

ПРОРАЧУН МЕРОДАВНЕ КОЛИЧИНЕ ВОДЕ ЗА ЕВАКУАЦИОНЕ ОБЈЕКТЕ ШУМСКИХ ПУТЕВА

ЉУБОМИР ЛЕТИЋ
РАТКО РИСТИЋ
ИВАН МАЛУШЕВИЋ

Извод: Интензиван отицај на шумским путевима угрожава безбедност саобраћаја јер долази до појаве површинске ерозије на самом коловозу, као и необезбеђеним шкарпама. Отицај се формира као последица јаких, пљусковитих киша, отапањем снега или коинциденцијом ових појава. Количина воде је одређена висином слоја падавина, величином површине са које се слива, карактеристикама земљишта и начином коришћења. Основни улазни податак за димензионисање евакуационих објеката на путевима јесте протицај одређене вероватноће појаве $Q_{\max,p}$ који се одређује на основу рационалне методе.

Кључне речи: шумски путеви, максималан протицај, време концентрације, евакуациони објекти.

CALCULATION OF MAXIMAL DISCHARGE FOR FOREST ROADS DRAINAGE STRUCTURES

Abstract: The appearance of intensive runoff on the surface of forest roads without drainage structures could lead to serious destruction and risk to traffic safety. Significant quantity of water is the consequence of intensive rainfall, snow melting or their coincidence. The quantity of runoff water is determined by the amount of precipitation, magnitude of the catchment, characteristics of soil layer and vegetation cover. The main input data for drainage structure design is the maximal discharge of required probability $Q_{\max,p}$. Calculation of maximal discharge is based on rational method.

Key words: forest roads, maximal discharge, time of concentration, drainage structures.

1. УВОД

Површински отицај јавља се када је интензитет падавина I већи од интензитета инфилтрације I_i ($I > I_i$). Вишак воде се јавља као последица:

- интензивних киша краћег трајања;
- отапања снега;
- коинциденције ових појава.

На површинама које гравитирају шумским путевима не постоје мерења отицаја, тако да се третирају као хидролошки неизучене. Прорачун меродавне количине воде на оваквим сливовима базира се на трансформацији рачунске кише у одговарајући протицај. Киша је доминантан фактор који формира отицај, утиче на његово трајање и запремину. Остали значајни фактори су: врста и састав тла, степен деградације земљишних твора, карактеристике вегетационог покривача, нагиб и облик површина. На одређеном сливу тренутак појаве максималног протицаја је условљен трајањем и интензитетом кише, односно временом концентрације.

Прорачун максималног протицаја обавља се применом рационалне методе:

$$Q_{max} = 0.278 \cdot C \cdot I \cdot A \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (1)$$

0.278 - константа

C - коефицијент отицаја

I - интензитет меродавне кише [mm h-1]

A - величина сливне површине [km²]

Рационална метода се користи за прорачун максималног протицаја приликом пројектовања евакуационих објеката на путевима, дренажних система, објеката у конзервационим радовима, отвора на мањим мостовима (C h a n g, M., 2003). Приликом употребе ове методе потребно је имати на уму неке претпоставке за њену примену, као и ограничења. Користи се на сливовима величине до 50 km², а усвајају се претпоставке да је трајање меродавне кише једнако времену концентрације, са равномерним интензитетом, при чему је захваћена читава површина слива (P a t r a, K.C., 2001).

2. КОЕФИЦИЈЕНТ ОТИЦАЈА C

Процена коефицијента отицаја C је најосетљивији сегмент у примени рационалне методе. Представља однос ефективних падавина (отицај) према укупним падавинама које доспевају на сливну површину. На природним сливовима велики део падавинске воде се “губи” процесима интерцепције, ретенцијом у депресијама, инфилтрацијом, евапорацијом. Интензитет ових процеса зависи од својстава земљишта (механички састав, водно-ваздушни капацитет), претходног садржаја влаге у земљишту, морфологије терена (нагиб, облик падине), начина коришћења земљишта, степена деградације ерозионим процесима. Коефицијент отицаја C се одређује таблично (C h a n g, M., 2003) на основу дефинисаних хидролошких класа земљишта (према SCS методологији), у зависности од начина коришћења земљишта и нагиба терена (табела 1).

Вероватноћа да је процена одговарајућа, расте уколико је пројектант обавио теренски обилазак предметног слива и поседује неопходна знања и искуство из области педологије и хидрологије.

Табела 1 - Коефицијент отицаја C у функцији начина коришћења земљишта, хидролошке класе и нагиба

Table 1 - Runoff coefficient C in relation to land use, hydrological group and slope

| Начин кор. земљ. | А | | | В | | | С | | | D | | |
|------------------|-------------------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|
| | 0-2 % | 2-6 % | 6+ % | 0-2 % | 2-6 % | 6+ % | 0-2 % | 2-6 % | 6+ % | 0-2 % | 2-6 % | 6+ % |
| Обрађено | 0.08 ^a | 0.13 | 0.16 | 0.11 | 0.15 | 0.21 | 0.14 | 0.19 | 0.26 | 0.18 | 0.23 | 0.31 |
| | 0.14 ^b | 0.18 | 0.22 | 0.16 | 0.21 | 0.28 | 0.20 | 0.25 | 0.34 | 0.24 | 0.29 | 0.41 |
| Пашњаци | 0.12 | 0.20 | 0.30 | 0.18 | 0.28 | 0.37 | 0.24 | 0.34 | 0.44 | 0.30 | 0.40 | 0.50 |
| | 0.15 | 0.25 | 0.37 | 0.23 | 0.34 | 0.45 | 0.30 | 0.42 | 0.52 | 0.37 | 0.50 | 0.62 |

| | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ливада | 0.10 | 0.16 | 0.25 | 0.14 | 0.22 | 0.30 | 0.20 | 0.28 | 0.36 | 0.24 | 0.30 | 0.40 |
| | 0.14 | 0.22 | 0.30 | 0.20 | 0.28 | 0.37 | 0.26 | 0.35 | 0.44 | 0.30 | 0.40 | 0.50 |
| Шума | 0.05 | 0.08 | 0.11 | 0.08 | 0.11 | 0.14 | 0.10 | 0.13 | 0.16 | 0.12 | 0.16 | 0.20 |
| | 0.08 | 0.11 | 0.14 | 0.10 | 0.14 | 0.18 | 0.12 | 0.16 | 0.20 | 0.15 | 0.20 | 0.25 |
| Пут, Улица | 0.70 | 0.71 | 0.72 | 0.71 | 0.72 | 0.74 | 0.72 | 0.73 | 0.76 | 0.73 | 0.75 | 0.78 |
| | 0.76 | 0.77 | 0.79 | 0.80 | 0.82 | 0.84 | 0.84 | 0.85 | 0.89 | 0.89 | 0.91 | 0.95 |
| Паркинг окућница | 0.85 | 0.86 | 0.87 | 0.85 | 0.86 | 0.87 | 0.85 | 0.86 | 0.87 | 0.85 | 0.86 | 0.87 |
| | 0.95 | 0.96 | 0.97 | 0.95 | 0.96 | 0.97 | 0.95 | 0.96 | 0.97 | 0.95 | 0.96 | 0.97 |

^a - коефицијент отицаја за интензивне падавине повратног периода $T_t < 25$ година

^b - коефицијент отицаја за интензивне падавине повратног периода $T_t > 25$ година

Детерминисање хидролошке класе земљишта (А, В, С, D) обавља се на основу познавања квалитативних особина земљишта. У Србији нису вршена истраживања особина земљишта у циљу детерминисања хидролошких класа, тако да се примењује SCS класификација (Soil Conservation Service, 1972.), на основу минималног износа инфилтрације за један час (табела 2).

Табела 2 - Хидролошке класе земљишта према SCS критеријуму
Table 2 - Hydrological groups of soil SCS criterion

| Хидролошка класа | Минималан износ инфилтрације [mm h ⁻¹] |
|------------------|---|
| A | 7.62-11.4 |
| B | 3.81-7.61 |
| C | 1.27-3.80 |
| D | 0.0-1.26 |

- Класа А - дубока земљишта, састављена од песка и шљунка, са малим учешћем глиновитих честица (велика водопропусност, мали потенцијал за формирање површинског отицаја).
- Класа В – плића, песковита земљишта, са нешто већим учешћем глиновитих честица (просечна водопропусност, просечан потенцијал за формирање површинског отицаја).
- Класа С - плитка земљишта са доста глиновитих честица (слаба водопропусност, висок потенцијал за формирање површинског отицаја).
- Класа D – глиновита земљишта са доста колоидних честица. Одликује их висок ниво подземне воде или постојање непропусног слоја на малој дубини (веома слаба водопропусност, изузетно висок потенцијал за формирање површинског отицаја).

Класификација наших типова земљишта, према SCS критеријуму (табела 3), обављена је на основу богатог искуства у области мелиорација земљишта равничарских, брдских и планинских предела (Ђорђевић, М., 1984). Таблица се користи готово 20 година као незаобилазно средство приликом хидролошких прорачуна на природним сливовима.

3. ВРЕМЕ КОНЦЕНТРАЦИЈЕ T_C

Интензитет меродавне кише I , у релацији (1), добија се на основу рачунске кише чије је време трајања T_k једнако времену концентрације T_C . Тиме се испуњава услов за коришћење рационалне методе, јер цео слив “доприноси” формирању отицаја.

Кретање падавинске воде по површини терена, испод површине и хидрографском мрежом, захтева одређено време до тренутка формирања максималног протицаја. Параметар који интегрише сва временска кашњења, а притом је и репрезент хидрауличких својстава слива, услед дејства бројних физичких фактора, јесте време концентрације T_C . Теоријски, време концентрације представља *време потребно елементарној зајремини воде да из хидраулички најудаљеније тачке слива (тачка на вододелници од које почиње њено најузвишеније стање) доспе до излазног профила.*

Вода која доспева на коловоз шумских путева слива се, углавном, са падина по којима се креће у танком слоју по површини терена (overland flow), на коме није формирана хидрографска мрежа (корито). Време концентрације T_C се тада рачуна према К е r b у-јевој формули (H u g g i n s, L.F.; et all, 1982):

$$T_C = \left[\frac{2.2n \cdot L_1}{\sqrt{Ia}} \right]^{0.467} \quad [\text{min}] \quad (2)$$

n - Manning-ов коефицијент површинске рапавости [$\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$]

L_1 - дужина падине од тачке на вододелници до подножја (пут или почетак речног корита) [m]

Ia - нагиб падине на деоници L_1 [mm^{-1}]

Табела 3 – Класификација шљивова земљишта у Србији и Црној Гори према СЦС критеријуму (Ђоровић, М., 1984)

Table 3 – Classification of soil types in Serbia & Montenegro by SCS criterion (Đorović, M., 1984)

| Тип земљишта | Хидролошка класа |
|---|------------------|
| I Земљишта у равницама и на брежуљкастим теренима | |
| 1. Чернозем карбонатни, панонски | В |
| 2. Чернозем ливадски и забарени | С |
| 3. Чернозем и ливадски чернозем | В |
| 4. Чернозем песковит | В |
| 5. Чернозем огањачен | В |
| 6. Слатине и слатинаста земљишта (солонец, солончак, солоћ) | С |
| 7. Гајњаче | В |
| 8. Гајњаче, лесивиране гајњаче и смеђа карбонатна земљишта | В |
| 9. Гајњаче са пегамата слатина и водоника црница | С |
| 10. Црвеница на једрим кречњацима | С |
| 11. Црвеница на терцијарним седиментима | В |

| | |
|---|----------|
| 12. Параподзол и параподзоласта земљишта | С |
| 13. Подзоласто, бујадично-вриштинско земљиште, смеђа земљишта на кречњаку, црвенице | В |
| 14. Параподзоласта и неразвијена земљишта на флишу и лапорцу | В |
| 15. Неразвијена земљишта на флишу и лапорцу | В |
| 16. Алохтона смеђа земљишта | В |
| 17. Смонице и метаморфисане смонице | Д |
| 18. Смонице, гајњача и црвеница | С |
| 19. Хидрогене (ритске) црнице | Д |
| 20. Хидрогене црнице и друга мочварна земљишта | Д |
| 21. Ливадска и мочварна земљишта | Д |
| 22. Тресетна и полутресетна земљишта | Д |
| 23. Рецентни алувијални нанос | В |
| 24. Делувијални нанос | В |
| 25. Песак | А |
| 26. Шљунак, конгломерати | А |
| II Земљишта брдских и планинских предела | |
| A. На једрим кречњацима и доломитима | |
| 27. Рендзине | В |
| 28. Смеђа земљишта | В |
| 29. Рендзине, црвенице и смеђа земљишта | В |
| 30. Рендзине и смеђа земљишта | В |
| 31. Голи карст са пегама црвенице и рендзина | А |
| В. На силикатним стенама (пешчари, кварцити, гнајсеви, гранити, филити, глиници) | |
| 32. Хумусно-силикатна земљишта | В |
| 33. Хумусно-силикатна земљишта, смеђа и параподзоласта земљишта на серпентинима | С |
| 34. Кисела, смеђа и подзоласта земљишта | В |
| 35. Подзол и смеђе подзоласто земљиште | В |

На падинама дужине $L_1 > 365$ m, T_c се рачуна по сегментима ($L_{1max}=365$ m), а укупно време концентрације се добија сумирањем. K_{erbu} је дао вредности површинског коефицијента рапавости по $Manning$ -у (табела 4), који се одређује на основу типа површине (Huggins, L.F.; et all, 1982):

Табела 4 – Коефицијент рапавости за површинско течење
Table 4 – Coefficient of roughness for overland flow

| Површина | n |
|--|------|
| Глатка, непропусна | 0.02 |
| Глатко, голо и збијено земљиште | 0.10 |
| Оскудна трава, културе у редовима, средње рапаво голо земљиште | 0.20 |
| Пашњак, трава у солидном стању | 0.40 |
| Лишћарска или четинарска шума | 0.60 |
| Шума са дубоком стељом, густа трава | 0.80 |

Уколико путу гравитира сливна површина са јасно израженом хидрографском мрежом (јаруга, дубодолина, поток), на којој доминира течење коритом (дводимензионално раванско течење), користи се једначина Ramser-a, на сливовима површине $A > 5 \text{ km}^2$ (H u g g i n s, L.F.; et al, 1982):

$$T_{c2} = \frac{L_2}{Ia_2} \cdot 0.79 L_2^{0.85} \quad [\text{min}] \quad (3)$$

L_2 - дужина слива по главном току, од излазног профила до узводне тачке где се завршава речно корито [m]

Ia_2 - нагиб корита на деоници L_2 [$\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$]

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 T_{c1} (падинама) и у речном кориту T_{c2} . За сливне површине на којима је заступљено течење по падинама и у речном кориту, препоручује се обједињавање релација (2) и (3) (Huggins, L.F.; et al, 1982.):

$$T_c = T_{c1} + T_{c2} \quad [\text{min}] \quad (4)$$

$$T_c = \left[\frac{2.4 L_1}{\sqrt{Ia_1}} \right]^{0.67} + \frac{0.79 L_2}{Ia_2} \cdot 0.79 L_2^{0.85} \quad [\text{min}] \quad (5)$$

4. ИНТЕНЗИТЕТ МЕРОДАВНЕ КИШЕ

Интензитет кише одређује се на основу времена концентрације T_c , под претпоставком да је трајање меродавне кише T_k једнако времену концентрације. Мерни систем Републичког хидрометеоролошког Завода Србије располаже са око 800 кишомерних станица на којима се региструју дневне суме падавина. Максимални протицаји на мањим сливним површинама су последица киша чије је трајање краће од 24 h. Због тога је потребно максималну дневну кишу одређене вероватноће појаве $H_{(24h,P)}$ свести на меродавну кишу $H_{(T,P)}$, односно, количину падавина која се јави током времена концентрације T_c . То се постиже коришћењем модела који је изведен за територију Србије (Ј а н к о в и ћ, Д., 1994):

$$H_{(T,P)} = \frac{aT(1 - A^B)}{1 - A} H_{(24h,P)} \quad [\text{mm}] \quad (6)$$

$H_{(T,P)}$ - меродавна киша трајања (T), вероватноће појаве (P)

$a \approx 1.0$ (константа за територију Србије)

$A = 0.3$ (константа за територију Србије)

B - коефицијент који се одређује на основу приложене карте изолинија (слика 1)

T - трајање кише [min]

$H_{(24h,P)}$ - максимална дневна киша одређене вероватноће појаве [mm]

Максимална дневна киша одређене вероватноће појаве $H_{(24h,P)}$ добија се обрадом података са најближе кишомерне станице (издвајањем дневних максималних падавина за читав период рада станице и применом неке од теоријских функција расподеле вероватноћа). Приликом одређивања максималног протицаја сматра се да он има исту вероватноћу појаве као и киша која га је изазвала. Меродавна киша одређене вероватноће појаве може се израчунати применом:

- опште теорије екстрема (GEV – General Extreme Value), која обухвата Gumbel-ову расподелу и тропараметарску расподелу (конкавна на горе, погодна за екстремне максимуме, са негативним коефицијентом облика)
- Pearson III расподеле

Предуслов за коришћење поменутих расподела јесте располагање са низом од најмање 25 година осматрања, $N > 25$ (IWEM, 1987.).

Интензитет меродавне кише се добија на основу релације (7) (Ј а н к о в и ћ, Д., 1994):

$$I_{(T,P)} = \frac{a}{1 + \left(\frac{a}{I_{(T,P)}} \right)^b} \quad [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (7)$$

$I_{(T,P)}$ - интензитет меродавне кише трајања (T), вероватноће појаве (P)

5. ПРИМЕР ПРОРАЧУНА МАКСИМАЛНОГ ПРОТИЦАЈА

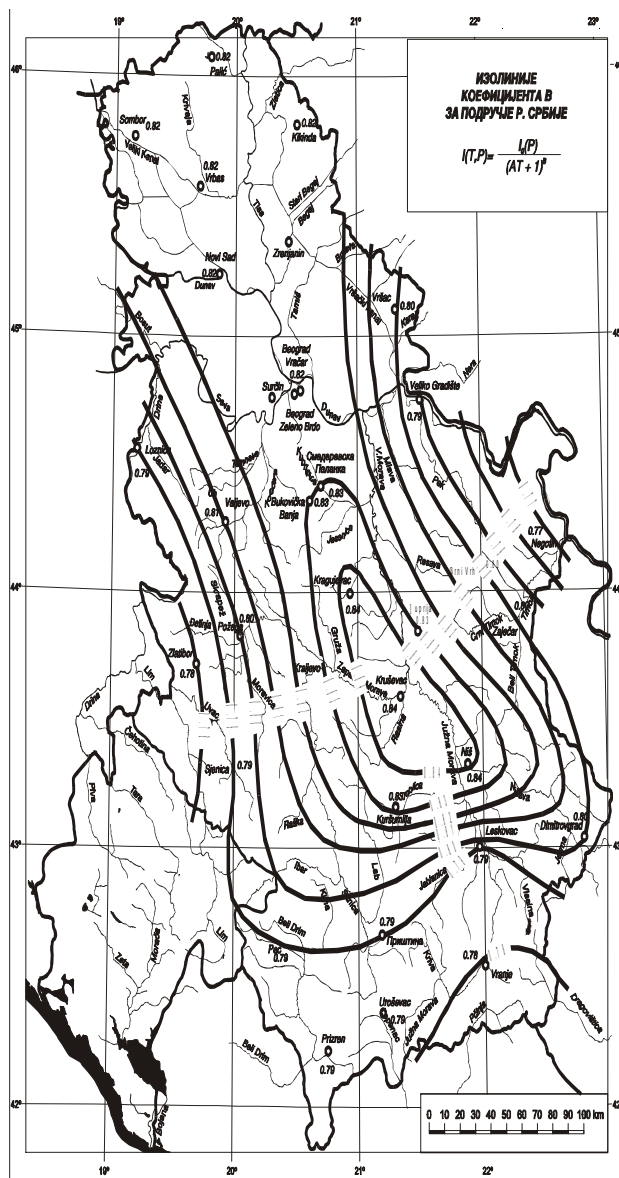
Шумски пут је угрожен водом која се слива са падине површине $A=3$ ha, дужине $L_1=360$ m, нагиба $la_1=35\%$. Падина је станиште квалитетне састојине букве и јеле, са дубоким смеђе-киселим земљиштем и слојем стеље. На основу табеле 4 одређена је вредност површинског коефицијента рапавости $n = 0.6$. На оближњој кишомерној станици, која у континуитету ради 30 година, после обраде података и применом Log-Pearson Type III расподеле, добијена је максимална дневна киша вероватноће појаве $P=1\%$, $H_{(24h,P)}=76$ mm. Помоћу карте изоленија коефицијента B (слика 1) одређена је вредност $B=0.83$. Потребно је одредити максималну количину воде која ће се појавити на путу.

$$T_1 = \left(\frac{2063}{0.83} \right)^{0.7} = 223 \text{ min.}$$

После прорачуна времена концентрације (релација 2), следи прорачун интензитета кише (релација 7):

$$I_{(T,P)} = \frac{0.1 \cdot 88.63}{1 + \left(\frac{0.1 \cdot 88.63}{I_{(T,P)}} \right)^{2.4}} = 77 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$$

Добијена минутна вредност интензитета се множи са 60, да би се израчунао часовни интензитет меродавне кише, односно, $88.63 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. На основу детерминисане хидролошке класе земљишта (A), узевши у обзир начин коришћења земљишта и нагиб падине (табела 1), одређена је вредност ко-



Слика 1 – Карта изолунија коефицијента B
 Map of isolines of coefficient B

ефицијента отицаја C = 0.14. Максималан протицај, вероватноће појаве 1% (релација 1):

$$Q_{max} = 3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

6. ЗАКЉУЧАК

Прорачун максималне количине воде која се јавља на шумским путевима представља главни улазни податак за димензионисање евакуационих објеката (одводни канали, риголе, пропусти). У литератури постоји велики број формула за прорачун максималног протицаја. Све формуле су изведене после истраживања у областима са дефинисаним дијапазоном природних својстава и могу се применити само у регионима са сличним климатским, педолошким, вегетацијским и хидролошким условима.

Примена рационалне методе, која носи епитет најчешће коришћеног модела у историји хидрологије, захтева прецизне податке о интензитету меродавне кише и коефицијенту отицаја. У овом раду је интензитет меродавне кише $I_{(T,P)}$ одређен коришћењем најрепрезентативнијег модела за територију Србије (Јанковић, Д., 1994.). Улазни податак за одређивање интензитета представља време трајања меродавне кише T_k , које је једнако времену концентрације T_c . У домаћој хидролошкој пракси није развијен погодан модел за прорачун времена концентрације T_c тако да се користе модели Kerby-ја (за течење по падинама) и Ram ser-a (течење у кориту). Коефицијент отицаја се одређује на основу детаљне анализе хидролошке групе земљишта (SCS критеријум који је прилагођен условима Србије и Црне Горе), начина коришћења земљишта и нагиба.

Употреба рационалне методе захтева теренски обилазак предметног слива и утврђивање неких основних карактеристика (начин коришћења земљишта; стање вегетационог покривача; степен деградираности ерозионим процесима).

ЛИТЕРАТУРА

- Ђоровић, М. (1984): *Одређивање хидролошке групе земљишта при дефинисању отицаја у методи SCS*, Водопривреда бр. 87, стр. 57-60, Београд.
- Institution of Water and Environmental Management (1987): *River Engineering – Part I, Design Principles*, Lavenham Press, Suffolk, England.
- Patra, K.C. (2001): *Hydrology and Water Resources Engineering*, Alpha Science, India.
- SCS National Engineering Handbook (1972): *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, USA.
- Chang, V.T.; Maidment, R.D.; Mays, W.R. (1988): *Applied Hydrology*, Mc Grow Hill Book Co., New York.

CALCULATION OF MAXIMAL DISCHARGE FOR FOREST ROADS DRAINAGE STRUCTURES

Ljubomir Letić, Ratko Ristić, Ivan Malušević

S u m m a r y

Appearance of runoff on the surfaces of forest roads without drainage structures could lead to serious destruction and endangerment of traffic safety. Significant quantity of water is consequence of intensive rainfall, snow melt or their coincidence. Quantity of runoff water is determined with height of precipitation, magnitude of the catchment, characteristics of soil layer and vegetation cover. Main input data for designing of drainage structures is maximal discharge of required probability $Q_{(max,P)}$. Calculation of maximal discharge is based on rational formula, with SCS criterions for determination coefficient of runoff C . Intensity of rain is based on regional precipitation model for Serbia.