

ZAŠTITA OD BUJIČNIH POPLAVA SUSTAVOM RETENCIJA

prof.dr.sc. Neven Kuspilić, dipl.ing.građ. ^a,
asis. Kristina Potočki, dipl.ing.građ. ^b, asis. Gordon Gilja, dipl.ing.građ. ^c

SAŽETAK

Za smanjenje opasnosti od poplava bujičnim vodama često se kao tehnička mjera koriste retencije kao pojedinačne građevine ili u okviru sustava više građevina. Iznalaženje mjerodavnih oborina temeljem kojih se dimenzioniraju retencije složenije je što je složeniji sustav. Pri tome je jedan od ključnih elemenata korektno izrađen simulacijski model koji daje vjerodostojne prognoze nailazećeg vodnog vala. U radu je prikazana metoda određivanja opasnosti od poplava vezano uz vjerojatnost pojave pojedinih kišnih događaja. Dan je primjer analize na složenom slivu potoka Medveščak, kao dijela sustava odvodnje brdskih voda Medvednice za zaštitu grada Zagreba od bujičnih poplava. Kao rezultat simulacijskog modela prema predloženoj metodi dobivena je procjena opasnosti od poplava za izgrađeni sustav retencija na području sliva Medveščaka.

KLJUČNE RIJEČI: HEC - HMS, Retencija; Otjecanje; Vodni val; Opasnost od poplava

1. UVOD

Korištenje retencija, kao tehničkog rješenja zaštite od bujičnih poplava, vrlo je često u hidrotehničkoj praksi. Prema definiciji, retencije su uređeno područje u slivu vodotoka predviđeno za vremenski kraće zadržavanje vode u svrhu zaštite od poplava. Njima se regulira vodni režim vodotoka. Prema raspoloživom prostoru,

^a Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, Zagreb, 10.000, Republika Hrvatska, kuspa@grad.hr

^b Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, Zagreb, 10.000, Republika Hrvatska, kpotocki@grad.hr

^c Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, Zagreb, 10.000, Republika Hrvatska, ggilja@grad.hr

kapacitetu korita vodotoka nizvodno od retencije te hidrološkim značajkama sliva oblikuju se i dimenzioniraju građevine koje čine retenciju. Zahtjev je da retencija bude dimenzionirana tako da sigurnost od pojave poplave u nizvodnom području dosegne neki povratni period. Jedna od osnovnih dilema je vezana uz pitanje na što treba vezati taj povratni period, da li na oborinu ili na vodni val koji se javlja u koritu. Zbog razloga nelinearne veze oborina - otjecanje ne radi se o istoj pojavi, jer oborina jednog povratnog perioda ne daje vodni val istog povratnog perioda. Dodatnu složenost tome problemu daje činjenica da za isti povratni period postoji niz oborina različitog trajanja i intenziteta.

Iznalaženje oblika vodnoga vala određenog povratnog perioda za vodotoke gdje postoje mjerenja protoka zadaća je koja za rezultat ima sigurno najvjerođostojniji podatak. No u praksi ćemo naći vrlo malo primjera gdje imamo dovoljno veliki broj mjerenja temeljem kojih bi mogli matematičkom obradom odrediti mjerodavne vodne valove. Čak štoviše uglavnom nemamo nikakva mjerenja. Tada nam jedino preostaje odabir mjerodavne kiše određenog povratnog perioda kao ulazni parametar koji ćemo koristiti za određivanje projektnog vodnog vala. Iako se čini zadaća jednostavna, to i nije. Problem je u tome da je transformacija oborine u otjecanje zajedno s transformacijom vodnog vala u retenciji izrazito nelinearni proces, pogotovo u složenim slučajevima gdje se obrana od bujičnih poplava rješava sustavom retencija.

2. HIDRAULIČKI PRORAČUN RETENCIJE

Učinak retencije se očituje smanjivanjem maksimalnog protoka koji prolazi vodotokom na nizvodnom području i produljivanjem trajanja velikih voda (isti volumen vode se kroz vodotok propušta dulje vrijeme). Hidraulički proračun retencija je nestacionarni problem. Pojednostavljenje proračuna moguće je uz zanemarivanje utjecaja tečenja kroz retencijski prostor, pa se može napisati jednadžba kontinuiteta:

$$Q_{sr}^{ul} - Q_{sr}^{iz} = \frac{\Delta V}{\Delta t}, \quad (1)$$

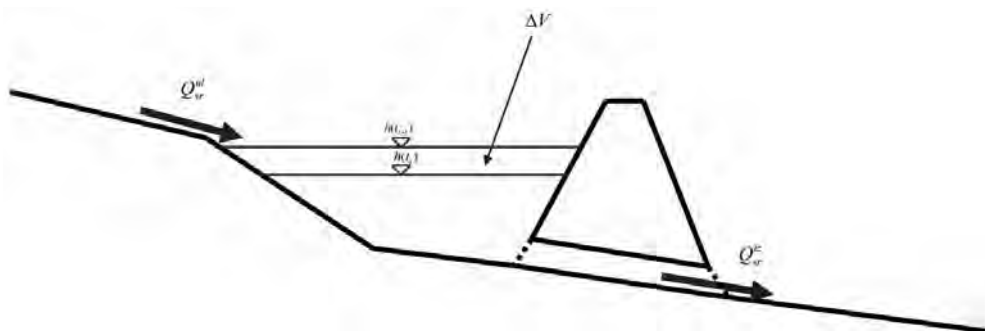
gdje su:

Q_{sr}^{ul} - Srednji protok dotjecanja u retenciju u vremenskom intervalu Δt ,

Q_{sr}^{iz} - Srednji protok otjecanja iz retencije u vremenskom intervalu Δt ,

ΔV - Promjena volumena vode u retenciji u vremenskom intervalu Δt ,

Δt - Vremenski diskretizacijski interval.



Slika 1. Definijska skica rada retencije

Ukoliko uvedemo diskretizaciju po vremenu, jednadžba (1) može se napisati u obliku:

$$\frac{Q_i^{ul} + Q_{i+1}^{ul}}{2} - \frac{Q_i^{iz} + Q_{i+1}^{iz}}{2} = \frac{V_{i+1} - V_i}{\Delta t} \quad (2)$$

gdje su:

- Q_i^{ul} - protok vode koja utječe u retenciju u trenutku i ,
- Q_{i+1}^{ul} - protok vode koja utječe u retenciju u trenutku $i+1$,
- Q_i^{iz} - protok vode koja istječe iz retencije u trenutku i ,
- Q_{i+1}^{iz} - protok vode koja istječe iz retencije u trenutku $i+1$,
- V_i - volumen vode u retenciji u trenutku i ,
- V_{i+1} - volumen vode u retenciji u trenutku $i+1$,
- i - indeks vremenskog intervala.

Prebacivanjem na lijevu stranu nepoznate veličine, a na desnu stranu poznate veličine, jednadžba (2) prelazi u oblik:

$$\left(\frac{2V_{i+1}}{\Delta t} + Q_{i+1}^{iz} \right) = (Q_i^{ul} + Q_{i+1}^{ul}) + \left(\frac{2V_i}{\Delta t} - Q_i^{iz} \right) \quad (3)$$

Nepoznate veličine vezane su zakonom istjecanja iz retencije, dok su poznate veličine definirane podacima iz ulaznog hidrograma i iz prethodnog koraka u proračunu. Ulazni hidrogram predstavlja zakonitost promjene protoka u vremenu vodnog vala koji ulazi u retencijski prostor.

Proračun učinka retencije kao rezultat mora dati izgled izlaznog hidrograma, odnosno zakonitost promjene protoka u vremenu vodnog vala koji izlazi iz retencije u nizvodni vodotok. Da bi se uz pomoć jednadžbe (3) mogla obaviti ta zadaća, moramo imati niz definiranih zakonitosti, odnosno funkcijskih veza između volumena retencije, vodostaja u retenciji, površine retencije i protoka izlaza iz retencije.

3. PRORAČUN UČINKA SUSTAVA RETENCIJA NA SLOŽENIM SLIVOVIMA

Proračun retencijskog učinka kod složenih slivova vrlo je zahtjevna zadaća. Razlog je u tome što je uobičajeni kriterij za određivanje dimenzije retencije maksimalni protok izlaza iz retencije određenog povratnog perioda. Općenito je, kada govorimo o slivovima, odnosno vodotocima na njima, unaprijed nemoguće odrediti koja će kiša fiksnog PP i intenziteta, a različitog trajanja, dati veći protok na pojedinim mjestima na vodotoku.

S druge strane krajnji nam je cilj odrediti opasnost od poplava. Metoda određivanja opasnosti od poplava sastoji se od više koraka. Prvenstveno treba odrediti kritična mjesta na slivu na kojima je primijećena smanjena propusnost korita. Ta mjesta nazivamo kritičnim točkama (KT) ili kritičnim dionicama. Na tim mjestima (ili dionicama) potrebno je odrediti kapacitet korita.

Nadalje treba izraditi hidrološko-hidraulički model sliva, unutar kojeg su definirani svi njegovi elementi (karakteristike sliva, površine, hidrografska mreža sa svim elementima korita vodotoka, retencije na slivu i njihove hidrauličke značajke, hrapavosti svih elemenata, itd.).

Dalje se provede hidrološko - hidraulički proračuni vodnih valova na kritičnim točkama, za razne intenzitete i trajanja kiša. Treba varirati kiše različitih trajanja i intenziteta pri čemu se svakoj od navedenih kišnih situacija pridružuje povratni period određen odnosom intenzitet-trajanje-povratni period (ITP krivulje) kako bi se za svaki povratni period odredila kiša koja daje maksimalni protok na pojedinim točkama na vodotoku.

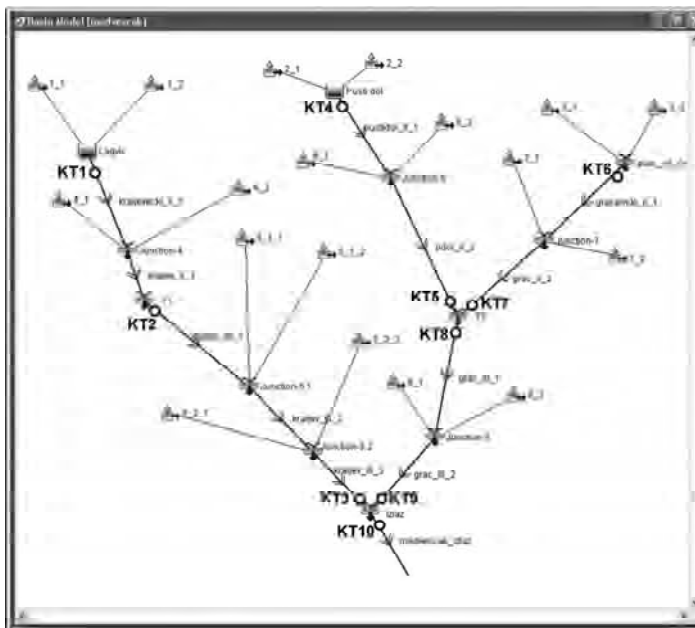
Iz dobivene veze povratnih perioda i pripadnih maksimalnih protoka, može se, na temelju poznatog kapaciteta korita na kritičnim točkama, odrediti stupanj premašnja kapaciteta korita na pojedinoj kritičnoj točki.

Navedenu metodu najbolje je prezentirati na primjeru koji se daje u nastavnom poglavlju.

4. PRIMJER PRORAČUNA KOD SLIVA POTOKA MEDVEŠČAK

Temeljem objašnjene metode načinjen je primjer proračuna na slivu potoka Medveščak u Zagrebu. Prvenstveno je bilo potrebno izraditi model cijeloga sliva sa svim geometrijskim i hidrauličkim parametrima. Na slici 2. dan je shematski prikaz sliva, na kojem su prikazani svi vodotoci, svi podslivovi i međuslivovi, sve retencije i mjesta identificirana kao kritične točke. Na kritičnim točkama definirani su kapaciteti korita vodotoka (Tablica 1.), odnosno vrijednosti protoka koji još može proći koritom a da ne dođe do izlivanja vode. Za svaki vodotok određeni su njegovi geometrijski parametri (poprečni profil, uzdužni pad, duljina) te hidraulički parametar hrapavosti. Podslivovi i međuslivovi definirani su sa svojim fizičkim karakteristikama (površina, oblik, pad, propusnost, hrapavost, ...). Retencije su određene svim funkcijskim

vezama između volumena retencije, vodostaja u retenciji, površine retencije i protoka izlaza iz retencije.



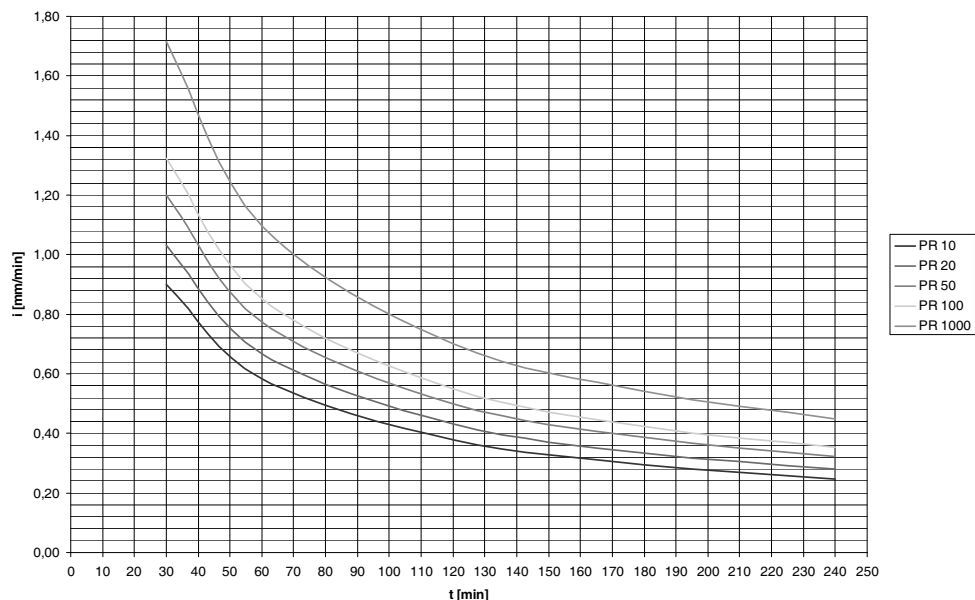
Slika 2. Shema sliva potoka Medveščak

Kritične točke na slivu određene su kapacitetom korita (Tablica 1.).

KRITIČNA TOČKA	KAPACITET KORITA [m ³ /s]
KT1	10
KT2	12
KT3	20
KT4	11
KT5	4
KT6	14
KT7	8
KT8	8
KT9	28
KT10	60

Tablica 1: Kapaciteti korita na kritičnim mjestima

Sljedeća priprema podataka sastoji se u definiranju oborina za koje će se obavljati proračuni. Oborine su određene familijom ITP krivulja (Slika 3.).



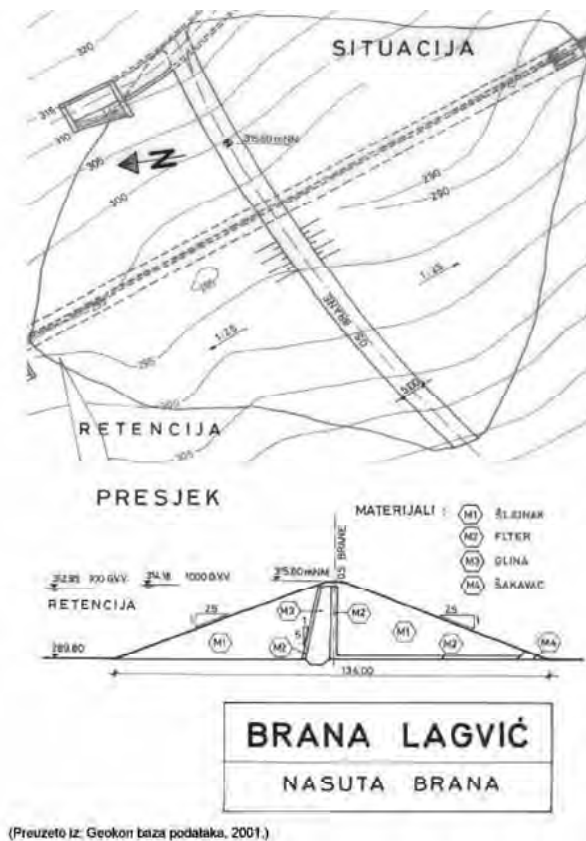
Slika 3. ITP krivulje za grad Zagreb, 1B područje

Iz definiranih familija ITP krivulja odabran je set podataka za koje će se izraditi hidrološko - hidraulički proračun. Pri tome treba uzeti u račun dovoljno veliki broj podataka kako bi se mogli dobiti relevantni podaci kao rezultat proračuna. Koji puta neće biti moguće otprve izabrati reprezentativni set podataka za sliv, već će se podaci morati nadopunjavati. Za konkretan primjer odabran je set podataka prikazan u tablici 2.

povratni period [godina]	trajanje oborina [min]									
	10	60	90	120	150	180	240	330	480	
20	60	90	120	150	180	240	330	420	480	
50	60	90	120	150	180	240	330	420		
100	60	90	120	150	180	240	330	420		
1000	30	60	90	120	150	180	240	330		

Tablica 2. Odabrane situacije oborina iz ITP krivulja za proračune

Funkcijske veze između volumena retencije, vodostaja u retenciji, površine retencije i protoka izlaza iz retencije dobivene su temeljem geometrijskih i hidrauličkih karakteristika retencija.



Slika 4. Situacija i presjek brane Lagvić

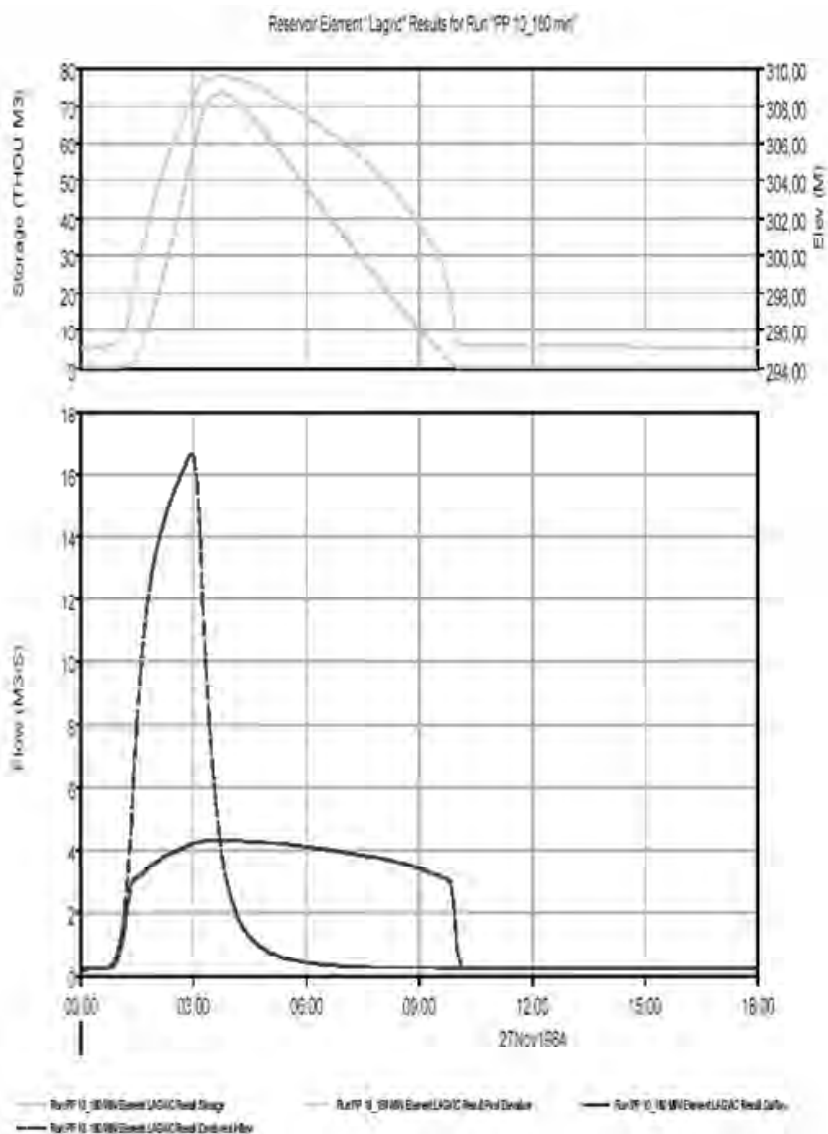
5. REZULTATI PRORAČUNA

Redoslijed provedene analize sastoji se od sljedećih koraka:

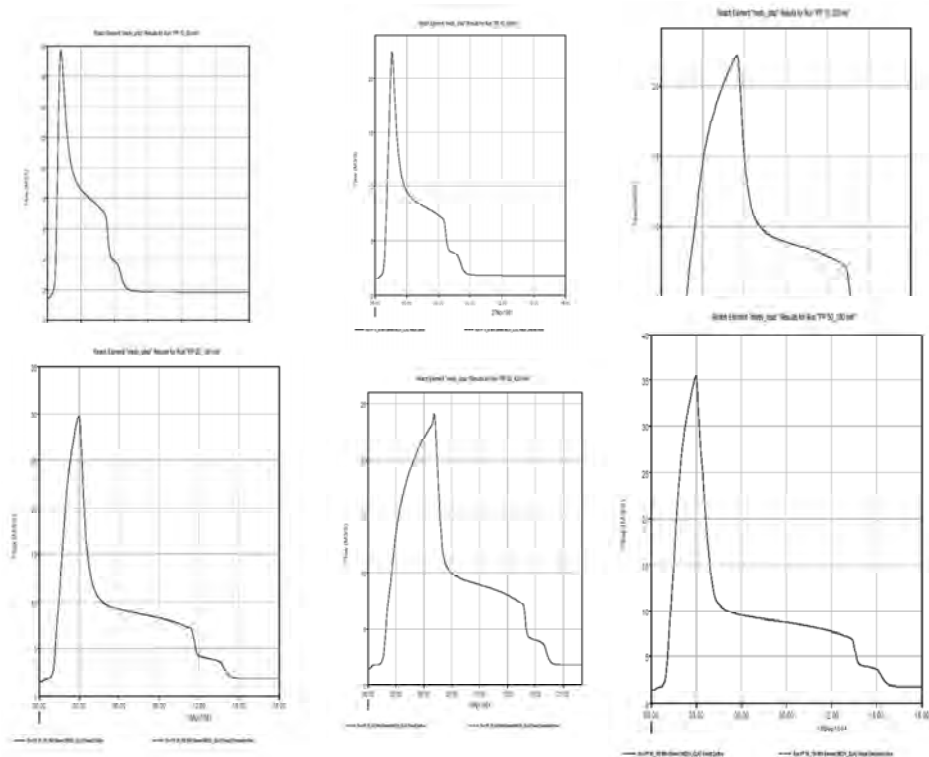
- Za kritične točke se za različite kišne situacije izrade hidrogrami (svaki hidrogram odgovara jednoj kiši jednog trajanja i jednog povratnog perioda), primjer na slici 6.,
- Izrade se krivulje najvećih maksimalnih vrijednosti protoka iz hidrograma za različite povratne periode i trajanja kiše (za svaku kritičnu točku), primjer na slikama 7. i 8.,
- Iz krivulja najvećih maksimalnih vrijednosti protoka očitaju se najveće vrijednosti za pojedini povratni period i izrade zavisnosti PP-Qmax (za svaku KT), primjer na slici 9.,

- Iz tih se krivulja za kapacitet korita očita pripadajući povratni period. Inverzna vrijednost povratnog perioda predstavlja vjerojatnost da će doći do izlivanja vode iz korita.

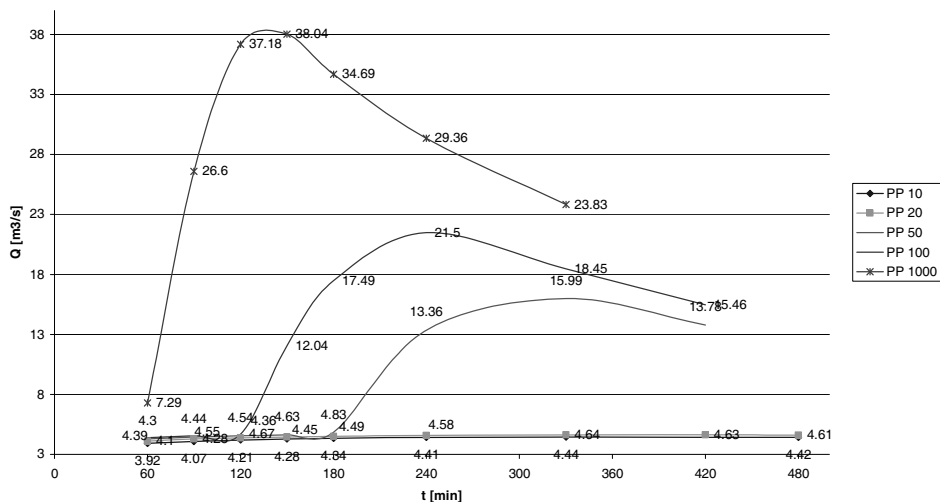
Nastavno će biti prikazani rezultati proračuna, odnosno samo dio najzanimljivijih prikaza koji ilustriraju cijeli postupak.

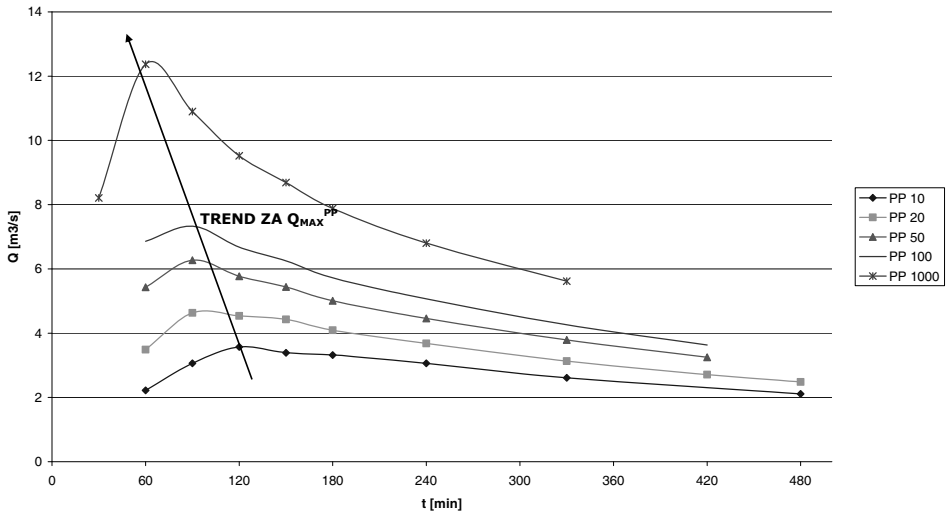


Slika 5. Prikaz izlaznih rezultata za retenciju Lagvić (krivulje vremenske promjene volumena i vodostaja u retenciji, hidrograme ulaza i izlaza iz retencije) kod kiše PP 10 godina i trajanja 180 minuta

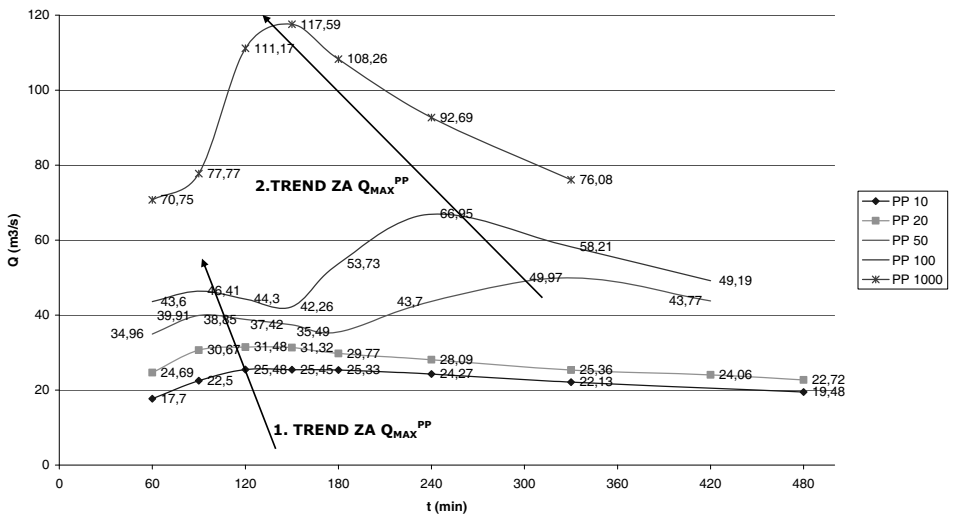


Slika 6. Neki od hidrograma za kritičnu točku KT10 kod kiša različitih trajanja i PP

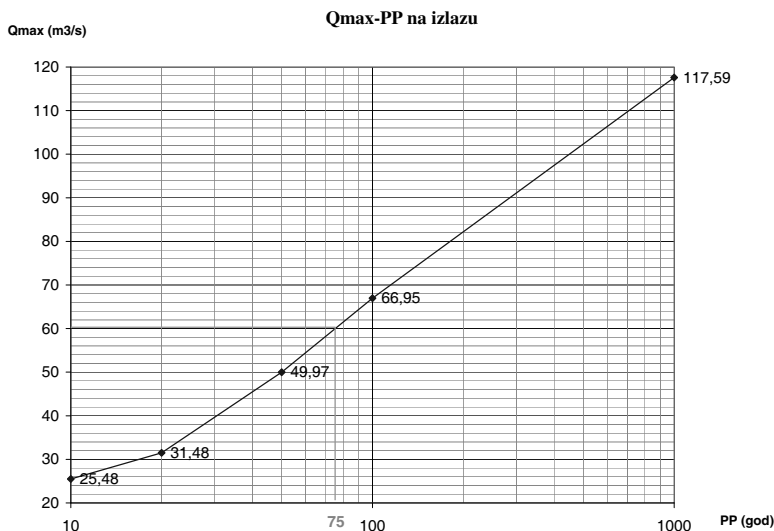




Slika 7. Krivulje najvećih maksimalnih vrijednosti protoka iz hidrograma za različite povratne periode i trajanja kiše (za kritične točke KT1 i KT6)



Slika 8. Krivulje najvećih maksimalnih vrijednosti protoka iz hidrograma za različite povratne periode i trajanja kiše (za kritičnu točku KT10)



Slika 9. Zavisnost najvećih maksimalnih vrijednosti protoka za pojedini povratni period: PP-Qmax (za KT10)

Treba prokomentirati postojanje lokalnih ekstrema na krivuljama za PP 100 i PP 50 godina (Slika 8.), što nam ukazuje na potrebu provođenja proračuna za dovoljan broj trajanja kiše, kako ne bi slučajno zbog neke uštede u vremenu „promašili“ pravi maksimum i zbog toga izveli krive zaključke.

Konačno, nakon svih provedenih analiza potrebno je kapacitetu korita pridružiti pripadajući povratni period i odrediti vjerojatnosti da će doći do izlivanja vode iz korita. U tablici 3. prikazani su rezultati te analize za prikazani primjer.

KRITIČNA TOČKA	KAPACITET KORITA [m ³ /s]	PP [godina]	VJEROJATNOST
KT1	10	32	0,0313
KT2	12	25	0,0400
KT3	20	18	0,0556
KT4	11	26	0,0385
KT5	4	7,5	0,1333
KT6	14	>1000	>0,0010
KT7	8	24	0,0417
KT8	8	5	0,2000
KT9	28	63	0,0159
KT10	60	75	0,0133

Tablica 3. Zaključni rezultati analize sliva potoka Medveščak za prikazani primjer

Iz tablice 3. se može vidjeti da, osim na kritičnoj točki KT6, ne dobivamo potrebnu sigurnost od plavljenja na kišu $PP > 100$ godina ni na jednoj od preostalih 9 kritičnih točaka. Na temelju ove analize zaključuje se da postojeći sustav retencija obavlja samo djelomično svoju funkciju i nema dostatnu sigurnost od kiša povratnih perioda 100 godina.

Na kraju treba zaključiti da je za prikazani primjer bilo potrebno provesti veliki broj proračuna za:

- 5 povratnih perioda (10, 20, 50, 100 i 1.000 godina),
- 8 trajanja kiše (iz raspona 30, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 330, 420 i 480 min),
- 10 kritičnih točaka na slivu,

što ukupno iznosi $5 \times 8 \times 10 = 400$ proračuna. Broj provedenih proračuna je bio potreban samo za jednu geometriju retencija. Proporcionalno broju varijantnih rješenja povećava se i broj potrebnih analiza i on može dosegnuti stvarno veliki broj. No ta nas činjenica nikako ne smije obeshrabriti i pokolebati u procesu iznalaženja najboljeg tehničkog rješenja sa aspekta zaštite od poplava.

ZAKLJUČAK

Procjena opasnosti od poplava je vrlo složen postupak, zbog niza čimbenika koje je moguće svrstati u dvije kategorije. Prva kategorija je opasnost pojave hidrološki nepovoljnog događaja, a druga kategorija je vezana uz pouzdanost funkcioniranja sustava. U ovome radu dana je metoda procjene samo dijela opasnosti vezanog uz pojavu hidrološki nepovoljnog događaja u slučaju primjene retencija kao tehničke mjere zaštite od poplava.

Općenito je, kada govorimo o slivovima, odnosno vodotocima na njima, unaprijed nemoguće odrediti koja će kiša fiksnog PP i intenziteta, a različitog trajanja, dati veći protok na pojedinim mjestima na vodotoku. Prikazanom metodom moguće je relativno točno odrediti koja kiša daje najnepovoljniju situaciju na pojedinim točkama branjenog područja. Svakoj toj kiši pridružen je povratni period, odnosno vjerojatnost pojave. Usporedbom s kapacitetom korita dobiva se veličina opasnosti od poplava. Takvi podaci vrijedni su pokazatelj za stratešku odluku planera o potrebi izgradnje ili dogradnje sustava za zaštitu od poplava za pojedina područja.

LITERATURA

- [1] Hydrologic Modeling System; Technical Reference Manual, March 2005, Approved for Public Release - Distribution Unlimited.
- [2] Hydrologic Modeling System; User's Manual, Version 2.1, January 2001, Approved for Public Release- Distribution Unlimited.
- [3] Hydrologic Modeling System; Applications Guide, December 2002, Approved for Public Release- Distribution Unlimited.
- [4] Primijenjena hidrologija, Dionis Srebrenović, Tehnička knjiga Zagreb, 1986.
- [5] Applied hydrology, Ven Te Chow, McGraw-Hill Book Company, New York, 1988.
- [6] Analiza dostignutog stupnja sigurnosti od poplava bujičnih voda grada Zagreba. izgradnjom retencija i daljnje planiranje sustava, (2005) Hidroinženjering, Zagreb
- [7] IDVOZG - Izmjene i dopune Vodoprivredne osnove grada Zagreba (1992).
- [8] NOVAK., K., KUSPILIĆ, N., KUNŠTEK, D., *The Flood Risk Analysis of Areas Defended by Retention System*, Proceedings of 10th International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, Šibenik, Croatia, 4-9 September 2007.

