

Ратко Ристић

UDK: 627.14
Прегледни рад

ВРЕМЕ КАШЊЕЊА ОТИЦАЈА НА БУЈИЧНИМ СЛИВОВИМА У СРБИЈИ

Извод: Максималан протицај одређене вероватноће појаве $Q_{\max(p)}$ представља основни улазни податак за пројектовање подужних и попречних објеката у коритима бујичних токова. Прорачун максималног протицаја Q_{\max} , на неизученим сливовима, обавља се најчешће применом теорије синтетичког јединичног хидрограма и SCS методологије за раздвајање ефективних P_e од укупних падавина P_b . Анализирана је једна од основних временских карактеристика великих вода: време кашњења t_p . Време кашњења је одређено на основу обраде хидрограма и издвајања репрезентативних јединичних хидрограма на 93 профила. За исти број профила су одређене неке доминантне физичко-географске карактеристике сливова (површина слива A , дужина слива по главном току L , одстојање од тежишта до излазног профила L_c , уравни пад речног корита I_u , средњи нагиб терена у сливу I_{sr}), што је био основ за извођење различитих зависности ($t_p = f(L, L_c, I_u)$; $t_p = f(L, L_c, I_u, I_{sr})$). Дефинисан је однос времена кашњења t_p и времена концентрације T_c ($t_p = f(T_c)$).

Кључне речи: бујична поплава, време кашњења, максималан протицај, јединични хидрограм

LAG TIME ON TORRENTIAL CATCHMENTS IN SERBIA

Abstract: Maximal discharge $Q_{\max(p)}$ is the basic input data for designing longitudinal and transversal objects in torrential beds. Calculation of maximal discharge Q_{\max} , on unstudied catchments, is carrying out by usage the theory of synthetic unit hydrograph and SCS methodology for separation effective rain P_e by total rainfall P_b . One of the basic time characteristics of torrential floods was analyzed: lag time t_p . Lag time t_p was determined on the basis of processing of hydrographs and deriving representative unit hydrographs, on 93 control profiles. Dominant physical-geography characteristics were determined: magnitude of the catchment area A , length of the catchment area along the main stream L , the distance from the centroid of the catchment area to the outlet profile L_c , average slope of the river bed I_u , average slope of terrain on the catchment area I_{sr} . Lag time and dominant physical-geography characteristics were the basis for deriving some equations with regional

др Ратко Ристић, доцент, Шумарски факултет Универзитета у Београду, Београд

significance ($t_p = f(L, L_c, J_u)$; $t_p = f(L, L_c, I_u, I_{sr})$). The relation between lag time t_p and time of concentration T_c was determined ($t_p = f(T_c)$).

Key words: torrential flood, lag time, maximal discharge, unit hydrograph

1. УВОД

Прорачун максималног протицаја одређене вероватноће појаве $Q_{\max(p)}$ представља основни улазни податак приликом димензионисања објеката, који се изводе у коритима бујичних токова (попречни објекти: преграде, прагови, појасеви, мање насуте бране, отвори мостова; подужни објекти: регулације корита, обалоутврде, путни пропусти). У Србији има 9260 бујичних токова (Гавриловић, 1975) од којих је највећи део потпуно или недовољно изучен. Термин потпуно неизучен односи се на водотокове где нема мерења водостаја, односно, протицаја, а недовољно изучен где се обављају у низу краћем од 15 година (Прохаска, Петковић, 1989).

На изученим бујичним токовима користе се статистичке анализе, које се своде на примену неке од теоријских функција расподеле вероватноћа, на расположиви низ годишњих максималних протицаја, при чему се усваја она расподела која показује највеће прилагођавање емпиријским тачкама (1987). Овакав приступ у прорачуну максималног протицаја се ретко примењује, због чињенице да је огромна већина бујичних токова неизучена (Ристић, 2000). На неизученим сливовима се примењују прорачуни засновани на принципу трансформације рачунске кише у рачунски протицај (Нан *et al.*, 1982). У бујичарској пракси Србије прорачун максималног протицаја одређене вероватноће појаве (обично $p=1,0\%$), на неизученим сливовима се обавља комплексним поступком, чије основне компоненте добијамо на основу:

- примене теорије синтетичког јединичног хидрограма за израчунавање максималног јединичног отицаја q_{\max} ;
- примене SCS методологије за одвајање ефективне (нето) кише P_e од укупне (брuto) кише P_b .

На основу израчунатих вредности максималног јединичног отицаја q_{\max} и висине ефективне кише P_e добија се максималан протицај Q_{\max} :

$$Q_{\max} = q_{\max} \cdot P_e [m^3 \cdot s^{-1}], \dots \dots \dots (1)$$

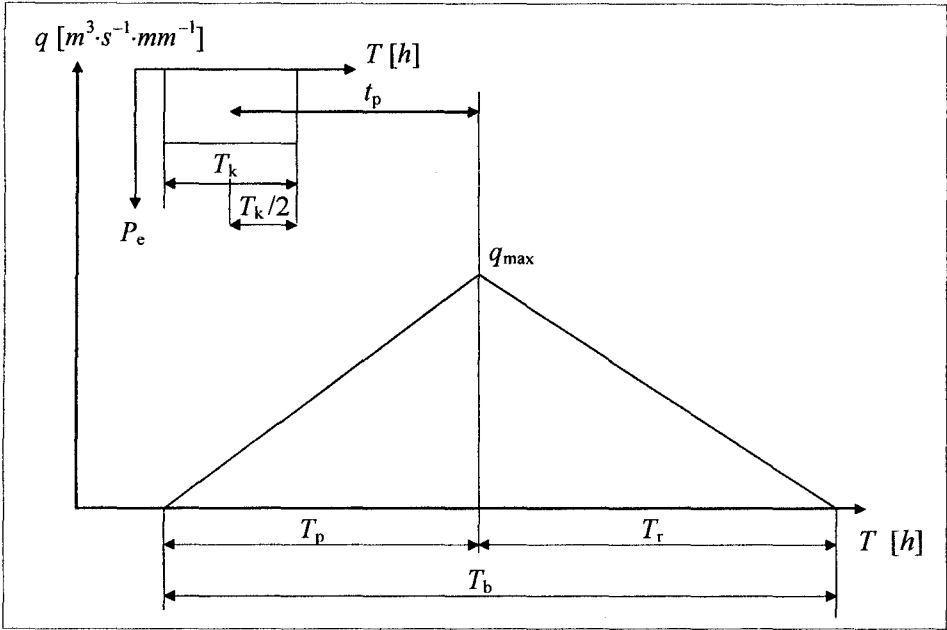
где су: P_e - ефективна киша [mm] и q_{\max} - максимална ордината синтетичког јединичног хидрограма [$m^3 \cdot s^{-1} \cdot mm^{-1}$].

$$q_{\max} = \frac{0,56 \cdot A \cdot 1,0}{T_b}, \dots \dots \dots (2)$$

где су: A - површина слива [km^2], T_b - временска база синтетичког јединичног хидрограма [h], која се добија као

$$T_b = T_p + T_r, \dots \dots \dots (3)$$

при чему су: T_p - време пораста хидрограма [h], које се израчунава као



Слика 1. Синтетички јединични хидрограм
 Figure 1. Synthetic unit hydrograph

$$T_p = \frac{T_k}{2} + t_p, \dots \dots \dots (4)$$

T_k - трајање ефективне кише [h], t_p - време кашњења слива [h] и T_r - време опадања хидрограма [h], које се добија се као

$$T_r = k \cdot T_p, \dots \dots \dots (5)$$

где је k - коефицијент облика хидрограма.

Хидрограм представља визуелни приказ промене протицаја воде у функцији времена, и као такав он репрезентује својства слива, која имају одлучујући, и условно речено сталан, утицај на однос падавина и резултујућег отицаја. Хидрограм је последица интегрисаног дејства падавина и доминантних својстава слива (величина; облик; густина хидрографске мреже; начин коришћења земљишта; рапавост падина и корита; геометријске карактеристике корита; нагиби падина и речног корита; инфилтрациони капацитет земљишта). Из овога следи да синтетички јединични хидрограм мора изражавати основна својства слива и карактеристичних падавина. У условима неизучених сливова примењује се синтетички јединични хидрограм, чији су основни елементи: време кашњења слива t_p ; ефективна киша трајања T_k ; време пораста хидрограма T_p , време опадања хидрограма T_r и максимална ордината јединичног отицаја q_{max} (слика 1). Синтетички јединични хидрограм на неизученим

сливовима се може конструисати преко зависности добијених на основу истраживања у појединим регионима. Такав приступ обавезује да се примена регионалних зависности у другим областима пажљиво анализира, у смислу њихове употребљивости (Ристић, 2000).

Прорачун максималног протицаја Q_{\max} на основу вршне ординате синтетичког јединичног хидрограма q_{\max} и ефективне кише P_e (према SCS методологији) представља стандард у бујичарској и широј хидролошкој пракси, када су у питању неизучени сливови. Републички Хидрометеоролошки Завод Србије издаје мишљења (према Закону о водама, члан 15, Службени гласник РС, № 46/91) о великим водама за све подужне и попречне објекте у коритима водотока, а време кашњења је неопходна компонента прорачуна. Време кашњења слива t_p (слика 1) представља интервал од центра хијетограма ефективне кише до врха хидрограма поплавног таласа (Huggins *et al.*, 1982).

2. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД РАДА

Истраживање је обухватило готово целу територију Србије, сем Војводине. Коришћени су подаци са сливних површина $10 < A < 1268 \text{ km}^2$, односно, сви мерни профили опремљени лимниграфом, из осматрачке мреже Републичког Хидрометеоролошког Завода Србије. Војводина није обухваћена овим истраживањем, односно, подручја Фрушке Горе и Вршачког Брега која су угрожена честим бујичним поплавама, а разлог је непостојање мерних профила. У раду су коришћене хидролошке станице лоциране на профилима унутар следећих сливних подручја: Велике, Јужне и Западне Мораве, Ибра, Вардара, Струме, Белог Дрима, Дунава (директне десне притоке Млава, Пек, Поречка река и Бели Тимок), Саве (директне десне притоке Думача и Добрава), Колубаре и Дрине. Практично, територија Србије, јужно од Саве и Дунава, третира се као истраживано подручје. Обрађени су нивограми са хидролошких станица опремљених лимниграфом. Дискретизација је вршена за временски интервал $\Delta t = 1 \text{ h}$ (1994). Нивограми $H(t)$ су трансформисани у хидрограме $Q(t)$, преко одговарајућих кривих протицаја. Обављен је преглед лимниграфских трака са 127 сталних и привремених хидролошких станица. Обухваћен је читав период рада лимниграфа, на појединим станицама, закључно са 1997. годином. Анализа режима падавина је обављена обрадом оригиналних плувиографских трака са 24 станице, и коришћењем оригиналних записника са око 700 станица са стандардним кишометром. Издвојени су јединични хидрограми за 93 профила, на основу којих су одређени репрезентативни јединични хидрограми, као и одговарајућа времена кашњења слива t_p .

Детерминисане су доминантне физичко-географске карактеристике за 93 слива: површина A , дужина по главном току L , одстојање од излазног профила до тачке у кориту најближе тежишту слива L_c , уравнати пад тока I_u , средњи нагиб терена у

сливу I_{sr} . Физичко-географске карактеристике су дефинисане на основу обраде карата $R=1:50000$, сем за неколико сливова површине $A < 50 \text{ km}^2$, где су коришћене карте $R=1:25000$. Уравнати пад тока је одређен коришћењем програма PAD (програмски језик Basic, оперативни систем DOS), аутора Драгана Малошевића (1996. год.). Приликом одређивања тежишта слива, на површинама $A > 100 \text{ km}^2$, коришћене су карте $R=1:100000$ и $R=1:200000$.

Дефинисана времена кашњења t_p , уз детерминисане физичко-географске карактеристике сливова (A, L, L_c, I_w, I_{sr}), послужила су као основ за извођење регресионих зависности за израчунавање времена кашњења t_p на неизученим сливовима. Регресионе анализе су изведене коришћењем статистичког програма Stat Work за Macintosh рачунаре, а дијаграми су израђени у програму Excel.

3. ПРЕГЛЕД ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА ВРЕМЕНА КАШЊЕЊА

Један од неопходних улазних података за прорачун максималног јединичног отицаја q_{max} , у методи синтетичког јединичног хидрограма, јесте време кашњења слива t_p . Појам времена кашњења t_p у хидролошку литературу први је увео Snyder 1938. год. (С h o w, 1988). На основу истраживања спроведених на сливовима величине $30\text{-}30000 \text{ km}^2$, на Апалачким планинама у Северној Америци, он је дефинисао појам стандардног јединичног хидрограма (standard unit hydrograph), чија важна карактеристика дефинише однос времена кашњења t_p и трајања ефективне кише T_k (Huggins *et al.*, 1982):

$$t_p = 5,5 \cdot T_k \text{ [h]}. \dots \dots \dots (6)$$

Истраживања Snyder-а су довела до релације за израчунавање времена кашњења слива t_p , на основу познатих физичко-географских карактеристика:

$$t_p = C_1 \cdot C_t \cdot (L \cdot L_c)^{0,3} \text{ [h]}, \dots \dots \dots (7)$$

где је: $C_1=0,75$, C_t - добија се на основу анализе издвојених јединичних хидрограма у региону, L - дужина слива по главном (најдужем) току, од вододелнице до излазног профила [km], L_c - одстојање од излазног профила до тачке у кориту главног тока, која је најближа тежишту слива [km].

U.S. Army Corps of Engineers је 1959. године представио неке модификације Snyder-ових зависности, уз дефинисање 5 значајних карактеристика задатог јединичног хидрограма (required unit hydrograph), где је један од најважнијих улазних података поред времена кашњења t_p , дата екстремна киша (given excess rainfall) (Huggins *et al.*, 1982).

Linsley, Kohler и Paulhus (1948, 1975, 1994) су представили зависност за израчунавање времена кашњења t_p , која је одређена на основу анализе регистрованих хидрограма на 20 сливова у Северној Америци, површине $A=10\text{-}1700 \text{ km}^2$:

$$t_p = C_t \cdot \left(\frac{L \cdot L_c}{\sqrt{I_u}} \right)^n [h], \dots \dots \dots (8)$$

где је I_u - уравни пaд главног тока [%], и представља нов параметар у односу на претходну једначину док остали имају исто значење. Исти аутори време кашњења t_p поистовећују са временом концентрације T_c .

SCS (Soil Conservation Service) 1972. год. сугерише, на основу регистрованих јединичних хидрограма са природних сливова, да се однос времена кашњења t_p и времена концентрације T_c може представити следећом релацијом:

$$t_p \cong 0,6 \cdot T_c [h]. \dots \dots \dots (9)$$

У домаћој хидролошкој пракси обављено је истраживање за слив Колубаре, на 7 контролних профила (Јанковић, 1971). Резултат истраживања је релација, често цитирана у стручним публикацијама и уџбеницима, а готово незаобилазна у пројектној документацији, за израчунавање времена кашњења t_p :

$$t_p = 0,75 \cdot \left(\frac{L \cdot L_c}{\sqrt{I_u}} \right)^{0,37} [h]. \dots \dots \dots (10)$$

На основу истраживања сливова река Вучице, Мирне и Топчидерске одређе-на је следећа зависност за израчунавање времена кашњења t_p (Брајковић, Јовановић, 1979-1981):

$$t_p = 0,65 \cdot \left(\frac{L \cdot L_c}{\sqrt{I_u}} \right)^{0,37} [h]. \dots \dots \dots (11)$$

Истраживања у Северној Америци показала су да вредности параметра C варирају од $C=0,30-0,90$ (Јовановић, 1974); за слив Колубаре $C=0,75$; за сливове Вучице, Мирне и Топчидерске реке $C=0,65$.

Анализом већег броја јединичних хидрограма на датом профилу, може се утврдити да време кашњења није константа (Брајковић, Јовановић, 1971), већ да зависи од трајања кише:

$$t_p = a \cdot T_k + t_0 [h]. \dots \dots \dots (12)$$

Параметар a зависи од површине слива ($a=0,30-0,60$, за сливове површине $A=20-160 \text{ km}^2$), док је то време кашњења тренутног јединичног хидрограма.

4. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

4.1. Анализа времена кашњења t_p

Време кашњења t_p је анализирано на сливовима на којима се врше вишегодишња мерења нивоа воде (протицаја) и падавина. Добијене зависности $t_p=f(L, L_c, I_u)$ и $t_p=f(L, L_c, I_u, I_{sr})$ служе за израчунавање времена кашњења t_p на сливовима

који су хидролошки неизучени. Коришћењем представљених зависности ($y=a \cdot x^b$) време кашњења t_p на неизученим сливовима се може израчунати на основу неких познатих физичко-географских карактеристика слива (L, L_c, I_u, I_{sr}), које се једноставно одређују стандардним методама, са расположивих топографских карата.

$$t_p = 0,751 \cdot \left(\frac{L \cdot L_c}{\sqrt{I_u}} \right)^{0,336} [h] \dots \dots \dots (13)$$

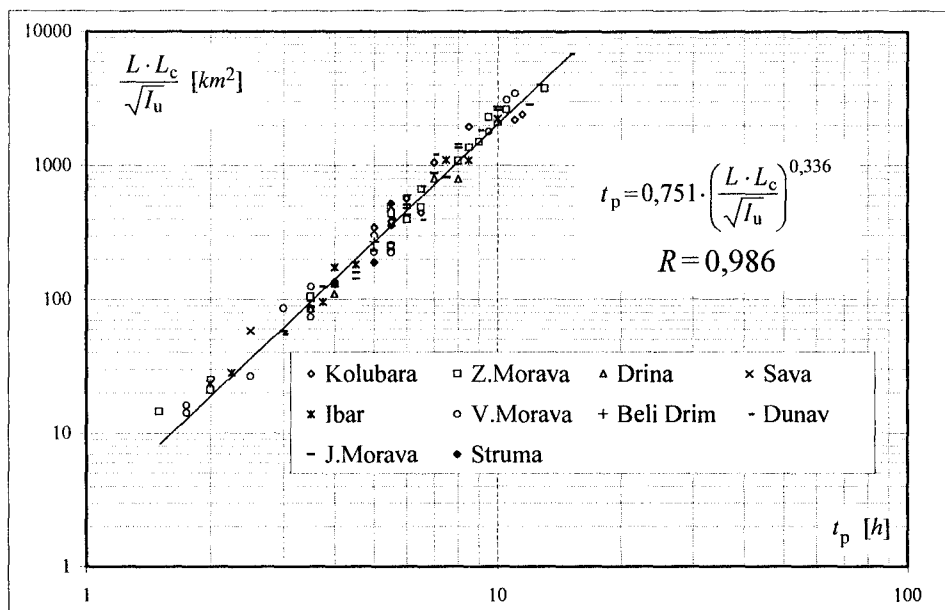
где су L и L_c изражени у km , а I_u у $\%$.

Релација (13) је изведена на основу резултата истраживања на 93 контролна профила (слика 2), а по облику ($y=a \cdot x^b$) следи стандард у светској и домаћој хидролошкој литератури. У односу на релацију (10) даје мање вредности времена кашњења t_p .

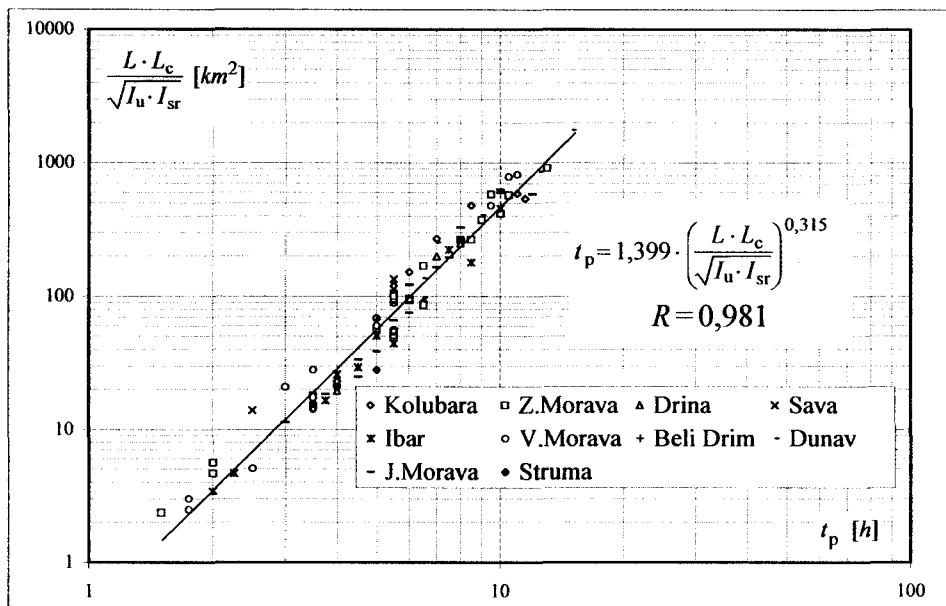
$$t_p = 1,399 \cdot \left(\frac{L \cdot L_c}{\sqrt{I_u \cdot I_{sr}}} \right)^{0,315} [h], \dots \dots \dots (14)$$

при чему су L и L_c изражени у km , а I_u и I_{sr} у $\%$.

Релација (14) у коју је укључен параметар средњег нагиба терена у сливу I_{sr} , даје нешто веће вредности времена кашњења t_p од релације (13). Увођење додатног показатеља I_{sr} (слика 3) није значајно побољшало квалитет корелационих веза, чак



Slika 2. Дијаграм зависности $t_p=f(L, L_c, I_u)$
 Figure 2. Relation $t_p=f(L, L_c, I_u)$



Slika 3. Дијаграм зависности $t_p = f(L, L_c, I_u, I_{sr})$
Figure 3. Relation $t_p = f(L, L_c, I_u, I_{sr})$

је и коефицијент корелације мањи ($R=0,981 < R=0,986$), у односу на релацију (13). Тиме је потврђено искуство истраживача у свету да је уравнати пад I_u доминантан параметар нагиба, што објашњава неукључивање I_{sr} у познате зависности.

Однос времена кашњења t_p према времену концентрације T_c представљен је релацијом:

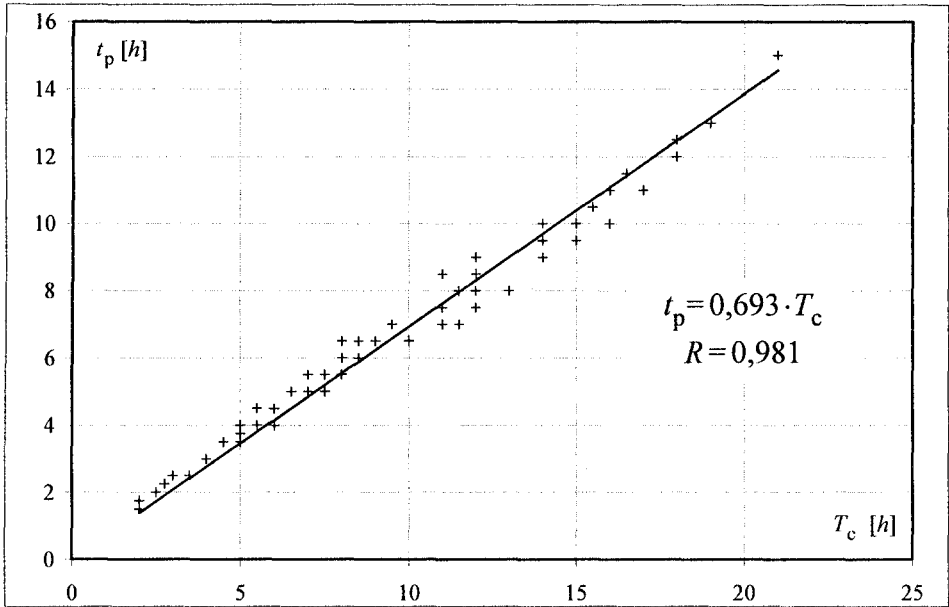
$$t_p = 0,693 \cdot T_c [h]. \dots\dots\dots (15)$$

Добијени однос, за сливове у Србији (слика 4), јужно од Саве и Дунава, близак је односу за сливове у Северној Америци, где је $t_p = 0,6 \cdot T_c$ (1972).

Вредности времена концентрације T_c су добијене на основу обраде јединичних хидрограма, према стандардној методологији (Wanielista, 1990), а зависности (13), (14) и (15) су изведене на основу низова података, приказаних у табели 1.

4.2. Физичко-географске карактеристике сливова

Физичко-географске карактеристике су одређене за сливне површине на 93 контролна профила. Распон вредности за поједине параметре износи: површина слива $A=10-1268 \text{ km}^2$; дужина слива по главном току $L=6,40-93,20 \text{ km}$; одстојање од тачке у речном кориту, најближе тежишту слива, до излазног профила $L_c=3,4-46,5 \text{ km}$;



Слика 4. Дијаграм зависности $t_p=f(T_c)$

Figure 4. Relation $t_p=f(T_c)$

уравнати пад дна речног корита $I_u=0,26-4,66\%$; средњи нагиб терена у сливу $I_{sr}=8,98-47,0\%$; однос $L/L_c=1,41-3,15$. Употреба зависности, у којима се користе физичко-географски параметри, требало би да буде ограничена на сливове са изнетим распонима вредности.

5. ДИСКУСИЈА О РЕЗУЛТАТИМА ИСТРАЖИВАЊА

Анализа времена кашњења t_p довела је до издвајања релације (13), која, у поређењу са релацијом (10), даје мање вредности времена кашњења t_p . Смањење времена кашњења t_p директно утиче на смањење именитеља у релацији (16) и увећање вредности максималне ординате јединичног хидрограма q_{max} , што за последицу има раст вредности максималног протицаја $Q_{max(p)}$ (за исто време трајања ефективне кише T_k).

$$q_{max} = \frac{0,56 \cdot A \cdot 1,0}{\left(t_p + \frac{T_k}{2}\right) + k \cdot \left(t_p + \frac{T_k}{2}\right)} [m^3 \cdot s^{-1} \cdot mm^{-1}]. \dots \dots \dots (16)$$

На изложеном примеру (таб. 2) 8 сливова (Шеварика, Сува Морава, Репинска река - директне притоке Ј. Мораве; Марина река, Лучка река, Вуковица, Грабовица

Табела 1. Улазни подаци за анализу времена кашњења t_p Table 1. Input data for analysis lag time t_p

Број	Река	Профил	t_p	$\frac{L \cdot L_c}{\sqrt{I_u}}$	$\frac{L \cdot L_c}{\sqrt{I_u \cdot I_{sr}}}$	T_c
			h	km ²	km ²	h
1	Пештан	Зсоке	6	566,83	152,05	8
2	Тамнава	Коцељево	7	1053,09	270,16	9,5
3	Уб	Уб	8,5	1956,97	478,41	11
4	Љиг	Воговађа	11	2214,29	589,95	16
5	Турија	Јунковац	5,5	357,82	119,33	7
6	Колубара	Словац	11,5	2423,70	540,37	16,5
7	Обница	Вело Поље	5,5	381,43	89,23	7
8	Колубара	Ваљево	6,5	446,23	91,06	8
9	Градац	Дегурић	5,5	522,13	95,68	7
10	Јабланица	Седларе	5	345,38	59,12	6,5
11	Јабланица	Стубо Ровни	3,5	85,81	14,15	4,5
12	Рибница	Паштрић	4	131,48	22,99	5
13	Чемерница	Прелјина	8	1081,91	264,10	12
14	Ђетиња	Шенгољ	9,5	2302,99	579,15	15
15	Скрапеж	Ужичка Пожега	9	1504,03	373,50	12
16	Расина	Вивоље	13	3780,10	914,64	19
17	Гружа	Туцачки Напер	6,5	671,38	168,28	10
18	Моравица	Ариље	10,5	2615,62	571,88	15,5
19	Велики Рзав	Ариље	10	2099,28	416,69	14
20	Ђетиња	Стапари	6	394,28	95,64	8,5
21	Велики Рзав	Роге	8,5	1371,88	265,53	12
22	Вјелица	Гуча	5,5	240,11	50,97	7
23	Каменица	Пријевор	5,5	478,63	99,81	8
24	Дичина	Врђани	5,5	437,33	89,65	8
25	Моравица	Ивањица	6,5	491,33	85,42	9
26	Градња	Каленић	2	24,78	5,60	2,5
27	Ворачка	Ворач	2	21,01	4,64	2,5
28	Скрапеж	Косјерић	3,5	104,64	17,89	5
29	Загржа	Станишинци	1,5	14,46	2,35	2
30	Јадар	Завлака	7	801,50	198,46	11
31	Вапа	Чедово	8	794,80	248,83	11,5
32	Вистрица	Вистрица	3,5	85,35	16,42	4,5
33	Милешевка	Пријепоље	4	110,25	19,40	5
34	Добрава	Вукошић	5,5	493,48	134,29	7,5
35	Думача	Поперски Метковић	2,5	57,79	13,89	3,5
36	Рашка	Рашка	10	2247,53	455,00	15
37	Ибар	Ватраге	7,5	1102,24	223,67	12
38	Рибница	Рибница	4	173,21	25,94	5,5
39	Студеница	Мланча	5	284,36	50,68	7,5
40	Студеница	Ушће	8,5	1097,75	178,56	12
41	Студеница	Девих	3,75	95,82	16,48	5

Табела 1. Улазни подаци за анализу времена кашњења t_p (наставка)

Table 1. Input data for analysis lag time t_p (continue)

Број	Река	Профил	t_p	$\frac{L \cdot L_c}{\sqrt{I_u}}$	$\frac{L \cdot L_c}{\sqrt{I_u \cdot I_{sr}}}$	T_c
			h	km^2	km^2	h
42	Лопатница	Вогутовац	4,5	181,69	29,17	6
43	Јошаница	Виљановац	5,5	248,98	44,15	7
44	Гвоздачка	Гвоздац	2,25	28,24	4,64	2,75
45	Сокоља	Каменица	2	23,38	3,41	2,5
46	Јасеница	Смед. Паланка	9,5	1792,65	475,84	14
47	Ресава	Свилајнац	11	3478,24	817,52	17
48	Лепеница	Ваточина	10	3084,70	785,71	16
49	Раваница	Ђуприја	5	227,25	56,45	6,5
50	Црница	Параћин	5,5	223,59	54,05	7
51	Велица	Јагодина	5	259,77	60,07	6,5
52	Осаница	Горње Комарице	3	86,24	20,85	4
53	Угљешница	Грбице	3,5	124,77	28,10	4,5
54	Каленићка	Орашје	5	301,82	68,52	6,5
55	Јовановачка	Ћићевац	5,5	255,33	55,58	7
56	Јасеница	Доња Шаторња	3,5	73,76	17,43	4,5
57	Раваница	Вавило	1,75	16,13	2,98	2
58	Велица	Велица	2,5	26,54	5,03	3
59	Дуленка	Дулене	1,75	14,20	2,47	2
60	Мируша	Мируша	5	268,33	66,70	7
61	Млава	Ращанац	15	6798,29	1760,15	21
62	Вели Тимок	Књажевац	12,5	3987,89	862,55	18
63	Пек	Ујевац	7	1208,93	252,57	11
64	Млава	Горњак	9	1831,50	405,23	14
65	Витовница	Кула	6,5	393,45	97,75	8,5
66	Грлишка	Грлиште	5,5	397,29	89,25	7
67	Трговишки Тимок	Штрбац	6,5	703,18	136,11	10
68	Црнајка	Црнајка	3	54,74	11,32	4
69	Јужна Морава	Доње Кормијане	10	2592,65	599,47	15
70	Пуста	Пуковац	9,5	2733,89	632,12	15
71	Моравица	жучковац	7,5	816,53	195,66	11
72	Габерска	Мртвине	5,5	517,47	109,13	8
73	Кутинска	Радикине Варе	5,5	353,88	65,73	7,5
74	Јабланица	Лебане	8	1350,55	268,20	12
75	Темска	Станичење	12	2853,08	581,13	18
76	Нишава	Димитровград	8	1438,05	328,18	13
77	Власина	Власотинце	7	881,84	164,60	11,5
78	Лужница	Свође	6	509,71	98,28	8,5
79	Топоничка	Горња Топоница	6	595,92	121,92	8,5
80	Височица	Врајићевци	5,5	264,36	56,75	7
81	Косаница	Висока	6	478,70	89,04	8,5
82	Вањска	Куршумлија	5,5	517,38	89,66	7,5

Табела 1. Улазни подаци за анализу времена кашњења t_p (наставак)
 Table 1. Input data for analysis lag time t_p (continue)

Број	Река	Профил	t_p	$\frac{L \cdot L_c}{\sqrt{I_u}}$	$\frac{L \cdot L_c}{\sqrt{I_u \cdot I_{sr}}}$	T_c
			h	km ²	km ²	h
83	Топлица	Доња Селова	6	428,14	74,77	8,5
84	Јерма	Стразимировци	3	57,75	11,22	4
85	Височица	Изатовац	4,5	158,93	33,36	6
86	Виначка Морава	Косовска Витина	4	124,02	21,53	5
87	Јабланица	Сијаринска Вања	3,5	88,04	14,86	4,5
88	Пуста	Горњи Врестовац	3,5	97,10	15,77	5
89	Козарска	Тупаловци	5	233,02	38,53	7
90	Топлица	Магово	4,5	142,28	24,77	5,5
91	Луковска	Мерћез	3,75	123,60	18,49	5
92	Вранковачка	Рибарци	4	135,70	20,99	6
93	Љубатска	Восилеград	5	190,06	28,11	6,5

- директне притоке Моравице, слив Западне Мораве; Грачанка - притока Ситнице, слив Ибра), у распону површина од $A=5,1-95,9 \text{ km}^2$, према релацији (13) добијају се вредности времена кашњења t_p мање за 5,17-16,40% (табела 2, кол. 7). Последично, вредности протицаја $Q_{\max(1\%)}$ веће су за 4,29-14,51% (табела 2, кол. 9).

Релација (14), у коју је укључен параметар средњег нагиба терена у сливу I_{sr} , није показала побољшање корелативних веза у односу на релацију (13). Релацијом (15) дефинисан је однос између времена кашњења t_p и времена концентрације T_c , што представља израз специфичних услова у којима долази до формирања максималног протицаја на сливовима у Србији.

Наставак истраживања биће усмерен на поједине категорије сливова према критеријумима, који ће обухватити физичко-хидрографске карактеристике (величина слива, густина хидрографске мреже, просечна надморска висина), метеоролошко-климатолошке особине (режим падавина), доминантан тип вегетационог покривача, инфилтрационе карактеристике земљишта. Уочено је да квалитетне буково-јелове шуме имају изузетан интерцептивни капацитет (Ристић, Маџан, 2002), што у садејству са квалитетним земљишним творевинама (кисела смеђа земљишта) значајно продужава време кашњења. Суседни сливови са различитим врстама вегетационог покривача показују значајне разлике у режиму отицања (Ристић, Маџан, 1996), док различите геолошке формације на истом сливу утичу на измењен режим великих вода на појединим профилима (Никић, Ристић, 2002). Време кашњења могуће је проучити и са аспекта доминантног фактора који изазива појаву максималног протицања, као што су кратке кише јаког интензитета (Ристић *et al.*, 1997). У Србији постоје региони где се око 80% максималне дневне количине падавина излучује у интервалу од 120 минута (Ристић, 1992), а расподела максималних

Табела 2. Резултати прорачуна Q_{\max}
Table 2. Results of Q_{\max} calculation

Река River	A	L	L_c	I_u	CN	t_p	t_p	$Q_{\max}(1\%)$	$Q_{\max}(1\%)$
	km^2	km	km	%		h	h	$m^3 \cdot s^{-1}$	$m^3 \cdot s^{-1}$
Шеварика	5,1	4,0	2,1	2,9	77	1,35	1,28	23,21	24,25
Сува Морава	5,4	5,8	3,2	4,59	81	1,67	1,55	24,77	26,37
Репинска	8,0	8,5	4,6	5,48	80	2,12	1,93	29,14	31,64
Марина	18,1	8,8	4,4	3,25	68	2,41	2,11	48,93	53,38
Грачанка	21,2	5,6	2,6	0,51	71	2,29	2,07	43,19	46,88
Вуковица	21,9	11,6	6,6	3,66	67	2,94	2,59	47,84	53,14
Грабовица	88,6	23,1	12,1	1,92	67	5,34	4,47	114,19	133,57
Лучка	95,9	21,1	10,0	1,80	67	4,87	4,11	130,42	151,32

протицања показује сезонски карактер (Ристић, 2000). Познат је ефекат водно-ваздушних особина појединих типова земљишта и начина њиховог коришћења (Ристић *et al.*, 1997) на интензитет инфилтрације, време кашњења и максимални протицај (Ристић *et al.*, 2001). Реализација даљих истраживања времена кашњења, поред апликативне (инжењерско-пројектантске) вредности, отвара могућност формирања система за рану најаву и упозорење, што би у многама смањило штете од бујичних поплава (Ристић *et al.*, 2000).

6. ЗАКЉУЧЦИ

- ✦ Максималан протицај одређене вероватноће појаве $Q_{\max(p)}$ представља основни улазни податак за пројектовање подужних и попречних објеката у коритима бујичних токова. Време кашњења t_p је једна од основних компоненти прорачуна вршне ординате синтетичког јединичног хидрограма q_{\max} на незиученим бујичним сливовима. Број мерних места коришћених у овом истраживању, као и добијени резултати мерења омогућили су стварање највеће базе података у домену хидрологије бујичних токова Србије.
- ✦ Време кашњења t_p анализирано је на основу података са 93 хидролошка профила са сталним осматрањима нивоа воде. Издвојена је зависност (13), чијим се коришћењем добијају веће вредности максималног протицања $Q_{\max(p)}$ у односу на релацију (10), што је у складу са оштријим захтевима сигурности.
- ✦ Доминантан параметар нагиба је уравнати пад тока I_u , иако је у анализама коришћен и параметар средњег нагиба терена у сливу I_{sr} . Добијени однос времена кашњења t_p и времена концентрације T_c ($t_p = 0,693 \cdot T_c$), указује на специфичности појаве великих вода на територији Србије, јужно од Саве и Дунава.

- ↪ Бујичне поплаве екстремних карактеристика (нагла појава; кратко трајање; висок садржај чврсте фазе) чешће су на мањим сливовима, због чега нужно носе утицај локалних климатских, орографских и ерозионих карактеристика. Обим и квалитет података имају одлучујући утицај на веродостојност коришћених регионалних зависности, на основу којих се обављају прорачуни максималног протицања.

ЛИТЕРАТУРА

- Brajković M., Jovanović S. (1979-1981): *Analysis of watershed parameters applied to computations of maximal discharge using the method of synthetic unit hydrograph*, International Symposium on specific aspects of hydrological computations for water projects, Gidrometizdat/UNESCO, Leningrad
- Wanielista P.M. (1990): *Hydrology and Water Quantity Control*, John Wiley & Sons, New York
- Wisler C.O., Brater E.F. (1959): *Hydrology*, 2nd ed, John Wiley & Sons, New York
- Гавриловић С. (1975): *Бујични токови у СР Србији*, Републички Фонд за воде и Институт за Водопривреду ерозионих подручја Шумарског факултета, Београд
- (1994): *Guide to hydrological practices*, W.M.O.
- (1987): *Institution of Water and Environmental Management: River Engineering - Part I, Design Principles*, Lavenham Press, Suffolk
- Јовановић С. (1974): *Параметарска хидрологија*, Београд
- Јанковић Д. (1971): *Прорачун великих вода за неизучене токове у сливу реке Колубаре*, Водопривреда 13-14, Београд (796-799)
- Linsley R.K., Kohler M.A., Paulhus J.L.H. (1975): *Hydrology for engineers*, 2nd ed., Mc Grow Hill Book Co., New York
- Linsley R.K., Kohler M.A., Paulhus J.L.H. (1994): *Applied hydrology*, Mc Grow Hill Book Co., New York
- Никић З., Ристић Р. (2002): *Специфичност протицаја реке Рашке - утицај хидрогеолошких услова*, XIII Симпозијум о хидрогеологији и инжењерској геологији, Зборник радова, Херцег Нови (323-330)
- Петковић Т., Прохаска С. (1990): *Методe за прорачун великих вода*, Грађевински календар, Београд (183-279)
- Ристић Р. (1993): *Анализа неких метода параметарске хидрологије на примеру бујичног слива реке Обнице*, магистарски рад у рукопису, Шумарски факултет Универзитета у Београду, Београд
- Ристић Р. (2000/а): *Режим појаве и карактеристике великих вода на бујичним сливовима у Србији*, докторска дисертација у рукопису, Шумарски факултет Универзитета у Београду, Београд
- Ристић Р. (2000/б): *Карактеристике бујичног режима великих вода на главним притокама Велике Мораве*, Друго саветовање „Водни ресурси слива Велике Мораве и њихово коришћење“, Крушевац (190-194)
- Ristić R., Đeković V., Nikić Z., Barbaroša Z. (1997): *Reconstruction of the torrential flood on the river Manastirica*, 3rd ICFWST, Proceedings, Belgrade (236-242)
- Ristić R., Kostadinov S., Malošević D., Spalević V. (2001): *Erosion aspect in estimation of hydrologic soil group and determination of runoff curve number CN*, X Congress of Yugoslav Society for Soil Studies, Vrnjačka Banja

- Ristić R., Marković A., Malošević D., Đeković V. (2000): *Torrential floods - permanent threat on ecosystem stability*, 75th Anniversary of Forestry faculty, Proceedings, Sofia (369-376)
- Ристић Р., Маџан Г. (1996): *Анализа режима отицаја и квалитета вода са микросливова под шумском вегетацијом и голетима*, Конференција „Заштита вода 96“, Зборник радова, Улцињ (273-277)
- Ристић Р., Маџан Г. (2002): *Истраживање процеса интерцепције у буково-јеловој састојини на Гочу*, Гласник Шумарског факултета 86, Шумарски факултет Универзитета у Београду, Београд (181-188)
- Ristić R., Mačan G., Malošević D., Nikić Z. (1997): *Maximal discharges from micro-catchment areas under forest and meadow-pasture vegetation*, 3rd ICFWST, Proceedings, Belgrade (249-254)
- (1972): *SCS National Engineering Handbook: Hydrology (section 4)*, SCS&U.S. Dept. of Agriculture, Washington D.C.
- (1959): *U.S. Army Corps of Engineers: Flood hydrographs analysis and computations*, Engineering and Design Manual, U.S.G. Printing Office, Washington D.C.
- Haan C.T., Johnson H.P., Brakensiek D.L. (1982): *Hydrologic modeling of small watersheds*, American Society of Agricultural Engineers, Michigan
- Huggins L.F. et al. (1982): *Hydrologic Modeling of Small Watersheds*, Chapter 5 - Surface runoff, storage and routing, ASAE
- Chow V.T., Maidment R.D., Mays W.R. (1988): *Applied hydrology*, Mc Grow Hill Book Co., New York

Ratko Ristić

LAG TIME ON TORRENTIAL CATCHMENTS IN SERBIA

Summary

Torrential floods are the most frequent phenomenon in the arsenal of natural disasters, in Serbia. Frequency of event, intensity and diffusion, in the whole territory, make them as permanent threat with consequences in economic and ecology sphere. Climate, specific characteristics of relief, distinctions of soil and vegetation cover, social-economic conditions have done that the occurrence of torrential flood waves is one of the resulting extreme forms of existing erosion processes. The basic input data for designing of transversal and longitudinal objects in torrential beds is maximal discharge. One of the main parameters for maximal discharge calculation on unstudied catchments is lag time t_p . Lag time was determined on the basis of processing of unit hydrographs and deriving representative unit hydrographs, on 93 control profiles. Dominant physical-geography characteristics were determined: magnitude of the catchment area A , length of the catchment area along the main stream L , the distance from the centroid of the catchment area to the outlet profile L_c , average slope of the river bed I_u , average slope of terrain on the catchment area I_{sr} . Lag time and dominant physical-geography characteristics were the basis for deriving some equations with regional significance ($t_p = f(L, L_c, I_u)$; $t_p = f(L, L_c, I_u, I_{sr})$). The relation between lag time t_p and time of concentration was determined ($t_p = f(T_c)$).