

2. Mjerodavne količine otpadnih voda

Mjerodavne količine otpadnih voda za dimenzioniranje ovise o vrsti kanalizacijskog sustava koji se planira u urbanoj sredini. Tako se razlikuju mjerodavne količine otpadnih voda za Q_{mj} za razdjelnu, od onih za mješovitu kanalizaciju.

Razdjelna kanalizacija

- Kanalizacija otpadnih voda:

$$Q_{mj} = Q_{kom} + Q_{ind} + Q_t \quad (2.1)$$

Gdje je: Q_{kom} komunalne otpadne vode, Q_{ind} industrijske otpadne vode, Q_t „tuđe“ otpadne vode.

U slučaju suhog razdoblja pod „tuđim“ vodama se podrazumijeva samo infiltracija podzemnih voda, dok se u slučaju kišnog razdoblja ukupnoj količini „tuđih“ voda dodaju i površinske vode.

- Kanalizacija oborinskih voda:

$$Q_{mj} = Q_{mjerodavne\ oborine} \quad (2.2)$$

Gdje je: $Q_{mjerodavne\ oborine}$ količina mjerodavne (računske, projektne) oborinske vode ovisna o veličini površine, topografiji, pokrovu i namjeni zemljišta, računskom pljusu i ostalim karakteristikama o kojima će biti više riječi u točki 2.2.

Mješovita kanalizacija

$$Q_{mj} = Q_{mjerodavne\ oborine} + Q_{kom} + Q_{ind} \quad (2.3)$$

Kod mješovite kanalizacije u proračun mjerodavne količine vode Q_{mj} u obzir se ne uzimaju „tuđe“ vode. Prilikom dimenzioniranja mješovite kanalizacije potrebno je provjeriti uvjete tečenja (brzine, ispunjenost cijevi) u slučaju kišnog, ali i suhog razdoblja.

2.1. Komunalne, industrijske i tuđe vode

Komunalne otpadne vode

Mjerodavna količina komunalne otpadne vode Q_{kom} koja se koristi za dimenzioniranje objekata kanalizacijskog sustava je maksimalna satna potrošnja (protok) vode u naselju $Q_{max,h,kom}$. Maksimalna satna potrošnja naselja ovisi o veličini i karakteru naselja. Određuje se na temelju specifične potrošnje pojedinog stanovnika, broja stanovnika i koeficijenta neravnomjernosti potrošnje. Potrošnja vode za komunalne potrebe proračunava se prema sljedećem obrascu:

- Srednji dnevni protok $Q_{sr,d,kom}$

$$Q_{sr,d,kom} = q_{sp} \cdot N \quad (2.4)$$

Gdje je: q_{sp} specifična potrošnja vode po stanovniku (l/stanovnik/dan), N broj stanovnika priključenih na kanalizaciju u planskom razdoblju.

- Maksimalan satni protok $Q_{max,h,kom}$

$$Q_{max,h,kom} = Q_{sr,d,kom} \cdot K = Q_{kom} \quad (2.5)$$

Gdje je: K opći koeficijent neravnomjernosti potrošnje.

Proračun mjerodavnih komunalnih otpadnih vode Q_{kom} ovise o planskom razdoblju, tj. o prognozi potrošnje q_{sp} i broja stanovnika N tijekom planskog razdoblja. Plansko razdoblje kanalizacijskog sustava, kao i njegovih pojedinih dijelova, predstavlja broj godina unutar kojih bi se trebali ostvariti uvjeti za koje je sustav projektiran (Margeta 2011). Vremenski okvir planskog razdoblja je između 15 i 30 godina, ovisno o tipu objekta i čimbenicima kao što su:

1. očekivani životni vijek konstrukcije i opreme,
2. početni troškovi izgradnje i upravljanja,
3. mogućnosti financiranja,
4. mogućnost osiguranja planirane potrošnje vode na kraju planiranog razdoblja,
5. mogućnost proširenja kapaciteta sustava,
6. ekonomičnost poslovanja tijekom planiranog razdoblja,
7. funkcioniranje sustava u početnom razdoblju kada nije u potpunosti iskorišten,

U nastavku su prikazane prosječne i uobičajene količine otpadnih voda u kućanstvu (Tablica 2.1) i u naselju (Tablica 2.2). Te vrijednosti preporučuju se i u važećim normama za dimenzioniranje kanalizacijskih sustava (Njemačke norme ATV-A 118).

Tablica 2.1 Količine otpadnih voda u kućanstvu (po stanovniku)

Vrsta otpadne vode	Količina otpadnih voda (l/stanovnik/dan)
Kuhinjske	20 – 40
Sanitarne	35 – 95
Tuševi	35 – 105
Otpadne vode od pranja	30 – 60
Ukupno	120 – 300

Tablica 2.2 Specifična potrošnja ovisno o veličini naselja

Veličina naselja	Količina otpadnih voda (l/stanovnik/dan)
< 5.000	150
5.000 – 10.000	180
10.000 – 50.000	220
50.000 – 250.000	260
> 250.000	300

Naselja se često promatraju i projektiraju kao jedinstvene cjeline. U takvim slučajevima mjera l/stanovnik/dan je pokazatelj prosječne količine urbanih otpadnih voda te obuhvaća ukupnu količinu otpadnih voda koje nastaju u jednoj urbanoj sredini, preračunatu na jednog stanovnika. U nju su uključene kućanske otpadne vode, vode iz javnih ustanova, servisa, manjih industrijskih pogona i slično (Margeta 2011). Ova količina može varirati ovisno o naselju, no uobičajeno se u gradskim sredinama uzima da iznosi oko 80 – 95 % opskrbe količine vode po stanovniku:

Koeficijenti neravnomjernosti

Kod proračuna maksimalnih satnih vrijednosti otjecanja $Q_{max,h,kom}$ za kanalizacijske se sustave vrlo često u praksi koristi, tzv. opći koeficijent neravnomjernosti. To je koeficijent koji integrira dnevnu i satnu neravnomjernosti i služi za pretvorbu prosječne dnevne u maksimalnu satnu potrošnju komunalne otpadne vode u naselju. Postoji nekoliko empirijskih izraza izvedenih na temelju mjerenja u naseljima različitih veličina:

- **formula Fedorova**

$$K = \frac{2,69}{Q_{sr,d,kom}^{0,121}} \quad (2.6)$$

- **formula iz norme ATV-A 118**

$$K = 1,5 + \frac{2,5}{\sqrt{Q_{sr,d,kom}}} \leq 3 \quad (2.7)$$

Gdje je: $Q_{sr,d,kom}$ srednja dnevna potrošnja komunalna otpadne vode u mjernim jedinicama l/s.

Kod obje formule se koeficijent neravnomjernosti smanjuje kako srednja potrošnja raste. Drugim riječima, što je naselje veće, to su oscilacije u potrošnji manje. U vrlo malim naseljima ili kod vrlo niskih srednjih protoka ATV empirijska formula daje nerealno visoke vrijednosti koeficijenta neravnomjernosti (npr. iznad 4 – 5). Budući da su takve vrijednosti statistički moguće, ali hidraulički i tehnički nepraktične za projektiranje sustava (jer bi dovodile do prevelikih dimenzija), ATV propisuje ograničenje koeficijenta na vrijednost 3 ($K_{max} = 3$). Isto se može primijeniti i na formulu Fedorova, iako zbog strukture jednadžbe je prirast koeficijenta znatno blaži pa su izračunate vrijednosti rijetko veće od 3. Na našim prostorima češće se primjenjuje ATV formula, posebno do vrijednosti prosječnih satnih dotoka od 200 l/s. Kod većih dotoka se koriste statistika na temelju mjerenih podataka mjerenja.

Tuđe vode

Tuđe vode su sve vode koje dopijevaju u kanalizacijski sustav otpadnih voda, a ne potječu iz predviđenih izvora (domaćinstava, industrije, ustanova). Dije se na:

- Infiltracijske vode – prodiru u kanale iz okolnog podzemlja kroz pukotine, spojeve i oštećenja cijevi.
- Površinske vode – dotječu u kanale kroz poklopce i druge dijelove okana, priključke i ispuste s površina i krovova.

Na „tuđe“ vode je važno obratiti pozornost u fazi dimenzioniranja i upravljanja kanalizacijskim sustavom jer povećava količine otpadnih voda i može uzrokovati preopterećenje sustava. U „tuđe“ vode ubrajaju se i vode iz ilegalno priključenih krovnih i drugih površinskih odvoda. Zbog malih količina u odnosu na oborinske vode, tuđe vode se ne uzimaju u obzir kod dimenzioniranja kanala oborinske i mješovite kanalizacije, ali se uzimaju u obzir kod proračuna kanalizacije otpadnih voda.

Količina tuđih voda često se izražava pomoću koeficijenta otjecanja, koji predstavlja omjer između ukupno pale oborine i dijela oborine koji sudjeluje u otjecanju (ovisno o karakteristikama terena). Veće vrijednosti koeficijenta otjecanja u pravilu znače i veće količine tuđih voda po jedinici slivne površine. S porastom gustoće naseljenosti (a time i koeficijenta otjecanja) raste duljina kanalizacijske mreže, broj priključaka i priključnih okana te broj spojeva i potencijalnih mjesta infiltracije. To dovodi do veće vjerojatnosti dotjecanja tuđih voda, uključujući infiltraciju i nekontrolirano ispuštanje oborinskih voda u sustav otpadnih voda.

U smjernicama ATV 118, za kanalizacijske sustave s visokim i pretežito stalnim podzemnim vodama predlaže se:

$$\bullet \quad Q_t = Q_{\max,h} \quad (2.8)$$

Gdje je: $Q_{\max,h} = Q_{\max,h,kom} + Q_{ind}$

U Republici Hrvatskoj se uglavnom količine „tuđih“ voda određuju kao postotak od otpadnih voda i to (Margeta, 2011):

- kanalizacijski sustavi s visokim i pretežito stalnim podzemnim vodama (kontinentalni dio Hrvatske, obalna područja pod utjecajem mora, uzimajući u obzir razinu plime):

$$Q_t = Q_{sr,d} \quad (2.9)$$

- kanalizacijski sustavi bez značajnih i stalnih podzemnih voda (krška područja u Hrvatskoj):

$$Q_t = 0,5 \cdot Q_{sr,d} \quad (2.10)$$

Gdje je: $Q_{sr,d} = Q_{sr,d,kom} + Q_{ind}$

Tuđe vode imaju velik utjecaj na kanalizaciju otpadnih voda jer značajno mijenjaju režim tečenja u kanalima. Zbog toga ih je nužno uzeti u obzir pri dimenzioniranju sustava otpadnih voda. U kanalizaciji oborinskih i mješovitih voda njihov je utjecaj znatno manji, jer čine samo mali udio u ukupnim protocima te se u pravilu ne uzimaju u obzir pri dimenzioniranju kanala. Ipak, treba ih uzeti u obzir pri dimenzioniranju ostalih građevina u sustavu, kao što su: crpne stanice, retencije, preljevni objekti i uređaji za pročišćavanje.

Industrijske tehnološke vode

Kod idejnih rješenja, a iznimno i kod idejnih projekata, količine industrijskih otpadnih voda mogu se preuzeti iz literature. Prema ATV–A 118, za industrijska i trgovačka područja za koja nisu poznate stvarne količine otpadnih voda, preporučuju se sljedeće jedinične vrijednosti:

- aktivnosti s malim utroškom vode: 0,5 l/s/ha
- aktivnosti sa srednjim utroškom vode: 1,0 l/s/ha
- aktivnosti s velikim utroškom vode: 1,5 l/s/ha

Karakteristični protoci koji se koriste u dimenzioniranju kanalizacijskog sustava su:

- maksimalni (vršni) satni protok (kanalizacijske cijevi, crpne stanice),
- srednji satni protok u maksimalnom danu (retencije, separatori itd.),
- minimalni satni protok (crpne stanice).

Pri određivanju mjerodavnih količina otpadnih voda potrebno je uzeti u obzir:

- ekonomske i tehnološke karakteristike kanalizacijskog sustava,
- vijek trajanja pojedinih elemenata sustava,
- pouzdanost i valjanost ulaznih podataka.

Uštede pri odabiru manjih dimenzija cijevi su relativno male u odnosu na ukupne troškove izgradnje. Cijena samih cijevi čini samo oko 10 – 20 % troškova izvedbe jednog metra kanala, dok je njihov vijek trajanja dug (više od 30 godina). Zbog toga je naknadna zamjena manjih profila većim obično znatno skuplja nego da se odmah ugrade veći profili pri izgradnji sustava. Za crpke i ostale uređaje i opremu je opravdano dimenzioniranje na kraće plansko razdoblje jer će se ionako ranije mijenjati ili nadograđivati. Preporučuje se izračunati mjerodavne količine za više vremenskih razdoblja razvoja sustava: početno stanje, za 10, 20 i 30 godina.

Zadatak 2.1

Za naselje s planiranim razdjelnim sustavom odvodnje odrediti mjerodavnu količinu otpadnih voda za hidrauličko dimenzioniranje glavnog kolektora.

Odabrano projektno razdoblje iznosi $PR = 25$ godina, a sadašnji broj stanovnika $N_0 = 12\,000$.

Specifičnu potrošnju vode za kućanske potrebe uzeti prema smjernicama ATV-A118, usvojiti godišnji postotak prirasta stanovništva $p = 1,3\%$.

Rješenje

Izračun broja stanovnika na kraju projektnog razdoblja:

$$N_{PR} = N_0 \cdot \left(1 + \frac{p}{100}\right)^{PR}$$
$$N_{PR} = 12000 \cdot \left(1 + \frac{1,3}{100}\right)^{25} \approx 16574 \text{ stanovnika}$$

Izračun ukupne količine otpadnih voda:

- Srednja dnevna količina komunalnih otpadnih voda

$$Q_{sr,d,kom} = N \cdot q_{sp}$$

$$Q_{sr,d,kom} = 16574 \text{ stanovnika} \cdot 220 \text{ l/stanovnik/dan}$$

$$Q_{sr,d,kom} = 3646280 \text{ l/dan} = 42 \text{ l/s}$$

- Tuđe vode

$$Q_t = Q_{sr,d,kom} = 42 \text{ l/s}$$

- Maksimalna satna količina otpadnih voda

$$Q_{max,h} = Q_{max,h,kom} + Q_t = (Q_{sr,d,kom} \cdot K) + Q_t$$

$$K = 1,5 + \frac{2,5}{\sqrt{Q_{sr,d}}} \leq 3$$

$$K = 1,5 + \frac{2,5}{\sqrt{42}} = 1,88$$

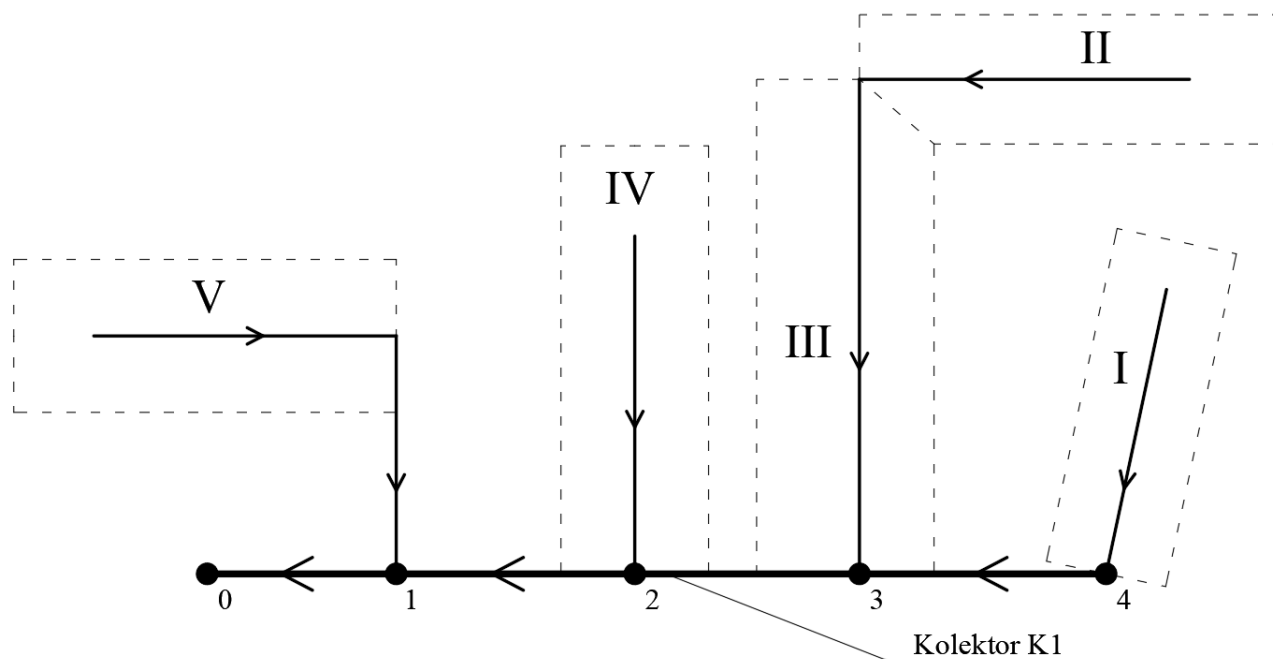
$$Q_{max,h} = Q_{mj} = 42 \text{ l/s} \cdot 1,88 + 42 \text{ l/s} = 121 \text{ l/s}$$

Zadatak 2.2

Za razdjelni kanalizacijski sustav potrebno je odrediti mjerodavne količine komunalne otpadne vode za dimenzioniranje kolektora (cjevovoda) K1. Shematski prikaz naselja i kolektora prikazan je na Slici 2.1. Broj stanovnika i specifična potrošnja po slivovima prikazani su u Tablici 2.3.

Tablica 2.3 Broj stanovnika i specifična potrošnja po slivovima

Površina	I	II	III	IV	V
Broj stanovnika	550	650	800	480	300
q_{sp} (l/stanovnik/dan)	130	130	130	130	130



Slika 2.1 Shematski prikaz naselja i kolektora

Rješenje

Izračun ukupne količine komunalnih otpadnih voda za Sliv I:

$$Q_{sr,d,kom,I} = N \cdot q_{sp}$$

$$Q_{sr,d,kom,I} = 550 \text{ stanovnika} \cdot 130 \text{ l/stanovnik/dan}$$

$$Q_{sr,d,kom,I} = 71500,00 \text{ l/dan} = 0,8 \text{ l/s}$$

$$Q_{t,I} = Q_{sr,d,kom,I} = 0,8 \text{ l/s}$$

$$Q_{max,h,I} = (Q_{sr,d,kom,I} \cdot K) + Q_{t,I}$$

$$K = 1,5 + \frac{2,5}{\sqrt{0,83}} = 4,3 > 3 \rightarrow K = 3$$

$$Q_{max,h,I} = 0,8 \text{ l/s} \cdot 3 + 0,8 \text{ l/s}$$

$$Q_{max,h,I} = 3,2 \text{ l/s}$$

Vrijednosti mjerodavnih količina komunalne otpadne vode po ostalim slivovima i dionicama kolektora K1 prikazani su u Tablicama 2.4 i 2.5.

Tablica 2.4 Rezultati srednjih dnevnih i maksimalnih satnih količina otpadnih voda po slivovima

	Sliv I	Sliv II	Sliv III	Sliv IV	Sliv V
$Q_{sr,d,kom}$ [l/s]	0,8	1	1,2	0,7	0,5
Q_t [l/s]	0,8	1	1,2	0,7	0,5
K	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
$Q_{max,h}$ [l/s]	3,2	4	4,8	2,8	2

Tablica 2.5 Mjerodavne količine komunalne otpadne vode po dionicama

Dionica	Pripadajući slivovi	Q_{mj} [l/s]
4 - 3	I	3,2
3 - 2	I + II + III	12
2 - 1	I + II + III + IV	15
1 - 0	I + II + III + IV + V	17

Pri proračunu mjerodavnih količina otpadne vode po dionicama, nije uzeto u obzir otjecanje duž pojedinog sliva i dionice, već su protoci simultano zbrajani (superponirani). Tako je prema gore navedenim rješenjima pretpostavljeno da otpadne voda sa slivova I i V dolaze do točke 0 u isto vrijeme. To u stvarnosti nije slučaj, ali se na ovaj način dobivaju veće vrijednosti protoka te je proračun na neki način na strani sigurnosti.

Na temelju dobivenih protoka, nastavno se provodi dimenzioniranje cijevi pojedinih dionica.

2.2 Oborinske vode

Za razliku od komunalnih i industrijskih otpadnih voda, kod kojih su količine i sastav uglavnom poznati i mogu se prilično točno predvidjeti, oborinske vode ponašaju se drugačije. Njihove količine i sastav imaju stohastičke karakteristike – dakle, promjenjivi su i ovise o slučajnim okolnostima.

Zagađenje u oborinskim vodama najizraženije je na samom početku kiše. Razlog tome je što se prvim oborinama ispire sav nakupljeni materijal sa slivnih površina – prašina, ulja, gume, lišće i drugi zagađivači. Kako kiša traje dulje, količina zagađenja postupno se smanjuje jer su površine sve čišće. Pritom važnu ulogu ima i trajanje sušnog razdoblja koje je prethodilo kiši: što je ono dulje, to se više zagađivača nakupi, pa će i početno onečišćenje oborinskih voda biti veće.

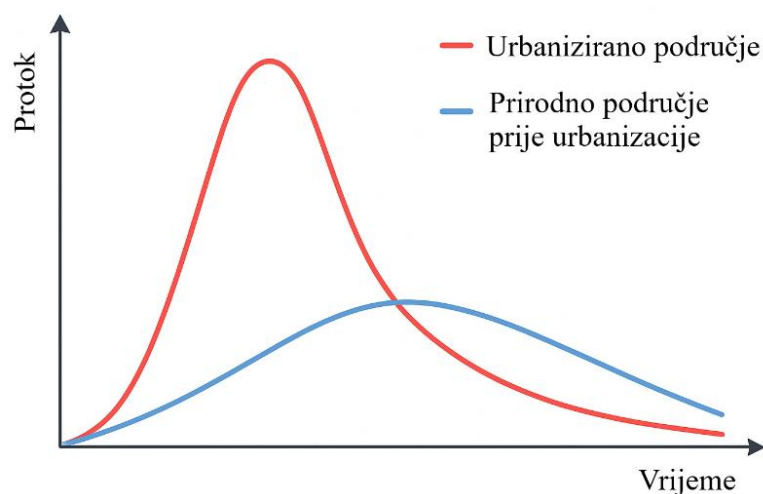
Za inženjere je važno razlikovati dva aspekta:

- protok oborinskih voda bitan za dimenzioniranje i projektiranje kanala i cjevovoda,
- hidrogram (promjena protoka kroz vrijeme, površina ispod hidrograma predstavlja volumen otjecanja) potreban pri projektiranju složenijih objekata, poput crpnih stanica, retencijskih i akumulacijskih bazena, preljevni građevina te uređaja za pročišćavanje.

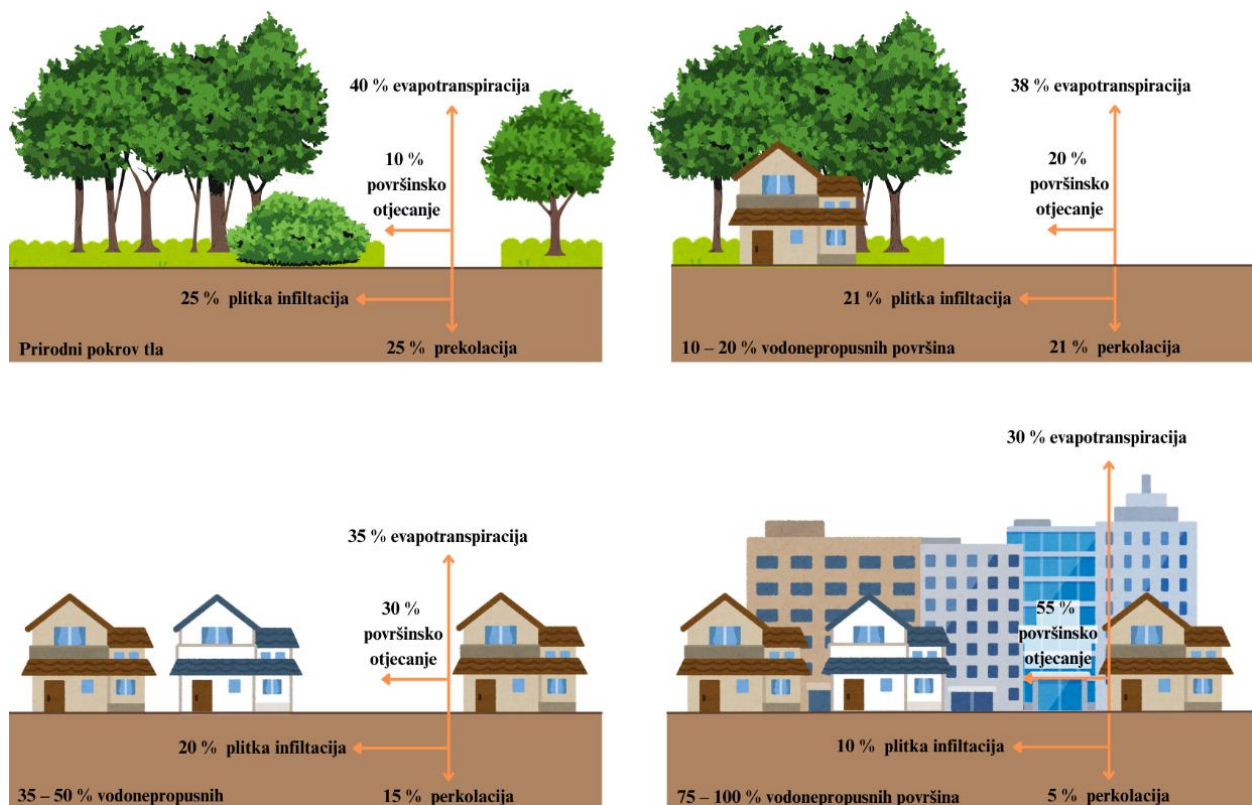
U praksi se danas proračun oborinskih voda uglavnom oslanja na racionalnu formulu (Poglavlje 2.2.1) i na standardne simulacijske modele, npr. SWMM, STORMCAD, MOUSE.

Utjecaj urbanizacije na količinu oborinske vode, tj. promjenu volumena otjecanja i vršno otjecanje prikazano je na Slikama 2.2 i 2.3. Zbog velikog udjela nepropusnih površina (asfalt, beton, krovovi):

- smanjuje se infiltracija u tlo i time opada razina podzemnih voda,
- hidrogram se mijenja – vrijeme koncentracije postaje kraće, a vršni protoci veći,
- smanjuje se evapotranspiracija jer nestaju zelene površine, što dodatno mijenja prirodni vodni ciklus.



Slika 2.2 Hidrogram otjecanja za slučaj prije i poslije urbanizacije



Slika 2.3 Utjecaj urbanizacije na bilancu vode

2.2.1 Racionalna metoda

Za određivanje mjerodavnih protoka oborinske vode radi dimenzioniranja kanalizacijskog sustava urbanih područja često se koristi, tzv. racionalna (Lloyd – Davies) metoda. Racionalna formula služi za proračun maksimalnog, vršnog protoka oborinskih voda. Norma EN 752:2008 (opisuje principe hidrauličkog dimenzioniranja vanjskih kanalizacijskih sustava) preporuča da se metoda koristi za slivove do 2 km² ili vrijeme koncentracije t_c do 15 minuta. Metoda daje dobre rezultate i za veće slivove (do 13 km²).

Maksimalan protok Q prema racionalnoj jednadžbi određuje se preko sljedeće jednakosti:

$$Q_{\max} = C \cdot i \cdot A = Q_{\text{mjerodavne oborine}} \quad (2.11)$$

Gdje je: Q maksimalan protok oborinske vode, C koeficijent otjecanja, i intenzitet oborine, A površina sliva do računskog profila.

Kako bi se odredio projektni intenzitet oborine i , potrebno je znati dva podatka:

1. povratno razdoblje (P) – koliko se često očekuje pojava određene oborine,
2. trajanje oborine – koje se u proračunima uzima jednako vremenu koncentracije sliva t_c .

Da bi se mogla koristiti racionalna metoda za proračun oborinskog otjecanja, potrebno je prihvatiti nekoliko osnovnih pretpostavki:

1. Oborina je jednolika – pretpostavlja se da kiša pada ravnomjerno po cijelom slivu.
2. Intenzitet oborine je stalan – ne mijenja se tijekom vremena.
3. Maksimalno otjecanje javlja se na računskom profilu u trenutku kada cjelokupno slivno područje sudjeluje u formiranju otjecanja.
4. Trajanje oborine jednako je vremenu koncentracije ($t_k = t_c$) – kišni događaj traje onoliko koliko je potrebno da voda s najudaljenije točke sliva stigne do izlaza.

5. Povratno razdoblje vršnog otjecanja i projektiranog pljuska je jednako – ako proračunavamo oborinu za, primjerice, povratno razdoblje od 10 godina, tada se pretpostavlja da će i proračunati protok (poplava) imati isto povratno razdoblje.
6. Povećanje površine $\approx$ povećanje duljine – površina sliva raste proporcionalno s njegovom duljinom.
7. Vrijeme koncentracije je kratko.
8. Koeficijent otjecanja je stalan – ne mijenja se s intenzitetom oborine niti s prethodnom vlažnošću tla.
9. Otjecanje je površinsko – podzemni tokovi i infiltracija se zanemaruju.
10. Nema značajnog zadržavanja vode u slivu – zadržavanje vode u depresijama i retencijama se zanemaruje.

Ukratko, racionalna metoda se koristi pod uvjetom da je sliv relativno mali, homogen i jednostavan, te da kišni događaji imaju kratko trajanje i ujednačen intenzitet.

2.2.1.1 Koeficijent otjecanja C

Koeficijent otjecanja C predstavlja omjer između maksimalne količine vode koja otječe sa sliva i ukupne količine oborine koja padne u vremenskom intervalu vremena koncentracije t_c . Drugim riječima, C pokazuje koliki dio oborine sudjeluje u procesu otjecanja, a koliki dio se gubi infiltracijom u tlo, evapotranspiracijom, zadržavanjem u vegetaciji ili depresijama terena. To je koeficijent koji u racionalnoj metodi služi za transformaciju ukupno pale (bruto) kiše u dio kiše koji sudjeluje u otjecanju (efektivna, neto kiša). Jednadžba kojom se opisuje glasi:

$$C = \frac{V_e}{V_u} = \frac{H_{P,e} \cdot A}{H_{P,u} \cdot A} = \frac{H_{P,e}}{H_{P,u}} \quad (2.12)$$

Gdje je: V_e volumen otekle vode, V_u volumen ukupno pale oborine, $H_{P,e}$ količina (visina) efektivne oborine (koja sudjeluje u otjecanju), $H_{P,u}$ količina (visina) ukupno pale oborine, A površina sliva.

Važno je naglasiti da, iako se u proračunu uzima kao konstantan, koeficijent otjecanja mijenja se tijekom samog kišnog događaja (uslijed promjene vlažnosti tla, a samim time i infiltracijskog kapaciteta tla), ali i tijekom različitih godišnjih razdoblja. Njegova veličina ovisi o klimatskim značajkama područja, karakteristikama slivnih površina (nagib, vrsta pokrova, stupanj izgrađenosti), procesima poput infiltracije, evapotranspiracije, gubitaka u vegetaciji i depresijama.

Za oborine s povratnim razdobljem $P < 5$ godina, preporučuje se korištenje vrijednosti C prikazanih u Tablici 2.6 i Tablici 2.7 (njemačke smjernice ATV-DVWK-A 118). Odabir vrijednosti ovisi o razini dokumentacije. U studijama, idejnim rješenjima i idejnim projektima koriste se koeficijenti prema tipu izgrađenosti područja (Tablici 2.6). U glavnim i izvedbenim projektima koriste se precizniji koeficijenti prema vrsti površine (Tablici 2.7).

Pri odabiru koeficijenata nužno je osigurati da oni realno prikazuju buduće stanje sliva, odnosno planirani stupanj urbanizacije i način korištenja prostora.

U slučaju da se na analiziranom slivnom području nalazi nekoliko različitih vrsta površina, proračunava se srednji koeficijent otjecanja $\bar{C}$ na sljedeći način:

$$\bar{C} = \frac{C_1 \cdot A_1 + C_2 \cdot A_2 + \dots + C_n \cdot A_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad (2.13)$$

Tablica 2.6 Raspon vrijednosti koeficijenta otjecanja C prema opisu područja odvodnje A

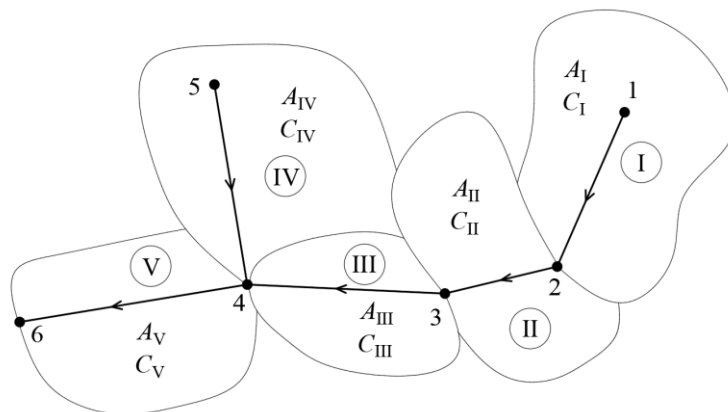
Karakteristike područja	C^*	C^{**}
Područja ureda, trgovina i sl.: - stari dio grada - predgrađe	0,7 0,5	0,95 0,7
Područja stanovanja: - rijetka izgradnja obiteljskih kuća - gusta izgradnja obiteljskih kuća - gusta stambena izgradnja	0,3 0,4 0,6	0,5 0,6 0,8
Industrijska područja: - područja rjeđe izgradnje - područja guste izgradnje	0,3 0,6	0,7 0,9
Parkovi, groblja i slično	0,1	0,25
Igrališta i slično	0,2	0,35
Željeznički kolodvori	0,2	0,4
Neizgrađene površine	0,1	0,3

* manje vrijednosti za $t_c < 20$ min, ** veće vrijednosti za $t_c > 30$ min

Tablica 2.7 Raspon vrijednosti koeficijenta otjecanja C prema vrsti površine B

Karakteristike površine	C
Ulice: - asfalt - beton - cigla - tucanik	0,70 – 0,95 0,80 – 0,95 0,70 – 0,85 0,25 – 0,45
Šetnice, pločnici i slično: - betonske ili asfaltne - pločnik sa spojnica - mozaik od kamenih ploča i sl.	0,75 – 0,85 0,70 – 0,90 0,40 – 0,55
Krovovi: - veliki ravni krovovi, preko 10.000 m² - mali ravni krovovi, manje od 100 m²	0,8 – 1,0 0,5 1,0
Tratine, prirodne površine – pjeskoviti teren: - ravan, 2 % - srednji nagib, 2 – 7 % - strm, 7 % i više	0,05 – 0,10 0,10 – 0,15 0,15 – 0,20
Tratine, prirodne površine – manje propusno tlo: - ravan, 2 % - srednji nagib, 2 – 7 % - strm, 7 % i više	0,13 – 0,17 0,18 – 0,22 0,25 – 0,35

Primjer: Odrediti vrijednost računskog koeficijenta otjecanja C za slivna područja sa Slike 2.4.



Slika 2.4 Shema slivnih područja

$$\bar{C}_I = C_I \quad \text{Dionica 1 – 2}$$

$$\bar{C}_{II} = \frac{C_I \cdot A_I + C_{II} \cdot A_{II}}{A_I + A_{II}} \quad \text{Dionica 2 – 3}$$

$$\bar{C}_{III} = \frac{C_I \cdot A_I + C_{II} \cdot A_{II} + C_{III} \cdot A_{III}}{A_I + A_{II} + A_{III}} \quad \text{Dionica 3 – 4}$$

$$\bar{C}_{IV} = \frac{C_{IV} \cdot A_{IV}}{A_{IV}} \quad \text{Dionica 5 – 4}$$

$$\bar{C}_V = \frac{C_I \cdot A_I + C_{II} \cdot A_{II} + C_{III} \cdot A_{III} + C_{IV} \cdot A_{IV} + C_V \cdot A_V}{A_I + A_{II} + A_{III} + A_{IV} + A_V} \quad \text{Dionica 4 – 6}$$

2.2.1.2 Računsko povratno razdoblje

Kao što je napisano ranije u tekstu, kako bi se odredio intenzitet oborine mjerodavan za dimenzioniranje objekata kanalizacijske mreže potrebno je odrediti računsko povratno razdoblje oborine. Povratno razdoblje (ili povratni period) ovdje će se označavati sa slovom P iako se u literaturi mogu naći oznake T i PP .

Povratno razdoblje predstavlja prosječno vremensko razdoblje (izraženo u godinama) u kojem se očekuje da će se određena oborina pojaviti barem jednom. Na primjer, oborina s povratnim razdobljem od 5 godina statistički se očekuje jednom u pet godina. Povratno razdoblje P predstavlja recipročnu vrijednost vjerojatno pojave p :

$$P = \frac{100}{p (\%)} \quad (2.14)$$

Gdje je: p vjerojatnost pojave u %.

Primjer: Odrediti vjerojatnost pojave p oborine povratnog period 4 godine.

$$p = \frac{1}{P} = \frac{1}{4} = 0,25 = 25 \%$$

Prema tome, vjerojatnost p da će u ovoj godini pasti oborina s povratnim periodom $P = 4$ godine iznosi 25 %.

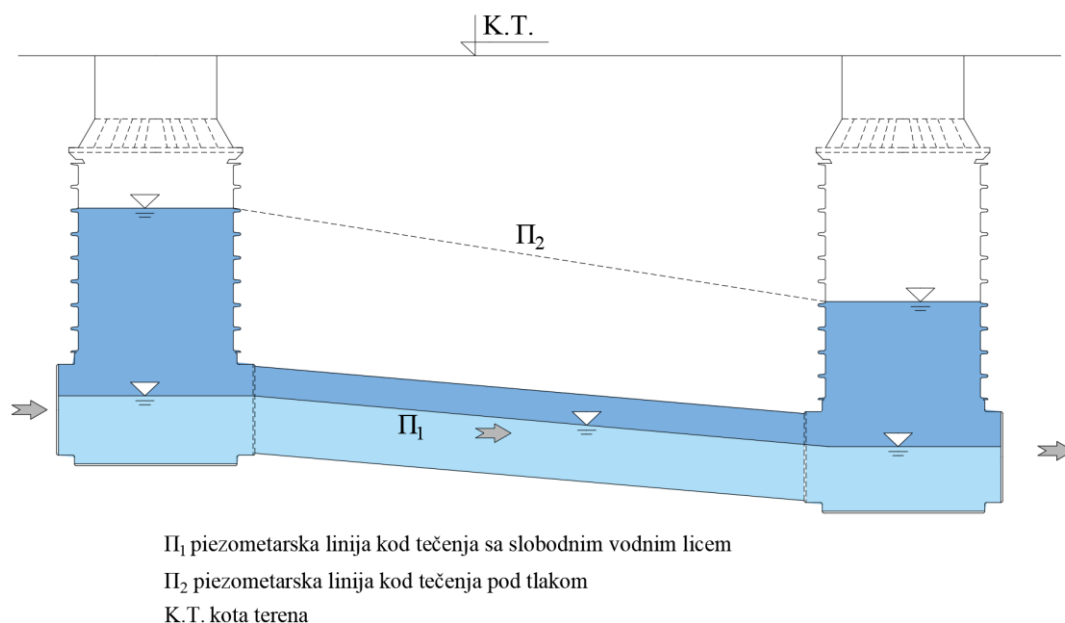
U praksi se za stambena područja najčešće koristi povratno razdoblje od 2 do 5 godina, dok se za poslovne i vrijedne gradske zone uzima dulje povratno razdoblje, obično 5 do 15 godina. Izbor odgovarajućeg povratnog razdoblja temelji se na ekonomskoj procjeni – uspoređuju se moguće štete od poplava s jedne strane i troškovi izgradnje sustava oborinske odvodnje s druge. Time se postiže kompromis između sigurnosti sustava i opravdanosti ulaganja. Prikaz povratnih razdoblja za različita područja prema normi EN 752:2008 prikazan je u Tablici 2.8.

Tablica 2.8 Povratna razdoblja prema preporukama norme EN 752-4

Projektirano vrijeme ponavljanja kiše * (1 u n godina)	Područje	Projektirano vrijeme ponavljanja poplave (1 u n godina)
1 u 1	Seoska područja	1 u 10
1 u 2	Gradska područja	1 u 20
1 u 2	Gradski centar (trgovački centar) s provjerom plavljenja	1 u 30
1 u 5	Gradski centar (trgovački centar) bez provjere plavljenja	1 u 30
1 u 10	Podzemna željeznica, propusti, garaže i slične građevine	1 u 50

* Za ove projektne veličine ne smije se javiti uspor u kanalima (tlačno strujanje).

Iz Tablice 2.8 je vidljivo da se za proračun oborinske odvodnje preporučuju razmjerno velika povratna razdoblja poplava, dok su povratna razdoblja računskih oborina manja. Razlog za to je što se računski kiša koristi za dimenzioniranje kanala koji rade u režimu slobodnog vodnog lica (kanali nisu potpuno ispunjeni). Ako dođe do oborine većeg intenziteta od računski kiše (tj. s većim povratnim razdobljem), kanali će se napuniti do vrha i nastupit će tlačno tečenje. U tom slučaju kapacitet kanala postaje znatno veći nego u uvjetima slobodnog tečenja (Slika 2.5, vidi razliku pada pijezometarske linije Π_1 i Π_2 – strmiji pad $\rightarrow$ veća brzina $\rightarrow$ veći protok). Time se postiže i veća razina zaštite od poplava nego što bi se očekivalo prema osnovnom proračunu. Budući da se radi o rijetkim i kratkotrajnim pojavama, dopušta se da sustav odvodnje povremeno radi u režimu tlačnog tečenja. Upravo je to razlog zbog kojeg se u projektiranju biraju kiše manjeg povratnog razdoblja, iako se u konačnici želi postići veća zaštita od plavljenja, odnosno veće povratno razdoblje za samu pojavu poplave (Margeta, 2011).



Slika 2.5 Usporedba tečenja pod tlakom i sa slobodnim vodnim licem

2.2.1.3 Vrijeme koncentracije

Kao što je spomenuto ranije u tekstu, prema teoriji racionalne metode maksimalno otjecanje nastupa u trenutku kada cijeli sliv sudjeluje u otjecanju. Vrijeme potrebno da se to dogodi naziva se vrijeme koncentracije t_c . Vrijeme koncentracije je razdoblje potrebno da kap efektivne oborine, pala na najudaljeniju točku sliva, stigne do promatranog (računskog) profila otjecanja.

Vrijeme koncentracije može se rastaviti na dvije komponente:

- t_1 – vrijeme površinske koncentracije (od početka oborine do ulaska u kanalizaciju),
- t_2 – vrijeme tečenja kroz oborinsku kanalizaciju.

Prema tome, vrijedi da koncentracije t_c iznosi:

$$t_c = t_1 + t_2 \quad (2.15)$$

Vrijeme površinske koncentracije t_1 ovisi o duljini puta otjecanja, koeficijentu otjecanja, nagibu površine, karakteristikama površinskog uređenja (npr. odvodni jarci, asfaltirane površine), povratnom razdoblju kiše. U pravilu je t_1 kraće kada je nagib terena veći, teren vodonepropusniji (više vode oteče, manje se upija u zemlju) i površinska odvodnja bolje uređena.

Za procjenu vremena površinske koncentracije t_1 razvijen je niz empirijskih i polu-teorijskih formula i metoda. One su razvijene na temelju mjerenja ili pojednostavljenih modela strujanja i vrijede za različite uvjete:

- plitko površinsko otjecanje ili otjecanje u tankom sloju (*eng. sheet flow*),
- plitko koncentrirani tok (*eng. shallow concentrated flow*),
- otjecanje kroz otvorene kanale ili vodotoke (*eng. channel flow*).

Svaka metoda je razvijena za određene uvjete sliva (npr. nagib sliva, duljina toka, tip površine). Nema univerzalnog izraza te se metoda bira prema fazama toka i karakteristikama terena. Empirijske formule daju različite rezultate te je potrebno razumjeti njihova ograničenja i usporediti dobivene vrijednosti. Kod složenijih slivova preporučuje se kombinacija metoda ili primjena numeričkih modela (npr. SWMM, HEC-HMS). U Tablici 2.9 su prikazane najčešće korištene metode, njihove značajke, područje primjene i ograničenja.

Tablica 2.9 Metode za proračun površinskog vremena koncentracije t_1

Metoda	Formula	Primjena, ograničenja i napomene
Hathawayeva formula	$t_1^{2,14} = \frac{2,19 \cdot L \cdot n}{I^{1/2}}$ L – duljina toka (m) n – koef. usporenja I – prosječan nagib sliva	Primjena kod većih udaljenosti, tipično za ravnije i duže plohe gdje otjecanje traje dulje. Vrijedi za srednje udaljenosti (≤ 365 m). Formula je empirijska i nema čvrsto definiran raspon primjene. U novijim priručnicima (npr. HEC-HMS) rijetko se preporučuje; zamijenjena je robusnijim metodama (Kirpich, NRCS, kinematički val). Hathaway je “povijesna” alternativa, ali danas se u inženjerskoj praksi koristi iznimno rijetko, više je od akademskog značaja, nego praktičnog.
Kirpicheva jednadžba	$t_1 = \frac{0,00032 \cdot L^{0,77}}{I^{0,385}}$ L – duljina toka (m) I – prosječan nagib sliva	Empirijska formula izvedena iz opažanja, ne iz teorijskih zakonitosti. Razvijena (1940.) na temelju podataka o malim i srednje velikim slivovima u SAD-u. Najčešće se koristi za prirodne i strme terene s jasno izraženim padom. Daje brzu i jednostavnu procjenu vremena koncentracije, pa se često koristi u preliminarnim hidrotehničkim proračunima. Uključuje samo duljinu toka i nagib terena jednostavna za primjenu, nema potrebe za parametrima hrapavosti ili oborine → praktična za terenski rad kad podaci nedostaju. Razvijena za američke uvjete; slabija primjena u urbanim područjima. Baza podataka na kojoj je nastala ne uključuje vrlo male nagibe.

Izzardova jednadžba	$t_1 = \frac{0,94 \cdot (0,0178i + c)L^{1/3}}{I^{1/3} \cdot i^{2/3}}$ <i>i</i> – intenzitet oborine (mm/h) <i>c</i> – koef. usporenja <i>L</i> – duljina toka (m) <i>I</i> – prosječan nagib sliva	Koristi se za procjenu vremena koncentracije u plitkom površinskom otjecanju (<i>eng. sheet flow</i>). Iako je jednostavna, osjetljiva je na odabir intenziteta kiše i koeficijenta usporenja, pa se u modernoj praksi koristi rjeđe od metoda poput NRCS ili Kirpicha.
Kinematički val	$t_1 = \frac{1,36}{i^{0,4}} \left(\frac{nL}{\sqrt{I}} \right)^{0,6}$ <i>n</i> – Manningov koef. <i>L</i> – duljina toka (m) <i>i</i> – intenzitet kiše (mm/h) <i>I</i> – prosječan nagib sliva	Procjena vremena koncentracije kod plitkog površinskog otjecanja na malim slivovima, kada dominiraju nagib i trenje, a dinamički efekti nisu značajni. Prednost joj je jednostavnost i mala potreba za podacima, pa je često korištena u inženjerskoj praksi i softverskim alatima. Posebno pogodna za male i jednostavne slivove, gdje je tok ujednačen: krovovi, ceste, mali urbani ili poljoprivredni slivovi. Ne uključuje promjene brzine (ubrzanje/deceleracija) ni utjecaj lokalnih promjena tlaka. Time je manje točna u situacijama s naglim promjenama toka. Kod vrlo blagih nagiba (<i>S</i>→0) rezultati mogu biti nerealni (pretjerano veliko <i>t</i>₁). Kod vrlo strmih slivova može podcijeniti vrijeme koncentracije. Vrijeme koncentracije jako ovisi o procijenjenom nagibu, hrapavosti i intenzitetu kiše. Mala pogreška u unosu daje veliku razliku. Ne može modelirati pojave poput: povratnog toka, formiranja zastoja u sustavu, tlačnog režima ili hidrauličkih skokova.
NRCS metoda	Za neasfaltirane površine: $v = 4,9178 \cdot I^{0,5}$ Za asfaltirane površine: $v = 6,196 \cdot I^{0,5}$ $t_1 = \frac{L}{v}$ <i>L</i> – duljina toka (m) <i>v</i> – brzina (m/s) <i>I</i> – prosječan nagib sliva (m/m)	Primjenjuje se na onim dionicama sliva gdje se površinski sloj otjecanja koncentrirao u manje tokove, obično nakon 100 – 300 m od ruba sliva. U toj zoni tok se opisuje kao plitko koncentrirani (<i>eng. shallow concentrated flow</i>), što je prijelaz između plitkog površinskog otjecanja i toka u kanalima. Može se koristiti tek nakon što plitko površinsko otjecanje završi (najčešće nakon 30 – 100 m, a najviše 300 m od ruba sliva). Brzina se računa samo kao funkcija nagiba i tipa površine. Ne uključuje hrapavost podloge ili detaljne karakteristike površine. Mala promjena u procjeni nagiba <i>S</i> značajno mijenja izračunanu brzinu i time vrijeme koncentracije. Ne uključuje intenzitet kiše pa vrijedi samo kao geometrijska/empirijska aproksimacija (za razliku od, npr. metode kinematičkog vala).
Manningova jednadžba za otvorene kanale	$Q = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} A$ $v = \frac{Q}{A}$ $t_1 = \frac{L}{v}$ <i>A</i> – površina presjeka (m²) <i>R</i> – hidraulički radijus (m) <i>I</i> – nagib kanala (m/m) <i>n</i> – Manningov koef. <i>L</i> – duljina kanala (m)	Primjenjuje se za tečenje otvorenim kanalima i vodotocima za slučaj jednolikog ustaljenog tečenja. Potrebna poznata geometrija korita i dosljedan odabir hrapavosti.

Koeficijenti usporavanja *n* i *c* u Hathawayovoj, odnosno Izzardovoj formuli po značenju odgovaraju Manningovom koeficijentu hrapavosti *n*. Iako se matematički pojavljuje u drugačijem obliku, u praksi se koeficijenti često uzima iz tablica sličnih onima za Manningov koeficijent *n*.

U praksi se često u urbanim sredinama gdje je duljina površinskog otjecanja manja od 50 m, vrijednosti *t*₁ kreću između 3 i 15 minuta. Za gusto naseljena područja (kolektivna izgradnja) može se usvojiti *t*₁ = 5 min, a za individualnu izgradnju *t*₁ = 10 min. Ove vrijednosti vrijede za povratno razdoblje *P* = 1 godina, dok se za druga povratna razdoblja koriste se vrijednosti dane u Tablici 2.10.

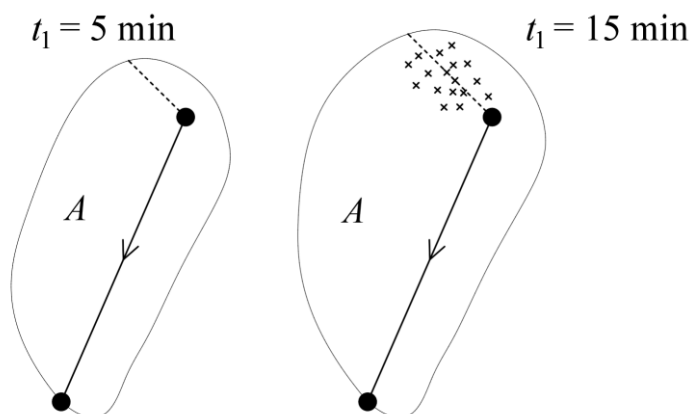
Tablica 2.10 Vrijednosti površinske koncentracije t_1 u zavisnosti od povratnog razdoblja P

Povratno razdoblje P	t_1 [min] za gustu naseljenost	t_1 [min] za individualnu izgradnju
0,5	7	15
1	5	10
2	4	8
5	3	6

Vrijednost vremena površinske koncentracije t_1 ovisi o udaljenosti od ruba sliva do prvog slivnika, ali i o eventualnim preprekama na putu otjecanja (Slika 2.6). Na manjim slivovima, gdje površina ne prelazi 3 do 4 ha preporučuju se sljedeće vrijednosti:

- $t_1 = 5$ min – kada je prvi slivnik postavljen neposredno uz granicu podsliva (voda brzo ulazi u kanalizaciju).
- $t_1 = 15$ min – kada između kraja sliva i prvog slivnika postoji prepreka, primjerice objekt, vegetacija ili druga zapreka, zbog koje se otjecanje usporava.
- $t_1 = 10 - 15$ min – za uobičajene mreže na ravnim terenima, gdje je put otjecanja dulji i bez većih prepreka.

Dobivene pretpostavljene vrijednosti uvijek se trebaju provjeriti jednostavnijim proračunom i analizom karakteristika područja otjecanja (nagib, hrapavost, duljina puta). Za veće slivove potrebno je vrijednost t_1 izračunati jednim od predloženih načina u Tablici 2.9.



Slika 2.6 Određivanje vremena površinske koncentracije

Za određivanje vremena tečenja kroz kanalizacijsku mrežu t_2 koriste se:

- duljina cijevi (L) – poznata iz situacijskog rješenja mreže,
- brzina vode u cijevi (v) – određuje se na temelju tablica za dimenzioniranje (brzine dobivene pomoću Manningove jednadžbe), uzimajući u obzir srednji nagib cijevi, oblik presjeka i stupanj punjenja cjevovoda.

Vrijeme tečenja t_2 računa se jednostavno:

$$t_2 = \frac{L}{v} \quad (2.16)$$

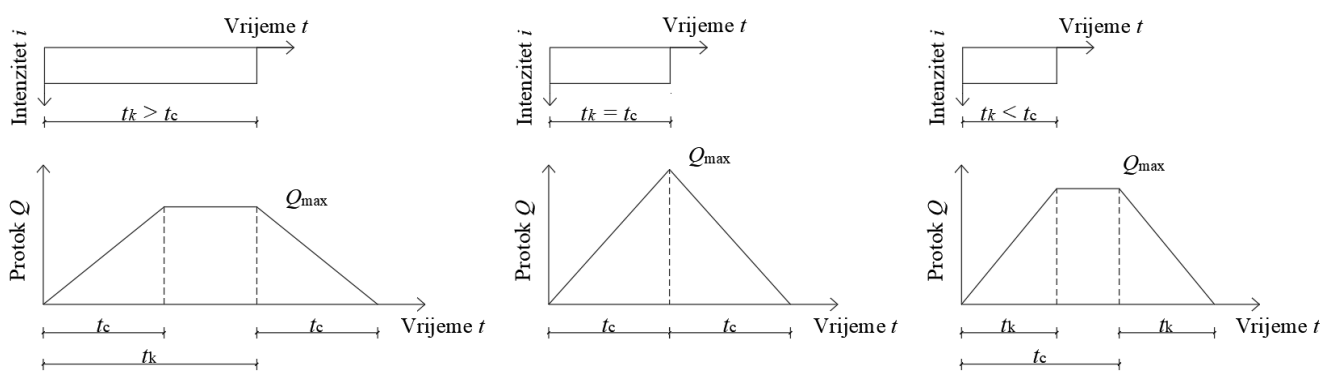
Budući da brzina ovisi o stvarnom hidrauličkom režimu u cijevi, tijekom proračuna se vrijednost v iterativno korigira dok se ne postigne konzistentan rezultat. U ovoj fazi projektiranja, potrebno je pretpostaviti profil, dimenziju i nagib cijevi te prema tome procijeniti iznos brzine tečenja u cijevi. Tako procijenjenu brzinu v potrebno je nakon odabira dimenzije i nagiba cijevi i potvrditi. U suprotnom, postupak je potrebno ponoviti. Taj iterativni postupak bit će objašnjen i prikazan u Poglavlju 3.

Izgled hidrograma otjecanja u racionalnoj metodi ovisi o odnosu vremena trajanja kiše t_k i vremena koncentracije t_c . Moguće su tri varijante izgleda hidrograma otjecanja s obzirom na odnos t_k i t_c :

1. $t_k > t_c$
2. $t_k = t_c$
3. $t_k < t_c$

Oblici hidrograma otjecanja prema racionalnoj metodi prikazani su na Slici 2.7. Iz geometrije dobivenog hidrograma je moguće izračunati volumen površinskog otjecanja na slivu (površina ispod hidrograma predstavlja volumen otjecanja). U varijanti 3 gdje je $t_k < t_c$ dolazi do modifikacije jednadžbe 2.11 za maksimalan protok jer se ne ispunjava uvjet da cijeli sliv sudjeluje u otjecanju (kiša je prestala padati prije nego je do izlaznog profila dospjela efektivna kiša s najudaljenije točke sliva). U tom slučaju za proračun maksimalnog protoka vrijedi izraz:

$$Q_{\max} = C \cdot i \cdot A \cdot \frac{t_k}{t_c} \quad (2.17)$$



Slika 2.7 Izgled hidrograma otjecanja

Hidrološki smisao odnosa t_k i t_c :

$$t_k > t_c$$

Nakon što je cijeli sliv aktivan, kiša još traje – ali s vremenom intenzitet opada (ITP je opadajuća funkcija).

Posljedice: ukupan volumen otjecanja je veći, ali je intenzitet manji pa je i $Q_{\max}$ manji.

$$t_k = t_c$$

U ovom slučaju kiša traje dovoljno dugo da aktivira čitav sliv, ali ne toliko dugo da se njezin intenzitet značajno smanji.

To je trenutak kada svi dijelovi sliva sudjeluju u otjecanju, intenzitet kiše još uvijek je visok, pa je i $Q_{\max}$ najveći.

$$t_k < t_c$$

Sliv se ne stigne “napuniti”; voda s udaljenih područja nije stigla do izlaza, samo dio sliva doprinosi protoku pa je i vršni protok manji.

2.2.1.4. Intenzitet oborina

Intenzitet kiše predstavlja prosječnu visinu oborine koja padne u određenom vremenskom intervalu. Drugim riječima, on pokazuje količinu kiše po jedinici vremena i temeljni je parametar u proračunima oborinskih otjecanja i dimenzioniranju odvodnje.

$$i = \frac{H_P}{t_k} \quad (2.18)$$

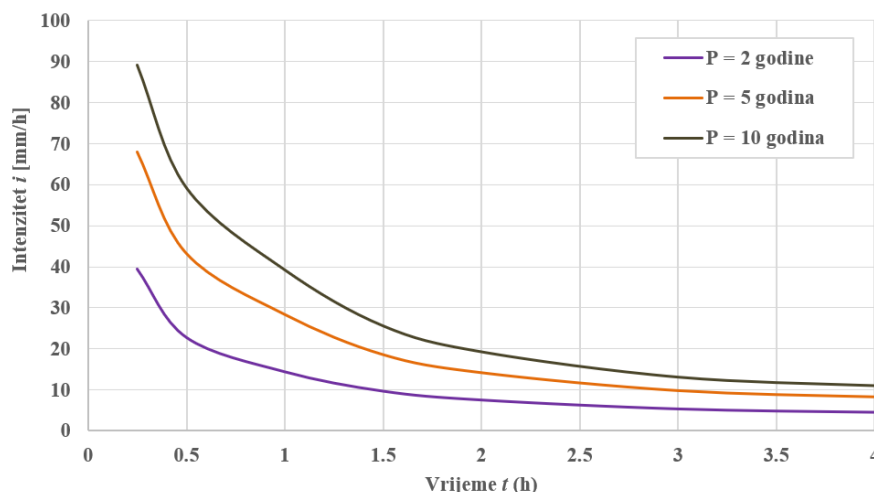
Gdje je: H_P visina ukupno pale (bruto) kiše, t_k vrijeme trajanja kiše.

Intenziteti kiše i koji se koriste u proračunu maksimalnog otjecanja očitavaju se iz ITP krivulja (Intenzitet–Trajanje–Povratno razdoblje). Za odabrani povratni period P i definirano vrijeme koncentracije t_c s grafa se očitava mjerodavan intenzitet oborine. Primjer ITP krivulja prikazan je na Slici 2.8. Podaci o intenzitetu dobivaju se mjerenjem na automatskim kišomjerima koji imaju mogućnost kontinuiranog zapisa količina oborine u vremenu. Ti se podaci podvrgavaju primarnoj obradi (npr. Metoda pokretnih prosjeka), a zatim i statističkoj obradi te se primjenom empirijskih ili teorijskih funkcija raspodjele vjerojatnosti određuju povratni periodi oborina za promatranu kišomjernu stanicu. Na taj način određuju se karakteristične vrijednosti intenziteta za različita povratna razdoblja P . Što je povratno razdoblje veće, to je vjerojatnost pojave takve oborine manja, ali je zato količina i intenzitet oborine veći.

Dobiveni rezultati prikazuju se pomoću ITP krivulja (Intenzitet–Trajanje–Povratno razdoblje). Ove krivulje imaju eksponencijalno opadajući oblik, što znači da je kod kratkotrajnih oborina intenzitet vrlo velik, dok je kod dugotrajnijih kiša intenzitet sve manji. To je u skladu s opažanim prirodnim fenomenima. Ukratko, prema mehanizmu nastanka kiše mogu biti:

- Konvekcijske kiše: nastaju uslijed vertikalnog dizanja toplog i vlažnog zraka; javljaju se naglo, najčešće ljeti, lokalnog su karaktera, kratkotrajne, ali vrlo intenzivne (pljuskovi, grmljavine); odgovaraju početnim, strmim dijelovima ITP krivulja.
- Ciklonske (frontalne) kiše: nastaju na frontalnim zonama između toplih i hladnih zračnih masa; mogu trajati duže vrijeme (satima ili danima), manjeg su intenziteta, ali daju velike ukupne količine oborine; odgovaraju ravnijem, dugotrajnom dijelu ITP krivulja.
- Orografske kiše: nastaju kada se vlažan zrak prisilno diže uz planinski lanac; uglavnom umjerenog intenziteta, ali mogu biti dugotrajne; često vezane uz specifične lokalne uvjete reljefa.

Dakle, ITP krivulje nisu samo matematički alat, nego oslikavaju stvarne procese u atmosferi.



Slika 2.8 ITP krivulje

2.2.1.5 Postupak proračuna

Primjena racionalne metode temelji se na jasno definiranom nizu koraka. Preporučeni redoslijed je sljedeći:

1. *Trasiranje kanala i određivanje računskih dionica*

- voda sa slivnih površina treba se odvoditi najkraćim mogućim putem do prijamnika,
- u glavnim projektima računske dionice se određuju tako da čvorovi (rubovi dionica) definiraju:
 - svako križanje i račvanje kanala,
 - svaki prijelom trase (horizontalni i vertikalni),
 - svakih 100 m ravne dionice.
- u studijama i idejnim projektima računske se dionice definiraju jednostavnije – čvorovi se određuju samo na križanjima i račvama.

2. *Definiranje podslivova za svaku dionicu*

Za svaki podsliv potrebno je odrediti:

- površinu A ,
- duljinu računske dionice L ,
- pad terena I .

3. *Računski koeficijent otjecanja*

Za cijelu dionicu ili podsliv uzima se srednji koeficijent otjecanja kao što je objašnjeno u Poglavlju 2.2.1.1.

4. *Određivanje karakteristika početnih podslivova i vremena t_1*

Za početne dionice potrebno je definirati površinsko vrijeme koncentracije t_1 kao je objašnjeno u Poglavlju 2.2.1.3.

5. *Proračun vremena otjecanja u kanalizacijskoj mreži t_2*

Proračun vremena tečenja u dionici t_2 obavlja se iteracijski. Postupak je iterativan za svaku dionicu, a usvojena točnost iteracije određuje koliko će se ciklusa iteracije obaviti. Naime, brzina otjecanja po dionici (cjevovodu) ovisi o padu cjevovoda i dimenzijama cjevovoda. Drugim riječima, ovdje je potrebno pretpostaviti pad nivelete i promjer cijevi. Za izvođenje ulične kanalizacije najbolje je da pad dna kanala S prati pad terena. U slučajevima ravnog terena ili tzv. “kontra-pada” postupa se prema dobro poznatim načelima struke o kojima će biti riječi u idućem poglavlju. Tako je moguće procijeniti brzinu otjecanja pomoću Manningove jednadžbe ili tablica za dimenzioniranje.

Vrijeme putovanja vode kroz cijev ovisi o duljini dionice i srednjoj brzini tečenja. Srednja brzina tečenja na računskoj dionici određuje se kao aritmetička sredina uzvodne i nizvodne brzine, a vrijeme putovanja kroz dionicu kao:

$$t_2 = \frac{L}{v_{sr}}$$

Kod početne dionice (npr. dionica 1 – 2 sa Slike 2.4), srednja brzina određuje se kao:

$$v_{sr} = \frac{v_{niz}}{2}$$

Na ovaj način se u proračun realnije unosi vrijednost brzine toka na dionici, jer korištenje samo nizvodne brzine za računanje vremena t_2 dovodi do dodatne, a zapravo nepotrebne sigurnosti. Nizvodna brzina je zbog većeg protoka najčešće veća od uzvodne → kraće vrijeme otjecanja → veći intenzitet kiše (eksponencijalno padajuća funkcija ITP krivulje) → veći protok. Sama racionalna metoda već sadrži određenu razinu konzervativnosti, pa bi uvođenje još jedne sigurnosne komponente moglo dovesti do precijenjenih rezultata. Nakon proračuna t_2 može se odrediti vrijednost t_c i nastaviti s postupkom proračuna.

Ako se neka dionica nalazi nakon više prethodnih dionica koje se spajaju u zajednički čvor, u proračun se uzima najveća vrijednost vremena koncentracije $t_c = \max(t_c)$ među svim prethodnih dionica. Ta se vrijednost unosi kao početno vrijeme t_1 za promatranu dionicu (npr. na Slici 2.4 dionica 4 – 6 preuzima kao svoje t_1 najveće vrijeme koncentracije iz pravca podslivova I, II i III. Razlog tome je što je, po definiciji, t_c vrijeme potrebno da kap efektivne oborinske vode s najudaljenije točke sliva stigne do promatranog profila. Zbog toga se uvijek usvaja najveća vrijednost t_c iz prethodnih dionica jer tada u otjecanju sudjeluje cijeli sliv (parametar površine A iz jednadžbe racionalne metode).

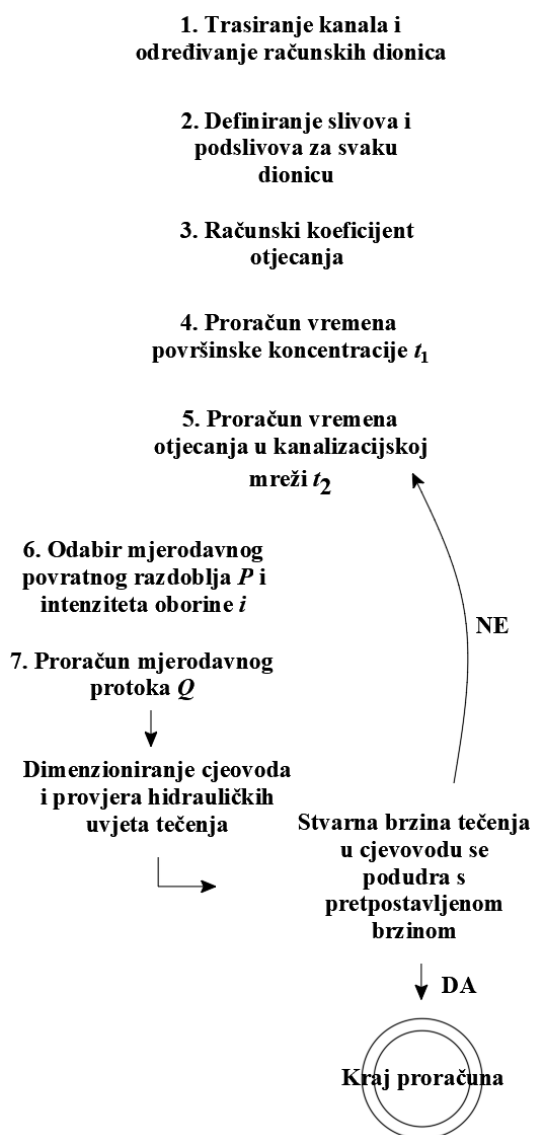
6. Odabir mjerodavnog povratnog razdoblja i intenziteta

Usvaja se povratno razdoblje P te se iz ITP krivulje određuje odgovarajući intenzitet oborine $i = f(t_c, P)$.

7. Proračun mjerodavnog protoka

Mjerodavni protok oborinskih voda računa se prema jednadžbi racionalne metode (Jednadžba 2.11).

Nakon toga pristupa se dimenzioniranju cjevovoda i određivanju hidrauličkih karakteristika kao što su visina punjenja cijevi i stvarne brzine tečenja. Ukoliko su stvarna brzina tečenja i brzina pretpostavljena u točki 5 identične (ovisno o usvojenoj točnosti) proračun se završava. Ukoliko se te dvije brzine razlikuju proračun se vraća na točku 5 i ponovno se pretpostavlja brzina tečenja u cjevovodu (iteracijski postupak). Dijagram tijeka proračuna prikazan je na Slici 2.9



Slika 2.9 Postupak proračuna prema racionalnoj metodi

Kanalizacijska mreža projektirana racionalnom metodom u pravilu pokazuje visok stupanj hidrauličke sigurnosti. To ne proizlazi iz nedostatka same metode, već iz praktičnih razloga i uobičajenih projektantskih postupaka (Margeta, 2011):

1. Dimenzioniranje cijevi

Računski promjer cijevi uvijek se zaokružuje na prvu veću komercijalno dostupnu dimenziju, što povećava kapacitet mreže u odnosu na proračunsku vrijednost.

2. Minimalne dimenzije u mreži

Velik broj cijevi nije određen proračunom, već se usvaja minimalna propisana dimenzija (zbog održavanja i izvođenja). Time se osigurava dodatna rezerva kapaciteta.

3. Ponašanje mreže pri preopterećenju

U slučaju većih oborina, pojedini dijelovi mreže mogu raditi pod tlakom, što povećava propusnu moć sustava. Šahtovi i cijevi također djeluju kao privremene retencije, pa ublažavaju opterećenje mreže.

4. Kapacitet kružnih kanala

Kapacitet kružnog kanala pri punjenju od 95 % veći je za oko 8 % od kapaciteta istog kanala pri punjenju od 100 % (zbog komponente hidrauličkog radijusa R u Manningovoj jednadžbi), što dodatno doprinosi sigurnosti sustava.

Ovim kombiniranim efektima mreža projektirana racionalnom metodom gotovo uvijek posjeduje značajnu sigurnosnu rezervu u odnosu na izračunate vrijednosti.

Zadatak 2.3

Za naselje s planiranim mješovitim sustavom odvodnje odrediti mjerodavnu količinu otpadnih voda za hidrauličko dimenzioniranje glavnog kolektora. Parametre za proračun komunalne otpadne vode usvojiti iz Zadatka 2.1. Ukupna površina slivnog područja iznosi $A = 20$ ha, sa sljedećim veličinama pojedinih vrsta površina i pripadnim vrijednostima koeficijenata otjecanja:

$$\begin{array}{ll} A_1 = 8 \text{ ha} & C_1 = 0,6 \\ A_2 = 8 \text{ ha} & C_2 = 0,4 \\ A_3 = 4 \text{ ha} & C_3 = 0,2 \end{array}$$

Mjerodavni intenzitet oborina iznosi $i = 155$ l/s/ha.

Rješenje

- Maksimalna satna količina komunalnih otpadnih voda (Zadatak 2.1)

$$Q_{\max, h, \text{kom}} = 79 \text{ l/s}$$

Napomena: kod mješovite kanalizacije u proračun nije potrebno uzeti "tuđe" vode.

- Mjerodavna količina oborinskih voda $Q_{\text{mj.ob.}}$

$$Q_{\text{mj.ob.}} = Q_{\max} = C \cdot i \cdot A$$

Intenzitet: $i = 155$ l/s/ha

Slivna površina: $A = 20$ ha

$$\text{Koeficijent otjecanja: } \bar{C} = \frac{C_1 \cdot A_1 + C_2 \cdot A_2 + C_3 \cdot A_3}{A_1 + A_2 + A_3} = \frac{0,6 \cdot 8 + 0,4 \cdot 8 + 0,2 \cdot 4}{8 + 8 + 4} = 0,44$$

$$Q_{\text{mj.ob.}} = 0,44 \cdot 155 \text{ l/s/ha} \cdot 20 \text{ ha} = 1364 \text{ l/s}$$

- Mjerodavna količina otpadnih voda za dimenzioniranje glavnog kolektora

$$Q = Q_{\max, h, \text{kom}} + Q_{\text{mj.ob.}} = 79 \text{ l/s} + 1364 \text{ l/s} = \mathbf{1443 \text{ l/s}}$$

Zadatak 2.4

Za analizirani sliv potrebno je izračunati vrijeme koncentracije. Vrijeme koncentracije sliva može se podijeliti u tri faze. U početku voda s površine sliva otječe u obliku tankog površinskog sloja (eng. *sheet flow*). Nakon određenog vremena, taj se tok postupno koncentrira u plitki, ali jasno oblikovani tok (eng. *shallow concentrated flow*). Na kraju voda dopijeva do kanalizacijskog sustava (otvorenih kanala ili cjevovoda) odakle se distribuira prema ispustu.

Prvo je potrebno izračunati vrijeme tečenja površinskog otjecanja u tankom sloju, ako je poznato sljedeće:

- duljina puta otjecanja $L_{1.1} = 125$ m,
- nagib terena $I = 0,5$ %

Nakon što se površinski sloj koncentrirao, potrebno je izračunati vrijeme tečenja plitkog koncentriranog toka za manje neasfaltirane tokove duljine $L_{1.2} = 30$ m.

Na kraju je potrebno odrediti vrijeme otjecanja oborinske vode u otvorenom trapeznom kanalu sa sljedećim karakteristikama:

- širina dna $b = 0,7$ m,
- dubina vode u kanalu $h = 0,45$ m,
- nagib kosina $1:m = 1:3$,
- Manningovim koeficijentom hrapavosti $n = 0,022$,
- nagib dna kanala $I_K = 0,2$ % i
- duljinom toka $L_{1.3} = 50$ m.

Rješenje

1. Proračun plitkog površinskog vremena otjecanja $t_{1.1}$

Proračun je proveden prema Kirpichevoj jednadžbi (Tablica 2.9):

$$t_{1.1} = \frac{0,00032 \cdot L^{0,77}}{I^{0,385}}$$
$$t_{1.1} = \frac{0,00032 \cdot 125^{0,77}}{0,005^{0,385}} = 0,101 \text{ h} = 6,1 \text{ min}$$

2. Proračun površinskog vremena otjecanja $t_{1.2}$

Proračun je proveden prema NRCS metodi (Tablica 2.9) nakon što se površinski sloj koncentrirao u manje neasfaltirane tokove:

$$v = 4,9178 \cdot I^{0,5}$$
$$v = 4,9178 \cdot 0,005^{0,5} = 0,35 \text{ m/s}$$
$$t_{1.2} = \frac{L_{1.2}}{v} = \frac{30}{0,35} = 85,7 \text{ s} = 1,43 \text{ min}$$

3. Proračun površinskog vremena otjecanja $t_{1.3}$

Proračun je proveden prema Manningovoj jednadžbi za tečenje otvorenim kanalima za slučaj jednolikog ustaljenog tečenja (za trapezni kanal):

Površina poprečnog presjeka

$$A = b \cdot h + m \cdot h^2 = 0,7 \cdot 0,45 + 3 \cdot 0,45^2 = 0,92 \text{ m}^2$$

Omočeni obod

$$O = b + 2 \cdot h \sqrt{1 + m^2} = 0,7 + 2 \cdot 0,45 \sqrt{1 + 3^2} = 3,55 \text{ m}$$

Hidraulički radijus

$$R = \frac{A}{O} = \frac{0,92}{3,55} = 0,26 \text{ m}$$

Protok

$$Q = \frac{1}{n} R^{2/3} I_K^{1/2} A$$

$$Q = \frac{1}{0,022} \cdot 0,26^{2/3} \cdot 0,002^{1/2} \cdot 0,92 = 0,76 \text{ m}^3/\text{s}$$

Vrijeme otjecanja $t_{1.3}$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0,76}{0,92} = 0,82 \text{ m/s}$$

$$t_{1.3} = \frac{L_{1.3}}{v} = \frac{50}{0,82} = 61 \text{ s} = 1 \text{ min}$$

4. Proračun ukupnog vremena koncentracije t_c sliva

$$t_c = t_{1.1} + t_{1.2} + t_{1.3} = 6,1 + 1,43 + 1 = 8,53 \text{ min}$$

U proračunu otjecanja po otvorenom trapeznom kanalu pretpostavljena je dubina vode $h = 0,45 \text{ m}$. Na temelju te pretpostavke izračunato je vrijeme otjecanja po kanalu te ukupno vrijeme koncentracije sliva. Nakon određivanja računskog protoka potrebno je tu pretpostavku provjeriti (u Manninogovoj jednadžbi tada su nepoznanice R i A). Ukoliko se javi odstupanje između pretpostavljene i stvarne dubine vode u kanalu, tada proračun vremena otjecanja treba provesti ponovno sve dok se ne dobije približno jednaka vrijednost dubine (iterativan proračun).

Zadatak 2.5

Potrebno je odrediti maksimalno otjecanje za kiše 5-godišnjeg i 10-godišnjeg povratnog razdoblja. Na temelju topografske karte i pregleda terena utvrđeni su sljedeći podaci potrebni za proračun:

- površina slivnog područja uzvodno od izlazne točke sliva iznosi 40 hektara,
- duljina površinskog otjecanja $L = 40$ m,
- prosječan nagib terena $I = 2,2$ %,
- duljina glavnog odvodnog kanala $L_K = 750$ m,
- nagib glavnog odvodnog kanala $I_K = 1,9$ %,
- procijenjeni Manningov koeficijent hrapavosti za odvodni kanal $n = 0,08$,
- hidraulički radijus odvodnog kanala može se aproksimirati prosječnom dubinom 0,5 m.

Na temelju postojećih karata procjenjuje se da je slivno područje sastavljeno od:

- 40 % stambena područja (gusta izgradnja obiteljskih kuća),
- 60 % neizgrađene površine (travnjaci, nagib 2 %).

Za analizirano područje poznata je ITP krivulja (Slika 2.10).

Rješenje

Na samom početku sliva voda prvo otječe kao plitki sloj po terenu (tratine). Voda još nije stigla do kanala, stoga se mora procijeniti vrijeme otjecanja početnog toka.

1. Izračun vremena površinskog otjecanja t_1 po slivu do ulaska u glavni odvodni kanal odredit će se prema Kirpichevoj empirijskoj formuli:

$$t_1 = \frac{0,00032 \cdot L^{0,77}}{I^{0,385}} = \frac{0,00032 \cdot 40^{0,77}}{0,022^{0,385}} = 0,024 \text{ h} = 1,43 \text{ min}$$

2. Izračun vremena otjecanja u kanalu prema Manningovoj jednadžbi:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} I_K^{1/2} = \frac{1}{0,08} 0,5^{2/3} 0,019^{1/2} = 1,09 \text{ m/s}$$

$$t_2 = \frac{L_K}{v} = \frac{750}{1,09} = 688 \text{ s} = 11,47 \text{ min}$$

3. Ukupno vrijeme koncentracije sliva:

$$t_c = t_1 + t_2 = 1,43 \text{ min} + 11,47 \text{ min} = 12,9 \text{ min} \approx 13 \text{ min}$$

4. Izračun maksimalnog otjecanja prema racionalnoj metodi:

Za neizgrađeno područje s travnjacima i prosječnim padom od 2 % prema Tablici 2.7 koeficijent otjecanja C je između 0,05 i 0,1. Ovdje je usvojena vrijednost $C = 0,1$. Za stambeno područje usvojen je koeficijent otjecanja $C = 0,4$ (Tablica 2.6).

$$\bar{C} = \frac{C_1 \cdot A_1 + C_2 \cdot A_2}{A_{uk}} = \frac{0,4 \cdot (0,4 \cdot 40) + 0,1 \cdot (0,6 \cdot 40)}{40} = 0,22$$

S ITP krivulje na Slici 2.10 očitani su sljedeći intenziteti:

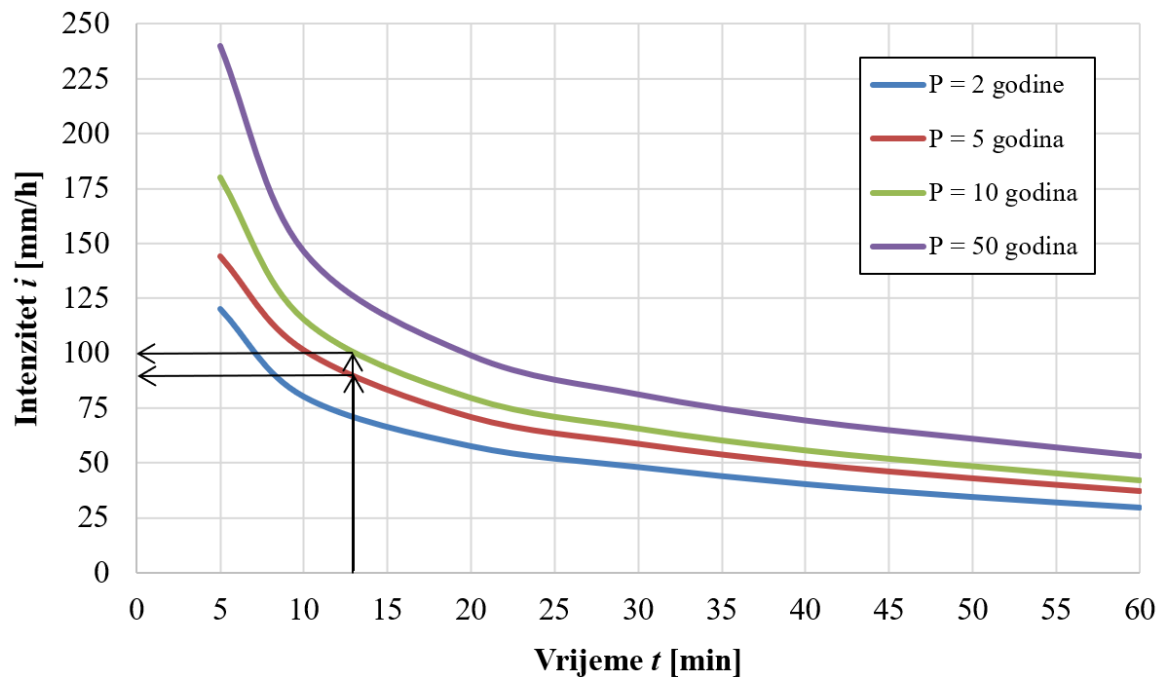
$$i(5; 13) = 90 \text{ mm/h},$$

$$i(10; 13) = 100 \text{ mm/h}.$$

Prema tome, maksimalni protoci 5-godišnjeg i 10-godišnjeg povratnog razdoblja iznose:

$$Q_{\max,5} = \bar{C} \cdot i \cdot A = 0,22 \cdot 90 \cdot \frac{1}{3600} \cdot 40 \cdot 10000 = 2,2 \text{ m}^3/\text{s} = 2200 \text{ l/s}$$

$$Q_{\max,10} = \bar{C} \cdot i \cdot A = 0,22 \cdot 100 \cdot \frac{1}{3600} \cdot 40 \cdot 10000 = 2,44 \text{ m}^3/\text{s} = 2440 \text{ l/s}$$



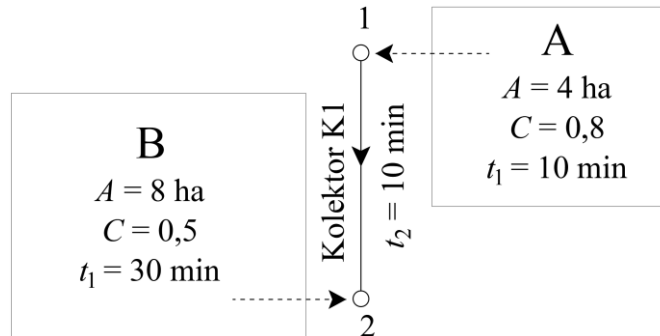
Slika 2.10 ITP krivulja

Treba imati na umu da je ovo približan proračun koji se koristi u početnim fazama projektiranja. U proračunu otjecanja po glavnom odvodnom kanalu pretpostavljen je hidraulički radijus $R = h_{sr}$ te je temeljem te pretpostavke izračunato vrijeme koncentracije, određen intenzitet oborine i izračunat maksimalan protok. Sada treba proračun provesti s dobivenim protokom te ponovno odrediti hidraulički radijus i vrijeme otjecanja. Dakle, radi se o iterativnom proračunu.

Zadatak 2.6

Oborinska kanalizacija treba prihvatiti otjecanje sa sliva veličine 12 ha, prikazanog na Slici 2.11. Sliv je podijeljen na dva podsliva (A i B). Karakteristike podslivova prikazane su na Slici 2.11. Voda s podsliva A ulazi u kolektor K1 u točki 1. Voda s podsliva B ulazi u kolektor K1 u točki 2. Procijenjeno vrijeme putovanja oborinske vode između točaka 1 i 2 na kolektoru K1 iznosi $t_2 = 10$ min.

Potrebno je odrediti maksimalan protok $Q_{\max}$ za kišu $P = 5$ godina, korištenjem racionalne metode. Koristiti ITP krivulju sa Slike 2.10 (Zadatak 2.3).



Slika 2.11 Shematski prikaz analiziranog sliva

Rješenje

1. Izračun vremena koncentracije za podsliv A:

$$t_{c,A} = t_{1,A} + t_2 = 10 \text{ min} + 10 \text{ min} = 20 \text{ min}$$

gdje t_1 predstavlja vrijeme ulaska oborinske vode od najudaljenije točke podsliva A do točke 1, a t_2 , vrijeme tečenja po kolektoru K1 od točke 1 do točke 2.

2. Izračun vremena koncentracije za podsliv B:

$$t_{c,B} = t_{1,B} = 30 \text{ min}$$

3. Izračun mjerodavnog vremena koncentracije:

$$t_c = \max(t_{c,A}, t_{c,B}) = 30 \text{ min}$$

4. Izračun koeficijenta otjecanja:

$$\bar{C} = \frac{C_A \cdot A_A + C_B \cdot A_B}{A_{uk}} = \frac{0,8 \cdot 4 + 0,5 \cdot 8}{12} = 0,6$$

5. Izračun maksimalnog otjecanja $Q_{\max}$ prema racionalnoj metodi:

S ITP krivulje na Slici 2.10 (Zadatak 2.5) očitano je intenzitet $i(5; 30) = 60$ mm/h.

$$Q_{\max} = \bar{C} \cdot i \cdot A = 0,6 \cdot 60 \cdot \frac{1}{3600} \cdot 12 \cdot 10000 = 1,2 \text{ m}^3/\text{s} = 1200 \text{ l/s}$$

Zadatak 2.7

Potrebno je odrediti maksimalan protok oborinskih voda s urbanog sliva veličine 15 ha. Slivno područje je definirano kao gusta stambena izgradnja. Pretpostaviti vrijeme koncentracije od 20 min. U proračunu uzeti u obzir kišu povratnog razdoblja $P = 4$ godine.

U Tablici 2.11 su prikazane maksimalne visine pale kiše u zavisnosti od trajanja kiše za period od 14 godina (2012. – 2025.). Visine kiše u Tablici 2.11 su poredane po veličini, od najveće prema najmanjoj vrijednosti.

Tablica 2.11 Visina pale kiše H_P u zavisnosti od trajanja kiše t_k (2012. – 2025.)

t_k [min]	Visina pale kiše H_P [mm]													
5	9,8	9,3	7,8	7,1	6,8	6,2	5,9	5,5	5,1	5,0	4,5	4,2	4,0	3,6
15	19,3	18,4	14,2	13,8	11,7	10,7	10,1	9,9	9,6	8,9	8,3	8,0	7,4	7,1
30	20,9	20,0	18,0	17,1	16,0	14,8	12,8	12,4	12,1	10,9	10,0	9,7	9,0	8,7
60	23,8	22,7	19,4	18,6	17,3	15,6	13,7	13,4	12,7	11,9	11,1	10,3	10,0	9,4
120	29,2	27,8	25,3	20,0	17,6	16,3	15,9	15,0	14,6	12,7	12,6	12,5	12,3	11,8
R.br.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Rješenje

U Tablici 2.11 su prikazani rezultati obrade visine pale kiše s jedne kišomjerne stanice. Na raspolaganju su bili podaci o visini pale kiše tijekom 14 godina kontinuiranog mjerenja. Primarnom obradom podataka, analizirala se pojedina kišna epizoda te se tražila najveća visina pale kiše za različita trajanja (npr. $t_k = 5, 15, 30, 60, 120$ min, itd.). Nakon što su se analizirale sve kišne epizode unutar jedne godine, izvukao se podatak maksimalne visine kiše za pojedino trajanje. Tako je za svaku godinu dobiven jedan podatak maksimalne visine kiše za trajanje od 5 min, jedan podatak za trajanje od 15 min, itd. Tako je za svako trajanje kiše u daljnjoj analizi raspoloživo s ukupno 14 podataka. Prema tome, svaki podatak u Tablici 2.11 predstavlja maksimalnu godišnju visinu kiše za određeno trajanje.

U hidrologiji se često za proračun vjerojatnosti pojave p određenog događaja (u ovom slučaju kiše) često koriste empirijski izrazi prema Čegodajevu, Hazenu, Gringortenu, itd. (Tablica 2.12). Kako bi se mogla odrediti empirijska vjerojatnost pojave p određenog događaja unutar niza mjerenja, prvo je potrebno podatke poredati u opadajući niz (kao u Tablici 2.11). Parametar m u Tablici 2.12 predstavlja redni broj podatka, dok N predstavlja ukupan broj podataka (u ovom zadatku $N = 14$).

Tablica 2.12 Empirijske raspodjele vjerojatnosti

Čegodajev	$p = \frac{m-0,3}{N+0,4}$
Hazen	$p = \frac{m-0,5}{N}$
Gringorten	$p = \frac{m-0,44}{N+0,12}$

Nakon izračuna p , određuje se povratno razdoblje P prema jednadžbi 2.14, koje označava prosječan broj godina između dva događaja iste ili veće veličine.

U Tablici 2.13 je prikazan proračun vjerojatnosti pojave p i povratnog razdoblja P .

Tablica 2.13 Vjerojatnosti pojave p i povratna razdoblja P pale kiše za tri empirijske raspodjele vjerojatnosti

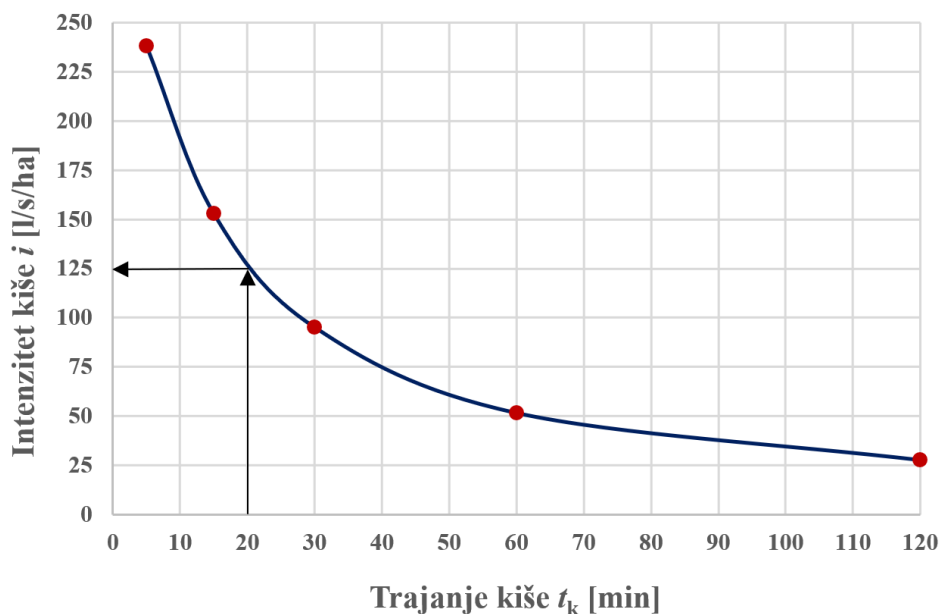
	R.br.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Čegodajev	p	0,05	0,12	0,19	0,26	0,33	0,40	0,47	0,53	0,60	0,67	0,74	0,81	0,88	0,95
	P	20,6	8,5	5,3	3,9	3,1	2,5	2,1	1,9	1,7	1,5	1,3	1,2	1,1	1,1
Hazen	p	0,04	0,11	0,18	0,25	0,32	0,39	0,46	0,54	0,61	0,68	0,75	0,82	0,89	0,96
	P	28,0	9,3	5,6	4	3,1	2,5	2,2	1,9	1,6	1,5	1,3	1,2	1,1	1
Gringorten	p	0,04	0,11	0,18	0,25	0,32	0,39	0,46	0,54	0,61	0,68	0,75	0,82	0,89	0,96
	P	25,2	9,1	5,5	4	3,1	2,5	2,2	1,9	1,6	1,5	1,3	1,2	1,1	1

Sva tri izraza pokazuju da kiša s povratnim periodom $P = 4$ godine odgovara 4 stupcu, tj. rednom broju 4. Prema tome, dalje se u analizu ide sa sljedećim podacima:

t_k	P	i	i
[min]	[mm]	[mm/s]	[l/s/ha]
5	7,1	0,0238	238
15	13,8	0,015283	152,8
30	17,1	0,009508	95,1
60	18,6	0,005163	51,6
120	20,0	0,002771	27,7

Napomena: $1 \text{ l/s/ha} = \text{mm/s} \cdot 10000$

Na temelju gore navedenih podatka moguće je konstruirati ITP krivulju za povratno razdoblje od 4 godine (Slika 2.12).



Slika 2.12 ITP krivulja za $P = 4$ godine

S obzirom na zadano vrijeme koncentracije $t_c = 20$ min, s ITP krivulje očitao je mjerodavan intenzitet za proračun protoka oborinskih voda od $i = 125 \text{ l/s/ha}$. Ostali podaci potrebni za proračun su: $C = 0,6$ (gusta stambena izgradnja, Tablica 2.6), $A = 15 \text{ ha}$ (površina sliva). Prema tome, protok oborinskih voda Q za mjerodavnu kišu iznosi:

$$Q = C \cdot i \cdot A = 0,6 \cdot 125 \text{ l/s/ha} \cdot 15 \text{ ha} = 1125 \text{ l/s}$$

Zadatak 2.8

Potrebno je odrediti hidrogram otjecanja oborinskih voda s jednog gradskog sliva primjenom racionalne metode. Usvojiti računsku kišu povratnog razdoblja $P = 10$ godina, a analizu napraviti za trajanja kiše $t_k = 30, 60$ i 90 minuta (vrijednosti su dane u Tablici 2.14). Potrebno je usporediti maksimalne protoke (ordinate) i volumene dobivenih hidrograma.

Karakteristike sliva su sljedeće: površina $A = 2,5 \text{ km}^2$, koeficijent otjecanja $C = 0,4$, visinska razlika između najviše točke i izlaznog profila $\Delta H = 33 \text{ m}$.

Vrijeme koncentracije sliva odrediti prema formuli kinematičkog vala:

$$t_c = \frac{1,36}{i^{0,4}} \left(\frac{nL}{\sqrt{I}} \right)^{0,6}$$

gdje je za Manningov koeficijent hrapavosti potrebno usvojiti vrijednost $n = 0,035$, a za dužinu toka vode do izlaznog profila vrijednost $L = 1660 \text{ m}$.

Tablica 2.14 Visina kiše H_P povratnog razdoblja $P = 10$ godina za različita trajanja t_k

t_k [min]	H_P [mm]
30	34
60	38
90	41

Teorijsko pojašnjenje

U racionalnoj metodi maksimalni protok određuje se izrazom:

$$Q_{\max} = C \cdot i(t_c) \cdot A$$

gdje je $i(t_c)$ intenzitet kiše čije trajanje mora biti jednako vremenu koncentracije sliva t_c .

Ova pretpostavka znači da kiša traje točno onoliko koliko je potrebno da svi dijelovi sliva počnu sudjelovati u otjecanju, pri čemu se ostvaruje najveći mogući protok $Q_{\max}$.

U idealiziranom teorijskom pristupu uzima se da trajanje kiše automatski odgovara vremenu koncentracije $t_k = t_c$.

Međutim, u stvarnim proračunima vrijeme koncentracije nije poznato unaprijed. Prema formulama za vrijeme koncentracije (Izzard, kinematički val) vrijedi da je $t_c = f(i)$. Dakle, i i t_c su međusobno uvjetovani, promjena jednog mijenja drugi. Zbog te međuzavisnosti ne možemo odmah znati koji je intenzitet mjerodavan (projektni). Intenzitet iz ITP krivulja ovisi o trajanju kiše t_k i povratnom razdoblju, dok vrijeme koncentracije t_c ovisi o intenzitetu kiše u nelinearnoj formi (npr, formula kinematičkog vala). Zato se za proračun mjerodavnog intenziteta i vremena koncentracije koristi iterativni postupak, kako bi se našla kombinacija t_k i t_c koja je fizikalno i hidrološki konzistentna.

Kada su $t_k \approx t_c$, znaš da si našao mjerodavan slučaj (odnosno “projektni” intenzitet). Drugim riječima, tada se “pogađa rezonantni trenutak” sliva: dovoljno duga kiša da cijeli slivu sudjeluje u otjecanju, ali ne preduga da intenzitet opadne. Trajanje kiše predstavlja vremenski period u kojem kiša stvarno pada → dolazi iz ITP tablice ili dijagrama. Vrijeme koncentracije t_c predstavlja reakcijski “odgovor” sliva na kišu → svojstvo terena i hidrauličkih uvjeta. Hidrološki gledano, sliv ima jedno mjerodavno t_c , koje odgovara njegovim karakteristikama (duljina toka, hrapavost površine, nagib sliva). Odnos t_k i t_c određuje oblik i visinu hidrograma otjecanja.

Iteracijski postupak:

1. Pretpostavi se trajanja kiše (npr. $t_k = 30, 60$ i 90 minuta).
2. Za svako trajanje iz ITP krivulje (ili PTP krivulje) očita se odgovarajući intenzitet $i(t_k)$.
3. Pomoću odabrane formule (npr. kinematički val) izračuna se vrijeme koncentracije t_c . To vrijeme je rezultat računске iteracije, a ne “novo fizikalno svojstvo”.

4. Usporedi se dobiveni t_c s pretpostavljenim trajanjem kiše t_k :
 - ako je $t_k < t_c \rightarrow$ kiša prekratka, intenzitet previsok,
 - ako je $t_k > t_c \rightarrow$ kiša preduga, intenzitet prenizak,
 - ako je $t_k \approx t_c \rightarrow$ pronađen je projektni intenzitet.
5. Kada se pronađe par (t_k, t_c) koji zadovoljava $t_k \approx t_c$, tada je intenzitet $i(t_c)$ mjerodavan i koristi se u racionalnoj formuli. To je mjerodavni ili projektni slučaj, tzv. “rezonantni” odnos sliva i kiše.

Rješenje

U Tablici 2.15 je proveden proračun vremena koncentracije t_c za tri trajanja kiše. Vrijeme t_c proračunato je prema formuli kinematičkog vala. Prosječan nagib sliva iznosi:

$$I = \frac{\Delta H}{L} = \frac{33 \text{ m}}{1660 \text{ m}} = 0,0199 = 19,9 \text{ ‰}$$

Tablica 2.15 Proračun vremena koncentracije

	Trajanje kiše [min]		
	30	60	90
H_p [mm]	34	38	41
i [mm/min]	1,133	0,633	0,456
t_c [min]	47,95	60,52	69,04

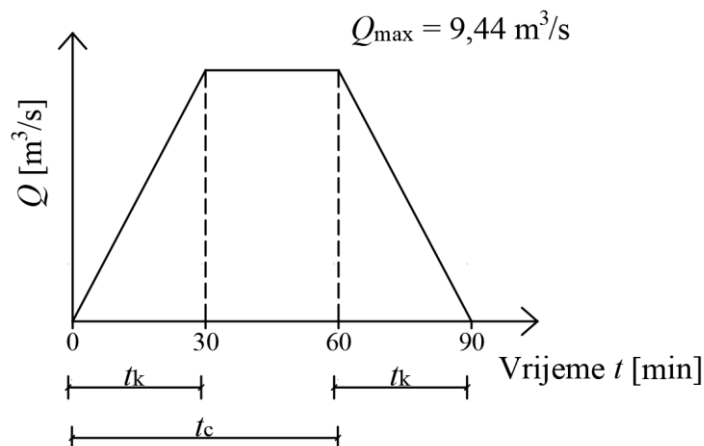
Prema proračunu iz Tablica 2.15 vidljivo je da je računsko vrijeme koncentracije t_c približno jednako trajanju kiše $t_k = 60$ min. Prema tome, usvaja se $t_c = 60$ min.

Hidrogram kiše za trajanje $t_k = 30$ min ($t_k < t_c$):

$$Q_{\max} = C \cdot i \cdot A \cdot \frac{t_k}{t_c} = 0,4 \cdot 1,133 \cdot \frac{10^{-3}}{60} \cdot 2,5 \cdot 10^6 \cdot \frac{30}{60} = 9,44 \text{ m}^3/\text{s}$$

Volumen otjecanja (površina ispod hidrograma otjecanja) iznosi:

$$V = \frac{90+30}{2} \cdot 60 \cdot 9,44 = 34000 \text{ m}^3$$



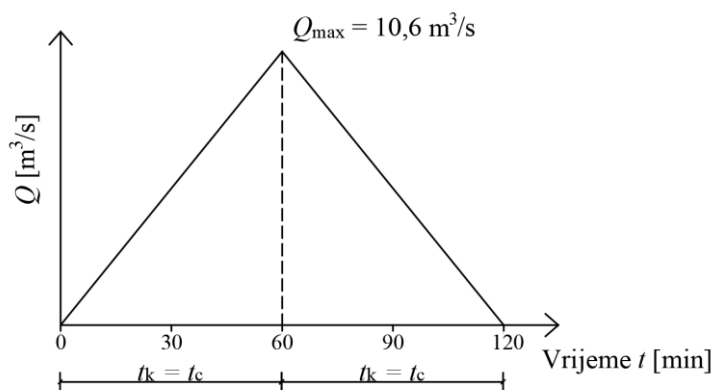
Slika 2.13 Hidrogram otjecanja za $t_k < t_c$

Hidrogram kiše za trajanje $t_k = 60$ min ($t_k = t_c$):

$$Q_{\max} = C \cdot i \cdot A = 0,4 \cdot 0,633 \cdot \frac{10^{-3}}{60} \cdot 2,5 \cdot 10^6 = 10,55 \text{ m}^3/\text{s}$$

Volumen otjecanja (površina ispod hidrograma otjecanja) iznosi:

$$V = \frac{120}{2} \cdot 60 \cdot 10,55 = 37980 \text{ m}^3$$



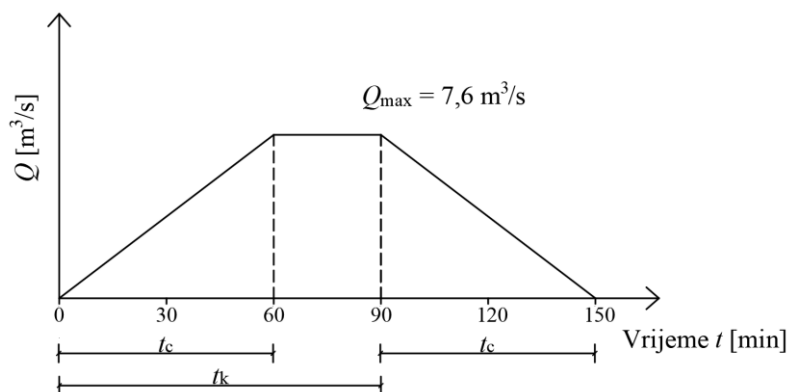
Slika 2.14 Hidrogram otjecanja za $t_k = t_c$

Hidrogram kiše za trajanje $t_k = 90$ min ($t_k > t_c$):

$$Q_{\max} = C \cdot i \cdot A = 0,4 \cdot 0,456 \cdot \frac{10^{-3}}{60} \cdot 2,5 \cdot 10^6 = 7,6 \text{ m}^3/\text{s}$$

Volumen otjecanja (površina ispod hidrograma otjecanja) iznosi:

$$V = \frac{150+30}{2} \cdot 60 \cdot 7,6 = 41040 \text{ m}^3$$



Slika 2.15 Hidrogram otjecanja za $t_k > t_c$

Tablica 2.16 Maksimalni protoci i volumeni otjecanja

	Trajanje kiše [min]		
	30	60	90
$Q_{\max} [\text{m}^3/\text{s}]$	9,44	10,55	7,6
$V [\text{m}^3]$	34 000	37 980	41 040

Zadatak 2.9

Za potrebe projektiranja sustava oborinske odvodnje u prigradskom području ukupne površine 150 ha, potrebno je odrediti protok oborinske vode za povratno razdoblje od $P = 10$ godina.

Promatrano područje ima prosječni pad terena od oko 1 %, s raspršenom (rijetkom) izgradnjom obiteljskih kuća. Koeficijent otjecanja potrebno je preuzeti iz ATV normi (Tablica 2.6). Duljina toka vode od najudaljenije točke sliva do izlaznog profila iznosi $L = 2400$ m.

Za analizirano područje dostupni su podaci o PTP odnosu (visina oborine – trajanje – povratno razdoblje), na temelju kojih je moguće odrediti mjerodavan intenzitet kiše za pojedino trajanje oborinskog događaja.

Potrebno je:

1. Odrediti vrijeme koncentracije sliva pomoću Kirpichove jednadžbe.
2. Odrediti hidrogram otjecanja sa sliva od kiše povratnog razdoblja $P = 10$ godina trajanja jednakog vremenu koncentracije pomoću racionalne metode.
3. Odrediti složeni hidrogram otjecanja uslijed kiše povratnog razdoblja $P = 10$ godina, trajanja 90 minuta, pretpostavljajući neravnomjeran intenzitet kiše.

Rješenje

1. Izračun vremena koncentracije sliva prema Kirpichevoj empirijskoj formuli

$$t_1 = \frac{0,00032 \cdot L^{0,77}}{I^{0,385}}$$

$$t_1 = \frac{0,00032 \cdot 2400^{0,77}}{0,01^{0,385}} = 0,75 \text{ h} = 45 \text{ min}$$

2. Određivanje hidrograma otjecanja kiše povratnog perioda $P = 10$ godina za $t_c = t_k$

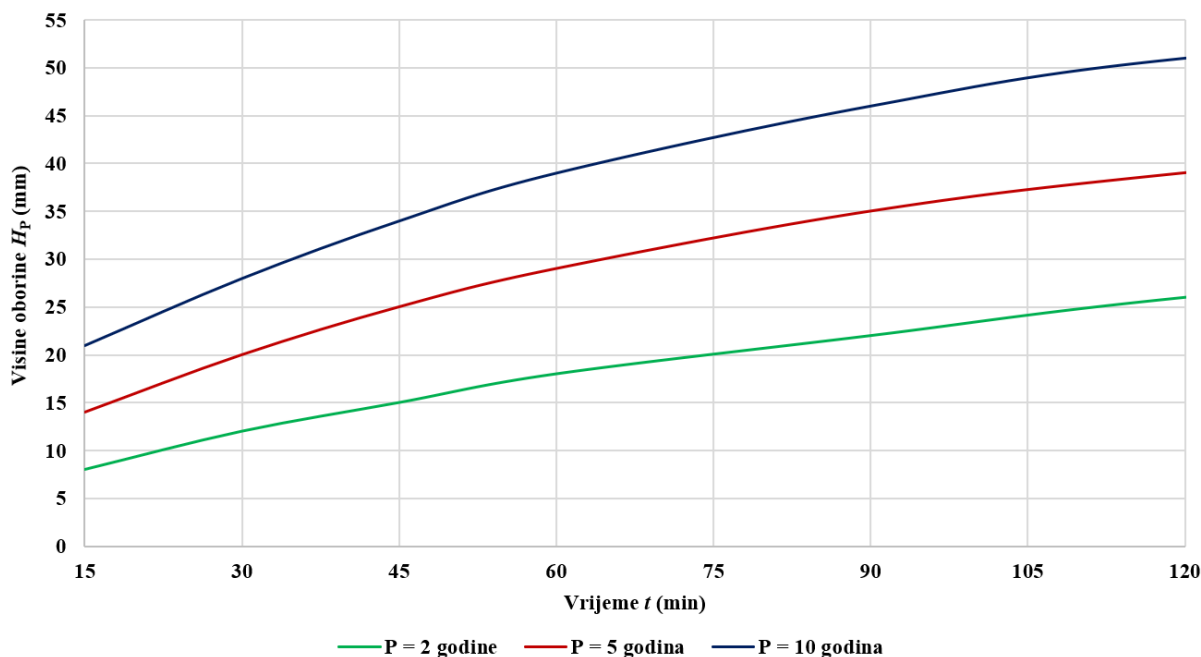
Sa zavisnosti PTP na Slici 2.16 očitana je vrijednost visine kiše povratnog razdoblja $P = 10$ godina za trajanje od 45 minuta od $H_p = 34$ mm.

Intenzitet oborine prema tome iznosi:

$$i = \frac{P_k}{t_k} = \frac{34}{\frac{45}{60}} = 45,33 \text{ mm/h}$$

Izračun maksimalnog otjecanja prema racionalnoj metodi:

$$Q_{\max} = C \cdot i \cdot A = 0,5 \cdot 45 \cdot \frac{1}{3600} \cdot 150 \cdot 10000 = 9,375 \text{ m}^3/\text{s} = 9375 \text{ l/s}$$



Slika 2.16 PTP krivulja

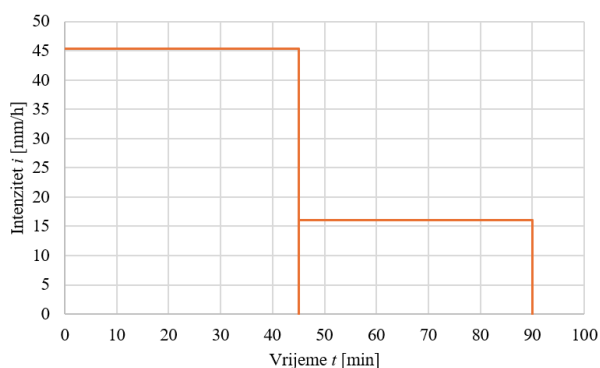
3. Složeni hidrogram otjecanja za neravnomjernu kišu trajanja $t_k = 90$ min

Visina kiše za trajanje 90 minuta i povratni period od 10 godina iznosi 46 mm (Slika 2.16). Za kišu neravnomjernog intenziteta u vremenu, postupak proračuna preko racionalne metode se provodi na sljedeći način:

- kiša se podijeli na n blokova intervala $\Delta t = t_c$,
- ukupan broj blokova (elementarnih hidrograma) iznosi $n = \frac{t_k}{t_c}$,
- unutar svakog intervala pretpostavlja se konstantan (ravnomjeran) intenzitet kiše u vremenu,
- proračunava se maksimalan protok i hidrogram za svaki blok,
- ukupan, složeni hidrogram dobiva se zbrajanjem elementarnih hidrograma (načelo superpozicije).

S obzirom na to da u analiziranom slučaju vrijeme koncentracije iznosi 45 min, a ukupno trajanje računske kiše 90 minuta, proračun će se provesti u dva bloka trajanja 45 minuta.

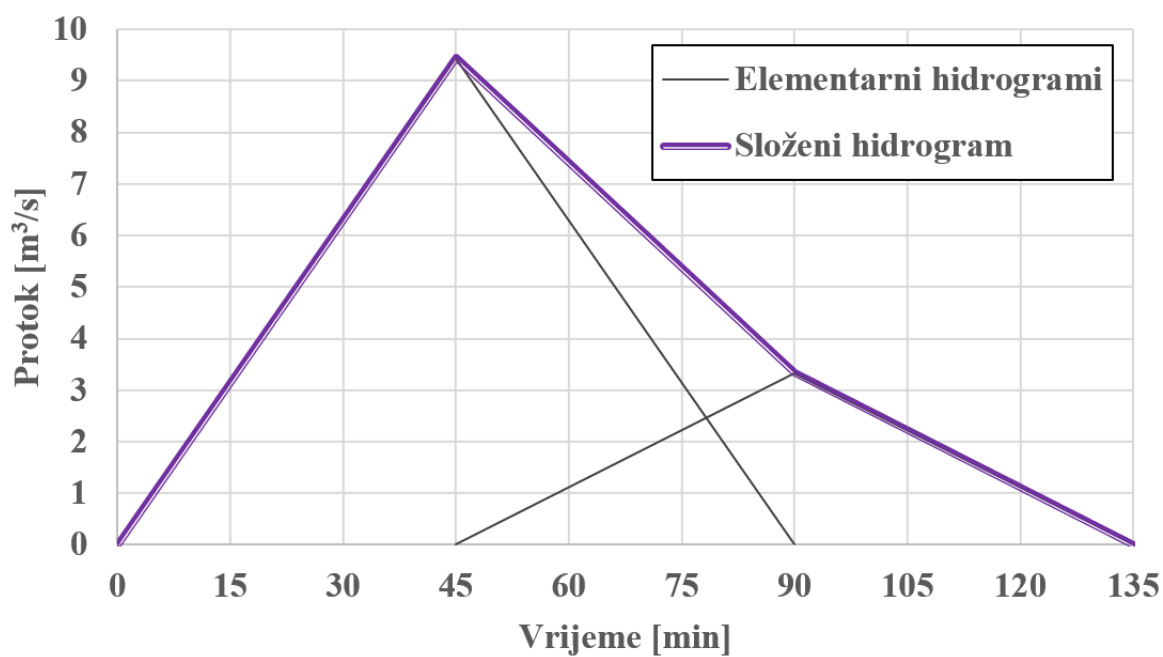
Mjerodavne visine kiše očitane su s PTP krivulje. Mjerodavan (projektni) hijetogram prikazan je na Slici 2.17. Hijetogram predstavlja prikaz intenziteta kiše u vremenu. Proračun je proveden u Tablici 2.17 gdje je u posljednjem stupcu prikazan maksimalan protok od pojedinog elementarnog hidrograma. Složeni hidrogram prikazan je na Slici 2.18. Sa slike je vidljivo da maksimalan protok za neravnomjernu kišu trajanja 90 min i povratnog razdoblja 10 godina iznosi $9,44 \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 2.17 Hijetogram neravnomjerne računske kiše $t_k = 90$ min

Tablica 2.17 Proračun elementarnih hidrograma

t [min]	H_p [mm]	ΔH_p [mm]	Δt [min]	i [mm/h]	Q [m ³ /s]
45	34	34	45	45,33	9,44
90	46	12	45	16	3,33



Slika 2.18 Složeni hidrogram otjecanja

Zadatak 2.10

Na Slici 2.19 prikazan je shematski prikaz jednog gradskog sliva. Jedan dio sliva od prije je urbaniziran (podsliv A) te je njega izveden glavni kolektor za odvodnju oborinskih voda.

Taj je kolektor dimenzioniran racionalnom metodom tako da može prihvatiti otjecanje za računsku kišu povratnog razdoblja od $P = 5$ godina.

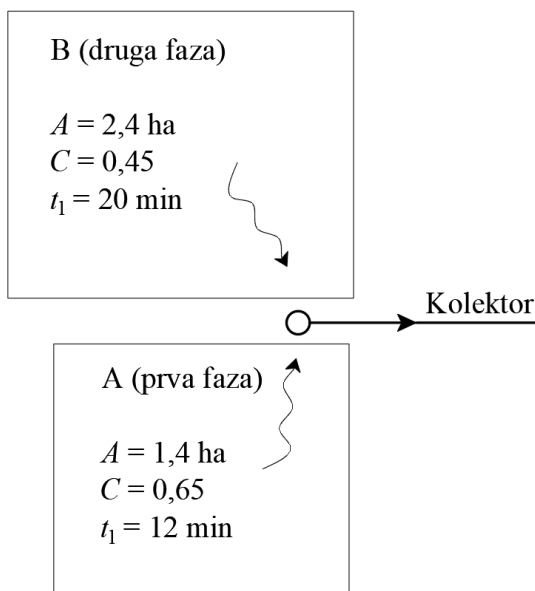
U drugoj fazi planira se urbanizacija preostalog dijela sliva, čije će se oborinske vode također morati usmjeriti prema postojećem kolektoru.

Za predmetnu lokaciju, na temelju regresijske analize mjernih podataka, određena je ITP krivulja koja se može opisati sljedećom jednačinom:

$$i(P; t_k) = \frac{15 \cdot T^{0,625}}{t_k + 18}$$

Vrijednost intenziteta prema ovoj jednačini dobit će se u mm/min, ukoliko se P uvrsti u godinama, a t_k u minutama.

Potrebno je provjeriti može li postojeći kolektor prihvatiti otjecanje s oba dijela sliva (nakon kompletne urbanizacije) za kiše povratnog razdoblja 2 i 5 godina.



Slika 2.19 Shematski prikaz analiziranog urbanog sliva

Rješenje

U prvoj fazi urbanizacije kolektor oborinskih voda dimenzioniran je kišu povratnog razdoblja $P = 5$ godina. S obzirom na to da vrijeme koncentracije iznosi $t_c = 12 \text{ min}$, mjerodavno trajanje kiše iznosi $t_k = t_c = 12 \text{ minuta}$.

Prema tome, intenzitet računске kiše iznosi:

$$i(5; 12) = \frac{15 \cdot 5^{0,625}}{12 + 18} = 1,37 \text{ mm/min} = 227,86 \text{ l/s/ha}$$

Protok na osnovu koje je dimenzioniran kolektor u prvoj fazi urbanizacije iznosi:

$$Q = C \cdot i \cdot A = 0,65 \cdot 227,86 \text{ l/s/ha} \cdot 1,4 = 207 \text{ l/s}$$

Tijekom druge faze urbanizacije slivna površina povećana je za dodatnih 2,4 ha. S obzirom na to da vrijeme otjecanja od podsliva B do kolektora iznosi 20 minuta, za proračun intenziteta mjerodavno trajanja kiše sada iznosi 20 minuta.

Koeficijent otjecanja također se mijenja i sada iznosi:

$$\bar{C} = \frac{0,65 \cdot 1,4 + 0,45 \cdot 2,4}{3,8} = 0,52$$

Provjera kapaciteta kolektora za kišu povratnog perioda $P = 2$ godina i trajanje 20 minuta:

$$i(2; 20) = \frac{15 \cdot 2^{0,625}}{20+18} = 0,61 \text{ mm/min} = 101,46 \text{ l/s/ha}$$

$$Q = 0,52 \cdot 101,46 \text{ l/s/ha} \cdot 3,8 = 200 \text{ l/s}$$

Maksimalan protok 2 godišnjeg povratnog razdoblja manji je od kapaciteta kolektora (protok od 207 l/s na koji je dimenzioniran), što znači da bi kolektor nakon druge faze urbanizacije bio prikladan za kišu povratnog razdoblja $P = 2$ godine.

Provjera kapaciteta kolektora za kišu povratnog perioda $P = 5$ godina i trajanje 20 minuta:

$$i(5; 20) = \frac{15 \cdot 5^{0,625}}{20+18} = 1,08 \text{ mm/min} = 179,89 \text{ l/s/ha}$$

$$Q = 0,52 \cdot 179,89 \text{ l/s/ha} \cdot 3,8 = 355 \text{ l/s}$$

Poslije druge faze urbanizacije može se zaključiti da postojeći kolektor ne bi mogao primiti oborinsku vodu 5 godišnjeg povratnog razdoblja.