

DEFINIRANJE NEKIH ELEMENATA HIDROLOŠKOG REŽIMA METODOM REGIONALIZACIJE

Husno HRELJA
Građevinski fakultet u Sarajevu

REZIME

U radu je prikazan postupak za definiranje sintetičkih krivih trajanja proticaja i maksimalnih proticaja na neizučeni, vodoprivredno potencijalnim lokalitetima. Postupak-metod za definiranje krivih trajanja proticaja baziran je na korištenju rezultata regionalizacije parametara krivih trajanja proticaja putem matematskog multiregresionog linearnog modela, a metod za definiranje maksimalnih proticaja na regionalnoj analizi modulnih koeficijenata maksimalnih proticaja. Dobivene regresione jednačine su iskorištene za definiranje sintetičkih krivih trajanja proticaja i maksimalnih proticaja na drugim hidrološki neizučeni vodomjernim profilima unutar hidrološki homogenog regiona.

Ključne riječi: regionalna analiza, trajanje proticaja, maksimalni proticaji, multiregresiona analiza, modulni koeficijenti maksimalnih proticaja

1. UVOD

Jedan od stalnih i gorućih problema zemalja u razvoju je osiguranje snabdijevanja stanovništva i industrije dovoljnim količinama električne energije uz najmanje moguće troškove i najveću moguću pouzdanost izgrađenih energetske sistema. Potrebe za električnom energijom stalno rastu, a mogućnosti da se one zadovolje, su zbog niza uticajnih faktora izuzetno otežane. To eksploataciju domaćih izvora električne energije, a naročito hidroenergije danas čini vrlo izazovnom. Poseban problem je to što je masovnije iskorištavanje vodnih snaga za proizvodnju električne energije zapostavljeno.

Kada su u pitanju male hidroelektrane stanje je vrlo nepovoljno. Sa iskorišćenošću od oko 3 % Bosna i Hercegovina je pri dnu u Evropi. Koliki je to nedostatak dobro je uočeno u toku proteklog rata u Bosni i

Hercegovini. U toku rata održan je i jedan kolokvij o malim hidroelektranama, što je na određeni način iniciralo poduzimanje niza mjera na ubrzanju njihove izgradnje. Danas ih ima izgrađenih jedanaest sa smagom od oko 30 MW i srednjom godišnjom proizvodnjom energije od oko 150 GWh od moguće procijenjene od oko 4.500 GWh.

Jednu od niza neophodnih podloga za njihovo projektovanje predstavljaju hidrološke podloge, odnosno količine voda i njihov vremenski raspored na predviđenoj lokaciji hidroelektrane. Ono što vrlo često predstavlja problem, je to što je većina ovih hidroelektrana locirana na hidrološki neizučeni lokalitetima, što uvjetuje da tzv. hidrološko projektovanje ovakvih objekata mora onda biti bazirano na informacijama prostorno transformisanim sa drugih hidrološki izučeni lokaliteta.

Obzirom da su vrlo često energetske pa i šire, vodoprivredno potencijalni lokaliteti, značajno udaljeni od postojećih hidrološki izučeni vodomjernih stanica, transfer hidroloških informacija korištenjem uobičajene regresione analize se pokazao nepouzdanim u vrlo velikom broju slučajeva.

Količina vode koja se može energetske preraditi zavisi od hidroloških karakteristika, definisanih krivom trajanja proticaja i veličinom izgradnje (instalisanom snagom hidroelektrane). Drugim riječima, prosječna godišnja proizvodnja električne energije se određuje pomoću krive trajanja proticaja, pada, koeficijenta korisnog dejstva i instalisane snage. Iako kriva trajanja ne daje vremenski raspored proticaja, što daje hidrogram, ona ipak, osim informacija potrebnih za procjenu hidropotencijala, pruža baznu informaciju i o potrebi gradnje akumulacije na razmatranom lokalitetu. Zbog toga je kriva trajanja koristan i nezaobilazan alat u preliminarnim studijama o hidroenergetskom potencijalu razmatranih vodnih tokova. Naravno, ona

daje i niz drugih hidroloških informacija neophodnih i u drugim vodoprivrednim studijama kao što su to vodosnabdijevanje, zaštita kvaliteta voda, plovidba i mnogi drugi.

Nadalje, jasno je da je problem sigurnosti ovih hidroenergetskih objekata čvrsto vezan za određivanje mjerodavnih velikih voda koje je neophodno prihvatiti i bezštetno provesti evakuacionim organima. Takva zaštita podrazumijeva korektno i racionalno dimenzioniranje objekata za prihvatanje i evakuaciju velikih voda. Ovo nadalje zahtijeva precizno određivanje parametara režima velikih voda, što je uslov za svestrano sagledavanje rizika i neizvjesnosti pojave ekscenčnih događaja. Od niza metoda za definiranje maksimalnih proticaja ovdje je prikazana metoda regionalnih analiza koja se generalno bazira na uporedbi determinirajućih faktora za formiranje velikih voda na razmatranom slivu sa istim faktorima na susjednim slivovima. Na osnovu ove uporedbe, izvlače se zaključci o veličinama i drugim relevantnim karakteristikama maksimalnih proticaja. Ova metoda nalazi svoju primjenu u uslovima potpunog nedostatka mjerenih hidroloških podataka i kada se radi o objektima koji predstavljaju relativno malu opasnost po nizvodna područja.

Naglo ukazane potrebe za izgradnjom niza malih hidroenergetskih postrojenja i nedostatak zadovoljavajućih hidroloških informacija na mjestu njihove izgradnje, uvjetovale su rad na pokušaju da se primjene relativno jednostavne i dobro poznate tehnike (metode) za definiranje krivih trajanja proticaja i maksimalnih proticaja na hidrološki neizučeni lokalitetima ili generalno tamo gdje su hidrološke informacije o količinama voda vrlo oskudne. Prikazan je postupak i rezultati regionalizacije karakteristika krivih trajanja proticaja, te postupak za definiranje maksimalnih proticaja korištenjem regionalizacije njihovih modulnih koeficijenata. Metode, odnosno dobiveni rezultati mogu se uspješno primijeniti za procjenu tzv. sintetičkih krivih trajanja proticaja i maksimalnih proticaja na hidrološki neizučeni lokalitetima.

2. DEFINIRANJE SINTETIČKIH KRIVIH TRAJANJA PROTICAJA

2.1. Kalibracija krivih trajanja proticaja

Pojam linije trajanja, zajedno sa linijom učestalosti, već odavno je postao redovno sredstvo izlaganja i sporazumjevanja među hidrotehničkim inženjerima.

Kriva ili linija trajanja predstavlja empirijsku funkciju koja pokazuje koliko je neka zadata veličina i sve vrijednosti veće od te veličine, trajala u danima ili procentima. Kriva trajanja se ponegdje naziva i «kriva obezbjeđenja», što ima smisao. Može se reći da je plovidba obezbjeđena, na primjer 90 % vremena, što se čita iz krive obezbjeđenja vodostaja kako se može nazvati «kriva trajanja vodostaja». Navodi se i naziv «zastupljenost» - i taj naziv ima smisla, jer vodostaji ili proticaji koji premašuju neku određenu vrijednost su zastupljeni sa, naprimjer 30 %. To je dobro poznata i široko korištena kriva, a procedura za njeno definiranje se može naći u gotovo svim knjigama bazične hidrologije.

Imajući u vidu gornju definiciju krive trajanja, očigledno je da analitički izraz za definiranje te empirijske funkcije zavisi od strukture serijske korelacije vremenske serije proticaja. Za vremenske serije sa statistički beznačajnom serijskom korelacijom karakteristike krivih trajanja mogu se modelirati preko teorijskih funkcija raspodjele vjerovatnoće, što je i uobičajena praksa. Međutim, u većini slučajeva vremenske serije proticaja su vremenski zavisne, naročito kada se radi o dnevnim vrijednostima proticaja na osnovu kojih se uobičajeno definišu krive trajanja. To je i osnovni razlog što se procedura za modeliranje krivih trajanja razlikuje od procedure korištenjem teoretskih funkcija raspodjele vjerovatnoće.

Obzirom da hidrološka literatura obiluje matematskim modelima kojima su opisivane krive trajanja proticaja, to su u ovom radu preuzeta pozitivna iskustva drugih autora. Načešće korišteni modeli su:

$$q = a \exp(-bT) \quad (1)$$

$$q = aT^{-b} \quad (2)$$

$$Q = a - b \ln T \quad (3)$$

$$Q = a - bT + cT^2 \quad (4)$$

$$Q = a - bT + cT^2 - dT^3 \quad (5)$$

gdje je q specifični proticaj (proticaj po jedinici površine), Q proticaj, T je odgovarajuće trajanje a a , b , c i d su konstante, odnosno parametri datih regresionih modela. Modeli (1) i (2) testirani su od strane Quimpoa /5/ na krivim trajanja proticaja na Filipinima, a modeli (3), (4) i (5) su testirani na vodotocima zapadne i sjeverozapadne Grčke od strane Mimikou i Kaemaki /3/. Za potrebe ovog rada svi gore navedeni modeli testirani su na više vodomjernih stanica, od kojih je model opisan jednačinom (5) dao najbolje rezultate. Model opisan jednačinom (5) nakon toga je primjenjen na

ukupno 19 vodomjernih stanica, od kojih 12 pripada slivu rijeke Bosne dok je preostalih 7 uzeto iz drugih slivova glavnih vodotoka u Bosni i Hercegovini. Izbor i obim korištenih podataka bio je uvjetovan minimalnim fondom preostalih hidroloških podataka, kao posljedice ratnih dejstava u minulom ratnom periodu.

Spisak stanica koje su korištene (ime, površina sliva, itd.) dat je u tabeli 1. Krive trajanja su preuzete iz odgovarajućih hidroloških-statističkih obrada za svaku od razmatranih stanica a konstruisane su na osnovu dnevnih vrijednosti proticaja na razmatranim lokalitetima.

Korištenjem već spomenutog matematskog modela (5) za svaku od stanica, odnosno za svaku od 19 krivih trajanja proticaja određene su vrijednosti konstanti a , b , c i d . Dobiveni rezultati, sa pripadajućim koeficijentom korelacije r prikazani su u tabeli 2.

Pregledom rezultata iz tabele 2. lahko je uočiti izuzetno dobro prilagođavanje modela, odnosno polinoma trećeg stepena registrovanim podacima. U postupku kalibracije modela svaka od krivih trajanja proticaja bila je predstavljena sa po 25 parova vrijednosti proticaja i odgovarajućih trajanja (4, 8, ... , 100 %).

Za vizuelnu ilustraciju rezultata, na slici 2. prikazane su mjerene i modelirane krive trajanja proticaja za četiri od ukupno 19 modeliranih vodomjernih stanica.

2.2. Regionalizacija karakteristika krivih trajanja proticaja

Kao što je već prethodno spomenuto, metoda regionalizacije za transfer hidroloških informacija – u ovom slučaju karakteristika krivih trajanja proticaja – sa jedne vodomjerne stanice sa poznatom krivom trajanja na drugu udaljenu stanicu bez te krive je neophodna, pošto su se drugi metodi pokazali nepouzdanim.

Dobro je poznato da se hidrološka regionalizacija radi grafički, crtanjem jednakih vrijednosti nekih numeričkih karakteristika hidrološke promjenljive koju prenosimo sa mjesta na mjesto, ili analitičkim obješnjenjem prostorne varijacije iste promjenljive, putem parametara matematskog modela regionalizacije.

U ovom radu je primjenjen drugi pristup. Dakle, prostorna varijacija četiri parametra (a , b , c i d) kojim je predstavljen matematskim model za krivu trajanja

proticaja opisan jednačinom (5), odnosno polinomom trećeg stepena, objašnjava se putem višestruke linearne regresije u kojoj su ulazne-nezavisne varijable jedna klimatska karakteristika i tri morfološke karakteristike slivnog područja razmatranog vodotoka, a zavisna varijabla jedan od parametara a , b , c ili d .

Tabela 1. Spisak korištenih vodomjernih stanica sa osnovnim podacima

Vodotok-stanica	P mm	F km ²	L km	H m
SLIV BOSNE				
Bosna-Reljevo	1330	1104	12	17
Bosna-Maglaj	1120	6619	165	330
Miljacka-Sarajevo	1150	307	26	780
Usora-Teslić	1100	465	53	750
Spreča-Stanić Rijeka	920	1944	129	320
Gostilja-Živinice	1050	185	24	650
Fojnica-Visoko	1050	721	52	1180
Fojnica-Podstijenje	1150	670	40	1140
Lepenica-Homoljska ć.	1280	177	23	740
Lašva-Merdani	1160	949	38	750
Bioštica-Bioštica	1150	411	22	345
Krivaja-Zavidovoći	1050	1387	126	680
DRUGI SLIV OVI				
Vrbas-Kozluk	1280	3161	93	1600
Vrbas-Banja Luka	1325	4280	161	1800
Una-Kostajnica	1340	8876	188	1080
Bistrica-Oplazići	1300	424	39	1060
Lim-Strmica	1050	5755	196	1490
Sutjeska-Igoče	1180	456	33	1150
Čehotina-Vikoč	1250	1296	93	670
KONTROLNI SLIV OVI				
Oskova-Donja Višća	950	151	22	730
Una-Bosanska Krupa	1460	3980	133	1030
Lim-Rudo	1050	5636	176	1448

P – prosječna godišnja visina padavina

F – površina sliva

L – dužina glavnog toka do posmatranog profila

H – visinska razlika na dužini L

Za regionalizaciju je korišten linearni regresioni model korišten od strane više autora, gdje je zavisna varijabla, odnosno jedan od parametara krive trajanja a , b , c ili d doveden u vezu sa slijedećim nezavisnim varijablama: prosječnim godišnjim padavinama na slivu (P) kao klimatskom karakteristikom sliva, te površinom sliva (F), dužinom glavnog toka-od najudaljenije tačke u slivu do posmatrane vodomjerne stanice- (L) i visinskom razlikom na toj dužini (H), kao morfološkim karakteristikama sliva.

Tabela 2. Rezultati kalibracije matematskog modela opisanog jednačinom (5)

Vodotok-stanica	Regresioni koeficijenti				Koef. korel.
	a	b	c	d	r
SLIV BOSNE					
Bosna-Reljevo	93,90	303,84	436,30	224,96	0,991
Bosna-Maglaj	350,57	1166,66	1651,65	830,54	0,990
Miljacka-Sarajevo	19,19	67,60	95,88	47,77	0,987
Usora-Teslić	37,73	152,44	238,61	124,78	0,983
Spreča-Stanić Rijeka	116,05	474,97	710,97	352,20	0,989
Gostilja-Živinice	12,98	46,23	65,88	32,68	0,990
Fojnica-Visoko	52,57	156,42	215,09	108,43	0,992
Fojnica-Podstijenje	61,65	224,14	332,11	170,35	0,987
Lepenica-Homoljska č.	14,96	41,58	51,13	24,26	0,997
Lašva-Merdani	44,00	122,38	165,47	84,75	0,993
Bioštica-Bioštica	26,30	107,41	166,60	85,03	0,987
Krivaja-Zavidovoći	98,89	381,66	563,79	282,69	0,981
DRUGI SLIV OVI					
Vrbaš-Kozluk	143,48	388,26	544,84	292,29	0,996
Vrbaš-Banja Luka	247,89	677,23	941,32	499,48	0,993
Una-Kostajnica	689,03	2010,64	2540,65	1203,82	0,992
Bistrica-Oplazići	35,50	110,89	148,41	73,09	0,988
Lim-Strmica	296,29	830,62	1133,93	588,62	0,997
Sutjeska-Igoče	49,89	180,77	260,62	129,74	0,987
Čehotina-Vikoč	59,24	206,09	289,81	141,54	0,994

Od više mogućih načina izražavanja zavisne varijable u funkciji četiri odabrane nezavisne varijable, usvojen je model predložen od strane Mimikou i Kaemaki /1/ u obliku:

$$X = A_0 F^{A_1} P^{A_2} L^{A_3} H^{A_4} \quad (6)$$

gdje je X zavisna varijabla koja predstavlja parametre krivih trajanja a , b , c i d , a A_0 , A_1 , A_2 , A_3 i A_4 su konstante, odnosno parametri regresionog modela koji se određuju.

Za definiranje parametara modela A_0 , A_1 , A_2 , A_3 i A_4 korištena je standardna, dobro poznata statistička metoda višestruke linearne regresije.

Obzirom da se metod hidrološke regionalizacije u principu, može provoditi na hidrogeološki i klimatski relativno homogenim regionima, to je on prethodno primjenjen na 10 vodotoka (12 stanica) iz sliva rijeke Bosne (tabela 1.).

Prilagodavanjem regionalnog modela, opisanog jednačinom (6), za sve parametre (a , b , c i d) vrijednostima nezavisnih varijabli, odnosno morfoklimatskim karakteristikama sliva dobivene su slijedeće regresione zavisnosti i odgovarajući korelacioni koeficijenti:

$$a = -7,808P^{0,909} F^{0,775} L^{0,227} H^{-0,101}; r = 0,984 \quad (7)$$

$$b = -0,183P^{0,099} F^{0,686} L^{0,325} H^{-0,180}; r = 0,974 \quad (8)$$

$$c = 3,560P^{-0,369} F^{0,699} L^{0,299} H^{-0,194}; r = 0,965 \quad (9)$$

$$d = 3,519P^{-0,476} F^{0,731} L^{0,255} H^{-0,184}; r = 0,963 \quad (10)$$

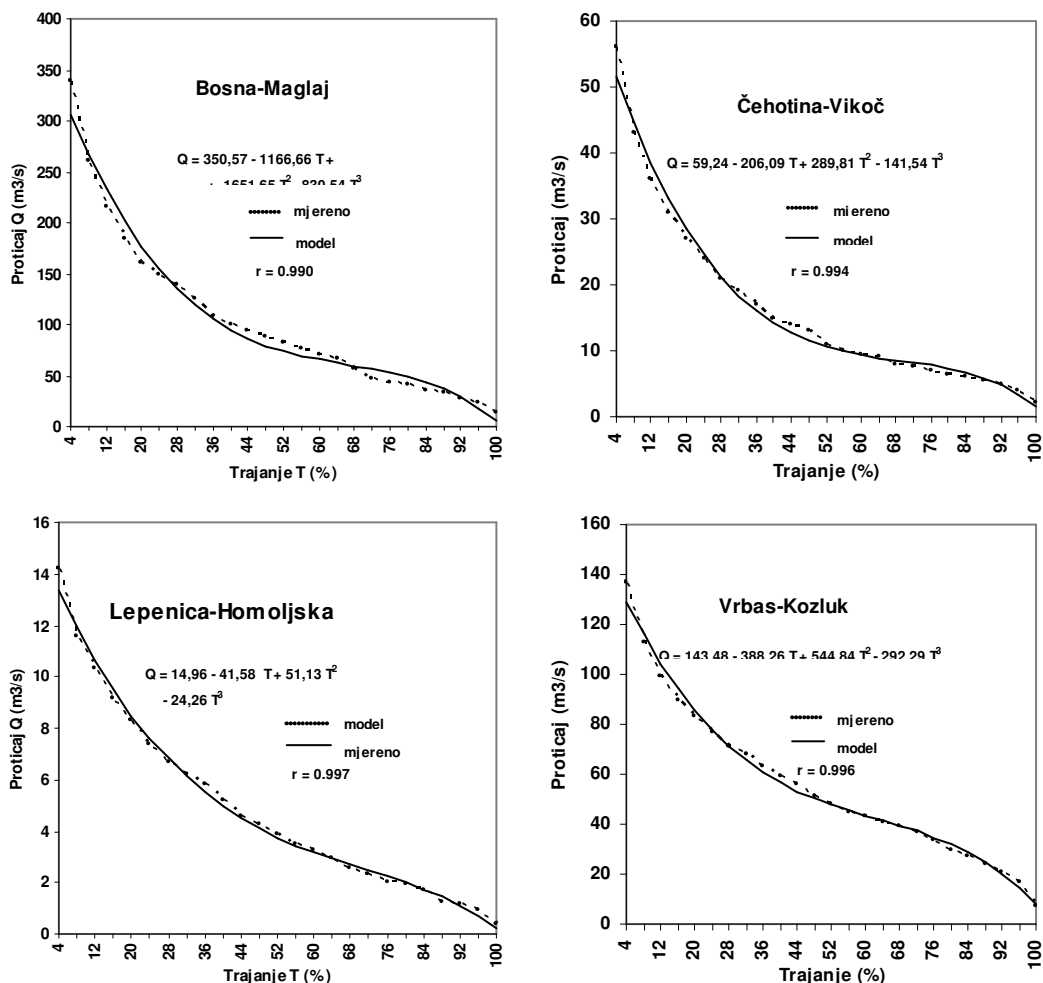
U cilju utvrđivanja uticaja na rezultate modeliranja uključivanja određenog broja vodotoka van sliva rijeke Bosne (tabela 1.), modeliranje je ponovljeno sa dodatnih 6 vodotoka (7 stanica), odnosno ukupno 19 vodomjernih stanica, što je dalo slijedeće rezultate:

$$a = -4,641P^{0,401} F^{0,891} L^{0,011} H^{-0,027} \\ r = 0,979 \quad (11)$$

$$b = 0,502P^{-0,041} F^{0,766} L^{0,161} H^{-0,115} \\ r = 0,968 \quad (12)$$

$$c = 3,118P^{-0,346} F^{0,766} L^{0,154} H^{-0,129} \\ r = 0,963 \quad (13)$$

$$d = 3,145P^{-0,469} F^{0,805} L^{0,101} H^{-0,112} \\ r = 0,963 \quad (14)$$



Slika 2. Grafički prikaz mjerenih i modeliranih krivih trajanja proticaja za neke od razmatranih vodomjernih stanica

2.3. Verifikacija modela

Imajući u vidu rezultate analize iz prethodne tačke, regionalni model predstavljen jednačinom (6) uspješno se može koristiti za procjenu karakteristika krivih trajanja preko procjene parametara a , b , c i d matematskog modela tih krivih. Drugim riječima, moguće je konstruisati sintetičke krive trajanja proticaja u formi polinoma trećeg stepena (jednačina 5), za neku drugu hidrološki neizučenu vodomjernu stanicu ili vodoprivredno interesantan lokalitet unutar hidrogeološki homogenog regiona.

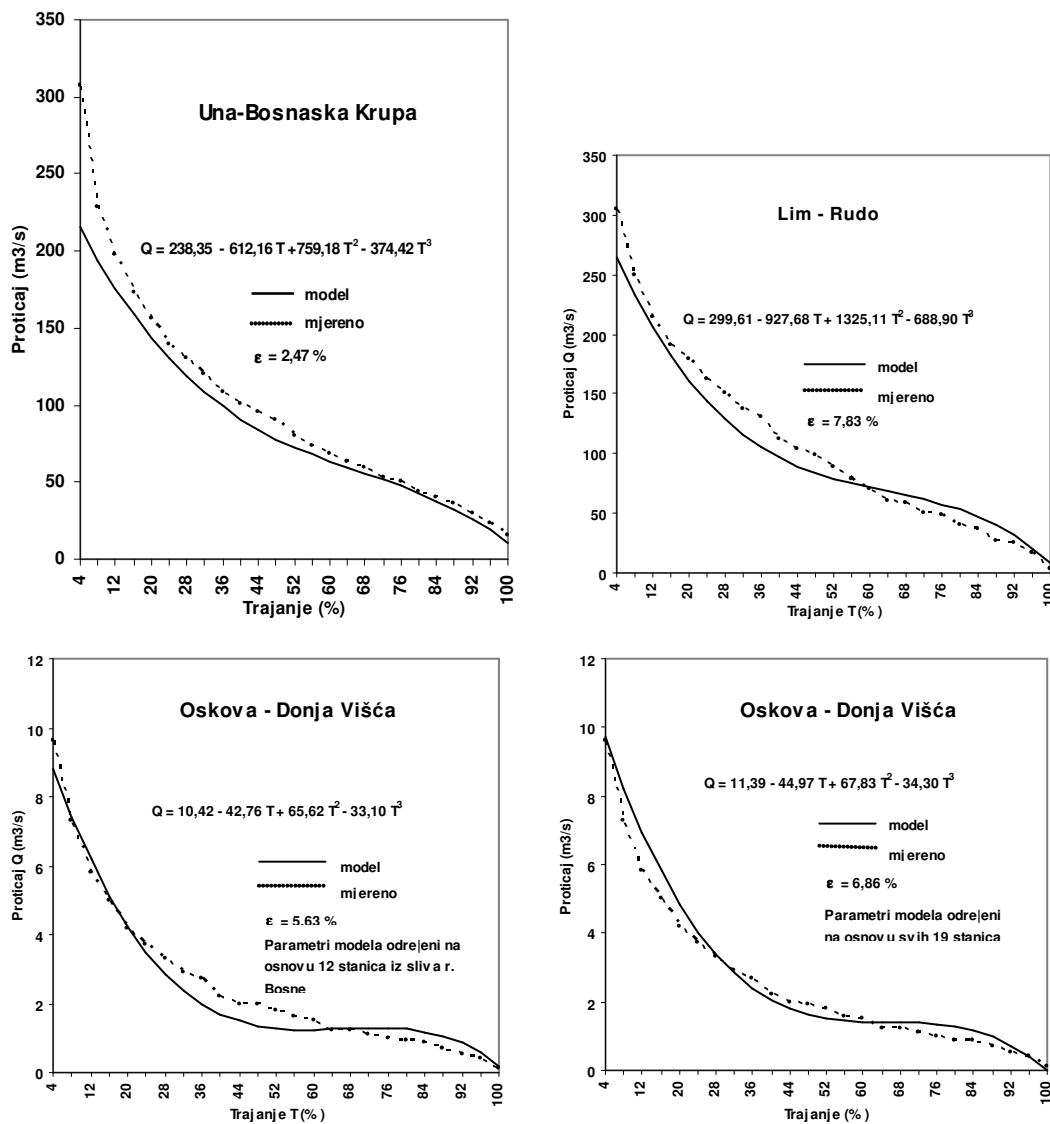
Kao što je u uvodu rečeno, kriva trajanja neće dati informacije o vremenskom rasporedu proticaja, ali uprkos tome ona jasno izražava raspoložive količine vode, te daje informacije potrebne za procjenu

hidroenergetskog potencijala na razmatranom lokalitetu. Takve informacije su vrlo često jedino i moguće u preliminarnim analizama, odnosno hidroenergetskim studijama malih hidroelektrana, sve dotle dok se mjerenjima ne prikupe drugi zadovoljavajući podaci koji obezbjeđuju upotrebu drugih, boljih metoda za takve analize.

U cilju da se izvrši verifikacija primjenjenog regionalnog modela i da se izvrši procjena njegove tačnosti za konstrukciju sintetičkih krivih trajanja proticaja na drugim lokalitetima, odabrane su tri vodomjerne stanice koje nisu korištene u ranijoj kalibracionoj proceduri: Donja Višća na rijeci Oskovi, Rudo na rijeci Limu i Bosanska Krupa na rijeci Uni. Osnovni podaci o tim stanicama, odnosno njihove morfoklimatske karakteristike date su u tabeli 1. Te

karakteristike su iskorištene da se pomoću jednačine (6) sračunaju parametri sintetičkih krivih trajanja proticaja a , b , c i d . Tako dobivene sintetičke krive trajanja upoređene su sa stvarnim krivim trajanja proticaja, konstruisanim na osnovu historijskog višegodišnjeg niza

dnevnih proticaja. Rezultati su prikazani grafički na slici 3., na kojoj je isprekidanom linijom predstavljena stvarna, a punom linijom sintetička kriva trajanja proticaja.



Slika 3. Grafički prikaz mjerenih i modeliranih krivih trajanja proticaja za kontrolne slivove

Vizuelnim poređenjem sintetičkih i stvarnih krivih trajanja lahko je uočiti dobro slaganje istih.

Da bi se kvantitativno izrazio stepen tačnosti između sintetičke i stvarne krive trajanja, određene su vrijednosti srednje kvadratne greške odstupanja ϵ kao:

$$\epsilon = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{Q_i - \hat{Q}_i}{Q_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

gdje je Q_i osmotreni proticaj, \hat{Q}_i modelom procjenjeni proticaj u vremenu $T=i$, ($i=1, 2, \dots, N$).

Određene greške su u zadovoljavajućim granicama i kreću se od $\varepsilon=2,47\%$ za stanicu Bosanska Krupa na rijeci Uni do $\varepsilon=7,83\%$ za stanicu Rudo na rijeci Limu.

Poređenjem rezultata modeliranja, preko koeficijena korelacije, za 12 stanica iz sliva rijeke Bosne (jednačine 7 do 10) i rezultata za svih 19 stanica zajedno (jednačine 11 do 14) može se uočiti da se oni praktično ne mijenjaju. Moguće objašnjenje za to vjerovatno leži u činjenici da slivna površina vodotoka ima najveći doprinos u objašnjenju svih modeliranih parametara. Mali uticaj padavina kao reprezenta klimatskih faktora sliva neki autori [3] objašnjavaju razlikom u vremenskoj skali između godišnjih padavina i modeliranih dnevnih vrijednosti proticaja sa kojima su konstruisane krive trajanja proticaja. U cilju ustanovljavanja opadanja tačnosti predviđanja sa progresivnim izbacivanjem pojedinih nezavisnih varijabli, u regresionim modelima za svaki od parametara, praćena je promjena, odnosno opadanje odgovarajućih koeficijena korelacije r . Dobiveni rezultati prikazani su u tabeli 3.

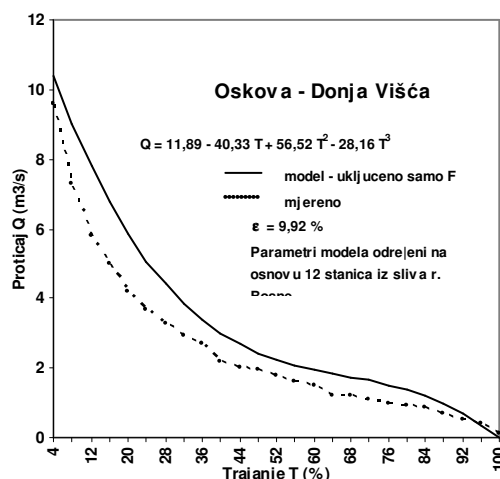
Tabela 3. Promjena vrijednosti koeficijena korelacije r sa progresivnim izbacivanjem nezavisnih varijabli

Karakteristike sliva	Konstante u modelu krive trajanja			
	a	b	c	d
P,F,L,H	0,9847	0,9742	0,9655	0,9625
P,F,L	0,9824	0,9675	0,9581	0,9559
P,F	0,9823	0,9675	0,9579	0,9555
P	0,6677	0,8828	0,9438	0,9319
L	0,6828	0,7045	0,7003	0,6928
L,H	0,9093	0,9266	0,9221	0,9164
F,L,H	0,9830	0,9742	0,9653	0,9621
F	0,9812	0,9672	0,9566	0,9544
H	0,3413	0,3352	0,3348	0,3372

Ukoliko se uporede samo vrijednosti koeficijena korelacije (date u tabeli 3.), lahko je uočiti da, ako se konstante a , b , c i d u matematskom modelu kojim se opisuju krive trajanja proticaja dovedu u vezu samo sa slivnom površinom F , vrijednosti koeficijena korelacije se praktično ne mijenja. Međutim, iskustvo autora stečeno kroz ovaj rad, ukazuje da se srednja kvadratna greška odstupanja sintetičke i stvarne krive trajanja proticaja značajno povećava sa vrlo manjim smanjenjem vrijednosti koeficijena korelacije, odnosno izbacivanjem pojedinih nezavisnih varijabli u regresionom modelu (padavine, dužina toka i visinska razlika na toj dužini).

Za ilustraciju, na slici 4. se daje prikaz sintetičke i stvarne krive trajanja proticaja za vodomjernu stanicu Donja Višća na rijeci Oskovi, gdje je sintetička kriva

trajanja određena tako što su parametri krive a , b , c i d dovedeni u vezu samo sa slivnom površinom F . Na primjer, iako je vrijednost koeficijena korelacije r , za konstantu a , smanjena sa vrijednosti $r=0,9847$ na vrijednost $r=0,9812$ (tabela 4.), vrijednost srednje greške odstupanja ε povećala se sa vrijednosti $\varepsilon=5,63\%$ na vrijednost $\varepsilon=9,92\%$.



Slika 4. Mjerena i modelirana kriva trajanja proticaja za V.S. Donja Višća na r. Oskovi (parametri a , b , c i d dovedeni u vezu samo sa slivnom površinom F)

3. DEFINIRANJE MAKSIMALNIH PROTICAJA

Opće je poznato da se maksimalni proticaji, odnosno velika voda na koju se projektuju hidrotehnički objekti, od koje u velikoj mjeri zavisi i sigurnost objekta, određuje prema više metoda. Uglavnom, izbor metode ovisi o vrsti i količini raspoloživih podataka na osnovu kojih se velika voda ocjenjuje. Kako je to u uvodu navedeno, cilj ovog rada je bio da se pokaže jedan od mogućih postupaka kojim se na osnovu raspoložive ocjene velikih voda na nizu lokaliteta na nekom hidrološki homogenom regionu, može izvršiti ocjena velikih voda na vodoprivredno potencijalnom lokalitetu na kome takva ocjena nije moguća zbog potpunog izostanka relevantnih podataka, odnosno odgovarajućih hidroloških osmatranja i mjerenja. U tom smislu rad ne razmatra procedure, odnosno metode za određivanje velikih voda za lokalitete za koje se raspoloživim fondom podataka za sprovođenje klasične statističke procedure za definiranje velikih voda odabranih povratnih perioda javljanja. Rezultati takvih proračuna za potrebe ovoga rada, preuzeti su iz ranije urađenih hidroloških studija na nizu vodomjernih stanica u slivu rijeke Bosne.

Prema mišljenju mnogih autora, za analizu maksimalnih proticaja na nekom lokalitetu, raspoloživi fond mjerenih podataka o maksimalnim proticajima trebao bi biti najmanje 10 godina [4]. Da bi se ovaj problem prevazišao koriste se svi raspoloživi podaci o maksimalnim proticajima na širem hidrološki homogenom regionu (prostoru). Prvi korak u takvoj regionalnoj analizi maksimalnih proticaja je sprovođenje testa homogenosti za sve vodomjerne stanice iz hidrološke mreže na razmatranom regionu. Test u stvari pomaže da se definira hidrološki homogen region kao takav, te iz regionalne analize isključe one vodomjerne stanice koje ne zadovolje navedeni test.

Postoji više metoda za sprovođenje testa homogenosti, ali je metod predložen od strane Darymple-a i Benson-a za potrebe U. S. Geological Survey [4] možda najšire korišten. To je i bio razlog za njegovo korištenje u ovom radu. Nakon testa homogenosti provodi se regionalna analiza maksimalnih proticaja, odnosno konstruiše bezdimenzionalna zavisnost između povratnog perioda javljanja maksimalnih proticaja, kao nezavisne promjenljive, i odnosa maksimalnih proticaja određenog povratnog perioda javljanja i prosječnog maksimalnog proticaja, kao zavisne promjenljive. Treći korak je definiranje zavisnosti između prosječnog maksimalnog proticaja i veličine slivne površine, što omogućava procjenu vrijednosti prosječnih maksimalnih proticaja na hidrološki neizučeni slivovima. Procedura provođenja testa homogenosti i regionalne analize maksimalnih proticaja može se podijeliti u slijedeće korake:

3.1. Test homogenosti

1. Prikupljanje svih podataka o proticajima na vodotocima, odnosno vodomjernim stanicama na širem prostoru hidroenergetski iskoristivog potencijalnog lokaliteta, a koje raspolažu sa minimum 10 godina osmatranja i mjerenja. Za primjer obrađen u ovom radu odabrano je 19 vodomjernih stanica iz sliva rijeke Bosne, čiji spisak sa osnovnim podacima (vodotok, vodomjerna stanica, dužina raspoloživog historijskog niza, površina sliva, karakteristične vrijednosti maksimalnih proticaja) je dat u tabeli 3.
2. Za sve odabrane vodomjerne stanice, nekom od klasičnih metoda, odrediti prosječnu vrijednost maksimalnih godišnjih proticaja \bar{Q} i vrijednosti maksimalnih godišnjih proticaja odabranih povratnih perioda (u ovom primjeru 10, 50, 100 i

1000 godina). Ti podaci, odnosno vrijednosti maksimalnih proticaja odabranih povratnih perioda javljanja za razmatrane vodomjerne stanice iz sliva rijeke Bosne dati su u tabeli 4.

3. Za sve vodomjerne stanice određuje se modulni koeficijent maksimalnog proticaja desetogodišnjeg povratnog perioda javljanja q_{10} , kao odnos maksimalnog proticaja desetogodišnjeg povratnog perioda javljanja Q_{10} i prosječnog maksimalnog proticaja \bar{Q} , odnosno $q_{10} = Q_{10} / \bar{Q}$. Sračunate vrijednosti modulnih koeficijenata date su u koloni 4 tabele 5. Nakon toga sračunava se prosječna vrijednost modulnog koeficijenta kao

$$\bar{q}_{10} = \sum_{i=1}^n q_{10} / n, \text{ gdje je } n \text{ broj vodomjernih stanica koje su uzete za analizu.}$$

4. Za sve vodomjerne stanice računa se nova vrijednost maksimalnih proticaja Q^* , koji imaju isti modulni koeficijent, jednak prosječnom modulnom koeficijentu \bar{q}_{10} , određenom na način opisan u prethodnoj tački, kao $Q^* = \bar{Q} \cdot \bar{q}_{10}$. Sračunate vrijednosti ovih proticaja date su u koloni 5 tabele 5.
5. Za sve vodomjerne stanice računa se povratni period javljanja $T(Q^*)$, maksimalnih proticaja Q^* iz prethodne tačke, pod prepostavkom da se oni prilagođavaju Gumbel-ovom zakonu raspodjele vjerovatnoće. Sračunate vrijednosti ovih povratnih perioda date su u koloni 6 tabele 5.
6. Za sve vodomjerne stanice računa se gornja i donja granica 95 % intervala povjerenja maksimalnog proticaja 10-to godišnjeg povratnog perioda javljanja, Q_{10} . U ovom radu, one su sračunate korištenjem tzv. empirijskog metoda, po kome se interval povjerenja sa koeficijentom sigurnosti $(1-\tau)$ definira kao:

$$P[Q_{10}^d < Q_{10} \leq Q_{10}^g] = 1 - \tau = 0,95 \quad (16)$$

gdje su Q_{10}^d i Q_{10}^g donja, odnosno gornja granica intervala povjerenja koje se određuje pomoću slijedećih izraza:

$$Q_{10}^{d,g} = Q_{10} \pm z_{1-\tau/2} SG_T \quad (17)$$

gdje je $z_{1-\tau/2}$ vrijednost standardizovane normalne promjenljive za odabrani koeficijent sigurnosti

(nivo povjerenja) od $(1-\tau/2)$, odnosno vrijednost standardizovane normalne promjenljive «z» za vjerovatnoću $P[Z \leq z] = F(z) = 1 - \tau/2$. SG_T predstavlja tzv. standardnu grešku procjene, koja je u stvari mjera varijabilnosti sračunatih veličina slučajne promjenljive pomoću neke od teoretskih funkcija raspodjele i računa se kao:

$$SG_T = \delta_T (S^2 / n)^{1/2} \quad (18)$$

gdje je parametar δ_T funkcija faktora frekvencije (K) i određenog broja statističkih momenata, zavisno od primjenjene teoretske funkcije raspodjele, a (S) procjenjena vrijednost standardne devijacije na osnovu uzorka. Parametar δ_T se za Gumbelovu funkciju raspodjele vjerovatnoće računa kao: $\delta_T = (1 + 1,14K + 1,1K^2)^{1/2}$, gdje je (K) faktor frekvencije za Gumbelovu raspodjelu.

Tabela 4. Spisak vodomjernih stanica sa osnovnim podacima koji su razmatrani regionalnom analizom

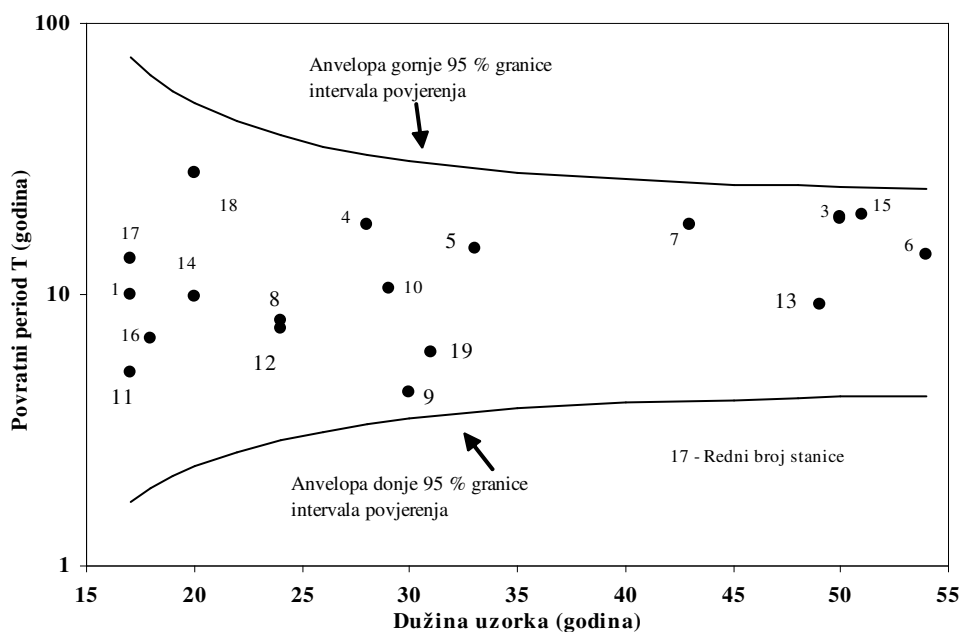
Nº	Vodotok	Vodomjerna stanica	Površina sliva F (km ²)	Dužina uzorka (godina)	Srednja vrijednost Q _{sr} (m ³ /s)	Standardna devijacija S (m ³ /s)	Q ₁₀ (m ³ /s)	Q ₅₀ (m ³ /s)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	Q ₁₀₀₀ (m ³ /s)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
SLIV RIJEKE BOSNE – MODELIRANE STANICE										
1	Bioštica	Bioštica	411	17	86	45	145	203	227	308
2	Bosna	Reljevo	1104	50	266	99	395	523	577	755
3	Bosna	Visoko	2468	50	368	138	548	726	801	1049
4	Bosna	Zavidovići	5033	28	818	313	1226	1630	1800	2363
5	Bosna	Maglaj	6619	33	1030	435	1597	2158	2395	3177
6	Bosna	Usora	7672	54	1120	487	1755	2383	2648	3524
7	Bosna	Modriča	10308	43	1383	530	2074	2757	3046	3999
8	Fojnica	Podstijenje	670	24	217	139	398	577	653	903
9	Fojnica	Visoko	721	50	137	60	215	292	325	433
10	Krivaja	Olovo	737	30	132	151	329	523	605	877
11	Krivaja	Zavidovići	1387	29	420	214	699	975	1091	1476
12	Lašva	Merdani	949	17	79	73	174	268	308	439
13	Lepenica	Homoljska č.	177	24	49	30	88	127	143	197
14	Miljacka	Sarajevo	338	49	76	42	130	185	208	283
15	Spreča	Modrac	1176	20	168	89	284	399	447	607
16	Spreča	Stanić rijeka	1944	51	244	90	361	477	526	688
17	Stupčanica	Olovske luke	285	18	83	57	157	231	262	364
18	Ukrina	Brestovo	587	17	180	79	283	385	428	570
19	Vijaka	Prnjavor	177	20	50	16	71	91	100	129
20	Željeznica	Krupačke st.	307	31	85	65	170	253	289	406
SLIV RIJEKE BOSNE – KONTROLNE STANICE										
1	Bosna	Zenica	4124	47	630	240	1010	1329	1463	1914
2	Željeznica	Ilovice	175	31	47	36	94	140	160	225

7. U slijedećem koraku crta se grafikon, odnosno zavisnost između povratnih perioda korigovanih maksimalnih proticaja 10-to godišnjeg maksimalnog proticaja, Q^* , i dužine raspoloživog uzorka/serije proticaja za svaku od stanica (slika 5). Na istom grafikonu, za svaku od stanica, nanose se gornje i donje granice intervala povjerenja maksimalnih proticaja 10-to godišnjeg povratnog perioda (Q_{10}^g i Q_{10}^d), na osnovu kojih se povlače

anvelope obje granice intervala povjerenja. Tako određene anvelope gornje i donje granice intervala povjerenja nanešene su na slici 5. Sve vrijednosti povratnih perioda javljanja koje leže van određenih granica 95 % intervala povjerenja u daljnjim analizama se ne razmatraju, odnosno smatra se da ne pripadaju jedinstvenom homogenom regionu. Za razmatrani primjer sve stanice su «položile» test homogenosti.

Tabela 5. Proračun parametara za provođenje testa homogenosti

Vodomojerna stanica	\bar{Q}	Q_{10}	$q_{10} = \frac{Q_{10}}{Q_{sr}}$	$\bar{q}_{10} \times \bar{Q}$	$T(7)$	SG_T	$Q_g = Q_{10} + 1,96 \times SG_T$	$Q_d = Q_{10} - 1,96 \times SG_T$	T_g	T_d
	(m^3/s)	(m^3/s)		(m^3/s)	(god.)	(m^3/s)	(m^3/s)	(m^3/s)	(god.)	(god.)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Bioštica	86	145	1.683	145	10	23	191	99	35	3
Reljevo	266	395	1.486	448	19	37	468	322	25	4
Visoko	368	548	1.489	620	19	52	650	447	25	4
Zavidovići	818	1226	1.499	1378	18	155	1530	923	33	3
Maglaj	1030	1598	1.551	1736	15	186	1961	1234	28	4
Usora	1120	1756	1.567	1887	14	159	2068	1443	22	5
Modriča	1383	2075	1.500	2330	18	211	2489	1660	26	4
Podstijenje	217	398	1.836	366	8	54	505	292	26	4
Olovo	132	329	2.493	222	4	41	409	249	19	5
Zavidovići	420	699	1.665	708	10	86	869	530	27	4
Merdani	79	174	2.206	133	5	28	230	119	26	4
Homoljska č.	49	88	1.799	83	8	12	112	65	26	4
Sarajevo	76	131	1.721	128	9	12	155	106	20	5
Modrac	168	284	1.691	283	10	42	367	201	32	3
Stanić rijeka	244	361	1.481	411	20	34	428	295	25	4
Olovske luke	83	157	1.896	140	7	25	206	109	29	4
Brestovo	180	283	1.573	303	14	46	373	193	41	3
Prnjavor	50	71	1.418	84	28	11	92	50	51	2
Krupačke st.	85	170	1.998	143	6	20	210	130	21	5
	$\bar{q}_{10} =$		1.713							



Slika 5. Grafička predstava testa homogenosti za regionalnu analizu maksimalnih proticaja

3.2. Regionalna analiza maksimalnih proticaja

Na osnovu vrijednosti maksimalnih godišnjih proticaja odabranih povratnih perioda javljanja (Q_{10} , Q_{50} , Q_{100} i Q_{1000}) za 19 razmatranih vodomjernih stanica iz sliva rijeke Bosne, preuzetih iz odgovarajućih tzv. hidroloških obrada tih stanica rađenih za potrebe različitih vodoprivrednih korisnika (date u tabeli 4), u drugom koraku, za svaki od odabranih povratnih perioda posebno, računaju se prosječne vrijednosti odnosa Q_T / \bar{Q} , gdje je \bar{Q} prosječna vrijednost maksimalnog godišnjeg proticaja, odnosno:

$$\bar{q}_{10} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{10} / \bar{Q}), \quad \bar{q}_{50} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{50} / \bar{Q}),$$

$$\bar{q}_{100} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{100} / \bar{Q}), \quad \bar{q}_{1000} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{1000} / \bar{Q})$$

Prosječne vrijednosti \bar{q}_{10} , \bar{q}_{50} , \bar{q}_{100} i \bar{q}_{1000} za razmatranih 19 stanica iz sliva rijeke Bosne date su u tabeli 6.

U trećem koraku određuje se zavisnost $\bar{q}_T = f(T)$, gdje je «T» razmatrana vrijednost povratnog perioda javljanja maksimalnih proticaja. Za razmatrani primjer ta zavisnost glasi:

$$\bar{q}_T = Q_T / \bar{Q} = 0,431 \ln(T) + 0,722 \quad (19)$$

a njena grafička predstava data je na slici 6. Kriva prikazana na slici 6 naziva se regionalnom krivom prosječnih modulnih vrijednosti maksimalnih godišnjih proticaja, odnosno krivom zavisnosti prosječnih modulnih vrijednosti maksimalnih godišnjih proticaja i njihovog povratnog perioda javljanja.

Na osnovu poznate regionalne krive prosječnih modulnih vrijednosti maksimalnih godišnjih proticaja, relativno jednostavno je moguće odrediti vrijednost maksimalnog godišnjeg proticaja željenog povratnog perioda javljanja, Q_T , za bilo koji lokalitet na vodnom toku koji pripada razmatranom hidrološki homogenom regionu uz poznavanje samo vrijednosti slivne površine do toga lokaliteta, F :

1. Koristeći se poznatim vrijednostima \bar{Q} i F , za sve stanice koje su razmatrane kod definiranja regionalne krive prosječnih modulnih vrijednosti maksimalnih proticaja, uspostaviti zavisnost $\bar{Q} = f(F)$.

Tabela 6. Proračun parametara za konstruisanje regionalne zavisnosti prosječnih modulnih koeficijenata maksimalnih proticaja i povratnog perioda javljanja

Vodomjerna stanica	\bar{Q} (m ³ /s)	Q_{10} (m ³ /s)	Q_{10}/\bar{Q} (m ³ /s)	Q_{50}/\bar{Q} (m ³ /s)	Q_{100}/\bar{Q} (m ³ /s)	Q_{1000}/\bar{Q} (m ³ /s)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Bioštica	86	145	1.68	2.36	2.64	3.58
Reljevo	266	395	1.49	1.97	2.17	2.84
Visoko	368	548	1.49	1.97	2.18	2.85
Zavidovići	818	1226	1.50	1.99	2.20	2.89
Maglaj	1030	1598	1.55	2.10	2.33	3.09
Usora	1120	1756	1.57	2.13	2.36	3.15
Modriča	1383	2075	1.50	1.99	2.20	2.89
Podstijenje	217	398	1.84	2.66	3.01	4.16
Olovo	132	329	2.49	3.97	4.59	6.65
Zavidovići	420	699	1.66	2.32	2.60	3.52
Merdani	79	174	2.21	3.40	3.90	5.56
Homoljska ć.	49	88	1.80	2.59	2.92	4.02
Sarajevo	76	131	1.72	2.43	2.73	3.73
Modrac	168	284	1.69	2.37	2.66	3.62
Stanić rijeka	244	361	1.48	1.96	2.16	2.82
Olovske luke	83	157	1.90	2.78	3.16	4.39
Brestovo	180	283	1.57	2.14	2.38	3.17
Prnjavor	50	71	1.42	1.83	2.00	2.58
Krupačke st.	85	170	2.00	2.98	3.40	4.78
Srednje vrijednosti			1.71	2.42	2.71	3.70

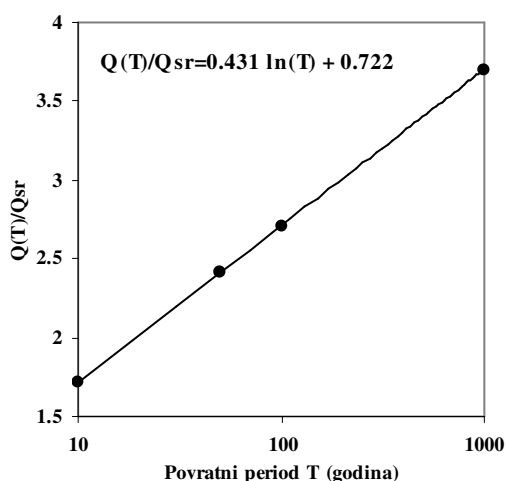
2. Za lokalitet za koji se želi odrediti vrijednost maksimalnog godišnjeg proticaja Q_T odabranog povratnog perioda javljanja T , na osnovu vrijednosti njegove slivne površine F (koja se jednostavno određuje korištenjem topografske karte odgovarajuće razmjere) na osnovu zavisnosti $\bar{Q} = f(F)$, određuje se prosječna vrijednost maksimalnog godišnjeg proticaja, \bar{Q} , za taj lokalitet.
3. Za odabrani povratni period javljanja sa regionalne krive prosječnih modulnih vrijednosti, odnosno zavisnosti $Q_T / \bar{Q} = f(T)$ određuje se odnos Q_T / \bar{Q} , iz koga se dobija odgovarajuća vrijednost Q_T .

3.3. Verifikacija modela

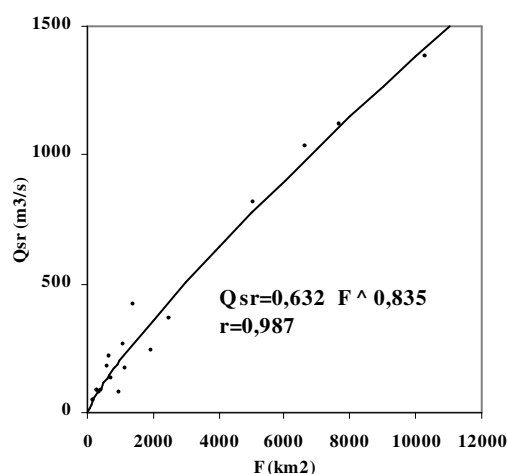
U cilju verifikacije primjenjenog matematskog modela, odnosno ocjene njegove tačnosti za definiranje velikih voda na drugim, hidrološki neizučanim lokalitetima, odabrane su dvije vodomjerne stanice koje nisu

korištene u ranijoj kalibracionoj proceduri: Zenica na rijeci Bosni i Ilovice na rijeci Željeznici. Osnovni podaci o ovim stanicama (veličina sliva, dužina historijskog niza i veličine maksimalnih proticaja razmatranih povratnih perioda javljanja) dati su u tabeli 4. Uz prethodno konstruisanu zavisnost $\bar{Q} = f(F)$, slika 7, iz koje su određeni prosječni maksimalni proticaji, \bar{Q} , na obje vodomjerne stanice, pomoću

jednačine (19), koja daje zavisnost $Q_T / \bar{Q} = f(T)$, određene su vrijednosti maksimalnih proticaja odabranih povratnih perioda javljanja. Rezultati su prikazani u tabeli 7 sa greškama odstupanja sračunatih vrijednosti po regionalnom modelu i vrijednostima određenim na osnovu historijske serije. Odstupanja se kreću u granicama od 12 do 28 %, zavisno od vodomjerne stanice i povratnog perioda javljanja.



Slika 6. Regionalna zavisnost prosječnih modulnih koeficijenata maksimalnih proticaja i povratnog perioda javljanja



Slika 7. Zavisnost prosječnog maksimalnog proticaja i veličine slivne površine

Tabela 7. Rezultati verifikacije regionalnog modela za definiranje maksimalnih proticaja

Vodotok/ stanica	Površina sliva F (km ²)	\bar{Q} (m ³ /s)		ΔQ (%)	Q_{max} (m ³ /s) za T=10 g.		ΔQ (%)	Q_{max} (m ³ /s) za T=50 g.		ΔQ (%)
		Uzorak	Model		Uzorak	Model		Uzorak	Model	
		Željeznica/ Ilovice	175		47	47		0,0	94	
Bosna/ Zenica	4124	630	660	4,7	1010	1129	11,8	1329	1452	9,2
Vodotok/ stanica	Površina sliva F (km ²)	\bar{Q} (m ³ /s)		ΔQ (%)	Q_{max} (m ³ /s) za T=100 g.		ΔQ (%)	Q_{max} (m ³ /s) za T=1000 g.		ΔQ (%)
		Uzorak	Model		Uzorak	Model		Uzorak	Model	
		Željeznica/ Ilovice	175		47	47		0,0	160	
Bosna/ Zenica	4124	630	660	4,7	1463	1788	22,2	1914	2442	27,6

4. ZAKLJUČCI

Rezultati provedenih regionalnih analiza karakteristika krivih trajanja proticaja i modulnih koeficijenata maksimalnih proticaja ukazuju na to da prikazane metode mogu dati vrlo prihvatljive rezultate u uslovima potpunog nedostatka mjerenih hidroloških podataka ili generalno tamo gdje su hidrološke informacije o količinama voda vrlo oskudne.

Matematsko modeliranje sintetičkih krivih trajanja proticaja sa 19 vodomjernih profila na vodotocima iz crnomorskog dijela sliva Bosne i Hercegovine, ukazuju da:

- Prikazani regresioni model je moguće lahko i uspješno koristiti za procjenu sintetičkih krivih trajanja proticaja na neizučeni, vodoprivredno potencijalnim lokalitetima unutar hidrološki homogenog regiona,
- Potrebni morfoklimatski ulazni podaci za model mogu se vrlo jednostavno dobiti iz topografskih karata, što se odnosi na površinu sliva, dužinu toka i visinsku razliku na toj dužini, dok se vrijednosti godišnjih padavina na slivu mogu lahko odrediti sa karte izohijeta za Bosnu i Hercegovinu,
- Najbolji matematski model za opisivanje krive trajanja je model u kome se proticaj izražava preko polinoma trećeg stepena vremena trajanja.

Matematsko modeliranje karakteristika maksimalnih proticaja na 19 vodomjernih stanica na vodotocima iz sliva rijeke Bosne ukazuju da:

- Prikazani regresioni regionalni model, ukoliko uje konstruisan za hidrološki homogen region, se može uspješno koristiti za procjenu maksimalnih

proticaja na neizučeni vodoprivredno potencijalnim lokalitetima,

- Potrebni ulazni podatak, odnosno vrijednost slivne površine za odabrani lokalitet, može se jednostavno dobiti pomoću topografske karte,
- Greške procjene tako određenih maksimalnih proticaja u odnosu na greške koje se dobivaju nekritičkim korištenjem raznih empirijskih obrazaca sa drugih regiona, a često i kontinenata, su praktično zanemarljive.

5. LITERATURA

- [1] Hrelja, H.: Definiranje sintetičkih krivih trajanja proticaja na neizučeni slivovima metodom regionalizacije, Vodoprivreda No.2. (1), Sarajevo, 1997.
- [2] Jovanović, S., Z. Radić: Regionalna analiza hidroloških parametara, Vodoprivreda No. 1. Beograd, 1985.
- [3] Mimikou M., S. Kaemaki.: Regionalization of Flow Duration Characteristics, Journal of Hydrology, 82., 1982.
- [4] Patra, K.C.: Hydrology and Water Resources Engineering, Alpha Science International Ltd., UK, 2001.
- [5] Quimpo R.G., A.A. Alejandrino, T.A. Mc Nally: Regionalized Flow Duration for Philippines, Journal Water Resources Planning Management, 109 (4),1983.

SOME ELEMENTS OF THE HYDROLOGIC REGIME CALCULATIONS
BY THE METHOD OF REGIONAL ANALYSIS

by

Husno HRELJA
Faculty of Civil Engineering, Sarajevo

Summary

The paper describes the calculation of synthetic flow duration curves and flood discharges at ungauged sites of importance for water resources management. The flow duration curves are calculated on the basis of regional multi-regressive linear mathematical modeling of the parameters of flow duration curves. Flood discharges are estimated on the base of the regional analysis of average ratios between peak flood

discharges and mean flood discharges, versus flood recurrence intervals. The obtained regressive equations can then be used to calculate synthetic flow duration curves and flood discharges at other ungauged sites within the same hydrologically-homogenous region.

Key words: regional analysis, flow duration, floods, multiregressive analysis, peak and mean discharge ratios

Redigovano 19.04.2005.