Eva Munda, mag. inž. grad.
eva.munda1@student.um.si
Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija
eva@stajerski-inzeniring.com
Štajerski Inženiring, d. o. o.
Tržaška cesta 85, 2000 Maribor

Živa Hanžič, M. Sc. REAP
ziva@stajerski-inzeniring.com
Štajerski Inženiring, d. o. o.
Tržaška cesta 85, 2000 Maribor

izr. prof. dr. Janja Kramer Stajnko, univ. dipl. inž. grad.
janja.kramer@um.si
Univerza v Mariboru
Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

Strokovni članek
UDK/UDC: 556.18:696.135:004.42

ANALIZA RAZLIČNIH METOD DIMENZIONIRANJA METEORNE KANALIZACIJE NA PRAKTIČNEM PRIMERU
COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR STORMWATER SEWER SYSTEM DESIGN ON A PRACTICAL CASE STUDY

Povzetek
Prispevek obravnava analizo različnih metod dimenzioniranja meteorne kanalizacije na praktičnem primeru logističnega centra. Pri tem so bile obravnavane naslednje hidrološke metode: racionalna metoda, modificirana racionalna metoda, racionalna metoda DeKalb, Santa Barbara UH, SCS TR-55 in SWMM. Namen raziskave je bil ovrednotiti vpliv izbire hidrološke metode na rezultate hidravličnega dimenzioniranja sistema. Modeliranje je bilo izvedeno s programskima orodjema Civil 3D in Storm and Sanitary Analysis (SSA), pri čemer so bile uporabljene različne metode za določanje odtoka padavinskih voda. V okviru analize so bili primerjani hidrogrami odtoka, izračunani maksimalni pretoki, hitrosti, dimenzije cevovodov in izpolnjenosti cevi. Rezultati kažejo, da izbira metode vpliva na končne rezultate, pri čemer so bila ugotovljena opazna odstopanja med posameznimi metodami izračuna časov koncentracij in hidrološkimi metodami. Te razlike lahko pomembno vplivajo na varnost delovanja sistema in na stroške izvedbe. Pri načrtovanju meteorne kanalizacije je potrebna kritična presoja izbire metode glede na velikost, rabo in kompleksnost obravnavanega območja. Prispevek podaja tudi praktična priporočila za uporabo posameznih metod v inženirski praksi.

Ključne besede: odvajanje odpadnih voda, meteorna kanalizacija, metode dimenzioniranja kanalizacije, hidrologija

Summary

This article presents an analysis of stormwater sewer design methods based on a practical case study of a logistics centre. The following hydrological methods were considered: rational method, modified rational method, DeKalb rational method, Santa Barbara UH, SCS TR-55 and SWMM. The aim of the study was to evaluate the impact of the selected hydrological method on the results of hydraulic design. The modelling was carried out using Civil 3D and Storm and Sanitary Analysis (SSA), applying various approaches for estimating stormwater runoff. As part of the analysis, runoff hydrographs, calculated peak flows, velocities, pipe dimensions, and pipe filling ratios were compared. The results show that the choice of method affects the final outcomes, with noticeable deviations identified among different methods for calculating time of concentration and among hydrological methods. These differences can significantly influence both the operational safety of the system and construction costs. In storm sewer design, a critical assessment of method selection is necessary, considering the size, land use, and complexity of the area under consideration. The article also provides practical recommendations for the application of individual methods in engineering practice.

Key words: wastewater drainage, storm sewer, sewer dimensioning methods hydrology

1 UVOD

Človekova prisotnost in urbanizacija imata velik vpliv na značilnosti zemeljskega površja. Naravne površine, kot sta vegetacija in prepustna zemljina, skozi kateri se padavinska voda naravno infiltrira, se nadomeščajo z neprepustnimi ali delno prepustnimi materiali. Takšne spremembe zmanjšajo infiltracijsko sposobnost tal ter skrajšajo čas koncentracije padavinske vode. Posledično se povečajo konični pretoki in celotni volumen površinskega odtoka. Meteorna kanalizacija je ključen del komunalne infrastrukture, saj omogoča odvodnjavanje padavinskih voda in s tem zmanjšuje tveganje za poplave in druge negativne vplive na urbano okolje.

Pri projektiranju meteorne kanalizacije se uporabljajo različne metode za določanje hidravličnih obremenitev, katerih izbira lahko pomembno vpliva na rezultate dimenzioniranja. V sodobni praksi se za ta namen pogosto uporablja programska oprema, kot je Autodesk Storm and Sanitary Analysis (SSA), ki omogoča izvajanje hidravličnih simulacij po več različnih metodoloških pristopih. Na konkretnem primeru logističnega centra je bila zato izvedena primerjalna analiza metod dimenzioniranja meteorne kanalizacije z namenom ovrednotenja vpliva izbire metode na končne rezultate preračunov.

Prispevek predstavlja povzetek magistrske naloge [Munda, 2025], ki celovito obravnava analizo različnih metod dimenzioniranja meteorne kanalizacije na širšem območju novega logističnega centra. Osrednji cilj raziskave je bil ugotoviti vpliv izbire metode na rezultate hidravličnega preračuna ter na izbor ustreznih premerov cevi kanalizacijskega sistema. Hkrati je bila preverjena hipoteza, da je v praksi najpogosteje uporabljena racionalna metoda tudi najbolj optimalna z vidika zanesljivosti in uporabnosti rezultatov.

2 UPORABLJENE METODE IN PRAKTIČNI PRIMER

Metode dimenzioniranja meteorne kanalizacije so bile analizirane na praktičnem primeru Logističnega parka Logatec. Projekt se je projektiral v letih 2023–2024, njegova izvedba pa je bila zaključena v letu 2025. Slika 1 prikazuje objekt in zunanjo ureditev v zaključni fazi gradnje.

2.1 Opis primera

Obravnavano območje je bilo pred gradnjo nepozidano, z značilnim kraškim terenom in brez obstoječe infrastrukture. Predvidena ureditev je vključevala gradnjo logističnega objekta z nakladalnimi rampami, pripadajočimi pisarniškimi in tehničnimi prostori ter celovito zunanjo ureditvijo. Ta obsega prometno infrastrukturo, parkirne površine za osebna in tovorna vozila ter priključitev na gospodarsko javno infrastrukturo. Poseben poudarek je na ureditvi utrjenih, večinoma nepropustnih površin, ki pomembno vplivajo na odtok padavinskih voda.

Sistem odvajanja padavinskih voda na obravnavanem območju je zasnovan kot ločen kanalizacijski sistem, ki vključuje odvodnjavanje strešnih in manipulativnih površin. Na Sliki 3 je prikazan meteorni kanalizacijski sistem – z vijolično barvo od-

Slika 1. *Logistični park Logatec proti koncu gradnje*

vodnjavanje strešnih površin in z zeleno barvo odvodnjavanje manipulativnih površin. Meteorne vode s prometnih in manipulativnih površin se zbirajo ter mehansko obdelajo v usedalnikih in lovilnikih olj, nato pa se očiščene odvajajo v ponikalne jaške. Padavinske vode s strešin se preko vertikal in peskolovov prav tako vodijo v ponikalne jaške. Sistem sestavljajo tudi točkovni in linijski požiralniki ter betonske kanalete ustreznih dimenzij in nosilnosti, prilagojeni prometnim obremenitvam. Betonske kanalete so bile predvidene po obodu servisne poti okrog objekta (na Sliki 2 so prikazane s svetlo modro barvo), ker je objekt spuščen nižje glede na zgornjo javno cesto in je treba površinske padavinske vode, ki pritečejo po strmih brežinah, kontrolirano zajeti.

Slika 2. *Situacija meteorne odvodnje*

Odvodnjavane površine so različnih hrapavosti, naklona, sestave in prepustnosti. Razdelimo jih lahko na tri tipe prispevnih površin:

- utrjene neprepustne površine – asfaltne in betonske s koeficientom odtoka 0,8 do 0,9,
- površine streh s koeficientom odtoka 0,9 do 1,0,
- zazelenjene in kamnite brežine s koeficientom odtoka 0,1 do 0,3.

Posebna pozornost je bila namenjena varstvu voda, saj je bil celoten kanalizacijski sistem cevi in jaškov predviden kot vodotesen skladno z veljavnimi smernicami. V primeru požara je izveden nadzorovan sistem zapiranja, ki preprečuje odtok onesnaženih požarnih voda v ponikalni sistem in omogoča njihovo zadrževanje ter ustrezno ravnanje.

2.2 Uporabljene metode

Pri dimenzioniranju meteorne kanalizacije se najprej lotimo modeliranja padavin in odtoka. Pri tem določimo prispevne površine in čas koncentracije.

2.2.1 Čas koncentracije

Padavine, ki padejo na prispevno površino, ne odtečejo takoj v kanal. Čas, v katerem dosežejo kanal, je odvisen od naklona in hrapavosti površine, oddaljenosti od kanala in od intenzitete padavin [Kolar, 1983].

V SSA je za izračun časa koncentracije na voljo več različnih metod:

- Kirpich,
- Carter,
- Eagleson,
- FAA,
- Harris County,
- Papadakis-Kazan,
- SCS TR-55.

Metoda po Kirpichu (1940) je bila razvita za manjše prispevne površine iz podatkov s šestih manjših območij v Tennesseeju v ZDA, velikih 0,0051–0,433 km^2 in z naklonom 3–12 %. Upošteva dolžino toka od najbolj oddaljene točke do iztoka in povprečni vzdolžni naklon. Podobno enačbo je razvil Carter (1961), ta se nanaša na manjše naravne vodotoke v ZDA in njihove prispevne površine, ki so manjše od 21 km^2 (8 mi^2) [D. Sultan, 2022].

Eagleson (1962) in kasneje Nicklow et al. (2006) so razvili enačbo, ki je prav tako primerna za vodotoke in prispevne površine, manjše od 21 km^2 (8 mi^2), in zraven dolžine toka upošteva od najbolj oddaljene točke do iztoka še Manningov koeficient hrapavosti in hidravlični radij v glavnem kanalu vodotoka, ko je ta poln. Metoda po FAA (1970) je bila razvita na podlagi podatkov odtoka s površin manjšega letališča, ki jih je zbrala USACE (U.S. Army Corps of of Engineers). Po navadi preceni čas dotoka, če ima pot dotoka znaten delež plitvega koncentriranega toka. Enačba upošteva dolžino toka od najbolj oddaljene točke do iztoka v kanalizacijski sistem, povprečni vzdolžni naklon in koeficient odtoka (po racionalni metodi, ki je opisana v poglavju 2.2.2) [Salimi, 2016].

Harris County Engineering Department, Teksas [Harris County Engineering Department, 2018], je za izračun časa koncentracije predpisal enačbo, ki je odvisna samo od velikosti prispevne površine.

Papadakis-Kazanova (1986) metoda je bila razvita na podlagi podatkov USDA Agricultural Research Service za 84 majhnih podeželskih povodij. Čas koncentracije je odvisen od dolžine površinskega toka, koeficienta hrapavosti, naklona površine in intenzitete padavin [Salimi, 2016].

Po metodi SCS TR-55 se končni čas koncentracije izračuna kot vsota časov potovanja vode različnih vrst toka, kot so površinski tok, plitvi koncentriran tok in kanalski tok (tok po odprtem kanalu, npr. po kanaleti). Za površinski tok se upoštevajo dolžina toka, Manningov koeficient hrapavosti, 24-urni naliv pri dvoletni povratni dobi in naklon površine. Za plitvi koncentriran tok in kanalski tok enačba upošteva dolžino toka glede na povprečno hitrost toka [Autodesk Inc., 2025].

Izvedena je bila analiza obravnavanega meteornega sistema, kjer smo primerjali čase koncentracije in odtoke s površine glede na različne metode izračuna časa koncentracije. Celotno območje je bilo razdeljeno na 115 prispevnih površin. V nadaljevanju za nazornejši pregled obravnavamo samo tri različne prispevne površine. Za izračun odtoka je bila v tem primeru uporabljena racionalna metoda. Preglednica 1 prikazuje primerjavo in rezultate različnih časov koncentracije in odtoka. Vključeni so tudi rezultati po izračunu SWMM (Storm Water Management Model). Intenziteta padavin je bila pri izračunu odtoka po racionalni metodi določena na podlagi časa koncentracije, ki je enak času trajanja padavin. V program SSA smo vnesli ITP-krivulje (Slika 3), na podlagi katerih program določi intenziteto padavin glede na trajanje padavin oziroma čas koncentracije.

Lahko opazimo, da so rezultati po metodah Carter, Kirpich, Papadakis-Kazan enaki, veliko odstopanje pa je pri metodi po Harris County. Model SWMM uporablja največ parametrov za izračun časa koncentracije, zato lahko smatramo, da daje najbolj natančne rezultate. Čas koncentracije je za bolj hrapave površine daljši kot za gladke. Enako je daljši v primeru manjšega naklona površine in daljše dolžine toka po prispevni površini.

Oznaka	Površina [m^2]	Vtok v sistem	Povprečni naklon [%]	Dolžina toka [m]	Čas koncentracije [hh:mm:ss]				Odtok [l/s]			
					Carter, Kirpich, Papadakis-Kazan	FAA	Harris County	SWMM	Carter, Kirpich, Papadakis-Kazan	FAA	Harris County	SWMM
ASFALT_36	1036,74	L.11	1,0	18,0	00:05:00	00:05:40	00:22:52	00:03:15	30,74	28,94	15,59	43,78
BREZINA_15	924,01	PE1.5	40,0	30,0	00:05:00	00:05:00	00:22:42	00:08:58	11,91	11,91	4,34	8,01
STREHA_02	2059,66	O.2	2,0	24,0	00:05:00	00:05:00	00:23:52	00:02:58	61,07	61,07	32,74	87,92

Preglednica 1. *Prikaz primerjave različnih časov koncentracije in odtoka*

2.2.2 Hidrološke metode

Po izračunu časa koncentracije uporabimo izbrano hidrološko metodo. V nadaljevanju so predstavljene hidrološke metode, ki jih je mogoče izbrati v programu SSA za dimenzioniranje meteorne kanalizacije:

- racionalna metoda,
- modificirana racionalna metoda,
- racionalna metoda DeKalb,
- SCS TR-20,
- SCS TR-55,
- Santa Barbara UH,
- HEC-1,
- EPA SWMM.

Racionalna metoda je splošno znana, enostavna, hitra in daje oceno koničnega odtoka s prispevne površine pri padavinah s stalno intenziteto. Izpeljana je na podlagi sledečih predpostavk:

- intenziteta dežja je stalna po času in kraju,
- frekvenca koničnega odtoka je enaka frekvenci padavin, ki jo povzroča,
- razmerje med količino padavin in odtokom je linearno,
- vsaka od spremenljivk je neodvisna in določena ločeno,
- hitrost potovanja vala po omrežju je enaka hitrosti pri polni cevi,
- koeficient odtoka oz. infiltracija je neodvisna od časa trajanja padavin, od intenzitete padavin in od predhodne vlažnosti. [Kompare, 1991].

Racionalna metoda je torej klasična metoda za izračun največjega pretoka, ki se uporablja pri dimenzioniranju kanalizacije. Izračuna se na podlagi velikosti prispevne površine, koeficienta odtoka in intenzitete oz. jakosti naliva, ki se določi iz ITP-krivulje (intenziteta – trajanje – povratna doba) glede na čas koncentracije posamezne prispevne površine.

Modificirana racionalna metoda vključuje osnoven princip racionalne metode in obenem generira hidrogram. Hidrogram $Q(t)$ je časovna porazdelitev pretoka, kjer je mogoče razbrati, kako hitro pride do konice pretoka, kolikšen je skupni volumen odtoka in kako dolgo traja odtok.

Racionalno metodo DeKalb je razvil DeKalb County Public Works Department, Decatur, Georgia, ZDA. Racionalna metoda DeKalb oblikuje projektni hidrogram tako, da porazdeli konični pretok (računan po racionalni metodi) skozi čas, z uporabo dimenzijskega enotnega hidrograma. Z uporabo te metode lahko dimenzioniramo tudi zadrževalne bazene in akumulacije [CivilGEo Inc., 2026].

Metodi The Soil Conservation Service (SCS) TR-20 in TR-55 sta razširjena hidrološka modela, ki ju je razvila USDA Natural Resources Conservation Service (NRSC, prej SCS). Ti metodi ocenjujeta površinski odtok glede na padavine, rabo zemljišča in značilnosti površine, zato sta pomembni pri zasnovi meteornih sistemov, objektov za nadzor poplav in načrtov za upravljanje s padavinsko vodo [CivilGEo Inc., 2026].

Metoda urbanega hidrograma (UH) Santa Barbare, tako kot SCS, temelji na pristopu številke krivulj (CN) in uporablja enake enačbe za izračun infiltracije skozi tla in odtoka. To metodo je razvil Okraj za nadzor poplav in ohranjanje voda v okrožju Santa Barbara v Kaliforniji (Santa Barbara County Flood Control and Water Conservation District) [Autodesk Inc., 2025].

Model HEC-1 je primeren za večja povodja ali kompleksne sisteme in je zasnovan za simulacijo odziva površinskega odtoka v porečju reke na padavine tako, da porečje predstavlja kot medsebojno povezan sistem hidroloških in hidravličnih komponent. Metoda HEC-1 v SSA omogoča generiranje hidrograma iz podanega naliva, pri čemer upošteva transformacijo padavin v odtok, učinke zadrževanja in prenos pretoka po kanalih. Je robustna metoda za večja območja in dinamično analizo odtoka padavinske vode [Hydrologic Engineering Center, 1998].

Storm Water Management Model je bil razvit na zahtevo Environmental Protection Agency v konzorciju Metcalf and Eddy Inc., Univerze na Floridi in Water Resources Engineers Inc. SWMM je simulacijski model, ki lahko obravnava kvantiteto in kvaliteto. Model vsebuje račun površinskega odtoka, račun sušnih odtokov v ločeni in/ali mešani kanalizaciji, infiltracijo, račun toka v ceveh z Manningovo in retenzijsko-kontinuitetno enačbo ali s Saint-Venantovimi enačbami [Kompare, 1991].

2.2.3 Hidravlične metode

Pri obravnavi toka vode v ceveh, kanalih in objektih uporabljamo hidravlične metode analize. Ko poznamo odtok s površine (hidrologija), preverimo, ali cev prenese ta pretok, kakšni sta gladina in hitrost v cevi.

Hidravlične metode uporabljajo za tok s prosto gladino Manningovo enačbo za povezavo pretoka z globino vode in naklonom cevi. Za izračun toka pod tlakom se namesto nje uporablja enačba Hazen-Williams ali Darcy-Weisbach. Tok v kanalu ali cevi urejajo Saint-Venantove enačbe ohranjanja mase in gibalne količine za postopno spreminjajoč se nestalni tok. Programska oprema SSA omogoča izbiro stopnje kompleksnosti, ki se uporablja za reševanje teh enačb. Privzeta hidravlična metoda je metoda kinematičnega vala. V programu je možno izbrati tudi metodo stalnega enakomernega toka in metodo hidrodinamičnega vala [Autodesk Inc., 2023].

Metoda hidrodinamičnega vala rešuje celotne Saint-Venantove enačbe in omogoča najbolj natančno simulacijo, saj upošteva akumulacijo, povratne vplive, tlačni tok, obrat toka ter kompleksne omrežne konfiguracije. Kinematični val, ki je privzeta metoda v SSA, temelji na poenostavljeni obliki enačb in je primeren za enostavnejša razvejena omrežja, vendar ne upošteva povratnih vplivov in tlačnega toka. Metoda stalnega enakomernega toka predstavlja najbolj poenostavljen pristop, primeren predvsem za predhodne analize velikih omrežij ali dolgoročne simulacije, saj ne upošteva časovnih in dinamičnih učinkov toka [Autodesk Inc., 2023].

2.3 Modeliranje

V programu SSA je mogoče modelirati naslednje elemente odvodnje:

- kanalizacijske cevi in jaški,
- prispevne površine,

- vtoki in zadrževalne površine,
- zadrževalni bazeni,
- kompleksne iztočne konstrukcije,
- razdelilniki pretoka – razbremenilniki, prelivi, odprtine, jezovi in ventili,
- črpalke in črpalne postaje,
- reke, potoki in jarki,
- prepusti in mostovi.

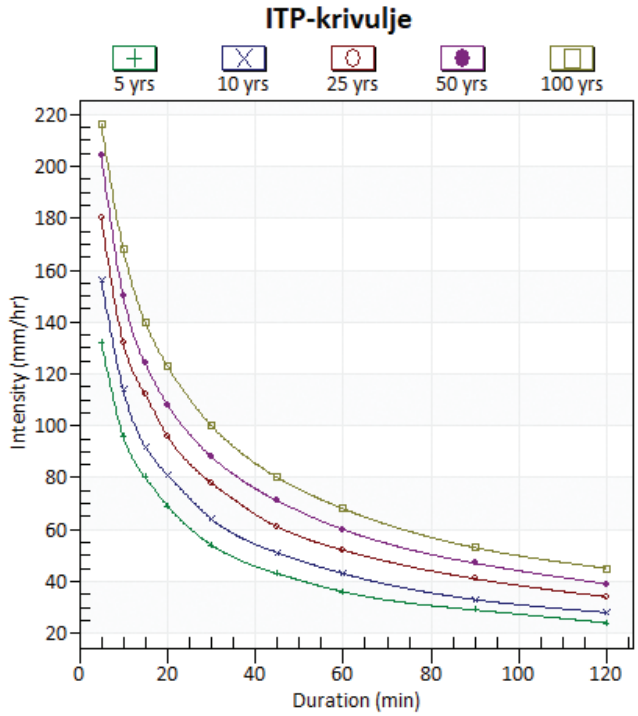
Sistem jaškov, požiralnikov in cevi je bil modeliran v programu Civil 3D 2024 (Autodesk) v koordinatnem sistemu D96 glede na predvidene nove površine in višine terena. Model kanalizacije je bil nato prek ukaza »Edit in Storm and Sanitary Analysis« prenesen v SSA, pri čemer je za izmenjavo podatkov mogoče uporabiti tudi datoteke Hydraflow Storm Sewers STM ali LandXML. Prispevne površine so bile grafično določene in opredeljene z ustreznimi lastnostmi SSA.

Podatki o padavinah so pridobljeni s spletne strani CrossRisk – povratne dobe za ekstremne padavine za območje Logatca, kar prikazuje Preglednica 2.

mm	5 let	10 let	25 let	50 let	100 let	250 let
5 min	11	13	15	17	18	20
10 min	16	19	22	25	28	32
15 min	20	23	28	31	35	41
20 min	23	27	32	36	41	47
30 min	27	32	39	44	50	58
45 min	32	38	46	53	60	70
60 min	36	43	52	60	68	79
90 min	43	50	61	70	80	94
2 h	48	56	68	78	89	105
3 h	56	66	79	90	103	120
4 h	62	73	88	100	113	132
5 h	68	79	94	107	121	141
6 h	73	84	100	113	127	147
9 h	85	97	114	128	143	164
12 h	94	107	125	139	155	177
15 h	101	115	133	148	164	187
18 h	108	122	141	157	173	196
24 h	118	133	154	171	188	212
48 h	146	165	189	209	228	256
72 h	164	185	213	234	255	285
96 h	178	201	230	253	276	308
120 h	190	213	245	269	293	326

Preglednica 2. *Količina padavin za območje Logatca glede na povratne dobe [CROSSRISK, Povratne dobe za ekstremne padavine, 2026]*

Podatke smo pretvorili v ITP-krivulje (intenziteta – trajanje – povratna doba), ki jih prikazuje Slika 3.



Slika 3. *ITP-krivulje za območje Logatca (prikaz iz programa SSA)*

Izvedli smo dimenzioniranja kanalizacijskega sistema za desetletno povratno dobo po naslednjih hidroloških metodah:

- racionalna metoda,
- modificirana racionalna metoda,
- racionalna metoda DeKalb,
- Santa Barbara UH,
- SCS TR-55,
- SWMM.

Kanalizacije nismo dimenzionirali po hidrološki metodi HEC-1, saj v postopku lahko obravnavamo samo prispevne površine, večje od 259 m². V izračunu se namreč prispevne površine obravnavajo v kvadratnih miljah z natančnostjo štirih decimalnih mest. To ustreza površini 0,0001 mi², kar je 0,0259 ha. V primeru manjših površin bi program javil napako. Podobno je pri metodi SCS TR-20, kjer je minimalna površina 25,9 m². V izračunu program prispevne površine obravnava v kvadratnih miljah z natančnostjo petih decimalnih mest. Kanalizacijskega sistema nismo preverili po UK-modificirani metodi, saj je postopek omejen na geografsko področje Velike Britanije [Autodesk Inc., 2023].

Kanalizacijski sistem smo najprej dimenzionirali po racionalni metodi s kinematičnim valom. Pri tem smo za izračun časa koncentracije primerjali več metod: Carter, Kirpich, Papadakis-Kazan, FAA, Harris County in SWMM. Glede na prej opisane metode časa koncentracije in rezultatov, ki so predstavljeni v poglavju 4, se je izkazalo, da je metoda po Carterju najprimernejša, saj je najhitrejša glede vnašanja podatkov, vendar kljub

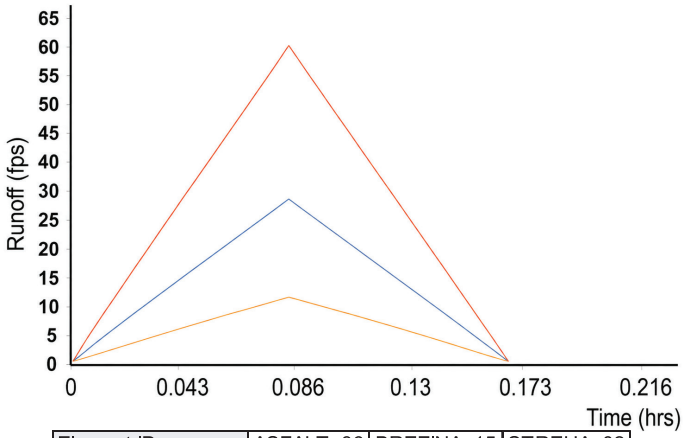
temu zajame pomembna vhodna podatka: dolžino površinskega toka in povprečni naklon površine. Določili smo minimalno vrednost časa koncentracije, ki znaša pet minut.

Kanalizacijski sistem smo dimenzionirali za vsako metodo posebej. Pri tem smo prilagajali premere cevi glede na pretok in polnitev, ki ne presega 70 % (± 3 %).

3 REZULTATI

Rezultati se lahko predstavijo v obliki datoteke formata .xlsx, ki jo izvozimo iz SSA. V programu lahko prikažemo tudi hidrograme in vzdolžne prereze kanalizacijskih vej z animacijo polnitve kanalizacijskega sistema. Hidrogrami iztoka iz sistema, hidrogrami posameznih prispevnih površin in hidrogrami posameznih odsekov se glede na izbrano metodo dimenzioniranja zelo razlikujejo. Pri tem imajo na videz enako obliko za sistem, prispevne površine in cevi. Zato so v nadaljevanju prikazani hidrogrami odtoka za izbrane tri prispevne površine glede na posamezno hidrološko metodo.

Slika 4 prikazuje hidrogram odtoka v primeru racionalne metode, ki je v obliki trikotnika. Čas trajanja naliva je pet minut in jakost naliva 156 mm/h. Največji odtok za vsako prispevno površino je zapisan pod hidrogramom in predstavlja vrh trikotnika, ki ga izračunamo po racionalni metodi.

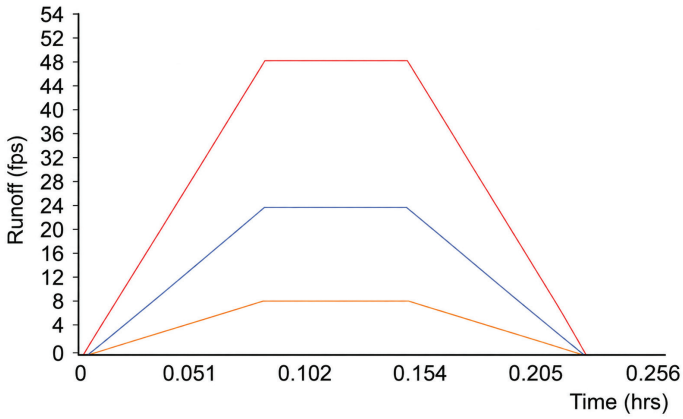


Element ID	ASFALT_36	BREZINA_15	STREHA_02
Krivulja			
Največji odtok [l/s]	30,74	11,91	61,07
Najmanjši odtok [l/s]	0,00	0,00	0,00
Srednji odtok [l/s]	0,11	0,04	0,21

Slika 4. *Hidrogrami odtoka s treh prispevnih površin po racionalni metodi (Carter)*

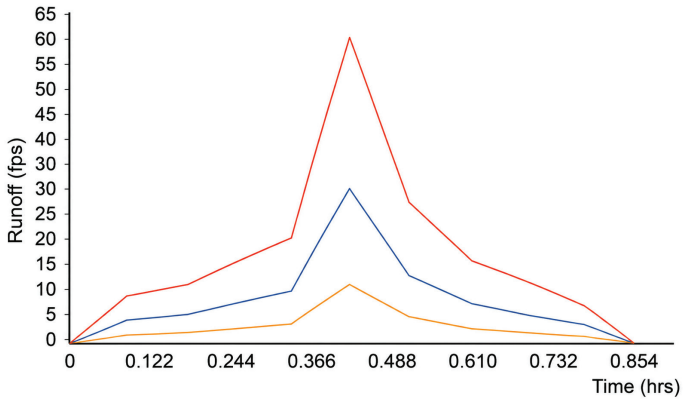
Slika 5 prikazuje hidrogram odtoka s prispevnih površin za primer modificirane racionalne metode. Čas trajanja naliva je osem minut in jakost naliva 126,11 mm/h. Največji odtoki so zapisani pod hidrogramom. Oblika hidrogramov je trapezna, saj je izbran čas trajanja naliva daljši od časa koncentracije.

Naslednja je racionalna metoda DeKalb (Slika 6). Čas trajanja naliva je pet minut in jakost naliva 156 mm/h. Največji odtoki so zapisani pod hidrogramom. Za to metodo je tipična zlomljena trikotna oblika hidrogramov.



Element ID	ASFALT_36	BREZINA_15	STREHA_02
Krivulja			
Največji odtok [l/s]	24,85	9,63	49,37
Najmanjši odtok [l/s]	0,00	0,00	0,00
Srednji odtok [l/s]	3,32	1,29	6,60

Slika 5. *Hidrogrami odtoka s treh prispevnih površin po modificirani racionalni metodi*

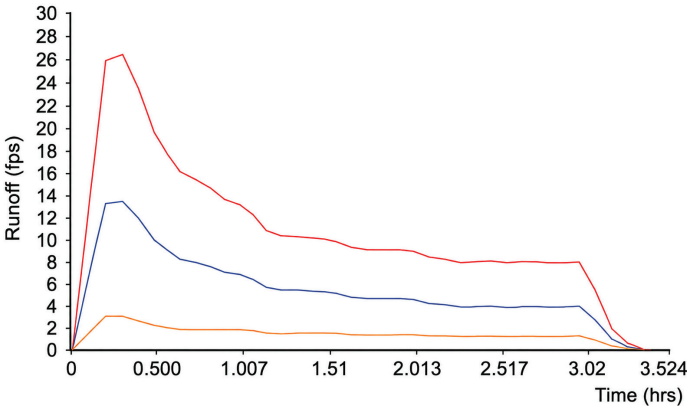


Element ID	ASFALT_36	BREZINA_15	STREHA_02
Krivulja			
Največji odtok [l/s]	30,74	11,91	61,07
Najmanjši odtok [l/s]	0,00	0,00	0,00
Srednji odtok [l/s]	0,32	0,12	0,63

Slika 6. *Hidrogrami odtoka s treh prispevnih površin po racionalni metodi DeKalb*

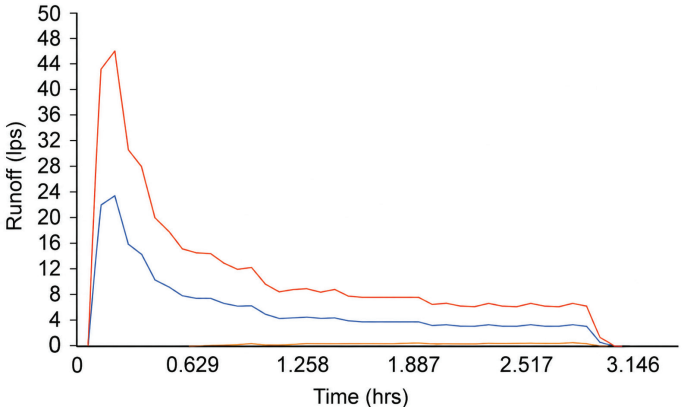
Hidrogrami odtoka po metodi Santa Barbara UH imajo že drugačno obliko (Slika 7), z izrazitim vrhom na začetku padavin. V program SSA smo za vhodni podatek o nalivu oz. o nevihti vnesli podatke o padavinah (kumulativne vrednosti) po času za obdobje treh ur. Te vrednosti prikazuje Preglednica 2.

Podobne hidrograme dobimo po metodi SCS TR-55 (Slika 8). V program SSA smo za vhodni podatek o nalivu oz. o nevihti vnesli podatke o padavinah (kumulativne vrednosti) po času za obdobje treh ur. Te vrednosti prikazuje Preglednica 2. Odtok z brežine po tej metodi je opazno manjši, vendar so odtoki z utrjenih in strešnih površin večji.



Element ID	ASFALT_36	BREZINA_15	STREHA_02
Krivulja			
Največji odtok [l/s]	13,21	2,35	26,24
Najmanjši odtok [l/s]	0,00	0,00	0,00
Srednji odtok [l/s]	2,49	0,62	4,94

Slika 7. *Hidrogrami odtoka s treh prispevnih površin po metodi Santa Barbara UH*

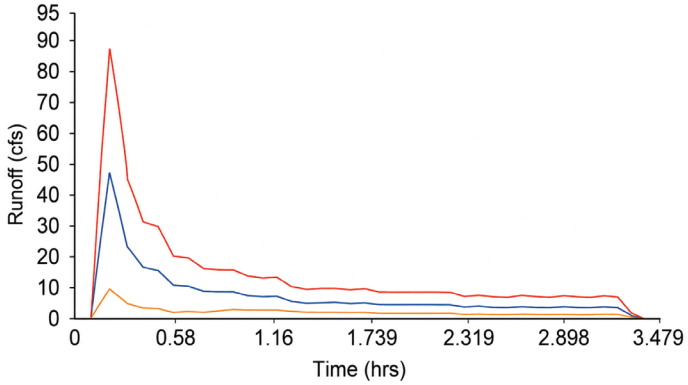


Element ID	ASFALT_36	BREZINA_15	STREHA_02
Krivulja			
Največji odtok [l/s]	22,44	0,59	44,89
Najmanjši odtok [l/s]	0,00	0,00	0,00
Srednji odtok [l/s]	0,73	0,04	1,45

Slika 8. *Hidrogrami odtoka treh prispevnih površin po metodi SCS TR-55*

Slika 9 prikazuje hidrograme odtoka po modelu SWMM. V program SSA smo za vhodni podatek o nalivu oz. o nevihti vnesli podatke o padavinah (kumulativne vrednosti) po času za obdobje treh ur. Te vrednosti prikazuje Preglednica 2. Opazimo lahko en sam vrh na začetku naliva za vsako prispevno površino, ki ponazarja največji oz. končni pretok.

Izvedla se je primerjalna analiza pretokov, hitrosti, dimenzioniranih premerov cevi in polnitve cevi glede na izbrane hidrološke metode. Obravnavanih je bilo 159 odsekov oz. cevi meteorne kanalizacije. Za prikaz razlik in primerjavo so v nadaljevanju prikazani samo tipični odseki, ki so navedeni tudi v Preglednici 3.



Element ID	ASFALT_36	BREZINA_15	STREHA_02
Krivulja			
Največji odtok [l/s]	43,78	8,01	87,92
Najmanjši odtok [l/s]	0,00	0,00	0,00
Srednji odtok [l/s]	0,80	0,25	1,60

Slika 9. *Hidrogrami odtoka treh prispevnih površin po metodi oz. modelu SWMM*

IZBRANE CEVI OZ. ODSEKI				
Naziv odseka	Dolžina [m]	Naklon [%]	Manningov koeficient hrapavosti	Tipični odsek
s.7	1,31	0,50	0,012	sekundarna cev iz rešetke v kanaleti
s.14	4,16	0,50	0,012	sekundarna cev iz točkovnega požiralnika ob cesti
s.16	23,52	1,00	0,012	sekundarna cev iz linijskega požiralnika na ploščadi
s.67	4,77	0,50	0,012	sekundarna cev iz peskolova strehe
p.28	20,00	0,50	0,012	primarna cev meteorne kanalizacije manipulativnih površin
p.64	6,10	1,00	0,012	primarna cev meteorne kanalizacije strešnih površin

Preglednica 3. *Podatki o izbranih ceveh oz. odsekih meteornega sistema*

V Preglednici 4 lahko primerjamo dobljene konične pretoke, ki so obarvani glede na količino od rumene) do rdeče (rdeča pomeni večji in rumena manjši pretok). Preglednica 5 prikazuje dobljene največje hitrosti v izbranih odsekih. Določeni nazivni premeri teh cevi so prikazani v Preglednici 6 in njihove polnitve oz. izpolnjenost cevi v Preglednici 7. Premeri so prav tako barvno prikazani od zelene do vijolične (zelena pomeni manjši, vijolična pa večji premer). Premeri cevi so določeni glede na pretok in polnitev cevi (≤ 70 %). Podatkov, ki so predstavljeni v Preglednici 3, pri nobenem dimenzioniranju nismo spreminjali.

PRETOKI [l/s]						
Naziv odseka	Racionalna metoda	Modificirana racionalna metoda	Racionalna metoda DeKalb	Santa Barbara UH	SCS TR-55	SWMM
s.7	5,54	4,49	5,55	1,56	1,68	5,19
s.14	7,04	5,74	7,06	2,83	5,05	9,41
s.16	13,53	11,28	13,68	5,96	10,04	19,89
s.67	40,15	39,70	39,87	25,94	38,11	38,35
p.28	50,47	43,27	51,73	22,38	37,84	72,48
p.64	240,17	261,58	241,02	168,72	243,15	243,78

Preglednica 4. *Prikaz rezultatov dimenzioniranja – pretoki*

HITROSTI [m/s]						
Naziv odseka	Racionalna metoda	Modificirana racionalna metoda	Racionalna metoda DeKalb	Santa Barbara UH	SCS TR-55	SWMM
s.7	0,65	0,62	0,65	0,46	0,46	0,64
s.14	0,77	0,73	0,69	0,54	0,63	0,74
s.16	1,56	1,50	1,07	0,84	0,98	1,18
s.67	1,11	1,10	1,10	0,95	1,05	1,05
p.28	1,30	1,25	1,30	1,04	1,18	1,40
p.64	2,17	2,21	2,17	1,97	2,17	2,17

Preglednica 5. *Prikaz rezultatov dimenzioniranja – največje hitrosti*

PREMERI CEVI [mm]						
Naziv odseka	Racionalna metoda	Modificirana racionalna metoda	Racionalna metoda DeKalb	Santa Barbara UH	SCS TR-55	SWMM
s.7	160	160	160	160	160	160
s.14	160	160	160	160	160	160
s.16	200	200	200	200	200	200
s.67	300	300	300	300	300	300
p.28	300	300	300	250	300	400
p.64	500	500	500	400	500	500

Preglednica 6. *Prikaz rezultatov dimenzioniranja – določeni nazivni premeri cevi*

POLNITEV CEVI [%]						
Naziv odseka	Racionalna metoda	Modificirana racionalna metoda	Racionalna metoda DeKalb	Santa Barbara UH	SCS TR-55	SWMM
s.7	44%	39%	44%	23%	24%	42%
s.14	50%	45%	51%	31%	42%	61%
s.16	43%	39%	43%	28%	36%	53%
s.67	52%	52%	52%	41%	51%	51%
p.28	60%	55%	62%	49%	51%	47%
p.64	55%	58%	55%	64%	55%	56%

Preglednica 7. *Prikaz rezultatov dimenzioniranja – polnitve cevi*

4 ANALIZA IN INTERPRETACIJA REZULTATOV

Metode izračuna časov koncentracij Carter, Kirpich in Papadakis-Kazan so podale enake rezultate, saj so za vsako površino določile čas koncentracije pet minut, ki je bila določena kot najmanjša vrednost. Po metodi FAA za večino površin v izračunanem času koncentracije ni bilo razlik, le pri nekaterih površinah je prišlo do razlik od ene do pet minut. Metoda Harris County je vse čase koncentracije izračunala med 19 in 24 minutami. Po metodi oz. modelu SWMM, ki upošteva največ dejavnikov, je bil izračunan največji razpon časov. Za asfaltne in strešne površine so časi koncentracije zelo kratki (< 4 min), za brežine pa relativno daljši (od 5 do 16 minut), saj sta upoštevana infiltracija in zadrževanje padavin glede na tip in velikost površine.

Razmerje koničnih odtokov s površin je obratno sorazmerno s časom koncentracije. Daljši ko je čas koncentracije, manjši je maksimalni odtok, in krajši ko je čas koncentracije, večji je maksimalni odtok vode s površine. Največji konični pretoki so bili izračunani po metodi SWMM in racionalni metodi DeKalb, najmanjši pa po metodi Santa Barbara UH.

Iz primerjave izračunanih največjih hitrosti ni mogoče razbrati kakšnih posebnih ugotovitev ali lastnosti. Potrebna je bila samo preveritev, da hitrosti vode v cevi ne presegajo najvišje dovoljene hitrosti 3 m/s.

Preglednica 6 barvno podaja premere cevi, ki so bili določeni glede na izračunane vrednosti pretoka in izpolnjenosti cevi. Opaziti je mogoče, da metodi SWMM in racionalna metoda DeKalb zahtevata večje premere na nekaterih končnih odsekih vej meteorne kanalizacije, kar je posledica večjih pretokov. Pri sekundarnih ceveh in začetnih odsekih je najmanjši določen premer cevi DN 160 mm. Pri različnih metodah ni opaziti razlik pri velikostih premerov začetnih odsekov oz. sekundarnih cevi. Vse metode je mogoče in priporočljivo uporabiti na manjših območjih. Zato v končnih dimenzijah cevi v primeru manjših projektov, kjer ni večjih prispevnih površin in dolgih vej meteorne kanalizacije, ni razlik. Če dobimo enake premere cevi po različnih metodah, lahko opazujemo, kakšne so polnitve cevi. Vrednosti polnitve cevi so po racionalni, modificirani racionalni in racionalni metodi DeKalb ter metodi SWMM relativno podobne. Dosti manjše so po metodi Santa Barbara UH in SCS TR-55.

5 SKLEP

Pri projektiranju logističnega centra je bila želja in potreba investitorja po čim večjem izkoristku gradbene parcele za izgradnjo objekta in zunanjih manipulativnih površin. S tem se je z zmanjšanjem zelenih površin zmanjšal zadrževalni učinek površinskega odtoka padavin, kar dodatno obremenjuje kanalizacijski sistem za odvodnjo padavinskih voda. Posledično so za strešne in manipulativne površine krajši časi koncentracije, večji odtočni volumni površinskega toka, večji pretoki v ceveh in večji premeri cevi. Zelene površine, v tem primeru brežine, zadržujejo vodo na površini, nekaj vode tudi ponikne, preostali površinski tok čiste vode pa odteče do požiralnika v kanalizacijski sistem.

Pri projektiranju meteorne kanalizacije se uporabljajo različne metode za določanje hidravličnih obremenitev. V praksi se pogosto uporablja programska oprema, kot je Autodesk Storm and Sanitary Analysis (SSA), ki omogoča simulacije po več metodah.

Izvedena je bila primerjalna analiza različnih metod dimenzioniranja meteorne kanalizacije na konkretnem primeru iz prakse z uporabo programa SSA. Za podobne projekte so glede na dobljene rezultate najuporabnejše hidrološka metoda racionalna metoda, metoda izračuna časa koncentracije po Carterju in hidravlična metoda kinematičnega vala. Racionalna metoda je enostavna in hitro pridemo do rezultatov. Če želimo natančnejše rezultate in hidrograme nalivov, uporabimo metodo SCS TR-55, ki je prav tako uporabna za hitre analize.

Metoda SWMM je najbolj natančna, vendar zahteva veliko vhodnih podatkov, kar naredi delo zamudno. Prav tako z njo dobimo večje pretoke. Najmanjše pretoke in premere cevi smo dobili po metodi Santa Barbara UH, ki je pravzaprav zasnovana za določeno okrožje v ZDA in zato ni primerna za uporabo v Sloveniji. Podobno velja za racionalno metodo DeKalb. Modificirana racionalna metoda zahteva uporabniško izbran čas trajanja naliva, ki se ga določi izkustveno, kar vpliva na rezultate izračuna.

V Preglednici 8 so predstavljene in zbrane informacije o zahtevnosti in primernosti metod ter prednosti in slabosti primerjanih hidroloških metod, ki so bile razbrane iz rezultatov in analize teh podatkov.

Hidrološka metoda	Zahtevnost	Primernost	Prednosti	Slabosti
Racionalna metoda	zelo nizka	manjša območja	Preprosta, hitra analiza, osnovni parametri: koeficient odtoka, jakost naliva, velikost površine, dovolj natančna za manjša območja	Ne dobimo hidrogramov nalivov, samo največji pretok, ni primerna za večja območja, ne upošteva zadrževalnikov, časovne porazdelitve padavin, dinamike odtoka
Modificirana racionalna metoda	nizka	manjša območja, enostavni projekti	Preprosta, hitra analiza, omogoča generiranje časovno odvisnega hidrograma, omogoča dimenzioniranje zadrževalnikov in akumulacij	Uporabniško določen čas trajanja naliva, enake poenostavitve kot pri racionalni metodi
Racionalna metoda DeKalb	nizka srednja	urbana območja	Generiranje hidrograma iz največjega pretoka	Zasnovana za določeno območje v ZDA (DeKalb), ni primerno za slovensko področje, ni primerna za večja območja
Santa Barbara UH	srednja	urbana območja	Relativno enostavna, generiranje hidrograma	Zasnovana za določeno območje v ZDA (Santa Barbara), ni primerna za območje Slovenije
SCS TR-55	srednja	manjša območja	Enostavna, razširjena, možnosti določanja oblike površinskega toka	Zasnovana za območja v ZDA, možnost prilagoditve za območje Slovenije, za manjša območja
EPA SWMM	visoka	kompleksni urbani in naravni sistemi, kakovost vode	Najbolj natančna, upošteva veliko realnih dejavnikov, dinamična simulacija celotnega sistema, kakovost vode	Zahtevnejša, kompleksnejša, zamudna, zahteva veliko vhodnih podatkov

Preglednica 8. *Primerjava izbranih hidroloških metod za dimenzioniranje meteorne kanalizacije*

6 ZAHVALA

Zahvalila bi se mentorici moje magistrske naloge Janji Kramer Stajnko in delovni somentorici Živi Hanžič. Zahvala gre tudi podjetju Štajerski Inženiring, d. o. o., ki mi je omogočilo uporabo projekta za namen analize v magistrski nalogi in predstavitve v članku.

7 LITERATURA

Autodesk Inc., Autodesk ® Storm and Sanitary Analysis 2024 User's Guide, 2023.

Autodesk Inc., InfoDrainage Help Documentation, 2025.

CivilGEo Inc., Stormwater Hydrology Methods, dostopno 18. 4. 2026, https://knowledge.civilgeo.com/stormwater-hydrology-methods/, 2026.

CROSSRISK, Povratne dobe za ekstremne padavine, dostopno 12. 5. 2026, https://crossrisk.eu/sl/climate?param=precipitation, 2026.

Harris County Engineering Department, Regulations of Harris County, Texas for the Approval and Acceptance of Infrastructure (Vol. 18). HARRIS COUNTY, 2018.

Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers HEC-1 Flood Hydrograph Package User's Manual CPD-1A, 1998.

Kolar, J., Odvod odpadne vode iz naselij in zaščita vode: tehnika zbiranja, odvoda, čiščenja in dispozicije odpadne ter padavinske vode. Ljubljana: Državna založba Slovenije, 1983.

Kompare, B., Modeliranje deževnega odtoka iz urbaniziranih povodij. Ljubljana: Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, VTOZD Gradbeništvo in geodezija, Inštitut za zdravstveno hidrotehniko, 1991.

Munda, E., Kramer Stajnko, J., Hanžič, Ž., Analiza različnih metod dimenzioniranja meteorne kanalizacije na praktičnem primeru, Magistrsko delo. Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo, Maribor, https://dk.um.si/Dokument.php?id=200756&lang=slv, 2025.

Salimi, E. T., Nohegar, A., Malekian, A., Hoseini, M., Holisaz, A., Estimating time of concentration in large watersheds, Paddy and Water Environment, 15, 123–132, https://doi.org/10.1007/s10333-016-0534-2, 2016.

Sultan, D., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Adgo, E., Tsegaye Meshesha, D., Almaw Fenta, A., ... Asamin Setargie, T., (,February 9), Evaluation of lag time and time of concentration estimation methods in small tropical watersheds in Ethiopia , Journal of Hydrology: Regional Studies, 40, 101025, https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101025, 2022.