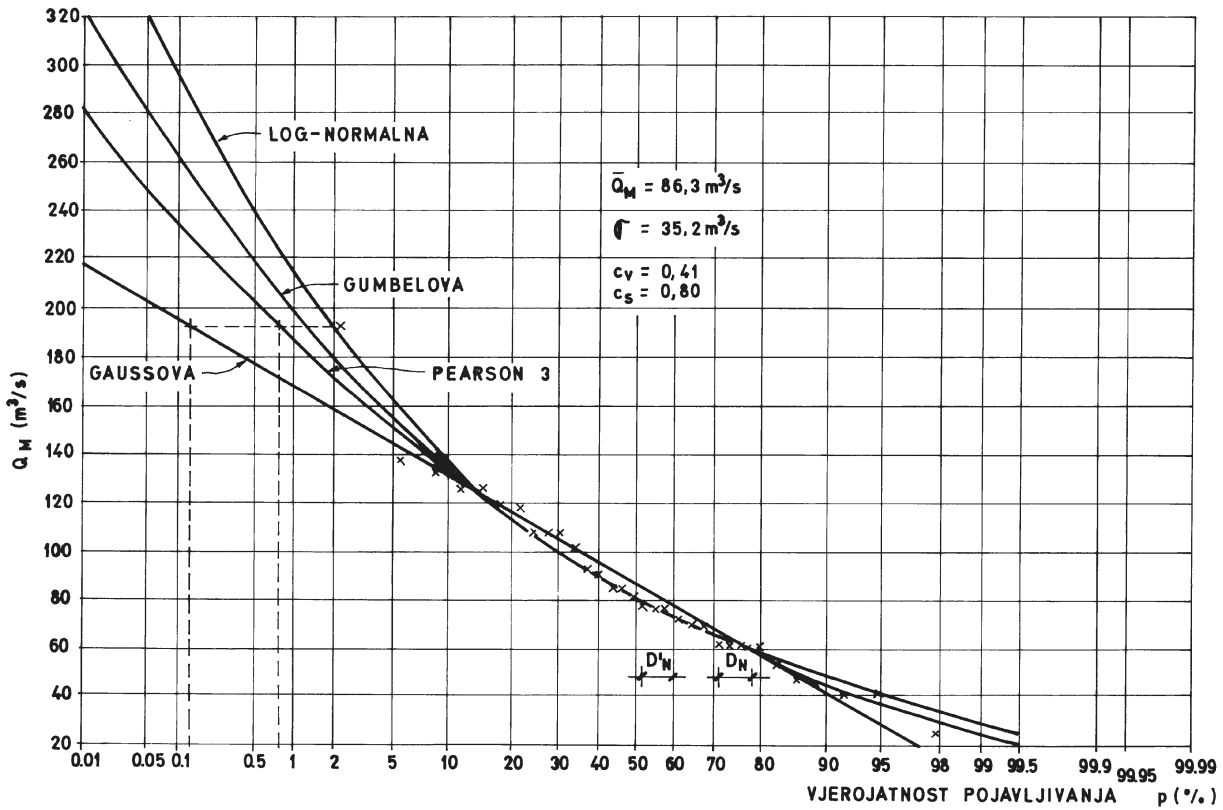
Povratno razdoblje p (god.)	Vjerojatnost pojavljivanja p (%)	p_1	z	$\frac{1}{a}z$	Q_{Mp} (m ³ /s)
10.000	0,01	0,9999	9,21	253,3	324
1000	0,1	0,999	6,91	190	261
100	1	0,99	4,60	126,5	197
50	2	0,98	3,91	107,5	178
25	4	0,96	3,20	88,0	159
10	10	0,90	2,25	61,9	132
5	20	0,80	1,50	41,3	112
2	50	0,50	0,37	10,2	80,7
1,25	80	0,20	-0,48	-13,2	57,3
1,1111	90	0,10	-0,83	-22,8	47,7
1,0417	96	0,04	-1,15	-31,6	38,9
1,0204	98	0,02	-1,35	-37,1	33,4
1,0101	99	0,01	-1,53	-42,1	28,4
1,0010	99,9	0,001	-1,94	-53,4	17,2
1,0001	99,99	0,0001	-2,20	-60,5	10,0

Krivulje raspodjele sa slike 9.3 daju različite vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka različitih povratnih razdoblja. Već na prvi pogled se vidi da Gaussova simetrična raspodjela nije prihvatljiva jer daje preniske ekstrapolirane vrijednosti. Najveći izračunski protok iz 32-godišnjega niza $Q_M = 192$ m³/s ima praktički 900-godišnje povratno razdoblje prema Gaussovoj raspodjeli.

Odluka o mjerodavnoj raspodjeli može se temeljiti na primjeni različitih testova kojima se ispituje prilagodljivost teorijskih raspodjela ulaznim izračunskim podacima, primjerice: χ^2 -test, test A. N. Kolmogorova (S. Jovanović, 1981.). Ovdje se opisuje Kolmogorovljev test.

Primjena Kolmogorovljeva testa ne ovisi o broju parametara raspodjele. Pretpostavlja se da su raspodjela članova niza i veličine parametara raspodjele poznate.

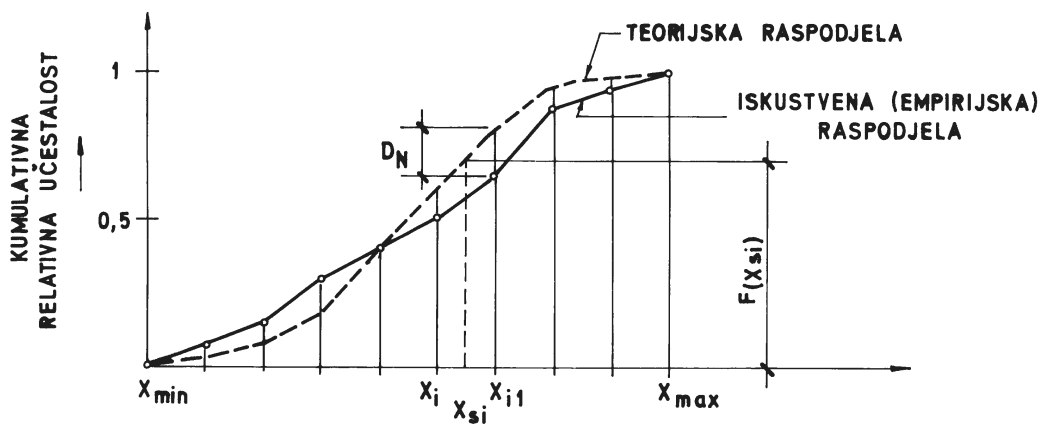
Mjera odstupanja D_N iskustvene raspodjele, odnosno raspodjele ulaznih izračunskih podataka, od teorijske raspodjele je najveća razlika između iskustvene (empirijske) $\varphi_{N(x)}$ i teorijske raspodjele $F_{(x)}$.



Slika 9.3 Maksimalni godišnji protoci različitih povratnih razdoblja Q_{Mp} Čabranke u profilu Zamost II

$$D_N = \max | \varphi_{N(x)} - F_{(x)} | \quad -\infty < x < +\infty \quad (9.22)$$

Niz je poredan prema rastućim vrijednostima, a određivanje mjere odstupanja D_N je prikazano na slici 9.4.



Slika 9.4. Iskustvena i teorijska raspodjela

Za razinu povjerenja $\alpha = 0,05$ (5%) za različit broj članova niza n dane su u tablici 9.6 kritične vrijednosti D_0 .

Tablica 9.6 Kritične vrijednosti D_0 testa A. N. Kolmogorova za različite brojeve članova niza n kod razine povjerenja $\alpha = 0,05$ uobičajene u hidrologiji (prema S. Jovanović, 1981.)

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	0,20	0,19	$\frac{1,36}{\sqrt{n}}$

Testiranje se provodi sljedećim postupkom:

1. za rastući se niz izračunaju iskustvene (empirijske) vrijednosti $\varphi_{N(xm)}$,
2. za svaki x u rastućem nizu se izračuna vjerojatnost $F_{(x)}$ – može se i očitati s raspodjele,
3. za svaki se x odrede razlike $|\varphi_{N(x)} - F_{(x)}|$,
4. najveća se razlika $D_N = \max |\varphi_{N(x)} - F_{(x)}|$ usporedi s kritičnom vrijednošću D_0 , koja se uzme iz tablica u skladu s usvojenom razinom povjerenja α .

Na primjeru niza maksimalnih godišnjih protoka Čabranke u profilu Zamost II prikazane su na slici 9.3 najveće razlike D_N između ulaznih izračunskih podataka i pojedinih raspodjela. Za Gaussovu raspodjelu $D_N = 8,54\%$, odnosno $D_N' = 0,085$, za log-normalnu $D_N = 0,070$, za Pearson 3 $D_N = 0,066$, a za Gumbelovu $D_N = 0,082$.

Prema tablici 9.6 kritična vrijednost za niz od $n = 32$ člana je $D_0 = 0,23$, pa po tom kriteriju sve četiri raspodjele zadovoljavaju. Najbolju prilagodbu ulaznim izračunskim podacima ima raspodjela Pearson 3, ali i za nju se može reći da daje niske ekstrapolirane vrijednosti – najveći zabilježeni protok u 32-godišnjem nizu $Q_M = 192 \text{ m}^3/\text{s}$ po raspodjeli Pearson 3 ima povratno razdoblje od približno 140 godina. U razmatranome stvarnom slučaju bilo bi najispravnije kao mjerodavne usvojiti vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka različitih povratnih razdoblja po log-normalnoj raspodjeli, i to iz sljedećih razloga:

1. log-normalna raspodjela zadovoljava prema provedenome Kolmogorovljevu testu (razlika između vrijednosti D_N za raspodjelu Pearson 3 i log-normalnu raspodjelu je vrlo mala)
2. log-normalna krivulja raspodjele prolazi vrlo blizu podatka najveće vrijednosti, pa i ta činjenica pruža određenu sigurnost ekstrapoliranima vrijednostima.
3. niz od 32 maksimalna godišnja protoka na osnovi kojega se izračunavaju protoci vrlo rijetka reda pojave vrlo je kratak u odnosu na povratna razdoblja od 100, 1000 i 10.000 godina. Zbog toga je sa stajališta veće sigurnosti opravdano usvojiti raspodjelu koja daje veće vrijednosti.

Prema tome, izbor mjerodavne raspodjele treba temeljiti na prilagodbi raspodjela ulaznim izračunskim podacima, a uz to treba razmotriti i druge čimbenike koji se razlikuju od slučaja do slučaja (duljina niza, odnos raspodjele prema najvećim vrijednostima u nizu i sl.). U nekim slučajevima važan utjecaj na usvajanje veličina velikih voda može imati i sama građevina radi koje se velike vode izračunavaju. Radi li se o dimenzioniranju evakuacijskih organa (preljev i temeljni ispust) nasute brane, redovito je opravdano usvajati veće vrijednosti velikih voda, odnosno veću sigurnost. Preljevanje vode preko krune nasute brane se ne smije dozvoliti jer uslijed erozije može doći do njezina rušenja.

9.3 Popravak sigurnosti

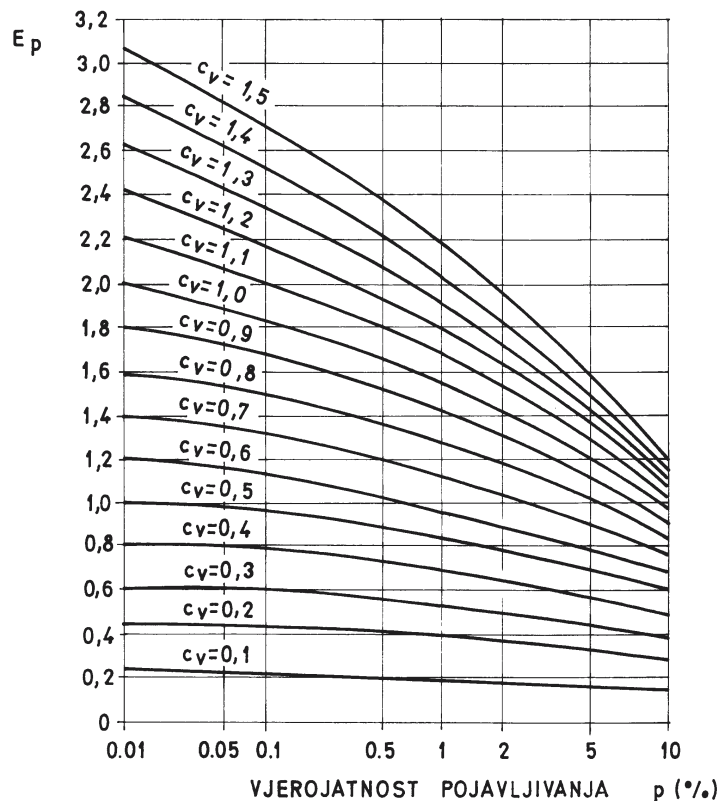
Ukoliko se tijekom razmatranja ulaznih izračunskih podataka ustanovi da su njihove vrijednosti niže od stvarnih, što je slučaj kada se radi s vodokaznima podacima ili kada se najveće vrijednosti ulaznih podataka nalaze s desne strane krivulje raspodjele, velike se vode različitih povratnih razdo-

blja može na određeni način povećati. Postupak pod nazivom **popravak sigurnosti** opisala je A. A. Lušćeva (1953.).

U izračun velikih voda uvodi se kao popravak sigurnosti veličina protoka ΔQ , koja je, budući da se redovito radi o maksimalnim protocima, definirana izrazom:

$$\Delta Q = \frac{a E_p}{\sqrt{n}} Q_{Mp} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (9.23)$$

gdje je a koeficijent i uzima se da je $a = 1$ za rijeke proučenih područja; $a = 2$ za rijeke neproučenih područja; E_p je srednja kvadratna pogreška protoka u računu vjerojatnosti, koja se uzima iz dijagrama sa slike 9.5; n je broj članova niza, a Q_{Mp} je maksimalni protok s krivulje raspodjele p -toga reda pojavljivanja.



Slika 9.5 Veličine E_p za određivanje popravka sigurnosti maksimalnih protoka (A. A. Lušćeva, 1953.)

Konačni maksimalni protok Q'_{Mp} je:

$$Q'_{Mp} = Q_{Mp} + \Delta Q \quad (9.24)$$

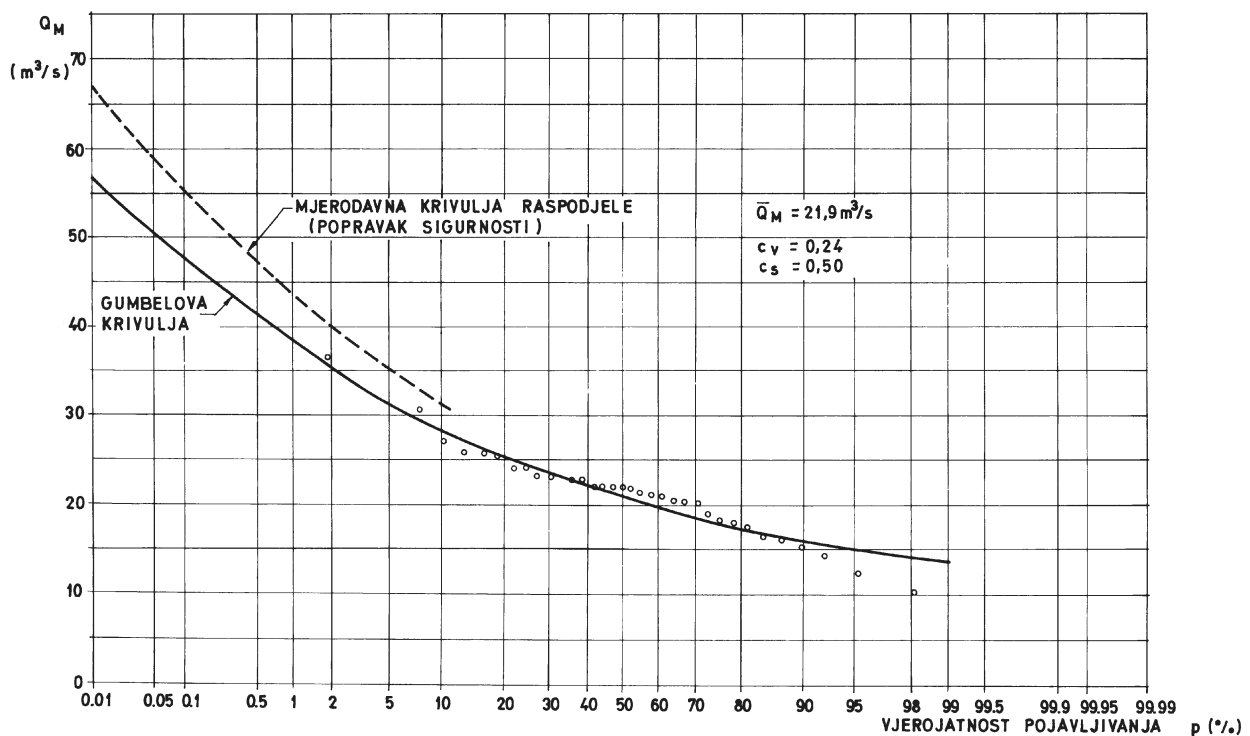
Kao primjer, daje se izračun maksimalnih godišnjih protoka Q'_{Mp} rijeke Bijeke u vodokaznome profilu Badljeva dan je u tablici 9.7, a mjerodavna krivulja raspodjele prikazana je na slici 9.6. Zbog vodokaznih podataka kojima nisu obuhvaćene najveće vrijednosti protoka (očitanja u određeno vrijeme), proveden je popravak vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka. Broj članova niza $n = 35$ (razdoblje od 1951. do 1985. godine), za koeficijent a je usvojeno $a = 2$, a E_p je za poznatu vrijednost koeficijenta varijacije $c_{vM} = 0,24$ očitavan za različita povratna razdoblja iz dijagrama na slici 9.5. (Krivulju $c_{vM} = 0,24$ jednostavno je interpolirati između krivulja $c_{vM} = 0,2$ i $c_{vM} = 0,3$, koje su prikazane na slici 9.5.)

Na osnovi vrijednosti Q_{Mp} nacrtana je mjerodavna krivulja raspodjele maksimalnih godišnjih protoka Bijele u profilu Badljevinu na slici 9.6.

Napominje se da se popravak sigurnosti ΔQ uvodi samo u slučaju kada nije veći od 20 posto protoka Q_{Mp} s krivulje raspodjele. Ukoliko je ΔQ veći od 20 posto Q_{Mp} , onda Q_{Mp} treba ponovo definirati.

Tablica 9.7 Izračun mjerodavnih vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka različitih povratnih razdoblja Bijele u profilu Badljevinu Q'_{Mp} na osnovi popravka sigurnosti

Povratno razdoblje p (god.)	Q_{Mp} (m ³ /s)	E_p	ΔQ (m ³ /s)	Q'_{Mp} (m ³ /s)
10	28,2	0,25	2,43	31,1
25	32,5	0,32	3,52	36,0
50	35,4	0,38	4,55	40,0
100	38,2	0,42	5,42	43,6
1000	47,6	0,45	7,24	54,8
10.000	56,9	0,50	9,62	66,5



Slika 9.6 Maksimalni godišnji protoci različitih povratnih razdoblja Bijele u profilu Badljevinu, određeni na osnovi popravka sigurnosti

9.4 Iskustvene (empirijske) formule

Iskustvena ili empirijska formula (za izračunavanje velikih voda) je formula koja izražava maksimum (najveću vrijednost) protoka kao funkcije veličine sliva i drugih čimbenika bitnih za otjecanje. Osim maksimalnih protoka – za koje je izvedeno najviše iskustvenih izraza – na taj se način može izračunavati i neke druge hidrološke parametre, primjerice: prosječni protok (na osnovi odnosa efektivne i bruto oborine) i pronos lebdećega (suspendiranog) nanosa. Iskustveni izrazi redovito se koriste za male, neizučene slivove (bez ili s premalo hidroloških podataka).

Mali sliv se u hidrološkome smislu ne smije određivati isključivo na temelju veličine površine, već se u obzir treba uzeti i druge osobine bitne za otjecanje vode. Bitno je svojstvo malih slivova da oborine koje su uzrokovale pojavljivanje velikih voda redovito padaju na cijeli sliv. Iako njihovi intenziteti nisu svugdje na slivu jednaki, ipak u otjecanju sudjeluje cijeli sliv. U slučajevima velikih slivova događa se da oborine jakih intenziteta, koje izazivaju pojave velikih voda, padnu samo na dio sliva, pa u otjecanju ne sudjeluje čitava slivna površina.

Koncentracija vode ovisi o obliku sliva, pa se zbog toga utjecaj oblika sliva opisuje **koeficijentom koncentriranosti sliva K** . Što je oblik sliva bliži krugu, to je koeficijent koncentriranosti sliva K bliži jedinici. Za sliv iste površine, a izdužena oblika, sa znatno manjim koeficijentom koncentriranosti, mogućnost da oborina pokrije cijeli sliv je manja. Slivovi s većim koeficijentom koncentriranosti mogu imati veću površinu nego izduženi slivovi, a da svejedno budu tretirani kao mali slivovi. Od različitih izraza za njegovu veličinu, ovdje je K definiran prema Srebrebovićevom izrazu (9.33.).

U ovome su poglavlju prikazane dvije od iskustvenih formula za izračun velikih voda, koje se kod nas najčešće koriste: **Srebrebovićeva formula** i **Metoda V. T. Chowa**.

Srebrebovićeva formula za male slivove

Srebrebovićeva formula je izvedena na temelju racionalne formule, a pri određivanju koeficijenta u formuli korišteni su podaci sa slivnoga područja Save. Zbog dobro određenih odnosa između karakterističnih parametara o kojima ovisi otjecanje velikih voda, vrlo je preporučljiva za praktičnu primjenu. Maksimalni protoci različitih povratnih razdoblja definirani su izrazom (D. Srebrebović, 1970.):

$$Q_{Mp} = 0,48 \frac{\alpha}{(\beta \omega)^{3/4}} A^{0,96} \psi_p S^{1/3} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (9.25)$$

A (km²) je veličina sliva, α je otjecajni koeficijent koji se za prosječne godišnje oborine $1000 < P < 2000$ mm može odrediti prema formuli:

$$\alpha = 0,80 [1 + 0,075(\log p - \beta)] \quad (9.26)$$

p (god.) je povratno razdoblje

β je faktor ovisan o propusnosti, pošumljenosti i sl., a njegove se vrijednosti kreću u granicama $\beta = 1 - 3$. Za slabo propusna i slabo obraštena tla, β je bliže jedinici, a za propusna i obraštena tla β teži prema vrijednosti 3.

Veličina ψ_p definirana je izrazom:

$$\psi_p = [P (1 + 1,5 \log p)]^{1,43} \quad (9.27)$$

gdje su P (m) je količina prosječnih godišnjih oborina, S (m/km) je nagib sliva određen izrazom:

$$S = \frac{2 \Delta H}{L} \quad (\text{m/km}) \quad (9.28)$$

ΔH je razlika između srednje nadmorske visine sliva H_0 koja se određuje iz hipsometrijske krivulje i kote protjecajnoga profila H :

$$\Delta H = H_0 - H \quad (\text{m}) \quad (9.29)$$

Hipsometrijska krivulja je krivulja koja pokazuje koji je dio područja riječnoga sliva smješten do razmatranoga riječnog profila. Najčešće se hipsometrijska krivulja konstruira radi određivanja sred-

nje nadmorske visine sliva do određenoga protjecajnog profila vodotoka. Srednja nadmorska visina sliva do nekoga profila vodotoka H_0 je:

$$H_0 = \frac{\sum H_i A_i}{A} \text{ (m n. m.)} \quad (9.30)$$

gdje je H_i (m n. m.) srednja nadmorska visina između dviju slojnica na slivu, A_i (km²) površina između dviju slojnica na slivu, a A (km²) veličina sliva.

L (km) je dulja stranica zamjenjujućega pravokutnika, čija je površina jednaka površini sliva:

$$L = \sqrt{\frac{A(2-K)}{K}} \text{ (km)} \quad (9.31)$$

Kraća stranica zamjenjujućega pravokutnika l je:

$$l = \sqrt{\frac{AK}{2-K}} \text{ (km)} \quad (9.32)$$

K je koeficijent koncentriranosti sliva definiran izrazom:

$$K = \frac{2A}{OU} \quad (9.33)$$

O (km) je opseg sliva, a U (km) je udaljenost težišta sliva od protjecajnog profila.

ω je veličina određena izrazom:

$$\omega = 1 + \frac{\tau_2}{\tau_1} \quad (9.34)$$

τ_1 je vrijeme površinskoga sabiranja:

$$\tau_1 = \frac{20 \beta}{[P(1 + 1,5 \log p)]^{0,57} S^{0,43}} \text{ (sati)} \quad (9.35)$$

τ_2 je vrijeme tečenja duž vodotoka:

$$\tau_2 = 2,6 \left(\frac{A}{S} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ (sati)} \quad (9.36)$$

Prema tome je vrijeme podizanja vodnoga vala τ :

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{20 \beta}{[P(1 + 1,5 \log p)]^{0,57} S^{0,43}} + 2,6 \left(\frac{A}{S} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ (sati)} \quad (9.37)$$

Metoda Ven Te Chowa

Za izračunavanje maksimalnih otjecanja vrlo je pogodna metoda Ven Te Chowa (The Chow Method) koja je objavljena šezdesetih godina prošloga stoljeća. (V. T. Chow, 1960., V. T. Chow i dr., 1964.). Glavna je značajka opisane metode da se ona može koristiti za izračune maksimalnih protoka s malih slivova u velikom rasponu nagiba slivova $S = 0,1 - 30 \%$.

Prema metodi Ven Te Chowa maksimalni su protoci različitih povratnih razdoblja:

$$Q_{Mp} = 16,67 A \cdot i_{ep} \cdot Y \cdot Z \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (9.38)$$

$$Q_{Mp} = 0,278 A \cdot i_{ep} Y \cdot Z \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (9.39)$$

gdje je 16,67 konstanta za preračunavanje, ako je mjerodavni intenzitet efektivne kiše p -toga povratnog razdoblja i_{ep} u (mm/min), a ukoliko je i_{ep} u (mm/sat) onda je konstanta za preračunavanje 0,278, A (km²) je veličina sliva do protjecajnoga profila, Y klimatski faktor (za područja kod kojih nisu bile provedene regionalne analize oborina obično se može usvojiti: $Y = 1,0$), a Z je faktor redukcije vrha hidrograma, za koji se može definirati odnos:

$$Z = f\left(\frac{t_k}{t_p}\right) \quad (9.40)$$

gdje je t_k (min) trajanje oborine, a t_p (min) vrijeme zakašnjenja (vrijeme od težišta hijetograma do maksimalnoga protoka (slika 6.2), odnosno vrijeme podizanja trenutnoga jediničnog hidrograma.

Intenzitet efektivne kiše različitih povratnih razdoblja i_{ep} definiran je izrazom:

$$i_{ep} = \frac{P_e}{t_k} \text{ (mm/min)} \quad (9.41)$$

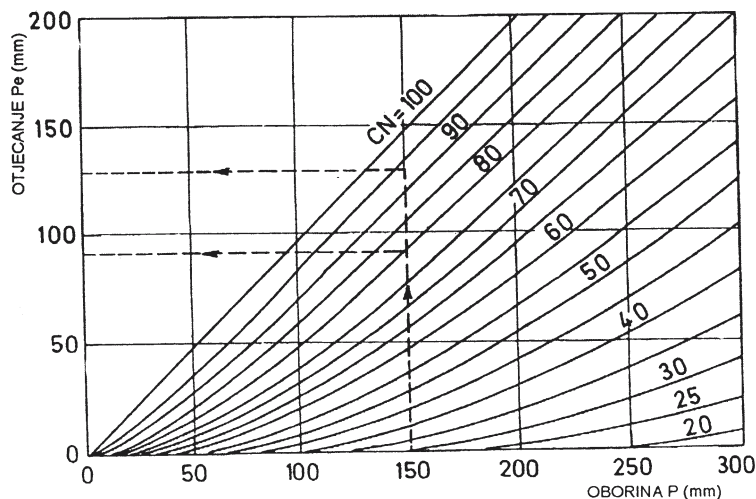
gdje je P_e (mm) efektivna kiša p -toga povratnog razdoblja, koja je otekla s razmatranoga sliva, a t_k (min) trajanje kiše.

Za određivanje efektivne kiše P_e vrlo je prikladan pristup korištenje SCS metode odnosno brojeva krivulja CN, kao što se preporuča u literaturi (V. T. Chow i dr., 1964., S. Jovanović, 1975.).

Prema tome kod primjene izraza (9.38) maksimalni godišnji protoci različitih povratnih razdoblja Q_{Mp} ovise o konstantnim veličinama: površini sliva A i klimatskom faktoru Y , a u nedostatku regionalne analize maksimalnih oborina, prema preporukama iz literature, može se prihvatiti $Y = 1,00$; te o promjenljivim veličinama: maksimalnim efektivnim kišnim intenzitetima različitih povratnih razdoblja i_{ep} i faktoru redukcije vršnoga protoka hidrograma Z .

Mjerodavni kišni intenzitet efektivne oborine i_{ep} , definiran izrazom (9.41), ovisi o nekoliko bitnih čimbenika i radi toga njegovo određivanje predstavlja posebno složen zadatak.

Efektivna oborina P_e (mm), koja podijeljena s trajanjem kiše t_k (min), daje intenzitet i_{ep} (mm/min), određuje se na temelju broja krivulja CN, koje su prikazane na slici 9.7. Za male slivove, s razmjerno



Slika 9.7 Odnos bruto P i efektivne oborine P_e prema SCS metodi

Tablica 9.8 Hidrološki tipovi tla prema U. S. Soil Conservation Service (1972.) (V. T. Chow i dr., 1964.)

Tip A	Mala mogućnost otjecanja i visoki stupanj infiltracije čak i kod potpuno vlažnoga tla. Pijesak, ilovasti pijesak, pjeskovita ilovača
Tip B	Umjeren stupanj infiltracije kad je tlo potpuno vlažno Praškasta ilovača i ilovača.
Tip C	Niski stupanj infiltracije, kad je tlo potpuno vlažno. Pjeskovito glinasta ilovača.
Tip D	Velika mogućnost otjecanja i vrlo niski stupanj infiltracije kad je tlo potpuno vlažno. Glinasta ilovača, prašasto glinovita ilovača, pjeskovita glina, praškasta glina i glina.

Tablica 9.9 Brojevi krivulja CN za različite hidrološke tipove tla (V. T. Chow i dr., 1964.)

Vegetacijski pokriv	Površinska obrada tla	Tip tla			
		A	B	C	D
Ugar	Ravni redovi	77	86	91	94
Okopavine	Ravni redovi	70	80	87	90
(kulture rijetka sklopa)	Obrada po izohipsama	67	77	83	87
	O. po izohipsama + terase	64	73	79	82
Žitarice (niske trave)	Ravni redovi	64	76	84	88
	Obrada po izohipsama	62	74	82	85
Leguminoze ili livade u plodoredu	O. po izohipsama + terase	60	71	79	82
	Ravni redovi	62	75	83	87
Pašnjaci	Obrada po izohipsama	60	72	81	84
	O. po izohipsama + terase	57	70	78	82
Livade Uzgajane šume, lugovi	Slabi	68	79	86	89
	Normalni	49	69	79	84
	Dobri	39	61	74	80
	O. po izohipsama, slabi	47	67	81	88
	O. po izohipsama, normalni	25	59	75	83
	O. po izohipsama, dobri	6	35	70	79
	Normalne	30	58	71	78
Salaši Putovi	Niske transpirac. sposob.	45	66	77	83
	Normalne transpirac. sposob.	36	60	73	79
	Visoka transpiracija	25	55	70	77
Šume koje nisu uzgajane-prirodne	Normalni	59	74	82	86
	Meka površina – blatnjavi	72	82	87	89
	Tvrda površina	74	84	90	92
	Vrlo niska transpiracija	56	75	86	91
	Niska transpiracija	46	68	78	84
Nepropusna površina	Normalna transpiracija	36	60	70	76
	Visoka transpiracija	26	52	62	69
	Vrlo visoka transpiracija	15	44	54	61
		100	100	100	100

kratkim vremenima koncentracije od pola do jednoga sata, veličina efektivne oborine može se, kod po svojim brojevima razmjerno bliskih brojeva krivulja CN, značajno razlikovati. Prema tome primjena V. T. Chowove metode vrlo je osjetljiva na CN krivulje, pa je određivanju njezina broja potrebno posvetiti naročitu pozornost. U odnosu na ostale veličine, koje ulaze u izračun, broj krivulje CN ima najveći utjecaj na veličinu maksimalnoga protoka Q_{Mp} .

Efektivna oborina P_{ep} definirana je u ovisnosti od bruto oborine P_p i broja krivulje CN, prema SCS metodi, sljedećim izrazom:

Tablica 9.10 Brojevi krivulja CN za različite uvjete vlažnosti zemljišta (V. T. Chow i dr., 1964.)

CN za uvjet II	CN za uvjete		CN za uvjet II	CN za uvjete	
	I	III		I	III
(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
100	100	100	58	38	76
			56	36	75
			54	34	73
98	94	99	52	32	71
96	89	99	50	31	70
94	85	98			
92	81	97	48	29	68
90	78	96	46	27	66
			44	25	64
88	75	95	42	24	62
86	72	94	40	22	60
84	68	93			
82	66	92	38	21	58
80	63	91	36	19	56
			34	18	54
78	60	90	32	16	52
76	58	89	30	15	50
74	55	88			
72	53	86	25	12	43
70	51	85	20	9	37
			15	6	30
68	48	84	10	4	22
66	46	82	5	2	13
64	44	81			
62	42	79	0	0	0
60	40	78			

$$P_e = \frac{\left[P - 0,2 \left(\frac{25400}{CN} - 254 \right) \right]^2}{P + 0,8 \left(\frac{25400}{CN} - 254 \right)} \quad (9.42)$$

U tablici 9.8 dani su hidrološki tipovi terena prema U. S Soil Conservation. Odabir odgovarajućega tipa terena, koji su u tablici 9.8 razvrstani u četiri grupe od A do D, je prvi korak za primjenu Ven Te Chowove metode.

Brojevi krivulja CN krivulja za različite pokrove terena, za tipove tla A, B, C i D dani su u tablici 9.9 za prosječne uvjete vlažnosti zemljišta (uvjeti vlažnosti zemljišta II).

Prema SCS metodi prethodna se vlažnost zemljišta određuje na temelju tri uvjeta: ispodprosječnih I, prosječnih II i natprosječnih III. Kod natprosječnih uvjeta III se podrazumijeva da je zemljište

praktički saturirano vodom. Za dimenzioniranje evakuacijskih organa velikih brana, zbog veće sigurnosti, preporuča se koristiti uvjet vlažnosti III. U tablici 9.10 su dani brojevi CN krivulja za uvjete vlažnosti I, II i III.

U Ven Te Chowoj formuli za maksimalni protok hidrograma Q_{Mp} (9.38), odnosno (9.39), značajnu ulogu ima faktor redukcije vrha hidrograma Z , čija veličina, prema izrazu (9.40), ovisi o omjeru trajanja oborine t_k i vremena zakašnjenja sliva t_p . Za vrijeme zakašnjenja sliva t_p može se usvojiti iskustveni izraz:

$$t_p = C \left(\frac{LU}{\sqrt{S}} \right)^{0,38} \quad (\text{sati}) \quad (9.43)$$

gdje je C koeficijent čija vrijednost ovisi o veličini i značajkama sliva (brdski, ravničarski), L (km) duljina sliva (udaljenost od protjecajnoga profila do razvodnice mjereno po glavnome vodotoku), U (km) je udaljenost od protjecajnoga profila do težišta sliva i S (%) je ujednačeni nagib vodotoka:

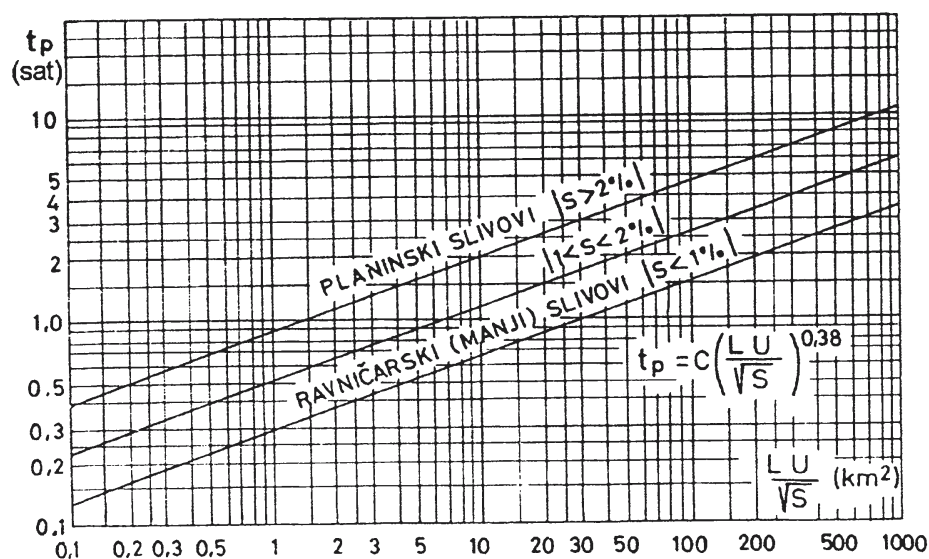
$$S = \frac{\Delta H}{L} \quad (9.44)$$

gdje je ΔH razlika između kote točke na razvodnici od koje počinje glavni vodotok pa do kote protjecajnoga profila, a L je duljina glavnoga vodotoka.

Ako se usvoji $C = 0,49$ onda ova vrijednost ima određeno uporište u stručnoj literaturi (S. Jovanović, 1975.). Pritom se napominje da parametar C definira familiju krivulja:

$$t_p = f \left(\frac{LU}{\sqrt{S}} \right) \quad (9.45)$$

i nije dosljedno (egzaktno) određen, što predstavlja nedostatak ove metode. Prema dijagramu anvelopnih vrijednosti iz (S. Jovanović, 1975.), za brdske slivove, za usvojeno $C = 0,49$ i za veličinu u zagradi u izrazu (9.45): $\frac{LU}{\sqrt{S}} = 10$, odgovaralo bi vrijeme zakašnjenja $t_p = 1,18$ sati, što se može prihvatiti, ako sliv nije vrlo malen. Vrijeme zakašnjenja t_p u ovisnosti od $\frac{LU}{\sqrt{S}}$, za različite nagibe slivova prikazano je na slici 9.8.



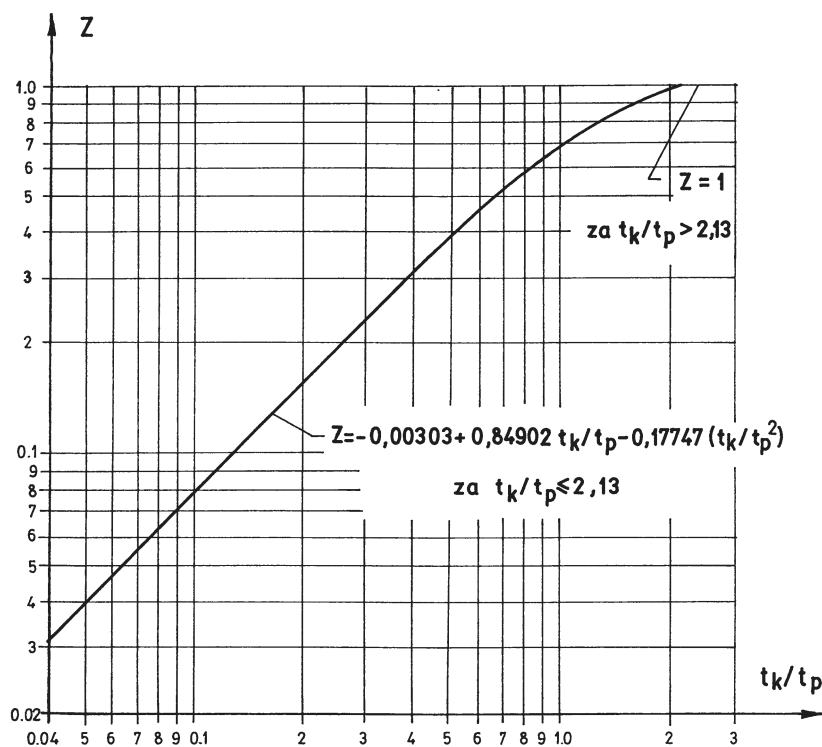
Slika 9.8 Vrijeme zakašnjenja t_p u ovisnosti od veličine $\frac{LU}{\sqrt{S}}$ (S. Jovanović, 1975.)

Odnos $Z = f\left(\frac{t_k}{t_p}\right)$ prema izvornoj formuli V. T. Chowa (1960.) je:

$$Z = -0,00303 + 0,84902 \frac{t_k}{t_p} - 0,17747 \left(\frac{t_k}{t_p}\right)^2 \quad (9.46)$$

i prikazan je na slici 9.9.

Važno je napomenuti da formula (9.46) vrijedi do $\frac{t_k}{t_p} = 2,13$, a za $\frac{t_k}{t_p} > 2,13$ usvaja se $Z = 1,0$.



Slika 9.9 Određivanje faktora redukcije vrha hidrograma Z (O. Bonacci, S. Roglić, 1985.)

Realnost ovako definiranoga otjecanja velikih voda preporučljivo je provjeriti na osnovi veličine otjecajnoga koeficijenta c .

Nakon izračuna efektivne oborine P_{ep} koja se, prema primijenjenoj SCS metodi, dobije na osnovi bruto oborine P_p , a uz broj krivulje CN pretpostavljene na temelju hidroloških uvjeta otjecanja (A, B, C ili D) i uvjeta prethodne vlažnosti zemljišta (I, II ili III), vrlo je važan pokazatelj koeficijent otjecanja c . Koeficijent otjecanja c je definiran odnosom efektivne i bruto oborine (5.1):

$$c = \frac{P_e}{P}$$

a njegova se veličina kod otjecanja velikih voda može provjeriti na osnovi sljedećega izraza

$$c = 1 - \sum_{i=1}^3 c'_i \quad (9.47)$$

gdje je veličina c' za različite tipove područja dana u tablici 9.11.

Za urbanizirana područja preporučaju se vrijednosti otjecajnih koeficijenata velikih voda c dane u tablici 9.12.

Tablica 9.11 Veličine c' za različite tipove područja (S. Jovanović, 1975.)

<i>Topografija:</i>	c'
Ravno zemljište (prosječni nagib 0,02 – 0,06%)	0,30
Brežuljkasto (od 0,3 do 0,4%)	0,20
Brdoviti teren (od 3,0 do 5,0%)	0,10
<i>Zemljište:</i>	
Zbijena, vrlo nepropusna glina	0,10
Srednje (kombinacija gline i ilovače)	0,20
Pjeskovita ilovača	0,40
<i>Biljni pokrov:</i>	
Slab ili golet	0,10
Obradivo zemljište	0,15
Šuma	0,20

Tablica 9.12 Otjecajni koeficijenti c za gradska područja (S. Jovanović, 1975.)

Opis područja	Otjecajni koeficijent c
Ravno, s izoliranim kućama, s oko 30% nepropusne površine	0,40
Blago nagnuto, s izoliranim kućama, s oko 50% vodonepropusne površine	0,65
Blago nagnuto, gusto izgrađene zgrade, s oko 70% vodonepropusne površine	0,80

Veličine c' iz tablice 9.11 i veličine otjecajnih koeficijenata c iz tablice 9.12 dobra su orijentacija za definiranje tih veličina i provjeru realnosti izračunatih velikih voda.

Iskustvene su formule izvedene za različita slivna područja, čije se značajke otjecanja velikih voda međusobno značajno razlikuju. To je osnovni razlog postojanja velikih razlika u veličinama maksimalnih protoka definiranih na osnovi različitih iskustvenih formula. Zbog toga se javljaju i stavovi da ih uopće ne treba rabiti (F. Bidovec, 1971.), a prevladava mišljenje da iskustvene formule treba oprezno koristiti. Prvenstveno je preporučljivo rabiti formule izvedene za regiju u kojoj se nalazi sliv ili formule izvedene za regije s vrlo sličnim glavnim značajkama otjecanja velikih voda. Maksimalni se protok može izračunati prema nekoliko različitih iskustvenih formula, pa se onda kao mjerodavna usvaja prosječna vrijednost \bar{Q}_M . Razmatranje o izboru mjerodavnoga protoka na stvarnom primjeru opisao je u poglavlju 9.6.

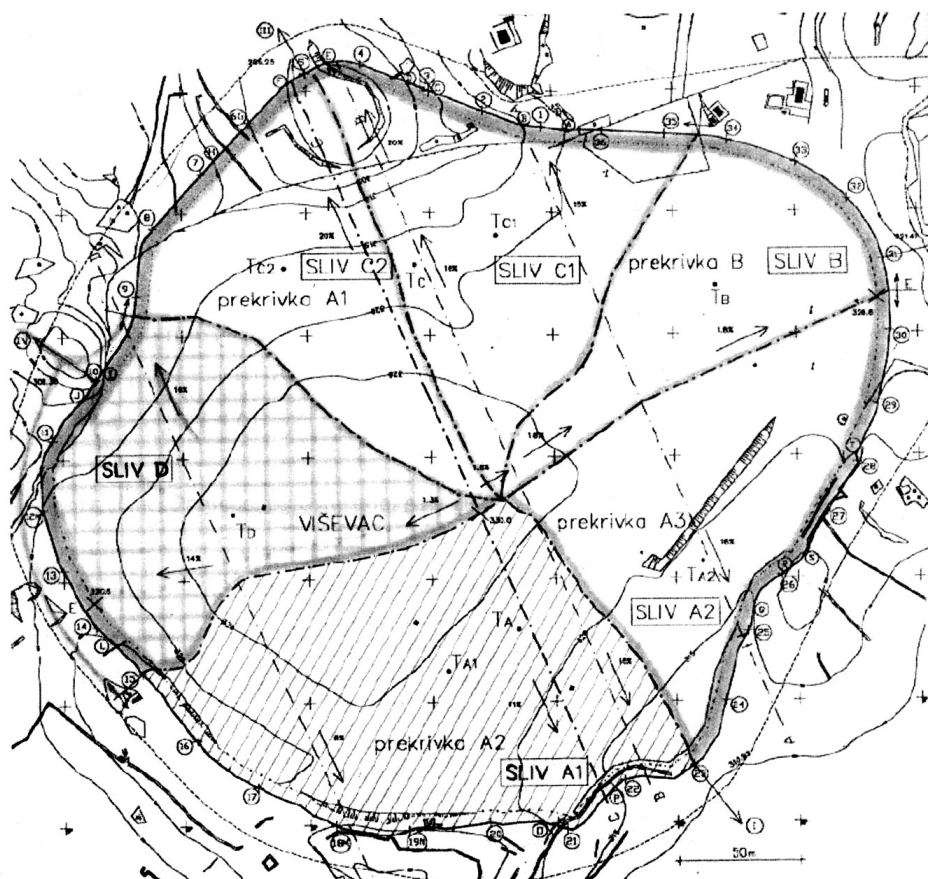
9.5 Hidrogrami velikih vodnih valova

Hidrogram velikoga vodnog vala može se iskustvenim načinom odrediti različitim pristupima. Ovdje se opisuje teorijski pristup njegova konstruiranja prema **R. D. Goodrichu**.

Osnovni elementi za konstrukciju hidrograma izoliranoga velikog vodnog vala koje daje metoda R. D. Goodricha su: efektivna oborina P_e – koja pomnožena s površinom sliva A daje volumen izravnoga otjecanja V – maksimalni protok Q_M i vrijeme zakašnjenja t_p . Pritom je vrijeme podizanja hidrograma T_p :

$$T_p = 0,5t_k + t_p \quad (9.48)$$

gdje je t_k trajanje kiše.



Slika 9.11. Situacija prekrivke površine odlagališta komunalnoga otpada Viševac sa slivovima

Vrijeme opadanja (recesije) hidrograma T_r je:

$$T_r = 3T_p \quad (9.49)$$

pa je, prema tome trajanje hidrograma (vremenska baza) T_b :

$$T_b = T_p + T_r = T_p + 3T_p = 4T_p \quad (9.50)$$

Hidrogram vodnoga vala konstruira se na sljedeći način:

$$y = 10 \frac{\lambda(1-x)^2}{x} \quad (9.51)$$

Pritom je veličina x definirana odnosom:

$$x = \frac{t}{T_p} \quad (9.52)$$

gdje je t vrijeme koje se zadaje za crtanje hidrograma.

$$\lambda = \frac{Q_M T_p}{V} \quad (9.53)$$

Protok (ordinata hidrograma) u vremenu t je:

$$Q(t) = y(t) Q_M \quad (9.54)$$

Za ilustraciju opisanih postupaka V. T. Chowa (pogl. 9.3) i R. D. Goodricha odabran je sliv na travom prekrivenom odlagalištu otpada Viševac u Rijeci. Situacija odlagališta otpada Viševac prikazana je na slici 9.11, a s njegove zatravljene kupole u odvodne kanale voda otječe sa četiri sliva (prema projektu odvodnje iz 2001. god.).

Treba odrediti hidrogram velikoga vodnoga vala 20-godišnjega povratnog razdoblja u najnižvodnijoj točki sliva D – od koje voda otječe izvan područja odlagališta – za maksimalni 20-godišnji protok.

Maksimalni protok 20-godišnjega povratnog razdoblja definirat će se prema metodi V. T. Chowa, a hidrogram odgovarajućega velikog vodnog vala prema Goodrichu.

Osnovni izračunski elementi su:

Veličina sliva:	$A = 0,017 \text{ km}^2$
Duljina sliva:	$L = 156 \text{ m}$
Udaljenost težišta sliva od protjecajnoga profila:	$U = 80 \text{ m}$
Opseg sliva:	$O = 520 \text{ m}$
Visinska razlika (od najviše točke do protjecajnoga profila):	$\Delta H = 13,55 \text{ m}$

Mjerodavna klimatska funkcija za Rijeku (J. Rubinić, 1988.):

$$P_{20} = 76,21 t^{0,611} P \text{ (mm); } t \text{ (sati)} \quad (9.55)$$

Prema izrazu (9.38) je:

$$Q_{M20} = 16,67 A i_{e20} Y Z$$

Izračun se provodi redosljedom parametara u V. T. Chowoj formuli (9.38).

Mjerodavna 20-godišnja oborina za maksimalni protok se računa za trajanje oborine jednako vremenu koncentracije T_c .

Za male slivove kod kojih je $L < 365 \text{ m}$ može se rabiti Kerby-Hathawayeva formula:

$$T_c = 1,44 (L r S^{-0,5})^{0,467} \text{ (min)} \quad (9.56)$$

gdje je L (m) duljina vodotoka (u ovom se slučaju radi o zatravljenoj, nagnutoj podlozi, bez izražena vodotoka), $r = 0,13$ koeficijent zakašnjenja uslijed hrapavosti (određen na osnovi podataka iz tablice 9.13), a S je nagib terena.

Tablica 9.13 Koeficijent zakašnjenja zbog hrapavosti r u ovisnosti o vrsti podloge (D. A. Chin, 2000.)

Površina	r
glatki pločnik	0,02
glatko golo tlo bez kamenja	0,10
slaba trava	0,30
pašnjak	0,40
rijetko drveće	0,60
drveće, gusta trava	0,80

Za nagib terena kod razmatranoga sliva usvojen je ujednačeni nagib sliva prema izrazu (9.57):

$$S = \frac{\Delta H}{L} = \frac{13,55}{156} = 0,087 = 8,7\% \quad (9.57)$$

Prema tome vrijeme koncentracije prema izrazu (9.56) je:

$$T_c = 1,44 (156 \cdot 0,13 \cdot 0,087^{0,5})^{0,467} = 10,3 \text{ min} = 0,172 \text{ sata}$$

Ovdje je važno napomenuti da Herheulidzeov izraz za T_c (6.8), koji se često preporuča u literaturi, nije pogodan za ovako male slivove. Taj je izraz ovisan samo o veličini sliva A i glasi:

$$T_c = 0,268 A^{0,612} \quad A \text{ (km}^2\text{); } T_c \text{ (sati)}$$

Za razmatrani slučaj je prema izrazu (6.8):

$$T_c = 0,268 \cdot 0,017^{0,612} = 0,0221 \text{ sati} = 1,3 \text{ min}$$

Ovako određeno vrijeme koncentracije za razmatrani sliv je sasvim sigurno prekratko. Izrazom (6.8) osrednjene su vrijednosti vremena koncentracije za slivove u vrlo velikom rasponu – od 0,008 km² do 3 000 000 km². Najveća relativna odstupanja izvedene zakonitosti veze $T_c = f(A)$ su kod malih slivova – veličina ispod 1,0 km² (slika 6.5).

Mjerodavna 20-godišnja oborina je:

$$P_{20} = 76,21 \cdot 0,172^{0,611} = 25,9 \text{ mm}$$

Za izračun efektivne oborine je, na osnovi tablice 9.8 usvojen tip tla D, a na osnovi tablice 9.9 vrijednost za prosječne uvjete otjecanja (II uvjet) za nisku travu u ravnim redovima CN = 88. Kod natprosječnih uvjeta otjecanja (III uvjet) za CN = 88 je, prema tablici 9.10, mjerodavna krivulja CN = 95.

Efektivna je oborina prema izrazu (9.42.):

$$P_{e20} = \frac{\left[25,9 - 0,2 \left(\frac{25400}{95} - 254 \right) \right]^2}{25,9 + 0,8 \left(\frac{25400}{95} - 254 \right)} = 14,0 \text{ mm}$$

Odgovarajući otjecajni koeficijent je:

$$c_{20} = \frac{14,0}{25,9} = 0,54$$

Za klimatski faktor Y usvojeno je: $Y = 1,0$.

Ukoliko se, prema preporukama iz literature usvoji $C = 0,49$ onda je vrijeme zakašnjenja t_p prema izrazu (9.43):

$$t_p = 0,49 \left(\frac{0,156 \cdot 0,080}{\sqrt{8,7}} \right)^{0,38} = 0,0614 \text{ sati} = 3,7 \text{ min}$$

Trajanje kiše t_k je jednako vremenu koncentracije T_c pa je odnos:

$$\frac{t_k}{t_p} = \frac{T_c}{t_p} = \frac{10,3}{3,7} = 2,78 > 2,13$$

pa je prema tome faktor redukcije vršnoga dijela hidrograma: $Z = 1,0$

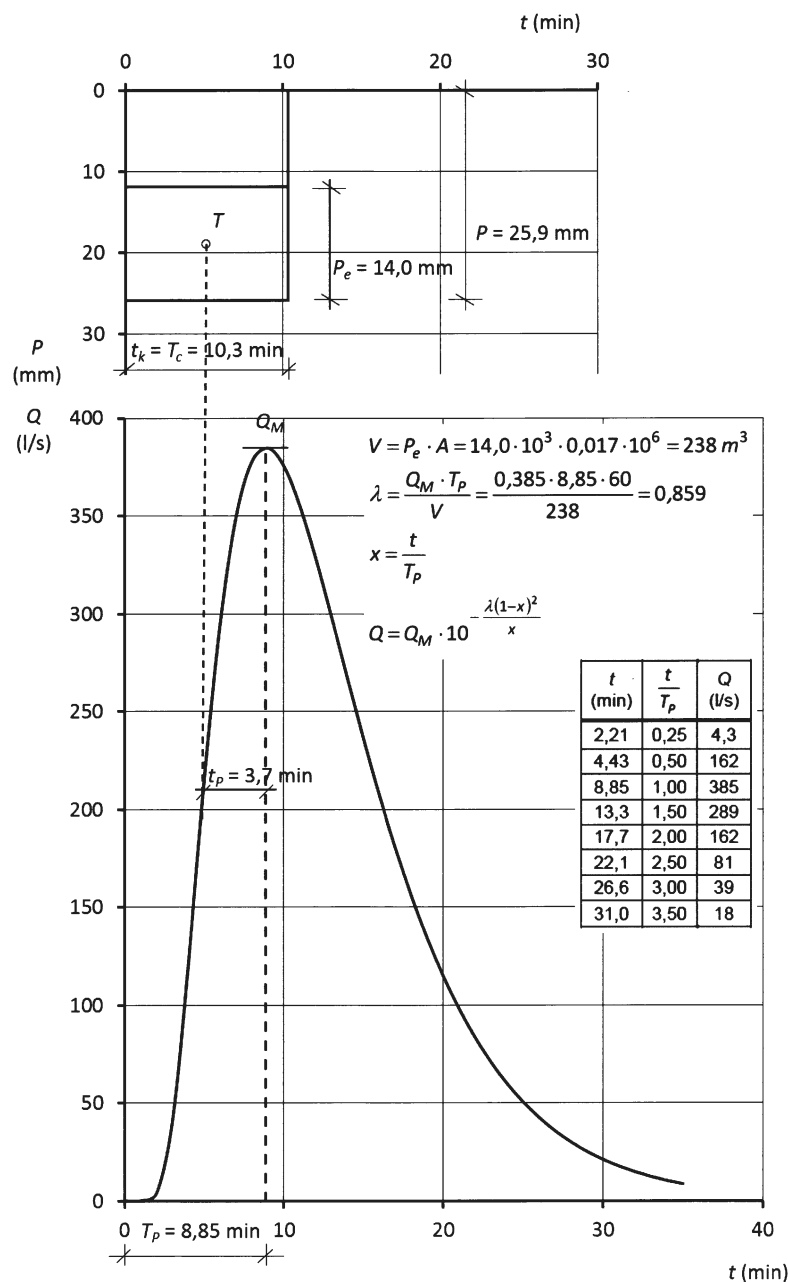
Intenzitet efektivne oborine je:

$$i_{e20} = \frac{P_e}{T_c} = \frac{14,0}{10,3} = 1,36 \text{ mm/min}$$

Maksimalni 20-godišnji protok je:

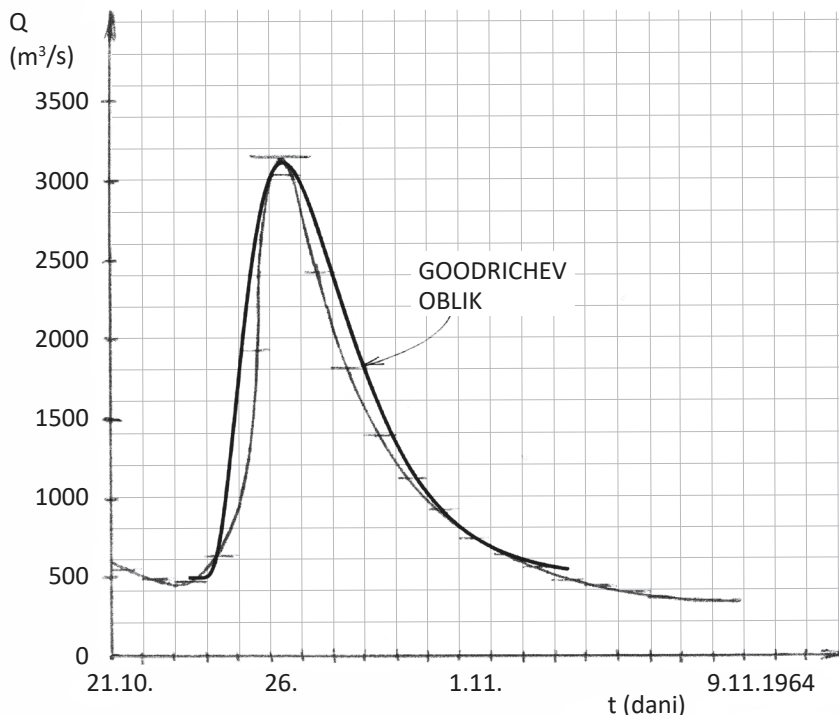
$$Q_{M20} = 16,67 A i_{e20} YZ = 16,67 \cdot 0,017 \cdot 1,36 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,385 \text{ m}^3/\text{s} = 385 \text{ l/s}$$

Konstrukcija 20-godišnjega velikog vodnog vala prema Goodrichu prema izrazima (9.48) – (9.56), za ovako određeni maksimalni protok i ostalim veličinama u nastavku teksta, prikazana je na slici 9.12.



Slika 9.12 Hidrogram 20-godišnjega velikog vodnog vala prema Goodrichu za maksimalnu kišu trajanja jednakoga vremenu koncentracije – primjer sliva D na odlagalištu komunalnoga otpada Viševac (R. Žugaj, 2006.)

Na slici 9.13 je prikazan veliki vodni val Save u profilu Zagreb, konstruiran na osnovi srednjih dnevnih protoka zabilježenih u listopadu 1964. godine za vrijeme poplave grada Zagreba, koji je, prema svojem potoku i volumenu, bio 100-godišnjega reda pojavljivanja. Podizanje vodnoga vala počelo je 23. listopada, za četiri dana, 26. listopada, postignut je maksimalni protok $Q_M = 3126 \text{ m}^3/\text{s}$, a opadanje vodnoga vala trajalo je dva tjedna. Na slici 9.13 također je prikazana aprosimacija – toga 100-godišnjega vodnoga vala – provedena na osnovi Goodricheva oblika. Oblici stvarnoga (zabilježenog) i Goodrichevog (iskustvenog) hidrograma vrlo su slični. Na toj se osnovi može zaključiti da je Goodrichev oblik hidrograma moguće rabiti i za velike slivove (površina sliva Save do profila Zagreb je $A = 12.450 \text{ km}^2$).



Slika 9.13 100-godišnji veliki vodni val Save u profilu Zagreb
– na osnovi srednjih dnevnih protoka i prema Goodrichevom teorijskom obliku

9.6 Ocjenjivanje realnosti primjene iskustvenih formula

Iskustvene formule pouzdane su prvenstveno za područja za koja su izvedene. Srebrenovićeva formula izvedena je za male slivove unutar sliva Save, a može se koristiti i na drugim malim slivovima u Hrvatskoj.

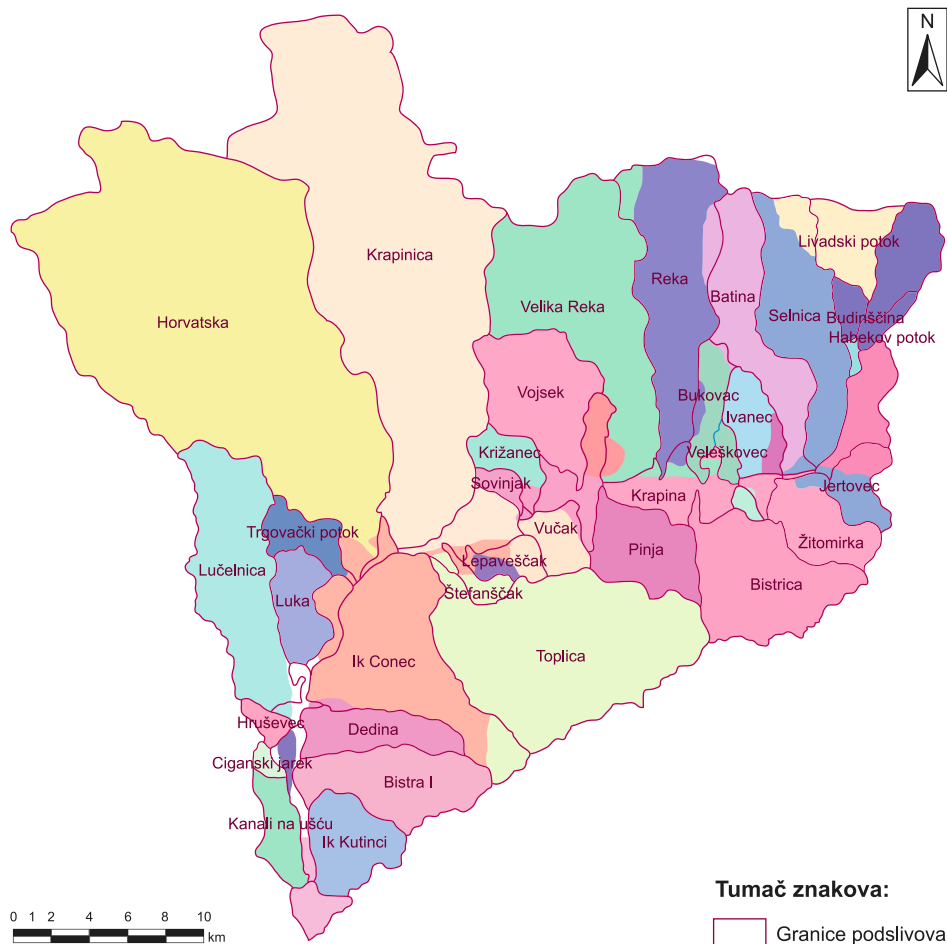
Formula V. T. Chowa, pak, ima vrlo široku primjenu u svijetu i kod nas. Međutim, potrebno je vrlo pažljivo definirati parametre, o kojima ovisi otjecanje.

Na stvarnim primjerima pokazat će se:

1. osjetljivost metode V. T. Chowa na izbor broja CN krivulje
2. da je opravdano koristiti iskustvene formule i u slučajevima kada postoje hidrološka mjerenja na slivu, ali protočne krivulje u području velikih voda nisu ispravno definirane

Ad 1) U svojem znanstvenom radu iz 2011. godine I. Ivanković je na slivu rijeke Krapine, do profila Kupljenovo, čija je veličina $A = 1235 \text{ km}^2$ definirala vrijednosti brojeva krivulja CN za čak 35 podslivova. Situacija sliva rijeke Krapine prikazana je na slici 9.14.

Na slici 9.15 prikazani su modelirani i izmjereni hidrogrami velikog vodnog vala rijeke Krapine u profilu Kupljenovo za kišni događaj iz siječnja 2001. godine, pri čemu je za modeliranje korišten HEC-HMS. Same analize, kojima je cilj bio utvrditi odgovarajuće brojeve krivulja CN za sliv Krapine, provedene su tako da je otjecanje modelirano za sva tri stanja vlažnosti, kako ih opisuje Ven Te Chow (CN za uvjete vlažnosti I, II i III). Usporedbom izmjenjenoga hidrograma s modeliranim, utvrđeno je stanje vlažnosti pri kojem su slaganja najbolja, te je za to stanje provedeno dodatno optimiziranje hidrograma.

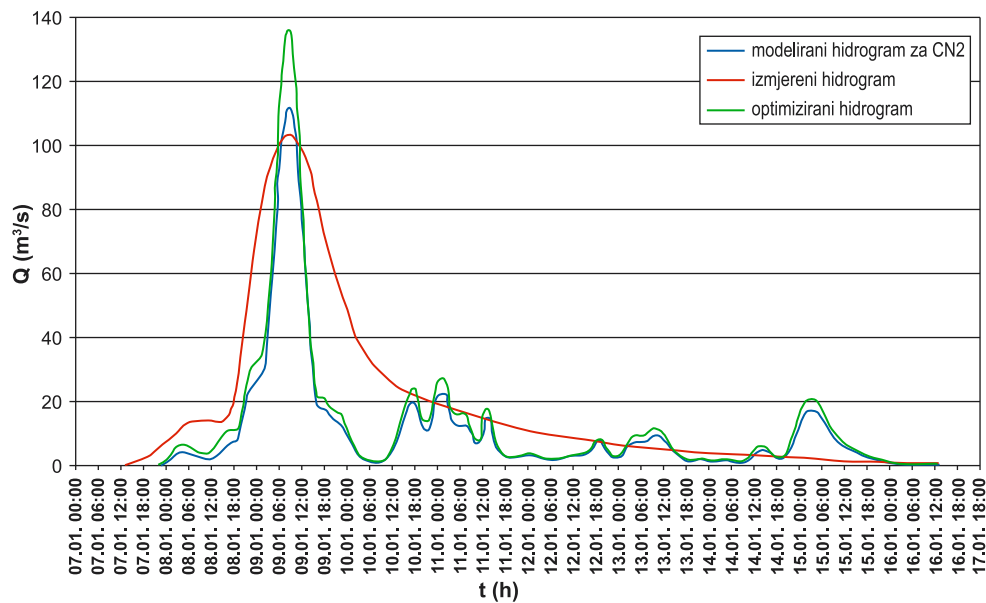


Slika 9.14 Definirani podslivovi na slivu rijeke Krapine do profila Kupljenovo (I. Ivanković, 2011.)

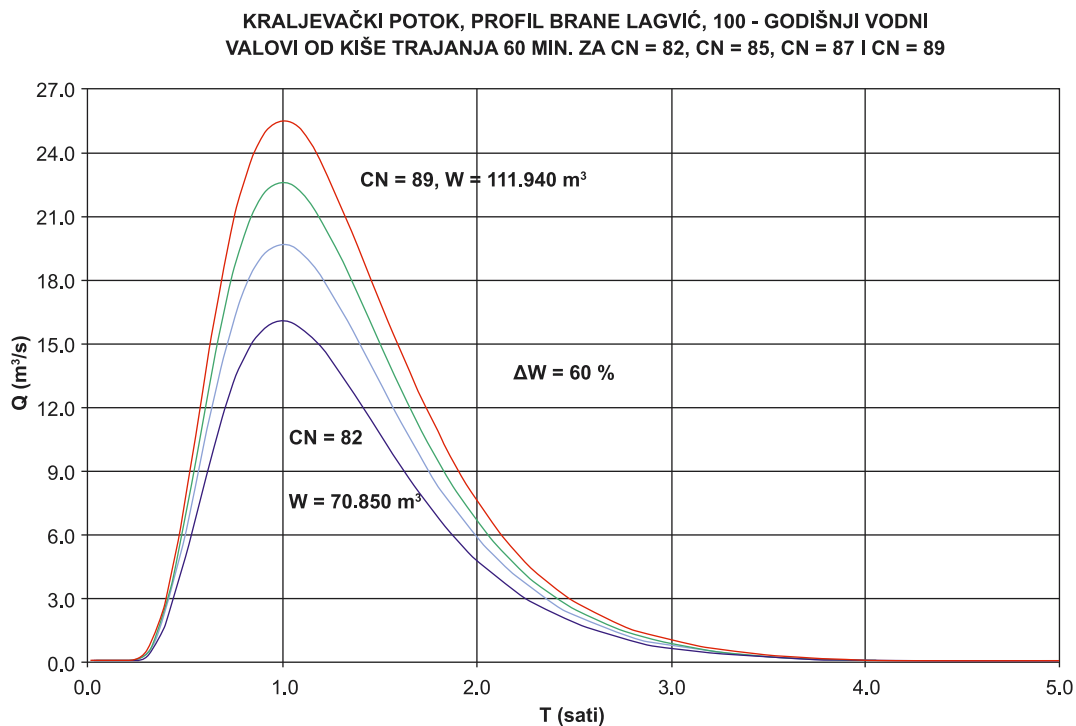
Ovaj primjer pokazuje složenost primjene formule V. T. Chowa u našim prilikama, gdje su potrebne vrlo složene analize da bi se došlo do rezultata bliskoga realnosti.

Ad 2) Na potocima Medvednice postoji znatan broj limnigrafa, dugi nizovi motrenja i mjerenja hidroloških veličina, ali praktički nema mjerenja za vrijeme pojavljivanja velikih voda. Iznimka je vodomjerenje Hidroinga, Zagreb na potoku Čnomerec za vrijeme velike vode 3. i 4. srpnja 1989. U ranijim studijama i obradama (od polovice pa do osamdesetih godina 20. stoljeća), nakon provedenih opsežnih analiza, jasno je zaključeno da se velike vode ne mogu realno odrediti na osnovi podataka s hidroloških profila i od takvoga se pristupa odustalo, nego ih se mora definirati posrednim načinom.

Nakon primjena različitih iskustvenih pristupa, preporučena je i korištena metoda, odnosno formula V. T. Chowa. Ova se metoda može primijeniti u različitim slučajevima, ali je, kako je već rečeno, pogotovo kod vrlo malih slivova, izrazito osjetljiva na odabranu veličinu broja krivulje CN.



Slika 9.15 Usporedba modeliranoga i optimiziranog hidrograma sa stvarnim hidrogramom velikoga vodnog vala rijeke Krapine u profilu Kupljenovo (I. Ivanković, 2011.)



Slika 9.16. Kraljevački potok, profil brane Lagvić: 100-godišnji vodni valovi od kiše trajanja 60 minuta za različite vrijednosti brojeva krivulja CN

Naime i male razlike u broju krivulje CN mogu dati velike razlike u veličinama maksimalnih protoka i u hidrogramima velikih vodnih valova – kako je na primjeru 100-godišnje velike vode Kraljevačkog potoka u profilu nasute brane Lagvić – prikazano na slici 9.16.

S druge strane izbor mjerodavnoga broja krivulje CN podložan je subjektivnosti obrađivača. Zbog toga je bilo provedeno uspoređivanje rezultata izračuna 100-godišnjih maksimalnih protoka i odgovarajućih volumena velikih vodnih valova prema različitim obradama i prema različitim iskustvenim pristupima, a pregled rezultata je u tablici 9.14.

Na osnovi međusobne usporedbe veličina 100-godišnjih maksimalnih protoka i volumena njihovih vodnih valova u tablici 9.14, može se zaključiti da su najprihvatljiviji protok i volumen hidrograma vodnoga vala: $Q_{max100} = 25,5 \text{ m}^3/\text{s}$ i $W_{100} = 237.800 \text{ m}^3$. Prema tome, kod složenih slučajeva, preporuča se provesti definiranje velike vode na više različitih načina i onda, uz odgovarajuće obrazloženje usvojiti mjerodavnu.

U tablici 9.14 osim rezultata prema metodi V. T. Chowa i formuli D. Srebrenovića, koje su ovdje opisane (pog. 9.3). Metoda jediničnoga hidrograma i ostalih pet iskustvenih izraza, opisani su u literaturi (R. Žugaj, 2015.).

Razmatranja u radovima Ivanković (2011.) i Žugaj i sur. (2019.) su pokazala da se mali slivovi, kao što su podslivovi na slivu rijeke Krapine, zbog nepouzdanosti protočnih krivulja u području velikih voda ne smiju tretirati regionalno. Jednaki zaključak vrijedi i za potoke Zagrebačke Medvednice, gdje postoji samo jedno mjerenje velikih voda.

Naime, kada nema ili ima premalo mjerenja protoka kod pojavljivanja velikih voda, ekstrapolacije protočnih krivulja su nepouzdana i redovito ne daju realne rezultate. Zbog toga je jedino opravdano na takvim područjima, velike vode definirati na osnovi iskustvenih formula.

Tablica 9.14 Kraljevečki potok, profil brane Lagvić: pregled veličina 100-godišnjih velikih voda prema različitim pristupima (Hidroinženjering, 2004)

Metoda (formula)	Q_{max100} (m^3/s)	q_{max100} ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$)	W_{100} (m^3)	Napomena
V.T.Chow	20,8	4,91	173.000	Prema Glavnom projektu, CN = 87
V.T.Chow	16,1	3,80	70.850	Prema IDVOGZ-u; $t_k = 1$ sat; CN = 82
V.T.Chow	(12,3)	(2,90)	177.740	Prema IDVOGZ-u; $t_k = 4$ sata; CN = 82
V.T.Chow	25,5	6,01	111.940	$t_k = 1$ sat; CN = 89
V.T.Chow	(16,5)	(3,89)	237.800	$t_k = 4$ sata; CN = 89
Jedin.hidrogr.	25,5	6,01	400.000	Prema VOGZ-u; $t_k = 24$ sata
D.Srebrenović	34,4	8,11	358.050	$\tau = 2,78$ sati; $\beta = 2,0$; $P = 1200$ mm
Racional.for.	31,2	7,37		$T_c = 1$ sat; $c = 0,52$
Četiri koef.	26,1	6,16		
Müller	41,9	9,88		
Espey-Altman	23,8	5,61	173.000	$T_c = 46,2$ min
Gian.-Vissen.	41,4	9,76		$T_c = 1,06$ sati

Napomena: U tablici 1 kratica IDVOGZ znači: Izmjene i dopune vodoprivedne osnove Grada Zagreba, a kratica VOGZ je Vodoprivedna osnova Grada Zagreba; t_k (sati) je trajanje kiše; τ (sati) je vrijeme podizanja vodnoga vala; β je faktor površinskoga otjecanja; P (mm) je prosječna godišnja količina oborine; T_c (min) je vrijeme koncentracije i c je otjecajni koeficijent.

10 MALE VODE I MALOVODNA RAZDOBLJA

Prema Međunarodnome hidrološkom rječniku (UNESCO/WMO, 1992.), **mala voda** može se definirati na dva načina:

1. kao *stanje oseke, kada je razina vode najniža za bilo koji plimni ciklus*
2. kao *najniža razina (protok) dostignuta u vodotoku ili jezeru.*

Izračunavanje vjerojatnosti pojavljivanja malih voda na osnovi metoda matematičke statistike provodi se na isti način kao i izračunavanje velikih voda različitih povratnih razdoblja – samo se veličine malih voda smanjuju s produljenjem povratnoga razdoblja (slika 10.2).

Najčešće se minimalni godišnji protoci različitih povratnih razdoblja računaju na temelju nizova minimalnih godišnjih protoka. Ukoliko nizovi zadovoljavaju kriterije za statističku obradu, koji su opisani u poglavlju 2. moguće je definirati minimalne godišnje protoke različitih povratnih razdoblja prema krivuljama raspodjela. Za određivanje logaritamsko-normalne raspodjele mogu se koristiti vrijednosti iz donjega dijela tablice 9.1, za određivanje raspodjele Pearson 3 vrijednosti iz tablice 9.3, a za određivanje Gumbelove raspodjele vrijednosti iz tablice 9.5. Mjerodavnu se raspodjelu određuje na isti način kao i za velike vode, pri čemu se može primijeniti test A. N. Kolmogorova (tablica 9.6).

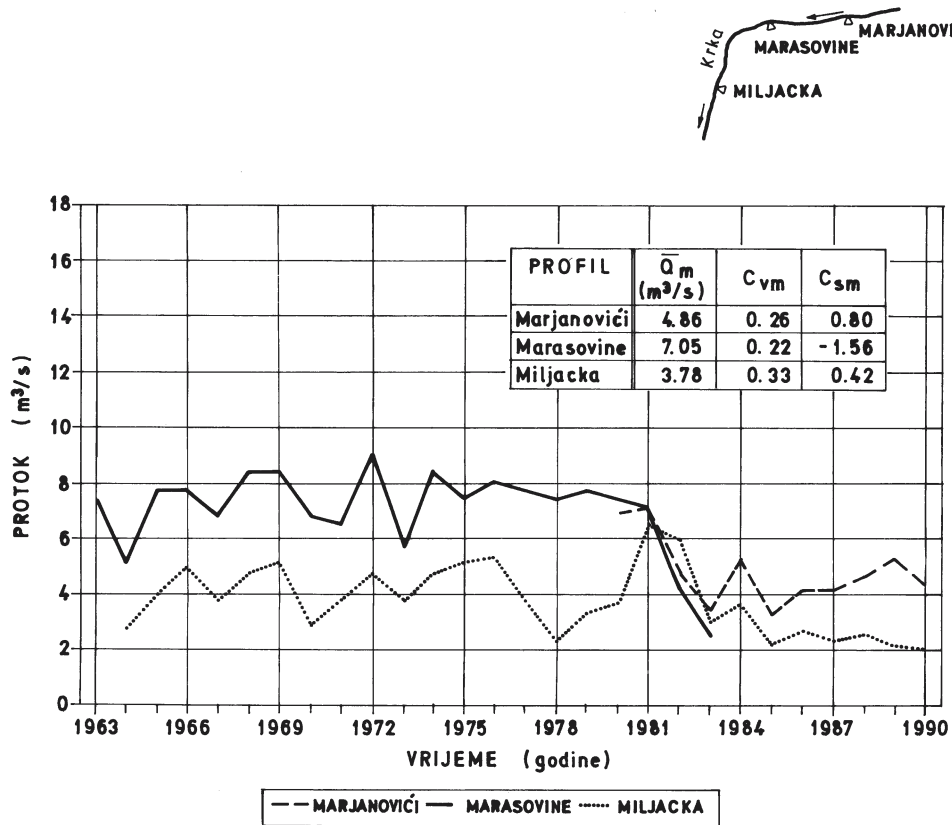
U analizi nizova minimalnih godišnjih protoka naročito je važna njihova duljina i kakvoća članova niza. Općenito se smatra da je kod nizova minimalnih godišnjih protoka za izračun koeficijenta varijacije c_{vm} dovoljno već 12 – 15 godina neprekinutih motrenja i mjerenja. Da bi definiranje koeficijenta asimetrije c_{sm} bilo dovoljno pouzdano, potrebno je barem 70 godina neprekidnih hidroloških motrenja i mjerenja, a nizovi takvih duljina su vrlo rijetki.

Na slici 10.1 prikazani su minimalni godišnji protoci triju hidroloških profila na Krki: Marjanovići, Marasovine i Miljacka. Profil Marjanovići se nalazi najuzvodnije, Marasovine (koji je 1983. ukinut) u sredini, a Miljacka nizvodno na Krki. Između profila Marasovine i Miljacka smještena je hidroelektrana Miljacka (ranije HE Manojlovac), čiji rad ima utjecaj na smanjivanje protoka u profilu Miljacka.

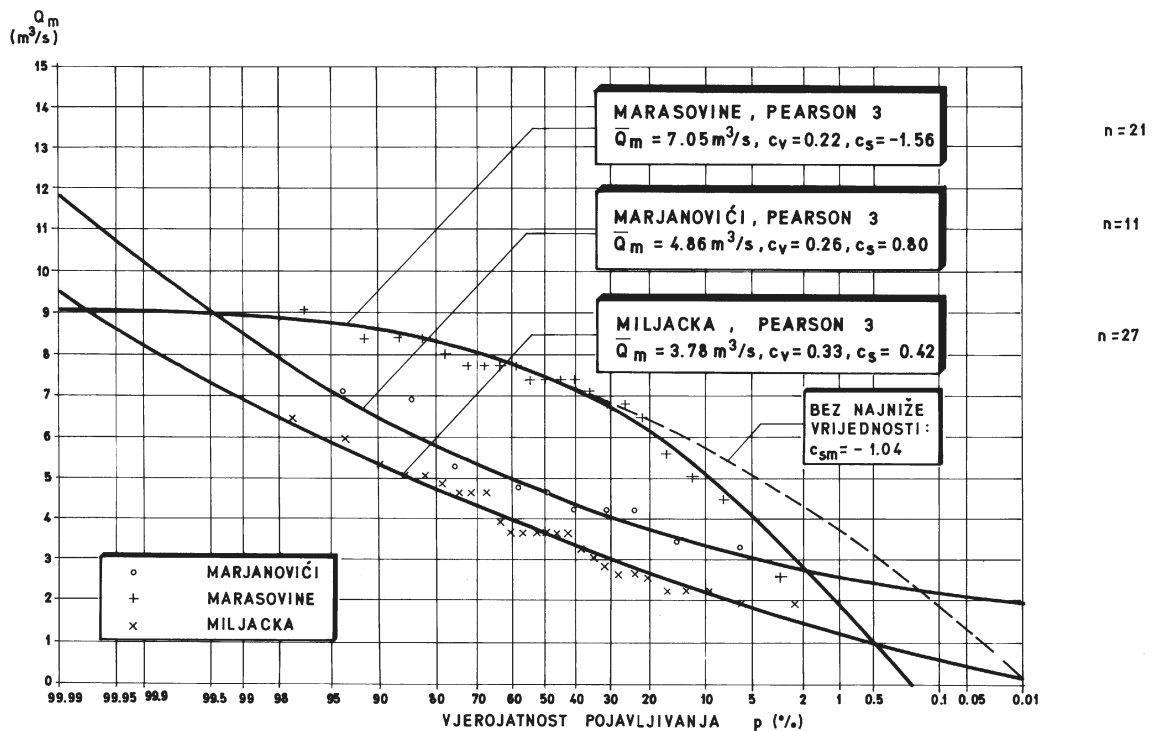
Na slici 10.1 jasno se vidi da minimalni godišnji protoci iz 1982. i 1983. godine nisu međusobno u skladu. Naročito je problematična veličina minimalnoga godišnjeg protoka Krke u profilu Marasovine u 1983. godini. Ta – vrlo niska – vrijednost protoka uzrok je negativnoj vrijednosti koeficijenta asimetrije u profilu Marasovine $c_{sm} = -1,56$. Zbog toga je krivulja raspodjele minimalnih godišnjih protoka Krke u profilu Marasovine, prikazana na slici 10.2, okrenuta prema dolje, a krivulje za ostala dva profila, u kojima je koeficijent asimetrije pozitivan, okrenute su prema gore.

Vrijednosti koeficijenata asimetrije c_{sm} za nizove minimalnih godišnjih protoka na slici 10.2 međusobno se značajno razlikuju. Zbog toga se krivulja raspodjele minimalnih godišnjih protoka Krke u profilu Marasovine po svojem obliku bitno razlikuje od krivulja raspodjela za druga dva profila. Za niz minimalnih godišnjih protoka Krke u profilu Marasovine može se reći da je prekratak, ali više podataka nije na raspolaganju jer je profil ukinut, a ako se izostavi najniža vrijednost, oblik krivulje raspodjele se neće bitno promijeniti (crtkana krivulja na slici 10.2).

Ovakav slučaj nije osamljen u hidrološkoj praksi, pa zbog toga ekstrapolirane vrijednosti minimalnih godišnjih protoka dugih povratnih razdoblja (500-, 1000- i 10.000-godišnjih) treba usvajati s određenim oprezom. U nekim problematičnim slučajevima, naročito u krškim područjima – kao na



Slika 10.1 Hidrogrami minimalnih godišnjih protoka Krke u profilima Marjanovići, Marasovine i Manojlovac



Slika 10.2 Minimalni godišnji protoci Krke različitih povratnih razdoblja u profilima Marjanovići, Marasovine i Miljacka

primjeru sa slike 10.2 – potrebno je realno ocijeniti do kojega povratnog razdoblja ekstrapolacija malih voda ima smisla (primjerice do 50- ili 100-godišnjega povratnog razdoblja).

Male se vode mogu razmatrati i prema pojedinim malovodnim razdobljima; primjerice od lipnja do rujna ili prema sušnim mjesecima. Analize malih voda mogu se provoditi i pentadno ili dekadno (s prosječnim najnižim petodnevnom ili desetodnevnom protocima).

Često puta se razmatraju trajanja malovodnih razdoblja koja su ispod nekoga repnog minimalnog protoka, a u nekim slučajevima i trajanja presušivanja korita vodotoka (naročito u kršu). **Repni protok je temeljni protok iznad ili ispod kojega se promatra otjecanje**, a najčešće se rabi pri analizama velikih i malih voda.

Za definiranje osobina malih voda D. Trninić (1998.) je opisao različite normative i standarde koji postoje kod nas i u svijetu.

U svijetu se najčešće mjerodavni mali protok definira kao protok kroz 30 uzastopnih dana (bilo kojih unutar godine), čije je povratno razdoblje 20 godina. Ovako određen protok nije podložan utjecaju pojave povećavanja protoka u kalendarski izabranome razdoblju od mjesec dana, nego je određen za realno razdoblje od 30 uzastopnih kritičnih dana.

Najčešće se rabi sljedećih šest pragova malih voda:

$Q_{30,80\%}$	minimalni srednji 30-dnevni protok vjerojatnosti pojavljivanja 80 posto
\bar{Q}_{min}	srednji minimalni godišnji protok (u ovoj knjizi označen kao \bar{Q}_m)
$Q_{95\%}$	minimalni srednji mjesečni protok, vjerojatnosti pojavljivanja 95 posto
$Q_{30,95}$	minimalni srednji 30-dnevni protok, vjerojatnosti pojavljivanja 95 posto
Q_{min}	apsolutno najmanji godišnji protok u razmatranome razdoblju
$Q_{99\%}$	stogodišnji minimalni protok.

Problematika malih voda u otvorenim vodotocima je vrlo složena, pa zahtijeva stručan i studiozan rad, pri kojemu treba raspolagati kvalitetnim i pouzdanim podacima dobivenim hidrološkim motrenjima i mjerenjima.

Često je potrebno definirati režim malih voda na malim slivovima na kojima nedostaju podaci. U tom se slučaju mogu koristiti rezultati regionalnih analiza malih voda iz regija sa sličnim osobinama otjecanja. Za proračun malih voda s neproučenih slivova vrlo je pogodna metoda A. M. Vladimirova (1976.), koja se ovdje ukratko opisuje.

Prema Vladimirovu, minimalni protok (mala voda) trajanja T i vjerojatnosti pojavljivanja p je:

$$Q_{Tp} = \lambda_{Tp} Q_{\varphi} \quad (10.1)$$

gdje je λ_{Tp} koeficijent prijelaza; a Q_{φ} je minimalni 30-dnevni protok, vjerojatnosti pojavljivanja 80 posto ($Q_{30,80\%}$).

Izračunavanje se provodi u tri koraka:

1. određuje se osnovna regionalna ovisnost Q_{φ} u funkciji parametara sliva, pri čemu se za Q_{φ} uzima minimalni 30-dnevni protok vjerojatnosti pojavljivanja 80 posto ($Q_{\varphi} = Q_{30,80\%}$)
2. određuju se, prema (10.1), koeficijenti prijelaza za $Q_{20,80\%}$; $Q_{10,80\%}$; $Q_{1,80\%}$, a zatim za svako trajanje posebno i koeficijenti prijelaza od $Q_{T,80\%}$ za $Q_{T,90\%}$; $Q_{T,95\%}$ i $Q_{T,98\%}$
3. izračunavaju se sve potrebne vrijednosti Q_{Tp} preko određene vrijednosti $Q_{30,80\%}$ za razmatrani sliv i na osnovi regionalnih vrijednosti koeficijenta prijelaza.

Veličina $Q_{30,80\%}$ ovisi o nekoliko parametara, među kojima su najvažniji: površina sliva A , gustoća riječne mreže D , srednja nadmorska visina sliva H_s i prosječna godišnja oborina P koja padne na sliv.

Najčešći je pristup u kojemu se područje koje se razmatra podijeli na dvije, tri ili više regija homogenih prema navedenim parametrima, osim površine sliva A koja predstavlja neovisnu varijablu. Za pojedine se regije definiraju ovisnosti oblika:

$$Q_{30,80\%} = a A^b \quad (10.2)$$

gdje su a i b regresijski koeficijenti.

U drugome se postupku primjenjuje višestruka korelacija za određivanje regionalnih koeficijenata a, b, c, d, \dots , pa je opći izraz za minimalni 30-dnevni protok vjerojatnosti pojavljivanja 80 posto:

$$Q_{30,80\%} = a A^b H_s^c P^d \quad (10.3)$$

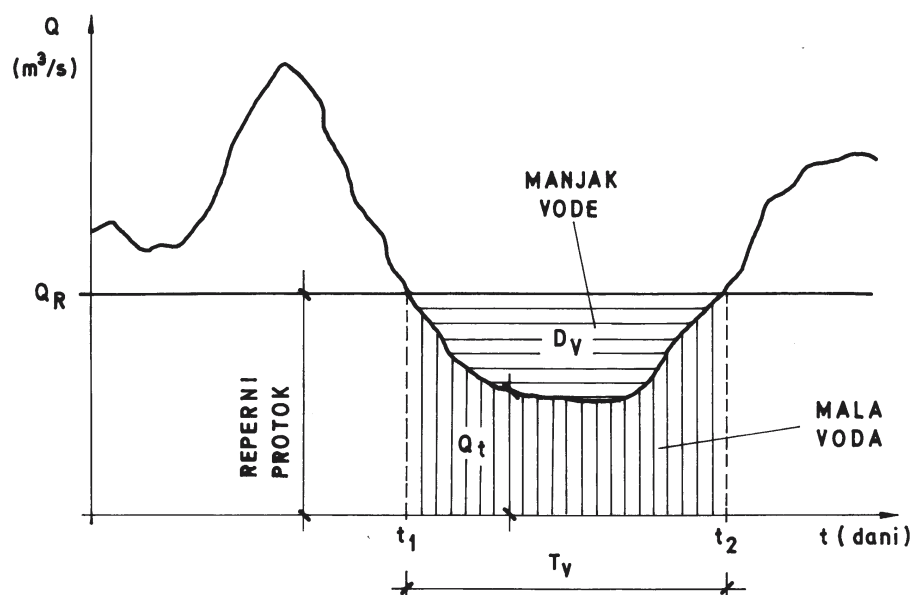
Rezultati analiza malih voda služe kao temeljna hidrološka podloga za različite korisnike voda, a posebno su značajni za prostorno planiranje, snabdijevanje naselja i industrije vodom, za energetiku, poljoprivredu, riječni i kanalski promet, za zaštitu voda, turizam, specijalne potrebe i sl. (D. Trninić, 1998.).

Prema Međunarodnome hidrološkom rječniku (UNESCO/WMO, 1992.) **suša je razdoblje izrazito suha vremena dovoljno duga trajanja da nedostatak oborina ozbiljno promijeni hidrološku ravnotežu.**

Hidrološka suša je razdoblje suha vremena koje traje toliko dugo da može uzrokovati manjak vode, što se očituje u razinama vodotoka i jezera ispod normale, manjku (deficitu) vlažnosti tla i smanjenju razina podzemne vode. Jedinice koje se u literaturi rabe za označavanje suše su godina i mjesec (Z. Sen, 1976., 1980.). Najčešće se rabi godina, ali na osnovi mjeseci se o suši može preciznije zaključivati.

Pojam je suše različit za pojedina geografska područja koja imaju različite vrste klime. Primjerice, na otoku Baliu u Indoneziji suša je svako razdoblje bez oborine koje traje duže od šest dana, a u Libiji se o suši govori tek kada prođu dvije godine bez pojavljivanja oborine.

Pod **malovodnim razdobljem**, a ujedno i sušom, *pri otvorenim vodotocima podrazumijeva se razdoblje u kojemu su prirodni protoci vode manji od onih koji su potrebni određenim korisnicima* (D. Trninić, 1998.).



Slika 10.3 Hidrogram male vode s osnovnim veličinama (D. Trninić, 1998.)

Jedan od glavnih problema koji se stvaraju djelovanjem suše je snižavanje razina podzemnih voda. Mali slivovi s malim podzemnim rezervoarima (retencijama) isprazne se uslijed suše za nekoliko mjeseci ili tijekom jedne godine. Na velikim slivovima (primjerice sliv Save u području Zagreba) pražnjenja podzemnih retencijskih prostora uslijed suše mnogo su sporija nego na malim slivovima i traju godinama, ali sa sve težim posljedicama na vodonosnik.

Često se hidrološka suša definira kao volumenski manjak vode u vodotoku ispod nekoga repnog protoka Q_R , uzimajući u obzir trajanje suše Δt i volumenski manjak male vode D_v , kako je prikazano na slici 10.3.

Na slici 10.3 korištene su oznake:

t_1 – vrijeme početka male vode

t_2 – vrijeme završetka male vode

T_v – trajanje male vode (ukupan broj uzastopnih dana u kojima je protok vode manji od repnoga protoka Q_R)

D_v – manjak male vode danoga trajanja T_v , definiran izrazom:

$$D_v = Q_R T_v - \int_{t_1}^{t_2} Q_t dt \quad (10.4)$$

Izraz (10.4) vrijedi za protok $Q_t < Q_R$.

Najveći godišnji manjak vode označava se s D_{vmax} .

Prema N. S. Griggu (1989.), borba protiv suše ili, kako se često naziva, odgovor suši, je multidisciplinarni problem. Pod time se podrazumijeva da u tu borbu osim vodoprivrede treba biti uključena i šira društvena zajednica.

O. Bonacci (1993.) navodi četiri faze koje je potrebno proći kako bi se stvarno moglo upravljati borbom protiv suše:

1. Predviđanje suše. Ova se faza odnosi na analize i prognoze prosječnih uvjeta vlažnosti u budućnosti (M. A. Beran, 1979., S. Chander i dr., 1979.) po dekadama, mjesecima ili sezonski. Statistički se obrađuju i analiziraju temperature zraka, evapotranspiracija, vlaga u zraku, oborine, razine vode (na površini i u podzemlju), protok, vlaga u tlu, stanje vegetacije itd.
2. Određivanje (identifikacija) i motrenje (monitoring) suše. U ovu su fazu uključeni čimbenici prve faze, a njih se proširuje novim čimbenicima, kojima se opisuje učinak suše na terenu (A. V. Havens, 1954.). Izravni učinci suše nepovoljno se odražavaju na poljoprivredu i šumarstvo, vodoprivredu – naročito na vodoopskrbu, industriju (hidroenergetika), te zaštitu okoliša (požari i zagađenja koja su naročito opasna za podzemne vode).
3. Procjena učinaka suše i njihovo ispravljanje. U procjenjivanju učinaka suše i njihovu ublažavanju i ispravljanju trebaju sudjelovati timovi stručnjaka različitih područja, a odluke se donose na različitim razinama, ovisno o veličini zahvaćenoga područja i težini posljedica (W. M. Wenland, 1990.).
4. Stvaranje strategije i politike borbe protiv suše. U ovoj fazi može se mjere koje se provode podijeliti u četiri skupine: institucionalne, zakonske, strukturne i upravljačke mjere.

Hidrologiji su najzanimljivije strukturne mjere u borbi protiv suše, jer se one odnose na korištenje voda tijekom suše. Pritom se zajednički tretiraju površinske i podzemne vode, te umjetni spremnici vode.

11 UTJECAJ KLIMATSKIH PROMJENA NA HIDROLOŠKE VELIČINE

1. Ranije provedenim analizama ustanovljeno je – u svijetu i kod nas – da utjecaj klimatskih promjena na hidrološke veličine počinje na kraju osme i početkom devete dekade dvadesetoga stoljeća. Promjene u rasporedu i količinama prosječnih mjesečnih oborina i odgovarajućih prosječnih mjesečnih dotoka dokumentirane su na primjeru krškoga izvora Golubinka u zadarskome zaleđu u poglavlju 5, slike 5.3, 5.4 i 5.5. te na primjerima karakterističnih godišnjih protoka u odabranim hidrološkim profilima u Hrvatskoj u poglavlju 7, slike 7.1-7.18.
2. U poglavlju 7 na slikama 7.1 – 7.18 prikazani su hidrogrami srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka u karakterističnim hidrološkim profilima u Hrvatskoj: Botovo na Dravi, Slavonski Brod na Savi, Kupljenovo na Krapini, Pleternica most na Orljavi, Mrzlo Polje na Mrežnici i Han na Cetini unutar razdoblja (1926.-2022.). Na osnovi navedenih hidrograma općenito se zaključuje da se u nizovima protoka nakon 1980. godine utjecaj klimatskih promjena očituje u nižim vrijednostima srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka. Iznimke su nizovi srednjih godišnjih protoka rijeke Drave u profilu Botovo (slika 7.1) i minimalnih godišnjih protoka rijeke Krapine u profilu Kupljenovo (slika 7.9), kod kojih su protoci u blagom porastu.
3. Pojavljivanja dužih sušnih razdoblja nakon 1981. godine u odnosu na ranije razdoblje do 1980. godine, opće su poznata i ne treba ih posebno dokazivati. Opadajući trendovi kod minimalnih godišnjih protoka nakon 1981. godine, koji su prikazani na slikama 7.3, 7.6, 7.12, 7.15 i 7.18 ukazuju na sve niže vrijednosti minimalnih protoka. Navedene sve niže vrijednosti minimalnih protoka, zajedno s izraženim manjkovima vode (teorijski prikazanim na slici 10.3), odnosno duljim sušama nego u ranijem razdoblju prije 1980. godine, uvjetuju još nepovoljnije prilike u smislu vodnosti kako površinskih, tako i podzemnih voda.

12 PREPORUKE ZA PROJEKTIRANJE

1. Procjeni kakvoće osnovnih (ulaznih) izračunskih podataka i strukturalnoj analizi hidroloških sustava i procesa potrebno je posvetiti odgovarajuću pozornost. Ukoliko se to zanemari nepouzdana osnovni/ulazni podaci i pogreške uslijed nehomogenosti nizova osnovnih podataka mogu značajno utjecati prvenstveno na rezultate hidroloških obrada te na izbor modela i rezultate modeliranja (pogl. 2).
2. Veličine mjerodavnih hidroloških parametara nisu konstantne, nego variraju oko prosječnih vrijednosti. Te se prosječne vrijednosti s vremenom mogu značajno promijeniti. Razlozi za promjene mogu biti: dulji nizovi prikupljenih podataka – koji redovito daju pouzdanije rezultate obrada – zatim klimatske promjene i promjene u vodnome režimu zbog utjecaja čovjekova rada na slivu i sl. Kod osuvremenjivanja ili noveliranja neizvedenih projekata nekih, znatno ranije projektiranih hidrotehničkih objekata, često se smatra nepotrebnim naručiti obrade novih hidroloških podloga pa se koriste rezultati starih obrada. Zanemarivo mala ušteda financijskih sredstava ostvarena nauštrb obrada novih hidroloških podataka može se, nakon izvedbe projekta „osvetiti“ jer postoji velika vjerojatnost da će pojedini dijelovi objekta biti krivo dimenzionirani (pogl. 4).
3. Protočne krivulje se, s obzirom na moguće promjene u koritima vodnih tokova, mogu mijenjati. DHMZ redovito prati, uzima u obzir te promjene i po potrebi mijenja izraze kojima su definirane protočne krivulje, koji onda vrijede za pojedina razdoblja. Zbog toga je poželjno raspolagati sa svim postojećim protočnim krivuljama unutar razdoblja motrenja i mjerenja.
4. Produljivanje (ekstrapolacija) protočne krivulje u području velikih voda zahtijeva posebna razmatranja i provjere, kako je primjerice prikazano u poglavlju 4 na slici 4.10. Produljivanja protočnih krivulja u području velikih voda mogu davati nerealne (preniske) vrijednosti protoka u hidrometrijskim profilima na bujičnim vodotocima malih slivova. U takvim je slučajevima za definiranje velikih voda opravdano, a i neophodno koristiti odgovarajuće iskustvene (empirijske) formule. Očigledni primjeri za takav pristup su slivovi Zagrebačke Medvednice i mali slivovi na području sliva rijeke Krapine (pogl. 9.4, 9.5 i 9.6).
5. Nadopunjavanja nizova srednjih godišnjih protoka preporuča se provoditi na osnovi dvostrukih sumarnih količina (engl. double mass analysis) – kako je opisano u poglavlju 5 i grafički prikazano na slici 5.2).
6. Razmatranja srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka Drave u profilu Botovo, Save u profilu Slavonski Brod, Krapine u profilu Kupljenovo, Orljave u profilu Pleternica most, Mrežnice u profilu Mrzlo Polje i Cetine u profilu Han, je općenito pokazala smanjivanje vrijednosti protoka, osim kod srednjih godišnjih protoka Drave u Botovu i minimalnih godišnjih protoka Krapine u Kupljenovu, unutar razdoblja (1926.-2022.). Na taj je način dokumentiran utjecaj klimatskih promjena na veličine dotoka vode (pogl. 7 slike 7.1 – 7.18). Pritom se može naići na slučaj kao kod hidrološkoga profila Slavonski Brod na Savi da nedostaje podataka pa to zahtijeva dodatna razmatranja, što se često kod ugovaranja hidrološke obrade ne predviđi.
7. Krivulje trajanja protoka mogu korisno poslužiti, ne samo ako se ocjenjuje mogućnost korištenja vode na osnovi prosječnih krivulja trajanja, nego i za potrebe projektiranja. Vrlo su zanimljivi i oblici krivulja trajanja protoka za karakteristične godine unutar razdoblja motrenja i mjerenja: u vlažnoj, sušnoj i približno prosječnoj godini (pogl. 8. slike 8.2 i 8.3).

8. Prikažu li se krivulje trajanja protoka u modulnim koeficijentima, onda ih je moguće uspoređivati na različitim vodotocima – kako je to prikazano za odabrane profile vodotoka na kojima su bili predviđeni prototipovi malih hidroelektrana u Hrvatskoj (pogl. 8, slika 8.5).
9. Za definiranje velikih voda različitih povratnih razdoblja u određenom hidrološkom profilu potrebno je raspolagati s nizom podataka koji je dovoljno dug, homogen i s pouzdanim zabilježenim vrijednostima velikih voda. U takvim se slučajevima primjenjuju metode matematičke statistike. U poglavlju 9.2, slike 9.5 i 9.6, na primjeru rijeke Čabranke, prikazano je izračunavanje teorijskih krivulja raspodjela koje se najčešće rabe u praksi: Log-normalna (Galtonova), Gumbelova, Pearson 3 i Gaussova (koja je simetrična, ali se često obrađuje radi usporedbe s ostalim, nesimetričnim krivuljama raspodjele).
10. Izbor mjerodavne krivulje raspodjele za projektiranje, treba temeljiti na prilagodbi raspodjele ulaznim izračunskim podacima, a uz to treba razmotriti i druge čimbenike koji se razlikuju od slučaja do slučaja (duljina niza, odnos raspodjele prema najvećim vrijednostima u nizu i sl.). U nekim slučajevima važan utjecaj na usvajanje veličina velikih voda može imati i sama građevina radi koje se velike vode izračunavaju. Radi li se o dimenzioniranju evakuacijskih organa (preljev i temeljni ispušt) nasute brane redovito je opravdano usvajati veće vrijednosti velikih voda, odnosno veću sigurnost. Preljevanje vode preko nasute brane se ne smije dozvoliti jer – uslijed erozije – može doći do njezina rušenja.
11. Ukoliko se kod definiranja velikih voda ustanovi da su vrijednosti ulaznih izračunskih podataka niže od stvarnih, što je slučaj kada se radi o vodokaznim podacima ili kada se najveće vrijednosti ulaznih izračunskih podataka nalaze s desne strane krivulje raspodjele, velike se vode različitih povratnih razdoblja može na određeni način povećati. Postupak pod nazivom popravak sigurnosti opisan je u poglavlju 9.3 (tablica 9.7, slike 9.5 i 9.6).
12. Od velikoga broja iskustvenih formula ovdje su opisane dvije, koje se u našoj hidrološkoj praksi vrlo često rabe. To su: formula D. Srebreновиća, koja je izvedena za naše male slivove i metoda V. T. Chowa (pogl. 9.4). Prvenstveno je preporučljivo rabiti formule izvedene za regiju u kojoj se nalazi sliv ili formule izvedene za regije s vrlo sličnim glavnim značajkama otjecanja velikih voda.
13. Maksimalni se protok može izračunati prema nekoliko različitih iskustvenih formula pa se onda za projektiranje može usvojiti prosječna vrijednost maksimalnoga protoka ili se, uz odgovarajuće obrazloženje, usvoji neka druga vrijednost (pogl. 9.6, tablica 9.14).
14. Teorijski oblik velikoga vodnog vala prema R. D. Goodrichu vrlo dobro opisuje velike vodne valove, kako za vrlo male slivove (sliv dijela odlagališta komunalnoga otpada Viševac: $A = 0,017 \text{ km}^2$, pogl. 9.5, slike 9.11 i 9.12) tako i za velike slivove (sliv rijeke Save do Zagreba, $A = 12.450 \text{ km}^2$, 100-godišnji veliki vodni val od poplave u listopadu 1964. godine, pogl. 9.6, slika 9.13).
15. Hidrograme velikih vodnih valova može se uspješno simulirati matematičkim modeliranjem. U poglavlju 9.6 na slici 9.15 uspoređeni su modelirani i optimizirani hidrogrami (korišten je HEC-HMS) sa stvarnim hidrogramom rijeke Krapine u profilu Kupljenovo. Također je naveden i obrazložen složeni postupak definiranja mjerodavnih brojeva krivulja CN za primjenu Metode V. T. Chowa na malim slivovima ukupnoga sliva rijeke Krapine do profila Kupljenovo.
16. Klimatske promjene imaju utjecaj na veličine minimalnih godišnjih protoka i na trajanja malovodnih razdoblja i suša (pogl. 9.7 i 9.11). Kod razmatranja raspoloživih vodnih količina potrebno im je posvetiti odgovarajuću pozornost – kako je opisano u poglavlju 10.

13 LITERATURA

Beran, M. A. (1979.) – *Drought Predictability: Problems and Possibilities*, Symp. “Hydrological Aspects of Drought”, New Delhi, Vol. I, 229-241.

Bidovec, F. (1971.) – *Metoda računa vjerojatnosti nije odgovarajuća metoda za određivanje velikih voda rijetkih učestalosti*, Vodoprivreda, Vol. 3, br. 13-14, str. 715-723.

Bonacci, O. (1993.) – *Identifikacija suše i borba protiv nje*, Zbornik radova, Okrugli stol o suši, Zagreb, str. 1-20.

Bonacci, O., Roglič, S. (1981.) – *Određivanje velikih voda na neizučnim slivovima genetskom metodom*, Vodoprivreda, Vol. 13, br. 6, str. 495-502.

Brkić, B., Zagreb (2001.): *Hidrotehničko rješenje zaštite grada Ogulina izgradnjom retencije*, Vodoprivredno-projektni biro d.d., Zagreb, knjiga 2 – stručni elaborat.

Browniee, K. A. (1960.) – *Statistical Theory and Methodology in Science and Engineering*, John Willey & Sons, New York.

Chander, S., Spolia, S. K., Kumar, A. (1979.) – *Prediction of Hydrologic Characteristic of Drought*, Symp. “Hydrological Aspect of Drought”, New Delhi, Vol. I., 305-318.

Chin, D. A. (2000.) – *Water-Resources Engineering*, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 750 str.

Chow, V. T. (1960.) – *Hidrologic Determination of Waterway Areas for the Design of Drainage Structures in Small Drainage Basins*, Engineering experiment station bulletin, No. 462, 1-105.

Chow, V. T. i dr. (1964.) – *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York, 1481 str.

Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W. (1988.) – *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, Singapore, 572 str.

Darlymple, T. (1960.) – *Flood-Frequency Analysis*, Water Supply Paper 1543-A, U.S. Geological Survey, Washington.

Fritz, F. (1976.) – *Hidrološka karta Ravni kotari Bukovica*, mj. 1: 100.000, Geološki zavod, Zagreb.

Grigg, N. S. (1989.) – *Hydrology and Management of Drought in U.S.*, IAHS Publication No. 181, 303-312.

Gupta, R. S. (1989.) – *Hydrology and Hydraulic Systems*, Prentice Hall, New Jersey, 739 str.

Hall, L. S. (1921.) – *The Probable Variations in Yearly Runoff as Determined from a Study of California Streams*, Trans. ASCE 84, 191-213.

Havens, A. V. (1954.) – *Drought and Agriculture*, Weatherwise, 7, 51-55.

Herheulidze, I. I. (1971.) – *Obobštenii objemnih metod rasčeta maksimalnih rashodov doždjevih padodkov*, Trudi, Zakavkaski naučno-isledovatel'ski gidrometeorološki institut, Vipusk 42 (48), Gidrometeoizdat, Leningrad.

Ivanković, I. (2011) – *Izrada sintetičkih hidrograma temeljem analize sliva pomoću GIS-a*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, magistarski rad, 128 str.

Jevđević, V. (1956.) – *Hidrologija I. deo*, J. Černi, Beograd, 403 str.

- Jevđević, V.** (1977.) – *Vjerovatnoća i statistika u hidrologiji*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Sarajevu, 309 str.
- Jevđević, V.** (1993.) – *Tendencije u hidrološkim istraživanjima i njihova primjena u 21. vijeku*, Vodoprivreda Vol. 25, br. 3-4, str. 127-140.
- Jovanović, S.** (1975.) – *Parametarska hidrologija*, Seminar o obradi hidroloških podataka, Izola, 213 str.
- Jovanović, S.** (1981.) – *Primjena metoda matematičke statistike u hidrologiji*, Građevinski fakultet, Beograd, 322. str.
- Kundzewicz, Z. W.** (1998.) – *Floods of the 1990s: Business Usual*, WMO Bulletin, 47 (2), 155-160.
- Linsley, R. K., Kohler, M. A., Paulhus, J. L. H.** (1949.) – *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York, 689 str.
- Lušćeva, A. A.** (1953.) – *Praktični primjeri iz hidrologije*, Savezna uprava hidrometeorološke službe, Beograd, 235 str.
- Marković, R.** (1971.) – *Analiza homogenosti voda metodom rangiranja*, Vodoprivreda, Vol. 3., br. 13-14, str. 815-820.
- Mlaker, I., Komar, S.** (1980.) – *Hidrološki informacioni sistem Hrvatske*, Savjetovanje o hardveru i softveru, Beograd.
- Mood, A. M., Graybill, F. A.** (1963.) – *Introduction to the Theory of Statistics*, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 2nd ed.
- Morozov, A. A.** (1954.) – *Korišćenje vodnih snaga*, T.V.Š. Beograd, 308 str.
- Mutreja, K. N.** (1986.) – *Applied Hydrology*, Tata McGraw-Hill, New Delhi, 959 str.
- Nikolić, M.** (1984.) – *Hidrološki aspekti određivanja instalisane snage hidroelektrana*, Zbornik radova, IV Jugoslavensko savjetovanje „Energetsko iskorišćavanje malih vodotoka i izgradnja malih hidroelektrana“, Aranđelovac, str. 52-64.
- Petković, T.** (1975.) – *Ekstrapolacija i približna konstrukcija krivulja protoka*, Seminar Obrada hidrološkihi podataka, Izola, str. 68-83.
- Ponce, V. M.** (1989.) – *Engineering Hydrology Principles and Practices*, Prentice-Hall, New Jersey, 640 str.
- Sen, Z.** (1976.) – *Wet and Dry Periods of Annual Flow Series*, J. Hydraul. Div., ASCE HY 10, 1503-1514.
- Sen, Z.** (1980.) – *Critical Drought Analysis of Periodic-stochastic Processes*, J. Hydrol., 46, 251-263.
- Srebrenović, D.** (1966.) – *Učestalost ekstremno visokih voda Drave u 1964. i 1965. godini – prirodna pojava ili nešto drugo*, Građevinar, Vol. 18, br. 12, str. 469-473.
- Srebrenović, D.** (1970.) – *Problemi velikih voda*, Tehnička knjiga, Zagreb, 278 str.
- Srebrenović, D.** (1986.) – *Primijenjena hidrologija*, Tehnička knjiga, Zagreb, 509 str.
- Stepinac, A.** (1976.) – *Pristup hidrološkim analizama i studijama*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, (rukopis), 4 str.
- Trninić, D.** (1993.) – *Ekstremna hidrološka suša na vodotocima u Hrvatskoj*, Okrugli stol o suši, Zagreb, Zbornik radova, str. 29-42.
- Trninić, D.** (1998.) – *Regionalna analiza malih voda u otvorenim vodotocima Hrvatske*, Hrvatske vode, Vol. 6, br. 24, str. 233-245.
- Vladimirov, A. M.** (1976.) – *Stok rek v malovodniy period*, Gidrometeoizdat, Leningrad, 194 str.
- Vranić, V.** (1971.) – *Vjerojatnost i statistika*, Tehnička knjiga, Zagreb, 378 str.

- Wanielista, M. P.** (1990.) – *Hydrology and Water Quantity Control*, John Wiley and Sons, New York, 565 str.
- Wendland, W. M.** (1990.) – *Hydrological Aspect of the 1988 Drought in Illinois*, Water Resources Bulletin, Vol. 16, No. 6, 913-920.
- Wilson, E. M.** (1974.) – *Engineering Hydrology*, The MacMillan Press Ltd., London, 232 str.
- Žugaj, R.** (1984.) – *Hidrološke podloge za Katastar malih vodnih snaga*, Zbornik radova, IV Jugoslavensko savjetovanje „Energetsko iskorišćavanje malih vodotoka i izgradnja malih hidroelektrana“, Arandelovac, str. 8-16.
- Žugaj, R.** (1993.) – *Mjerodavne duljine niza protoka*, Građevinar, Vol. 45, br. 6, str. 319-329.
- Žugaj, R.** (1995.) – *Regionalna hidrološka analiza u kršu Hrvatske*, Hrvatsko hidrološko društvo, Zagreb, Monografije, br. 1, 139 str.
- Žugaj, R.** (2015.) – *Hidrologija*, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, udžbenik, 538 str.
- Žugaj, R., Andreić, Ž.** (2011.) – *Utjecaj klimatskih promjena na protok Omble*, Zbornik radova, 5. Hrvatska konferencija o vodama s međunarodnim sudjelovanjem „Hrvatske vode pred izazovom klimatskih promjena“, Opatija, str. 249-257.
- Žugaj, R., Mijač, S., Mičković, B., Marković, V., Koren, Ž., Đokić, D., Lacković, M., Škunca, B.** (1989.) – *Katastar malih hidroelektrana u SR Hrvatskoj, I. faza; Hidrološke podloge*, knjige: H 1.1 – H 1.3, elaborati, Elektroprojekt, Zagreb.
- Žugaj, R., Jurak, V., Mayer, D., Prelogović, E., Štefanek, Ž.** (2004.) – *Analiza dostignutoga stupnja sigurnosti od poplava bujičnih voda grada Zagreba izgradnjom retencija i daljnje planiranje sustava*, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb i Hidroinženjering Zagreb, knjiga 1.1-studija.
- Žugaj, R., Pavlin, Ž.** (2009.) – *Male hidroelektrane; definiranje mjerodavnih hidroloških veličina*, ekspertiza, Elektroprojekt, Zagreb, 15 str.
- Žugaj, R., Pavlić, K.** (2015) – *Karakteristični primjeri izračuna velikih voda veza vezano za zaštitu ugroženih područja*, Vodnogospodarski projekti i EU fondovi, Zbornik radova iz hidrotehnike s 9. Dana ovlaštenih inženjera u Opatiji 2014., ur.: B. Karleuša, K. Pavlić, Hrvatsko hidrološko društvo, Zagreb, str. 5-30.
- Žugaj, R., Štefanek, Ž., Turčinov Mikulec, A.** (2019.) – *Velike vode na malim slivovima i problemi njihovoga definiranja*, 7. HKOV, Opatija, str. 221-229.
- *** (1992.) – *International Glossary of Hydrology*, 2nd edition, UNESCO and WMO, Paris, Geneve, 413 str.

