

Ратко Ристић

UDK: 627.14
Прегледни рад

ВРЕМЕ КОНЦЕНТРАЦИЈЕ 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 помоћу неколико метода: применом комбинованог поступка (теорија синтетичког јединичног хидрограма и SCS методологије за раздвајање ефективних P_e од укупних падавина P_b), применом рационалне теорије и на основу теорије граничног интензитета отицаја. Рационална теорија је поуздан и једноставан метод, под условом да се одреди репрезентативно време концентрације слива T_c . Истраживања у овом раду обављена су на 93 контролна профила, јужно од Саве и Дунава, што је послужило као основ за извођење зависности у којима је време концентрације изражено у функцији доминантних физичко-географских карактеристика сливова [$T_c=f(A)$, $T_c=f(L)$, $T_c=f(L, L_c, I_u)$, $T_c=f(L, I_u)$, $T_c=f(L, I_{st})$, $T_c=f(L, I_u, I_{st})$]. Дефинисан је однос времена концентрације T_c и времена кашњења слива t_p [$T_c=f(t_p)$].

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

TIME OF CONCENTRATION IN TORRENTIAL CATCHMENTS IN SERBIA

Abstract: Maximal discharge $Q_{\max,p}$ is the basic input data for the design of longitudinal and transversal objects in torrential beds. Calculation of maximal discharge Q_{\max} on unstudied catchments is performed by the following methods: combined procedure (the theory of synthetic unit hydrograph and SCS methodology for the separation of effective rainfall P_e from total rainfall P_b), rational theory and theory of maximal runoff intensity. Rational theory is a suitable method with representative time of concentration T_c . The time of concentration was determined on the basis of investigation on 93 control profiles, south from the Sava and the Danube. Time of concentration and dominant physical-geography characteristics of the catchments were the basis for deriving the equations with regional significance [$T_c=f(A)$, $T_c=f(L)$,

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

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

Key words: torrential flood, time of concentration, maximal discharge, unit hydrograph

1. УВОД

Прорачун максималног протицаја одређене вероватноће појаве $Q_{\max,p}$ представља основни улазни податак приликом димензионисања објеката, који се граде у коритима бујичних токова. У Србији има 9.260 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). Атрибут „довољно изучени” припада водотоцима где се нивои (протицаји) воде мере у периоду ≥ 25 година, што важи за 102 профила на бујичним сливовима у Србији (Ристић, 2002).

На неизученим сливовима примењују се прорачуни засновани на принципу трансформације рачунске кише у рачунски протицај (Huggins et al., 1982). На неизученим бујичним сливовима у Србији, прорачун максималног протицаја одређене вероватноће појаве (обично $p=1,0\%$), најчешће се обавља применом три метода: комбинованим поступком (теорија синтетичког јединичног хидрограма за одређивање вршне ординате q_{\max} и SCS методологије за раздвајање ефективних од укупних падавина), рационалне теорије и теорије граничног интензитета отицаја.

Рационална метода користи се за прорачун максималног протицаја приликом пројектовања подужних и попречних објеката у коритима бујичних токова, дренажних система, објеката у конзервационим радовима, отвора на мањим мостовима (Chang, 2003). Посебно је погодна за прорачун евакуационих органа путева (риголе, одводни канали) за површинске воде (Ристић et al., 2004). Приликом употребе ове методе потребно је имати на уму неке претпоставке за њену примену, као и ограничења. Користи се на сливовима величине до 50 km^2 , а усвајају се претпоставке да је трајање меродавне кише једнако времену концентрације, са равномерним интензитетом, при чему је захваћена читава површина слива (Patra, 2001):

$$Q_{\max,p}=0,278 \cdot C \cdot I \cdot A \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}, \dots \dots \dots (1)$$

где су: 0,278 - константа, C - коефицијент отицаја, I - интензитет меродавне кише [$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$] и A - величина сливне површине [km^2].

Примена рационалне теорије је поуздан и релативно једноставан поступак уколико се одреди репрезентативно време концентрације. У нашој хидролошкој пракси коришћена су искуства из иностране литературе, најчешће руских и америчких истраживача, због недостатка регионалних зависности које изражавају посебност хидролошких услова у Србији, што је и циљ овог истраживања.

Киша је доминантан фактор који формира отицај, утиче на његово трајање и запремину. Остали значајни фактори су: врста и састав тла, степен деградације земљишних творевина, карактеристике вегетационог покривача, нагиб и облик површина. На одређеном сливу тренутак појаве максималног протицаја је условљен трајањем и интензитетом кише, односно временом концентрације.

2. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД РАДА

Истраживање је обухватило територију Србије, сем Војводине (нема мерних профила на Фрушкој Гори и Вршачком Брегу, где се јављају бујичне поплаве). Коришћени су подаци са сливних површина $10 < A < 1.268 \text{ km}^2$, из осматрачке мреже Републичког Хидрометеоролошког Завода Србије. 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 јединствено истражно 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.

Анализа режима падавина је обављена обрадом оригиналних плувиографских трака са 24 станице, и коришћењем оригиналних записника са око 700 станица са стандардним кишомером. Издвојени су јединични хидрограми за 93 профила, на основу којих су одређени репрезентативни јединични хидрограми, као и одговарајућа времена концентрације слива T_c .

Детерминисане су доминантне физичко-географске карактеристике на 93 сливна подручја: површина A , дужина слива по главном току L , одстојање од излазног профила до тачке у кориту најближе тежишту слива L_c , уравни пад тока I_u и средњи нагиб терена у сливу I_{sr} . Физичко-географске карактеристике су дефинисане на основу обраде карата $R=1:50.000$, сем за неколико сливова површине $A < 50 \text{ km}^2$, где су коришћене карте $R=1:25.000$. Приликом одређивања тежишта слива, на површинама $A > 100 \text{ km}^2$, коришћене су карте $R=1:100.000$ и $R=1:200.000$.

Физичко-географске карактеристике сливова (дужине, падови) одређују се једноставно, и сматрају релативно непромењивим у дужем временском периоду. Дефинисане временске карактеристике сливова, на основу анализе непосредно регистрованих хидрограма и одговарајућих хијетограма, се доводе у везу са физичко-географским карактеристикама, што се изражава одређеним зависностима. Њихова примена се састоји у израчунавању времена концентрације T_c на неизученим сливовима, на основу познатих физичко-географских карактеристика. Регресионе анализе су изведене коришћењем стандардних статистичких програма.

3. ПРЕГЛЕД ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА ВРЕМЕНА КОНЦЕНТРАЦИЈЕ T_c

Време концентрације T_c представља један од најважнијих показатеља „могућности слива“ за формирање брзог, површинског отицаја. Време концентрације T_c има велики значај у примени рационалне теорије, код коришћења неких модела (DILR), а представља важан елемент у хидродинамичком моделу кинематског таласа (Радић, 1991). Кретање падавинске воде по површини слива, испод површине и хидрографском мрежом захтева одређено време до тренутка формирања вршног протицаја. Тражено време може се израчунати применом хидродинамичких једначина, уз стриктно поштовање услова које оне предвиђају: дефинисан распон вредности променљивих, у потпуности детерминисане битне одлике слива (дужина, нагиби, површинска рапавост). Овакав приступ могућ је у лабораторијским условима и на мањим експерименталним површинама у природи, али је непрактичан за веће природне сливове (одређивање неопходних параметара захтева скупа теренска истраживања, уз значајан утрошак времена). Уместо тога, уведен је параметар који интегрише сва временска кашњења, индукована течењем по падинама слива и хидрографском мрежом, време концентрације T_c . Теоријски, време концентрације T_c се може представити као:

- време потребно елементарној запремини воде да из хидраулички најудаљеније тачке слива (тачка на вододелници од које почиње главни ток) доспе до излазног профила.

Према кинематској теорији, време концентрације T_c је време за које се успостави стационарно течење. У лабораторијским условима где су неке карактеристике слива (површина A , коефицијент рапавости η) биле сталне, а трајање кише T_k и интензитет I променљиви, установљено је да се стационарно стање отицаја постиже за различита времена, уколико се мења интензитет кише. Дакле, време концентрације T_c директно зависи од интензитета падавина (Радић, 1991).

У литератури постоји велики број једначина за израчунавање времена концентрације T_c , али су све везане за глобални принцип да је T_c сума времена течења по површини терена (падинама) и у речном кориту. Једна од првих, још увек коришћених зависности, јесте једначина Ramser-а из 1927. године, предвиђена за употребу на мањим, неизученим сливовима, који имају формирано речно корито (Huggins *et al.*, 1982):

$$T_{c1} = 0,02 \cdot L_1^{0,77} \cdot I_{a1}^{-0,385} \text{ [min]}, \dots \dots \dots (2)$$

где су: L_1 - дужина слива по главном току, од излазног профила до узводне тачке где се завршава речно корито [m] и I_{a1} - апсолутни нагиб корита на деоници L_1 [$m \cdot m^{-1}$].

Ова једначина показује слабу зависност са резултатима мерења времена концентрације T_c на малим сливовима ($A < 5 \text{ km}^2$). Ово је очекивано, јер на малим сливовима доминирају услови погодни за формирање слоја отицаја по површини терена, док је време течења у хидрографској мрежи нешто мање изражено. Приликом извођења огледа на ерозионим парцелама, у лабораторијским и природним условима,

испоставило се да се релативно непромењиви услови (квазистационарно течење) не могу успоставити на деоницама дужим од 100-150 m (Huggins *et al.*, 1982).

Део времена концентрације за течење у кориту T_{c_1} , може се израчунати на основу једначина које користе већ одређен максимални протицај дате вероватноће појаве $Q_{\max,p}$ и познате (измерене или процењене) параметре (Петковић, Прохаска, 1990):

$$T_{c_1} = \frac{16,67 \cdot L_1}{a \cdot I_u^{\frac{1}{3}} \cdot Q_{\max}^{\frac{1}{4}}} [\text{min}], \dots \dots \dots (3)$$

где су: L_1 - дужина речног корита [km], I_u - уравни пад речног корита [‰], a - параметар који се односи на средњу вредност коефицијента рапавости дуж речног тока [$m \cdot s^{-1}$]:

$$a = 0,15 \cdot (20 \cdot \bar{\eta})^{\frac{3}{4}}, \dots \dots \dots (4)$$

и $\bar{\eta}$ - средњи коефицијент рапавости који се одређује табеларно, на основу средњих карактеристика корита и реке дуж целог тока (Петковић, Прохаска, 1990).

Kerby је 1959. године развио једначину за прорачун времена концентрације на бази течења по површини терена (падинама), за деонице дужине $L_2 < 365$ m (Huggins *et al.*, 1982):

$$T_{c_2} = \left[\frac{2,2 \cdot \eta \cdot L_2}{\sqrt{I_{a_2}}} \right]^{0,467} [\text{min}], \dots \dots \dots (5)$$

где су: L_2 - дужина падине од тачке на вододелници, по правцу главног тока, до почетка речног корита [m], I_{a_2} - апсолутни нагиб падине на деоници L_2 [$m \cdot m^{-1}$] и η - Manning-ов коефицијент рапавости.

Служба SCS користи две методе за израчунавање времена течења по површини терена (1972):

- **Upland method** - примењује се на сливовима површине $A < 8,09 \text{ km}^2$, или на подсливовима већих речних система на којима није јасно изражено речно корито (са попречним пресеком погодним за хидрометријска мерења). Брзина концентрације V_c дата је у функцији нагиба и врсте земљишног покривача (у распону од шума са дебелим слојем стеље, преко пољопривредних земљишта, голети, до површина прекривених вештачким материјалима);
- **Curve number method** - примењује се на сливовима површине $A < 8,09 \text{ km}^2$, код којих број криве отицаја CN варира у распону $50 < CN < 95$.

Брзи површински отицај (који садржи доминантан део запремине хидрограма директног отицаја) почиње када интензитет падавина надмаши интензитет инфилтрације, у виду слоја воде који се креће по површини терена, да би по правцу највећег нагиба доспео до хидрографске мреже и потом наставио кретање речним коритом. На основу саопштеног, Huggins и сарадници (1982) предлажу једначину за прорачун укупног времена концентрације T_c , која представља суму времена потребних за кретање по површини терена и речним коритом:

$$T_c = T_{c_1} + T_{c_2} \text{ [min]}. \dots \dots \dots (6)$$

Уколико се уведу одговарајуће замене добија се једначина:

$$T_c = 0,02 \cdot L_1^{0,77} \cdot I_{a_1}^{-0,385} + \left[\frac{2,2 \cdot \eta \cdot L_2}{\sqrt{I_{a_2}}} \right]^{0,467} \text{ [min]}. \dots \dots \dots (7)$$

Са порастом површине слива расте и дужина речног корита L_1 , што значи да код већих слива доминира време течења речним коритом T_{c_1} , у укупној вредности времена концентрације T_c . Међутим, са опадањем величине сливних површина, опада и однос L_1/L_2 , тако да расте удео времена T_{c_2} у укупном времену концентрације T_c . Време течења по површини терена теже је оценити јер оно зависи од нагиба падина, површинске рапавости, инфилтрационих карактеристика земљишта, депресија на површини терена, интензитета кише.

Истраживања Soil Conservation Service довела су до емпиријске одреднице времена концентрације $T_c = 1,67 \cdot t_p$ (1972).

У општем случају, време концентрације T_c се може израчунати као:

$$T_c = \frac{L}{V_c} \text{ [s]}. \dots \dots \dots (8)$$

где је V_c - брзина концентрације [$m \cdot s^{-1}$].

Према Херхеулидзеу (Јовановић, 1974) брзина концентарције V_c је у функцији апсолутног нагиба речног корита I_a и повратног периода T :

$$V_c = (1,6 + 1,1 \cdot \log T) \cdot I_a^{0,25} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}. \dots \dots \dots (9)$$

Емпиријска зависност је изведена на основу истраживања Срибног (Јевтић, 1978), који је установио да је коефицијент рапавости у природном кориту функција четвртог корена из пада:

$$\frac{1}{\eta} = \frac{6,25}{I_a^{0,25}} \dots \dots \dots (10)$$

Повећање повратног периода T подразумева већи максимални протицај, а тиме и већу брзину концентрације. Формула Херхеулидзеа се односи на просечну брзину концентрације слива (течење по површини терена и у речном кориту).

Бујични сливови имају комплексну структуру фактора важних за формирање отицаја, при чему је време концентрације „индикатор“ интензитета овог процеса. Изражени нагиби у хидрографској мрежи и на падинама слива доприносе интензивирању брзог површинског отицаја, чиме се скраћује време концентрације (Ristić, Stefanović, 2005). Врста вегетационог покривача утиче на површинску рапавост и водно-ваздушни капацитет земљишта, са директним последицама на висину слоја површинског отицаја и брзину кретања (Ристић, Мадан, 1996). Варијабилност геолошке подлоге, формираних типова земљишта и присутне шумске вегетације резултују у променљивости инфилтрационо-ретенционих карактеристика земљишта (Ristić, Мадан, 1995). Интерцепција, као компонента циклуса отицаја, може бити узрок значајне редукције количине падавина која доспева на слив, са очекиваним

продужењем времена концентрације (Ристић, Мацан, 2002). Људске активности (експлоатација шума, обрада земљишта, урбанизација, интензивно пошумљавање и затрављивање) директно утичу на брзину „реакције” слива после појаве интензивних падавина, односно на формирања отицаја (Ristić *et al.*, 2002). Еродирана земљишта имају мањи водно-ваздушни капацитет што директно повећава слој отицаја и запремину хидрограма поплавног таласа, са нужно краћим временом концентрације (Ristić *et al.*, 2001). Појава интензивног површинског отицаја повезана је покретањем ерозионог материјала на нагибима у сливу, који касније доспева до хидрографске мреже и акумулационих простора (Ristić *et al.*, 2004). Правилна просторна организација у сливу утиче на смањење ерозионе продукције, побољшање инфилтрационо-ретенционих карактеристика земљишта, чиме се продужава време концентрације, а смањује ризик од појаве бујичних поплава (Ristić *et al.*, 2004). Катастрофалне бујичне поплаве јављају се услед веома кратког времена концентрације слива (Ristić *et al.*, 1997). Зато је веома важно продужити време концентрације, што се постиже применом одговарајућих техника газдовања пољопривредним (Ristić *et al.*, 2003) и шумским земљиштима (Ristić *et al.*, 2005).

За мање природне сливове, са једноставнијом дренажном структуром, време концентрације T_c је блискије времену кашњења слива t_p , док неки други истраживачи та времена поистовећују (Linsley, Kohler, Paulhus, 1975). Ramser (Chang, 2003) изједначава време концентрације T_c са временом пораста хидрограма T_p . Соколовски (1968) дефинише време концентрације T_c , као:

$$T_c = \frac{T_p}{k} [h], \dots \dots \dots (11)$$

где је $k=1$ за кратке плъускове, а $k=1,30-1,60$ за дуже кише.

Очигледно је, да ставови истраживача нису усаглашени по питању одређивања времена концентрације T_c , иако се не пориче теоријско тумачење појма (време потребно елементарној запремини воде да из хидраулички најудаљеније тачке слива доспе до излазног профила). Међутим, због мноштва фактора који делују на сваком природном сливу, немогуће је без детаљних теренских истраживања израчунати време T_c преко неке физички коректно постављене једначине (хидродинамичке једначине кинематског таласа, на пример). То је био мотив за истраживаче Soil Conservation Service (1972) да креирају методологију за детеминисање времена концентрације на основу регистрованих хидрограма и одговарајућих хијетограма. Анализом великог броја поплавних таласа (и кишних епизода које су их изазвале) на природним сливовима (са широким спектром величина и услова), дошли су до закључка да време концентрације представља:

- време од завршетка ефективне кише, трајања T_k , до прве превојне (инфлексивне) тачке на рецесионој грани хидрограма.

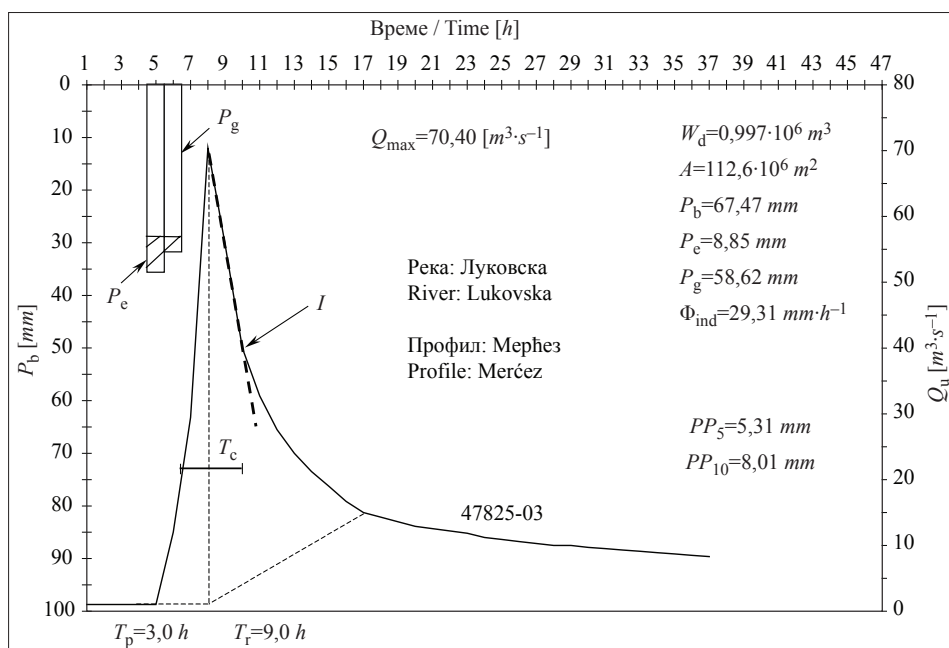
Емпиријски је утврђено да се инфлексивна тачка налази на $1,7 \cdot T_p$ (време пораста хидрограма), код SCS бездимензионалног јединичног хидрограма (1972). У конкретним случајевима, када је већ одређен хидрограм директног протицаја са одговарајућим хијетограмом ефективне кише, инфлексивна тачка се дефинише као

тачка у којој долази до прве промене нагиба опадајуће гране, у односу на врх хидрограма (Wanielista, 1990).

4. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

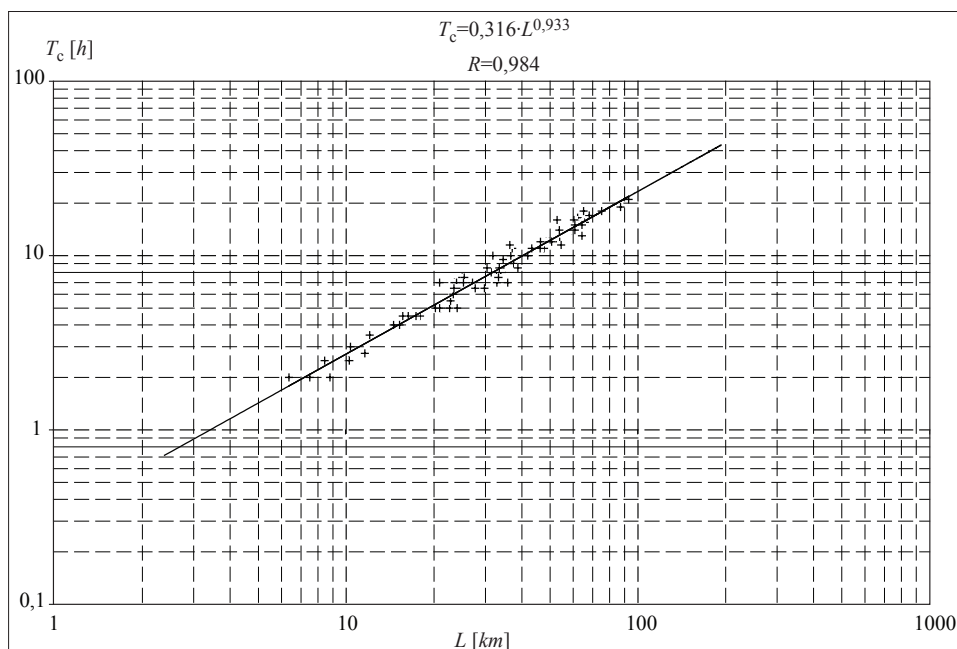
4.1. Анализа времена концентрације T_c

У овом раду су одређена времена концентрације T_c на 93 контролна профила на територији Србије, јужно од Саве и Дунава. Време концентрације T_c је одређено као време од завршетка ефективне кише до инфлексционе тачке на рецесионој грани хидрограма. Анализом свих регистрованих хидрограма укупног протицаја и одговарајућих хијетотограма, на сваком профилу су издвојени јединични хидрограми одређеног трајања (са временским одступањем не већим од 25%). Времена концентрације T_c на хидрограмима укупног протицаја (за које су издвојени јединични хидрограми) су осредњена, а тако добијено T_c представља репрезентативно време концентрације за дати профил. Примењена метода директног одређивања T_c илустрована је на примеру једног таласа, који је забележен на профилу Мерћез, на Луковској реци. Време концентрације T_c представља интервал од престанка двочасовних ефективних падавина (шрафирана површина), до појаве превојне тачке (означена са I) на опадајућој



Слика 1. ДETERМИНИСАЊЕ времена концентрације T_c

Figure 1. Determination of time of concentration T_c



Слика 2. Дијаграм зависности $T_c=f(L)$

Figure 2. Relation $T_c=f(L)$

грани хидрограма (сл. 1). Описани начин одређивања T_c доследно је примењен у свим случајевима. Анализирана времена концентрације T_c обухватају време течења у речном кориту T_{c_1} и време течења по површини (падинама) слива T_{c_2} .

Применом регресионе анализе утврђено је да T_c показује висок степен зависности у односу на основне физичко-географске карактеристике слива: површину (A), дужину слива по главном току (L), уравни пад корита (I_u) и средњи нагиб терена (I_{sr}). Следи шест зависности помоћу којих се на основу познатих физичко-географских карактеристика слива може израчунати време концентрације T_c .

Прва зависност изражава T_c у односу на L (у km) (слика 2):

$$T_c = 0,316 \cdot L^{0,933} [h]. \dots\dots\dots (12)$$

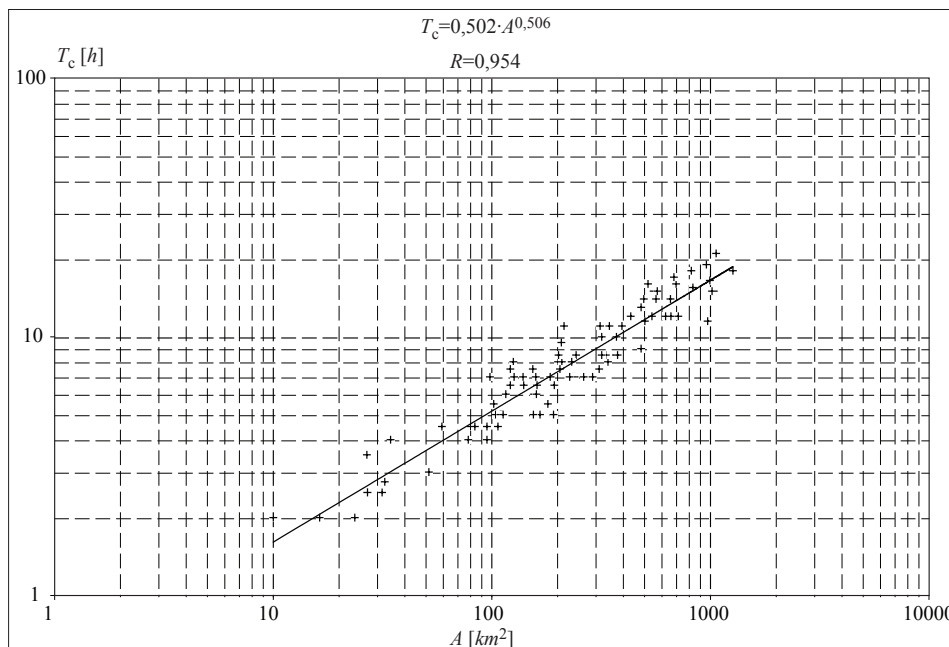
Потврђено је и да T_c зависи од A (у km^2) (сл. 3), што је изражено односом:

$$T_c = 0,502 \cdot A^{0,506} [h], \dots\dots\dots (13)$$

Време концентрације T_c може се изразити и следећом релацијом (сл. 4):

$$T_c = 0,819 \cdot \left(\frac{L \cdot L_c}{\sqrt{I_u}} \right)^{0,376} [h]. \dots\dots\dots (14)$$

Следи низ релација где, као променљиве, фигуришу дужина слива по главном току L , уравни пад I_u и средњи нагиб терена у сливу I_{sr} . Релација (15) представља



Слика 3. Дијаграм зависности $T_c=f(A)$

Figure 3. Relation $T_c=f(A)$

реминисценцију на једначину Ramser-a (Huggins *et al.*, 1982), где је $T_c=f(L, I_a)$, јер је апсолутни нагиб корита I_a замењен са уравнатим падом I_u , тако да је $T_c=f(L, I_u)$; релација (16) изражава време концентрације као $T_c=f(L, I_{sr})$, а релација (17) изражава време концентрације као $T_c=f(L, I_u, I_{sr})$:

$$T_c = 0,47 \cdot L^{0,826} \cdot I_u^{-0,127} [h], \dots \dots \dots (15)$$

$$T_c = 0,609 \cdot L^{0,898} \cdot I_{sr}^{-0,17} [h], \dots \dots \dots (16)$$

$$T_c = 0,56 \cdot L^{0,846} \cdot I_u^{-0,084} \cdot I_{sr}^{-0,08} [h], \dots \dots \dots (17)$$

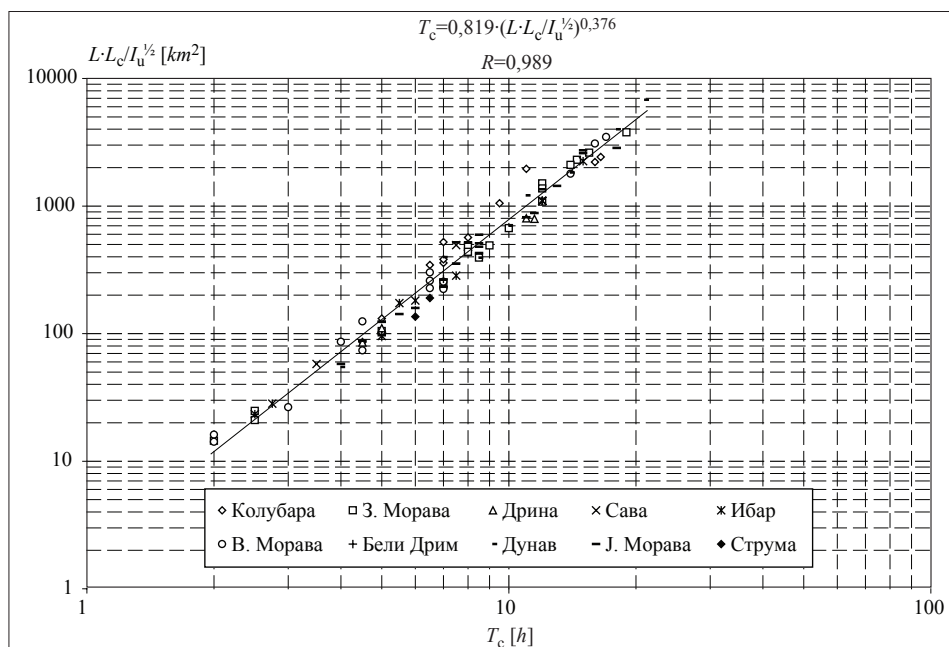
где су величине дате у следећим јединицама мере: L у km , I_u у % и I_{sr} у %.

Ранија истраживања времена кашњења t_p (Ристић, 2003) и поређење са актуелним истраживањем T_c (на основу исте базе података: сливови, физичко-географске карактеристике, хидрограми и хијетограми), показују да је однос ова два карактеристична времена изражен релацијом:

$$T_c = 1,443 \cdot t_p [h]. \dots \dots \dots (18)$$

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 $A=10-1.268 km^2$; дужина слива по главном току $L=6,40-93,20 km$; одстојање



Слика 4. Дијаграм зависности $T_c = f(L, L_c, I_u)$

Figure 4. Relation $T_c = f(L, L_c, I_u)$

од тачке у речном кориту, најближе тежишту слива, до излазног профила $L_c = 3,4-46,5 \text{ km}$; уравни пад дна речног корита $I_u = 0,26-4,66\%$; средњи нагиб терена у сливу $I_{sr} = 8,98-47,0\%$ и однос $L/L_c = 1,41-3,15$. Употреба зависности, у којима се на основу физичко-географских карактеристика рачуна време концентрације слива, требало би да буде ограничена на сливове са изнетим распонима вредности.

5. ДИСКУСИЈА О РЕЗУЛТАТИМА ИСТРАЖИВАЊА

Време концентрације T_c анализирано је према методолошком поступку који до сада није коришћен у хидролошкој пракси Србије - издваја се на основу забележених хидрограма и хијетотограма, као временски интервал од завршетка ефективне кише до прве инфлексione тачке на рецесионој грани хидрограма. Примена овог методолошког поступка подразумева да издвојени временски интервал (време концентрације) обухвата време течења елементарне запремине воде од хидраулички најудаљеније тачке слива (на вододелници) до излазног профила. Другим речима, обухваћено је кретање по површини (падинама) слива и у речном кориту.

Успостављањем зависности између издвојених времена концентрације сливова и детерминисаних физичко-географских карактеристика, формирано је неколико

једначина регионалног значаја. Оне омогућују да се на неизученим сливовима израчунају репрезентативна времена концентрације, на основу једноставно одређених физичко-географских карактеристика:

$$T_c = 0,316 \cdot L^{0,933} [h], \dots \dots \dots (12)$$

$$T_c = 0,502 \cdot A^{0,506} [h]. \dots \dots \dots (13)$$

Зависност времена концентрације T_c од површине слива A и дужине слива по главном току L , показује висок степен корелативне везе ($R_{12}=0,954$ и $R_{13}=0,984$), као и очекивани однос поменутих величина (са порастом A и L , расте T_c).

Увођење карактеристичних нагиба (уравнати пад I_u , средњи нагиб терена у сливу I_{sr}), довело је до издвајања следећих зависности:

$$T_c = 0,819 \cdot \left(\frac{L \cdot L_c}{\sqrt{I_u}} \right)^{0,376} [h] \dots \dots \dots (14)$$

$$T_c = 0,47 \cdot L^{0,826} \cdot I_u^{-0,127} [h], \dots \dots \dots (15)$$

$$T_c = 0,609 \cdot L^{0,898} \cdot I_{sr}^{-0,17} [h]. \dots \dots \dots (16)$$

$$T_c = 0,56 \cdot L^{0,846} \cdot I_u^{-0,084} \cdot I_{sr}^{-0,08} [h] \dots \dots \dots (17)$$

Увођење параметра средњег нагиба терна на сливу I_{sr} није значајно побољшало квалитет корелационих веза, а добијени коефицијенти корелације имају високе вредности ($R_{14}=0,989$, $R_{15}=0,99$, $R_{16}=0,99$, $R_{17}=0,991$).

Наставак истраживања времена концентрације T_c треба да доведе до резултата који изражавају посебности појединих сливова или региона. У неким деловима Србије, приликом појаве јаких киша краћег трајања, око 80% дневне количине падавина се излучује у интервалу од 120 min (без обзира на ранг вероватноће појаве), што ствара претпоставке за формирање интензивног површинског отицаја са веома кратким временом концентрације (Ристић, 1992). Интегрални део таквих истраживања треба да буде формирање јединствене базе података (хидролошки подаци, интегрисане топографске подлоге у дигиталној, интерактивној форми, са неопходним информацијама о физичко-географским, геолошким, педолошким карактеристикама, као и начину коришћења земљишта у сливовима). Јединствена база података омогућује, поред прецизнијег детерминисања времена концентрације и могућност прогнозе бујичних поплава (Ristić, Marković, Malošević, Đeković, 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 концентрације T_c је једна од основних компоненти прорачуна максималног протицаја коришћењем рационалне методе на неизученим бујичним сливовима.

- ▶ Време концентрације T_c анализирано је на основу података са 93 контролна профила, са сталним осматрањима нивоа (протицаја) воде. Све издвојене релације имају високе вредности коефицијента корелације између коришћених параметара ($R=0,954-0,991$), што показује изражен утицај физичко-географских карактеристика слива на време концентрације.
- ▶ Добијени однос времена концентрације T_c и времена кашњења t_p ($T_c=1,443 \cdot t_p$) 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 протицаја.

ЛИТЕРАТУРА

- Wanielista P.M. (1990): *Hydrology and Water Quantity Control*, John Wiley & Sons, New York
- Гавриловић С. (1975): *Бујични њокови у СР Србији*, Републички Фонд за воде и Институт за Водопривреду ерозионих подручја Шумарског факултета, Београд
- (1994): *Guide to hydrological practices*, W.M.O
- Јевтић Ј. (1988): *Хидролоија бујичних њокова*, Шумарски факултет Универзитета у Београду, Београд
- Јовановић С. (1974): *Параметарска хидролоија*, Београд
- Linsley R.K., Kohler M.A., Paulhus J.L.H. (1975): *Hydrology for engineers*, 2nd ed., Mc Grow Hill Book Co., New York
- Patra K.C. (2001): *Hydrology and Water Resources Engineering*, Alpha Science, New Delhi
- Петковић Т., Прохаска С. (1990): *Методе за прорачун великих вода*, Грађевински календар, Београд (183-279)
- Радић З. (1991): *Рационална теорија - 100 или 150 година после*, Водопривреда 131-132, Београд
- Ристић Р. (1993): *Анализа неких метода параметарске хидролоије на примеру бујичног слива реке Обнице*, магистарски рад у рукопису, Шумарски факултет Универзитета у Београду, Београд
- Ристић Р. (2002): *Режим појаве великих вода на бујичним сливовима у Србији*, Шумарство 1-3, СИТШИПДС, Београд (1-14)
- Ристић Р. (2003): *Време кашења ошцаја на бујичним сливовима у Србији*, Гласник Шумарског факултета 87, Шумарски факултет Универзитета у Београду, Београд (51-65)
- 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., Kadović R., Letić Lj., Đeković V., Nikić Z. (2003): *Agroforestry in the region of Stara Planina*, 75th Years of the Forest Research Institute of the Bulgarian Academy of Sciences, Proceedings Volume 1, Sofia (232-236)
- 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., Letić Lj., Đeković V. (2002): *Impact of forest harvesting on sediment yields of small catchments*, Conference: Social and Economy Effects of Erosion Processes, Proceedings, Vrujci Spa. (137-143)
- Ристић Р., Летић Љ., Малушевић И. (2004): *Прорачун меродавне количине воде за евакуационе орјане шумских јушева*, Шумарство 4, СИТШИПДС, Београд
- Ristić R., Ljujić M., Bukvić Z., Đeković V. (2004): *Sedimentation at small reservoirs in Serbia*, XXII Conference of the Danubian countries on the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management, Proceedings, Brno
- 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)
- Ristić R., Macan G. (1995): *Influence of the forest ecosystems on runoff process as the part of the Global Hydrologic Cycle*, The Second International Study Conference on GEWEX in Asia and GAME, Proceedings, Pattaya (327-330)
- Ристић Р., Мацан Г. (1996): *Анализа режима ошмицаја и квалитетна вода са микросливова јод шумском вегетацијом и толетима*, Конференција „Заштита вода” ’96, Зборник радова, Улцињ (273-277)
- Ристић Р., Мацан Г. (2002): *Истраживање процеса интјерцејције у буково-јеловој сасијони на планини Гоч*, Гласник Шумарског факултета 86, Шумарски факултет Универзитета у Београду, Београд (181-188)
- Ristić R., Macan G., Malušević I. (2005): *Influence of forest ecosystems on runoff process on micro-catchments*, International Conference on Forest Impact on Hydrological Processes and Soil Erosion, Proceedings, Yundola (30-35)
- Ristić R., Stefanović M. (2005): *Extreme discharges on torrential catchments in Serbia*, International Conference on Forest Impact on Hydrological Processes and Soil Erosion, Proceedings, Yundola (280-286)
- Ристић Р., Стефановић М., Гавриловић З. (2004): *Заштитна ерозионих јодручја ошмиине и одбрана од бујичних јодлава као интјералне комјоненте јросјорној јлана - јримјер ошмиине Аранђеловац*, Зборник радова „Локална самоуправа у планирању и уређењу простора и насеља”, Златибор (285-293)
- Sokolovskij D.L. (1952): *Rečnoi stok*, Gidrometizdat, Leningrad
- (1972): *SCS National Engineering Handbook - Hydrology (section 4)*, SCS & U.S. Dept. of Agriculture, Washington D.C.
- Huggins L.F. et al. (1982): *Hydrologic Modeling of Small Watersheds*, Chapter 5 - Surface runoff, storage and routing, ASAE
- Chang M. (2003): *Forest Hydrology*, CRC Press, New York
- Chow V.T., Maidment R.D., Mays W.R. (1988): *Applied Hydrology*, McGraw Hill Book Co., New York

Ratko Ristić

TIME OF CONCENTRATION IN TORRENTIAL CATCHMENTS IN SERBIA

Summary

Torrential floods are the most frequent phenomena in the arsenal of natural disasters, in Serbia. Frequency of event, intensity and diffusion, in the whole territory, make them permanent threat with consequences in the spheres of economy and ecology. Climate, specific characteristics of relief, distinctions of soil and vegetation cover, social-economic conditions have made the occurrence of torrential flood waves one of the resulting extreme forms of the existing erosion processes.

The basic input data for the design of transversal and longitudinal objects in torrential beds is maximal discharge. The calculation of maximal discharge Q_{\max} , in unstudied catchments, was carried out by the following methods: combined procedure (the theory of synthetic unit hydrograph and SCS methodology for the separation of effective rainfall P_e from total rainfall P_b), rational theory and theory of maximal runoff intensity. Rational theory is a suitable method with the representative time of concentration T_c . Time of concentration T_c 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 in the catchment area I_{sr} . Time of concentration T_c and the dominant physical-geography characteristics were the basis for deriving some equations with regional significance [$T_c=f(A)$, $T_c=f(L)$, $T_c=f(L, L_c, I_u)$, $T_c=f(L, I_u)$, $T_c=f(L, I_{sr})$, $T_c=f(L, I_u, I_{sr})$]. The relation between time of concentration T_c and lag time t_p was determined [$T_c=f(t_p)$].

