

Deja Mavri, dipl. inž. ok. grad.
deja.mavril@gmail.com



prof. dr. Mojca Šraj, univ. dipl. inž. grad.
mojca.sraj@fgg.uni-lj.si



doc. dr. Nejc Bezak, univ. dipl. inž. grad.
nejc.bezak@fgg.uni-lj.si



Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Hajdrihova 28, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek
UDK 551.57:556.16(497.4)

RAZVOJ ENAČBE ZA OCENO ČASA ZAKASNITVE ZA SLOVENSKA POREČJA

LAG TIME EQUATION DEVELOPMENT FOR SLOVENIAN CATCHMENTS

Povzetek

Za načrtovanje hidrotehničnih objektov in protipoplavnih gradbenih in negradbenih ukrepov za zmanjševanje poplavnih tveganj so ključnega pomena podatki o projektnih pretokih oziroma projektnih hidrogrameh. Le-te lahko določimo tudi z uporabo hidrološkega modela padavine-odtok. V primeru, ko nimamo na voljo dovolj podatkov za umerjanje hidrološkega modela, je treba parametre modela oceniti glede na lastnosti porečij. Eden izmed parametrov, ki jih upošteva tudi pri nas pogosto uporabljeni hidrološki model HEC-HMS, je čas zakasnitve porečja. Do sedaj so se v slovenski vodarski praksi za oceno tega parametra večinoma uporabljale empirične enačbe, ki so bile razvite na drugih geografskih območjih (npr. ZDA). Prispevek prikazuje postopek določitve empiričnih enačb za oceno časa zakasnitve na podlagi merjenih podatkov o padavinah in pretokih za 20 izbranih porečij v Sloveniji. Izpeljane enačbe so se pri prvih poskusih uporabe izkazale za ustrezne in se tako že lahko uporabijo za oceno časa zakasnitve v primeru nemerjenih porečij v Sloveniji. Bo pa seveda njihova nadaljnja uporaba v praksi pokazala njihove prednosti oz. slabosti.

Ključne besede: čas zakasnitve, empirična enačba, hidrološko modeliranje, padavine, odtok, porečje

Summary

Information on design discharge values and design hydrographs is crucial for the design of hydro-engineering structures and structural and non-structural flood control measures. These variables can also be determined using a rainfall-runoff hydrological model. If there are insufficient data to calibrate the hydrological model, the model parameters must be estimated according to the characteristics of the catchment. One of the parameters that is also considered by the commonly used hydrological model HEC-HMS is the catchment lag time. So far, empirical equations developed in other geographic areas (e.g., USA) have been used to estimate this parameter in Slovenian engineering practice. This article shows the methodology applied for developing the empirical equation for estimating the lag time parameter based on measured precipitation and discharge data using 20 selected river catchments in Slovenia. The derived equation can thus be used to estimate the lag time parameter in the case of ungauged catchments. Further studies need to be conducted in order to evaluate the performance of the proposed equations.

Key words: lag time, empirical equation, hydrological modelling, rainfall, runoff, catchment

1 UVOD

V vodarski in hidrotehnični praksi se pogosto uporabljajo hidrološki modeli padavine-odtok, ki simulirajo površinski odtok na podlagi podatkov o padavinah in se lahko uporabijo tudi za napovedovanje poplav in načrtovanje hidrotehničnih ukrepov ([Bezak, 2017], [Dirnbek, 2010]). Kadar imamo na voljo merjene podatke o padavinah in pretokih, lahko za izdelavo hidrološkega modela uporabimo eno izmed teorij, ki se uporablja za modeliranje, tj. teorijo hidrograma enote, in modelske parametre ustrezno umerimo. V praksi pa se pogosto zgodi, da nimamo na voljo vseh podatkov za izdelavo hidrološkega modela in njegovo umerjanje. V tem primeru lahko na podlagi lastnosti porečij oblikujemo sintetični hidrogram enote, ki ga nato uporabimo v postopku hidrološkega modeliranja. Teorija hidrograma enote temelji na predpostavki, da je oblika hidrograma neodvisna od predhodnih padavin in zajema parametre, ki imajo velik vpliv na odtok s porečja. Ti parametri so odvisni oziroma se jih določa glede na lastnosti porečja, kot so naklon, oblika, vegetacija, lastnosti tal, geologija itd. [Brilly, 2018]. V preteklosti je bilo v svetu razvitih veliko enačb (pregled enačb podaja [Brilly, 2018]), s katerimi se lahko ocenijo parametri za določitev sintetičnega hidrograma enote na podlagi lastnosti porečja. Enačbe so bile večinoma razvite za območja v ZDA, kar pomeni, da so bile lastnosti teh porečij, na katerih so bile osnovane enačbe, lahko precej različne (npr. ravninska in aridna porečja) od lastnosti porečij na območju Slovenije. Zaradi tega je smiselno obstoječo prakso nadgraditi in razviti enačbo, ki bo osnovana na podlagi podatkov s porečij na območju Slovenije. Glavni namen tega prispevka je predstaviti nove empirične enačbe za izračun časa zakasnitve, izpeljane na podlagi podatkov za porečja v Sloveniji, in prikazati posamezne korake izpeljave teh enačb.

2 PODATKI

Sintetični hidrogram enote, ki povezuje lastnosti hidrograma enote in značilnosti porečja, je prvi razvil F. F. Snyder leta 1938 [Brilly, 2018]. Določil je povezave in enačbe, s katerimi lahko, glede na lastnosti porečja, definiramo parametre za oblikovanje sintetičnega hidrograma enote. Sintetični hidrogram enote po Snyderju je definiran s konico hidrograma enote in

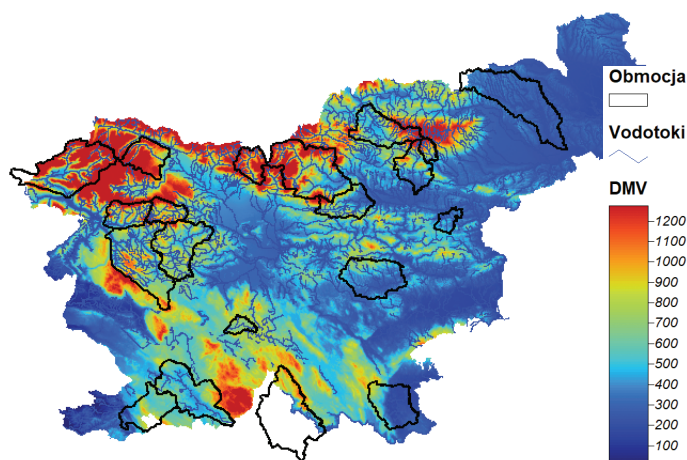
časom, pri katerem se ta pojavi. Čeprav se površinski odtok prične z začetkom učinkovitih padavin (razlika med padlimi padavinami in padavinskimi izgubami), se v nekaterih primerih del padavin zadrži na porečju. Padla voda potrebuje nekaj časa, da iz različnih delov porečja priteče do struge vodotoka ter tako do nastopa konice pretoka v vodotoku pride z določenim časovnim zamikom. Ta čas imenujemo čas zakasnitve (T_p) in je najpogosteje definiran kot razlika med težiščem učinkovitih padavin in konico pretoka, ki je posledica istega padavinskega dogodka [Gericke, 2014]. Čas zakasnitve je tudi eden izmed parametrov, ki je uporabljen v hidrološkem modelu HEC-HMS za določitev sintetičnega hidrograma enote po različnih metodah (npr. SCS, Snyder) [HEC-HMS, 2022].

Kot osnovo za izpeljavo enačbe smo izbrali 20 porečij na območju Slovenije (slika 1 in preglednica 1), ki jih je v svoji raziskavi obravnaval že [Alexopoulos, 2021]. Porečja so relativno enakomerno razporejena po celotni Sloveniji in imajo prispevek površine od približno 50 do približno 500 km² (preglednica 1). [Alexopoulos, 2021] je za vsako izmed teh porečij, glede na razpoložljivost podatkov o padavinah, pripravil zvezne urne podatke o padavinah in pretokih z upoštevanjem različnih padavinskih postaj, ki so predstavljene v preglednici 1. Izhodiščno obdobje je bilo 2000-2020. Na podlagi tako zbranih zveznih podatkov o pretokih smo v naši raziskavi za vsako izmed 20 izbranih porečij izbrali 5 največjih visokovodnih valov na podlagi podatka o konici pretoka. Za vsako visokovodno konico je bil izbran tudi pripadajoči padavinski dogodek. Za vse tako izbrane dogodke je bil določen čas zakasnitve T_p (v našem primeru definiran kot zamik med težiščem padavin in konico pretoka) in izrisan hidrogram s pripadajočim histogramom padavin. Primer za porečje vodotoka Poljanska Sora je prikazan na sliki 2, skupaj s časom zakasnitve T_p . Pri dogodku, ki se je zgodil 22. 10. 2014 na porečju vodotoka Poljanska Sora (slika 2), vidimo, da je razmik med težiščem padavin in konico pretoka relativno majhen, kar pomeni, da je čas zakasnitve relativno kratek (približno 2,7 h). V tem primeru to pomeni, da padavine niso potrebovale veliko časa, da so dosegle strugo vodotoka in povzročile konico pretoka. Za vsakega izmed tako izbranih visokovodnih dogodkov smo določili konico pretoka, skupno količino padavin med padavinskim dogodkom, največjo urno količino padavin in izračunali ter grafično ocenili čas zakasnitve T_p .

Vodotok	Vodomerna postaja in njena identifikacijska številka (ARSO)	Površina porečja (km ²)	Uporabljene padavinske postaje
Mislinja	Otiški Vrh - 2390	230,9	Šmartno pri Slovenj Gradcu, Spodnji Dolič, Muta, Ravne na Koroškem
Dravinja	Zreče - 2600	41,4	Slovenske konjice, Spodnji Dolič, Dravinja, Rogla
Pesnica	Zamušani I - 2900	477,8	Letališče Edvarda Rusjana Maribor, Polički vrh, Gornja Radgona, Gačnik
Radovna	Podhom - 3180	166,8	Davča, Zgornja Sorica, Kredarica, Lesce
Kokra	Kokra - 4120	112,2	Kamniška Bistrica, Zgornje Jezersko, Krvavec, Letališče J.P.
Poljanska Sora	Zminec - 4230	305,5	Leskovica, Zgornja Sorica, Suha, Dvor
Selška Sora	Železniki - 4270	104,1	Leskovica, Davča, Cerknica, Rudno polje
Mirna	Jelovec - 4695	270	Sevno, Novo mesto, Hrastnik, Malkovec
Kolpa	Petrina - 4820	460	Šmarata, Kočevje, Iskrba, Babno polje
Lahinja	Gradac - 4970	221,3	Črnomelj - Dobliče, Kočevske Poljane

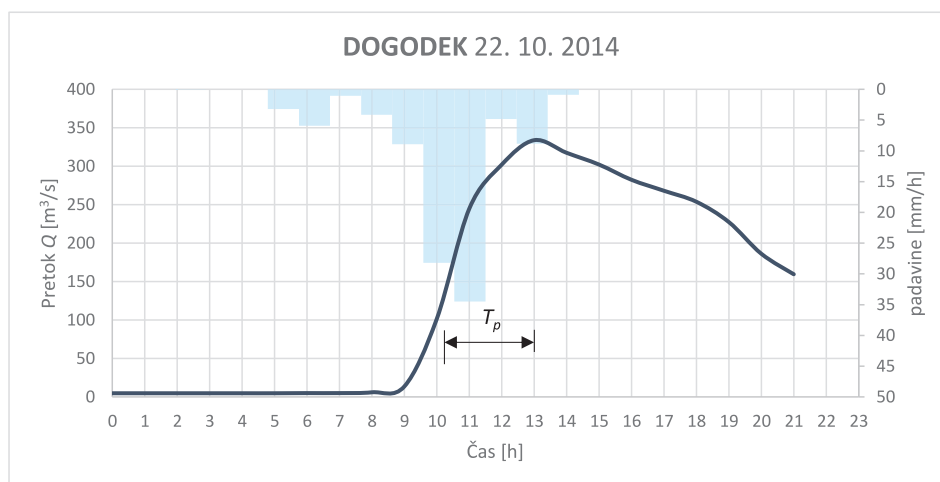
Cerkniščica	Cerknica I - 5770	47,3	Šmarata, Cerkniško jezero – Otok, Iška vas, Korošče
Savinja	Nazarje - 6060	457,3	Kamniška Bistrica, Zgornje jezersko, Nazarje, Krvavec
Bolska	Dolenja vas - 6550	175,1	Litija, Nazarje, Medlog
Vogljajna	Črnlolica I - 6690	53,7	Slovenske konjice, Lisca, Dravinja
Hudinja	Škofja vas - 6790	156,5	Šmartno pri Slovenj Gradcu, Slovenske Konjice, Medlog, Celje
Soča	Kobarid I - 8080	437	Stara Fužina, Rateče, Kredarica
Idrijca	Hotešk - 8450	442,8	Leskovica, Davča, Ajdovščina, Podroteja
Bača	Bača pri Modreju - 8500	142,3	Leskovica, Davča, Cerknica, Rudno Polje
Reka	Cerkvenikov mlin - 9050	377,9	Ilirska Bistrica, Postojna, Škocjan
Rižana	Kubed - 9210	204,5	Ilirska Bistrica, Koper - Luka, Škocjan

Preglednica 1. 20 izbranih porečij na območju Slovenije, ki so bila uporabljena za izpeljavo enačbe, skupaj z uporabljenimi padavinskimi postajami ter površinami porečij.



Slika 1. Prikaz izbranih 20 porečij na območju Slovenije (črno obrobljeni poligoni) skupaj z mrežo vodotokov (modre črte) in digitalnim modelom višin (DMV) kot podlago (enote metri).

Za izpeljavo enačbe za oceno časa zakasnitve posameznih porečij potrebujemo tudi podatke o osnovnih lastnostih porečij. Bistveni so podatki o površini porečja, padcu porečja, deležu urbanih površin, deležu gozdnih površin, deležu kmetijskih površin itd. Osnovne lastnosti pokrovnosti tal za izbranih 20 porečij so bile določene na podlagi karte rabe tal CLC Corine iz leta 2018 [CLC Corine, 2022]. Kot izhodišče za izpeljavo enačbe so pomembni tudi osnovni podatki o vodotoku, kot so dolžina vodotoka, padec vodotoka, dolžina od iztočnega profila do profila, ki je najbližji težišču vodotoka (L_c), itd. Podloge, uporabljene za analizo lastnosti vodotoka, so bile: digitalni model višin (DMV) za območje Slovenije (20 m) [RS MOP, 2022], mreža vodotokov (sloj Kategorizacija vodotokov, prenesen s portala Geoportal ARSO [ARSO, 2022]) v Sloveniji in razvodnice izbranih porečij. Na podlagi podatkov DMV smo določili tudi minimalno, povprečno in maksimalno nadmorsko višino vseh 20 izbranih porečij. Dodatno smo upoštevali tudi karto odtočnega potenciala posameznega porečja [UL BF, 2011]. Na podlagi podatkov o odtočnem potencialu in rabi tal smo ocenili tudi parameter CN (Curve Number) [Brilly, 2018]. Osnovne lastnosti izbranih porečij so prikazane v preglednici 2.



Slika 2. Primer hidrograma in histograma padavin za dogodek 22. 10. 2014 na porečju vodotoka Poljanska Sora. Podatki so bili pridobljeni iz vodomerne postaje Zminec in padavinske postaje Zgornja Sorica.

Vodotok in ime vodomerne postaje	L (km)	L_c (km)	I (m/m)	CN	Delež gozda (%)	Delež kmetijskih površin (%)
Mislinja, Otiški Vrh	34,8	21,4	0,02	71	66,8	30,7
Dravinja, Zreče	9,9	5,2	0,10	76	68,1	30,8
Radovna, Podhom	26,8	13,8	0,04	52	94,3	5,5
Kokra, Kokra	17,9	8,1	0,04	62	94,5	4,4
Poljanska Sora, Zminec	40,4	19,6	0,00	71	66,2	32,8
Selška Sora, Železniki	18,5	8,7	0,04	63	84,3	13,8
Mirna, Jelovec	33,6	19,6	0,02	65	57,3	42,0
Kolpa, Petrina	35,0	21,5	0,01	63	88,9	11,1
Lahinja, Gradac	27,6	15,3	0,00	64	73,6	24,3
Savinja, Nazarje	46,8	19,1	0,04	63	81,2	18,2
Bolska, Dolenja_vas	31,1	16,8	0,02	74	63,9	34,0
Voglajna, Črnomica I	17,8	12,1	0,01	79	37,8	61,7
Hudinja, Škofja vas	27,5	13,6	0,04	79	57,3	41,3
Idrijca, Hotešk	55,9	24,7	0,01	63	79,0	20,2
Reka, Cerkvenikov mlin	46,2	17,8	0,00	70	70,8	27,6
Rižana, Kubed	1,4	1,4	0,01	67	81,0	18,6
Pesnica, Zamušani I	52,3	33,6	0,00	82	22,9	74,9
Cerkniščica, Cerknica I	18,1	9,1	0,01	64	72,6	25,9
Soča, Kobarid I	39,8	17,9	0,02	50	93,9	5,7
Bača, Bača_pri_Modreju	23,4	11,0	0,05	63	90,6	9,4

Preglednica 2. Prikaz osnovnih lastnosti 20 izbranih porečij. Podani so dolžina vodotoka L , dolžina od točke na vodotoku, ki je najbližje težišču, do iztoka L_c , padec vodotoka I , parameter CN (Curve Number), delež gozda in delež kmetijskih površin.

3 IZPELJAVA ENAČB

V postopku izpeljave enačb smo najprej naredili pregled obstoječih enačb za oceno časa zakasnitve ([Brilly, 2018], [Gericke, 2014]). Tako smo dobili pregled nad različnimi oblikami enačb ter parametri, ki v teh enačbah nastopajo. Dodatno smo z uporabo nekaterih drugih pogosto uporabljenih empiričnih enačb, ki jih podaja [Brilly, 2018], naredili oceno časa zakasnitve. To pomeni, da smo na podlagi lastnosti porečij (npr. naklon vodotoka, dolžina vodotoka) izračunali čase zakasnitve glede na različne enačbe za izbrana porečja. Tako smo lahko te izračunane vrednosti primerjali z vrednostmi, ki smo jih določili na podlagi meritev padavin in pretokov petih izbranih dogodkov za vsako porečje. Čas zakasnitve je namreč odvisen od lastnosti porečij, pri čemer imajo nekatere lastnosti večji vpliv kot druge, vpliv posameznega dejavnika pa se tudi razlikuje od porečja do porečja. Odvisnost časa zakasnitve (določenega glede na 5 izbranih dogodkov) in lastnosti porečij smo ugotavljali z uporabo Pearsonovega koeficienta korelacije. Analizirali smo odvisnost časa zakasnitve (določenega kot povprečna vrednost T_p petih izbranih dogodkov) z osnovnimi lastnostmi porečij (preglednica 3). Na podlagi največje absolutne vrednosti Pearsonovega koeficienta korelacije so najbolj izrazito odvisnost s časom zakasnitve podale naslednje last-

nosti: površina kmetijskih površin, površina urbanih površin, padec vodotoka in dolžina od iztočnega profila do profila, ki je najbližji težišču vodotoka (L_c) (preglednica 3). Slika 3 prikazuje primer odvisnosti med kmetijskimi površinami in časom zakasnitve ter časom zakasnitve od naklona vodotoka. Prva odvisnost ponazarja, da ima večje porečje daljši čas zakasnitve, druga odvisnost pa je posledica dejstva, da imajo bolj strmi vodotoki načeloma krajši čas zakasnitve. Na podlagi rezultatov, prikazanih v preglednici 3, smo pri izpeljavi enačb dali poudarek tistim parametrom (npr. površina kmetijskih območij, naklon vodotoka, dolžina L_c), ki imajo največji vpliv na čas zakasnitve in so hkrati tudi fizikalno razložljivi.

Prva spremenljivka	Druga spremenljivka	Pearsonov koeficient korelacije med spremenljivkama
T_p (h)	kmetijske površine (km ²)	0,78
T_p (h)	urbane površine (km ²)	0,78
T_p (h)	\sqrt{I} (kvadratni koren padca vodotoka)	-0,54
T_p (h)	L_c (m)	0,55

T_p (h)	dolžina vodotoka L (m)	0,40
T_p (h)	koeficient CN	0,37
T_p (h)	povprečna vrednost odtočnega potenciala (mm/h)	0,36
T_p (h)	gozdne površine (km ²)	0,00
T_p (h)	površine krasa (km ²)	0,44
T_p (h)	površine manjših vodonosnikov (m ²)	0,46
T_p (h)	naklon vodotoka l (m/m)	-0,42
T_p (h)	maksimalno zadrževanje S_r (mm)	-0,36

Preglednica 3. Izračunane vrednosti Pearsonovih koeficientov korelacije med pari spremenljivk. Čas zakasnitve (T_p) je bil za vsako porečje določen kot povprečje 5-ih dogodkov.

kjer je x_1 dolžina vodotoka od iztočnega profila do profila na vodotoku, ki je najbližji težišču vodotoka L_c (m); x_2 kvadratni koren padca vodotoka \sqrt{l} (m/m); x_3 kmetijske površine (km²).

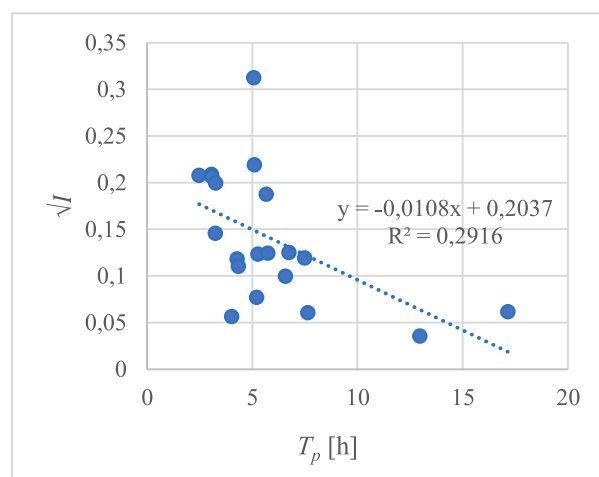
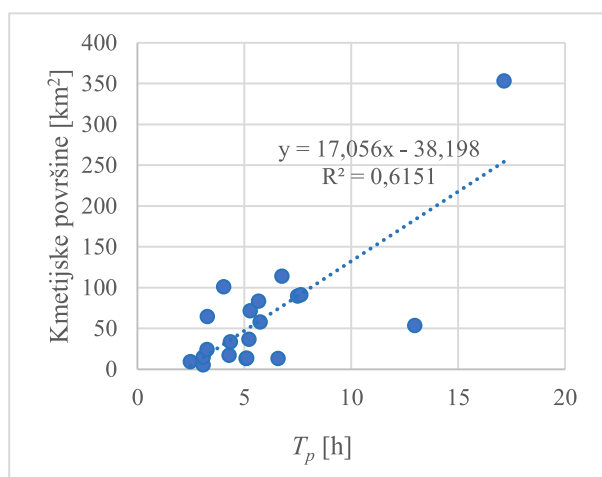
Kot dve alternativni obliki enačbe, ki sta prav tako dali relativno ustrezno ujemanje s časi zakasnitve, določenimi glede na merjene podatke o padavinah in pretokih, pa smo določili tudi naslednji dve enačbi:

$$T_p = 0,55 \cdot x_3 \cdot \frac{x_1^{-0,49}}{x_2} \quad (2)$$

$$T_p = 0,19 \cdot \left(\frac{x_3 \cdot x_4}{x_2^{1,61}}\right)^{0,29} \quad (3)$$

Opis parametrov x_1 , x_2 in x_3 v enačbah (2) in (3) je enak kot pri enačbi (1), x_4 pa predstavlja parameter CN .

Slika 4 prikazuje primerjavo med časi zakasnitve, izračunanimi z uporabo izpeljanih enačb (1), (2) in (3), in časi zakasnitve, določenimi glede na merjene podatke o pretokih in padavinah (povprečje 5-ih visokovodnih dogodkov). Opazimo lahko, da so ocenjene vrednosti časa zakasnitve po enačbi (2) v večini



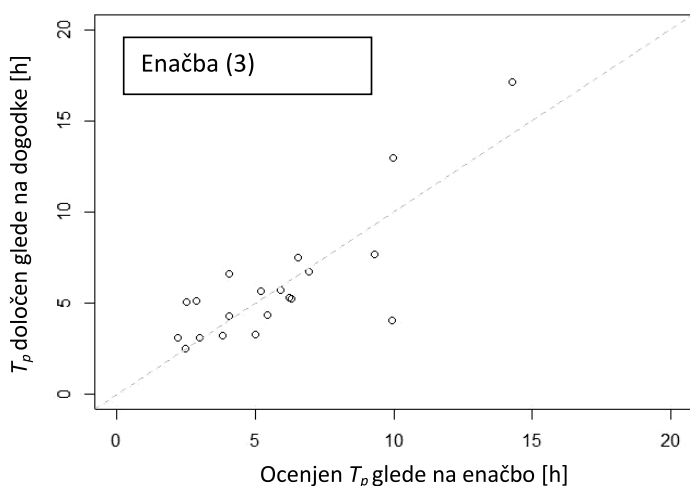
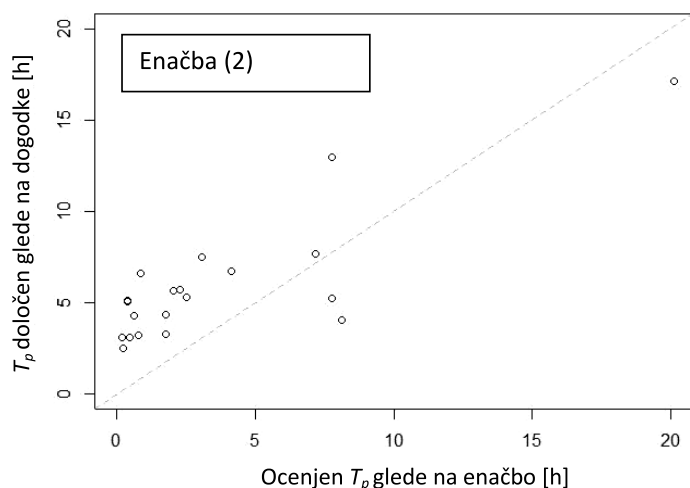
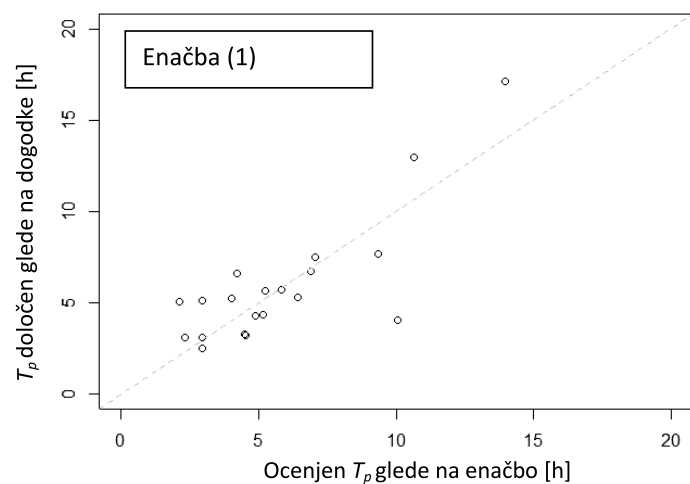
Slika 3. Primer odvisnosti med kmetijskimi površinami in časom zakasnitve (levo) ter med kvadratnim korenom padca vodotoka in časom zakasnitve (desno).

Postopek izpeljave enačbe je potekal v programskem jeziku R [R Core Team, 2022], za oceno koeficientov enačbe smo uporabili funkcijo »nls« (angl. nonlinear least squares; slo. nelinearna metoda najmanjših kvadratov). V postopku izbire enačbe smo testirali več kot 70 različnih oblik enačb (npr. kvadratni koren padca vodotoka nad ali pod ulomkovo črto, upoštevanje korena, upoštevanje različnih parametrov, različnega števila koeficientov itd.). Za vsako izmed enačb smo potem na podlagi lastnosti porečij izračunali čase zakasnitve ter jih primerjali s povprečnimi časi zakasnitve, ki smo jih določili glede na 5 izbranih dogodkov na podlagi izmerjenih podatkov o padavinah in pretokih. Za primerjavo sta bila uporabljena tako Pearsonov koeficient korelacije kot grafični prikaz.

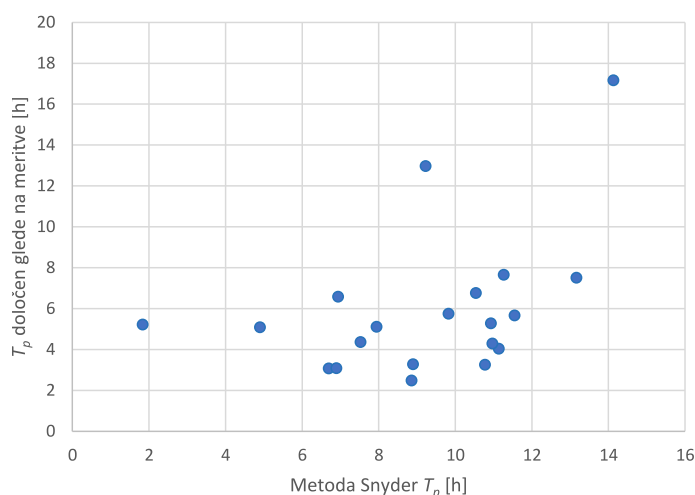
Kot najustreznejša enačba (glede na Pearsonov koeficient korelacije in ujemanje med izračunanimi in dejanskimi časi T_p) se je izkazala naslednja oblika enačbe:

$$T_p = 0,11 \cdot \left(\frac{x_1 x_3}{x_2^{2,46}}\right)^{0,21}, \quad (1)$$

primerov nekoliko manjše kot z uporabo enačbe (1). Vrednosti časov zakasnitve z uporabo enačbe (3) pa so nekoliko večje od ocenjenih vrednosti po enačbi (1). Več rezultatov in tudi nekatere druge oblike enačb so podane v [Mavri, 2022]. Izpeljane enačbe so pričakovano dale boljše ujemanje z dejanskimi časi zakasnitve kot nekatere druge enačbe, ki se pogosto uporabljajo za oceno časa zakasnitve v slovenski praksi (slika 5) (npr. Snyder, Denver, Tulsa District itd.) [Brilly, 2018]. Bolj podrobno primerjavo prikazuje [Mavri, 2022].



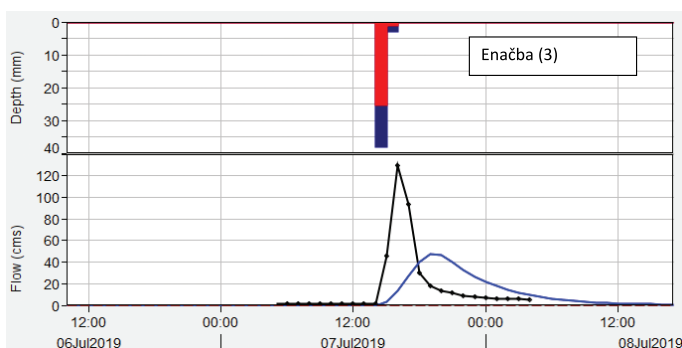
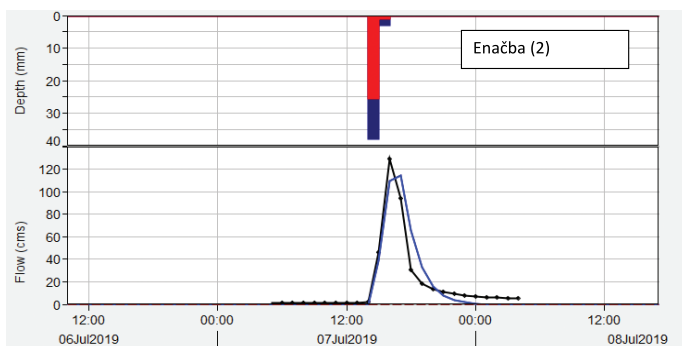
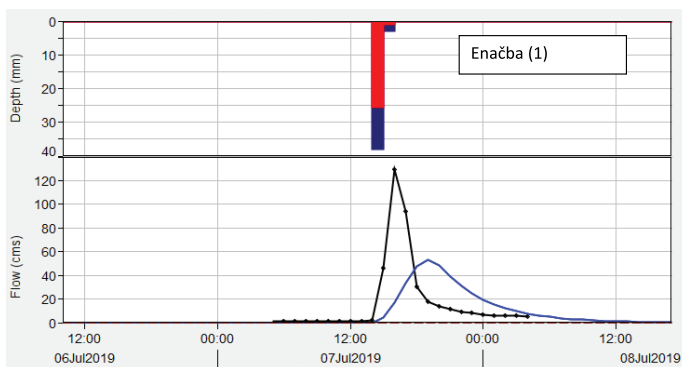
Slika 4. Primerjava med izračunanimi časi zakasnitve glede na izpeljane enačbe (enačbe (1), (2) in (3)) in časi zakasnitve, določenimi glede na merjene podatke o pretokih in padavinah (povprečje 5-ih visokovodnih dogodkov). Vrednosti Pearsonovih koeficientov korelacije znašajo 0,81 (enačba (1)), 0,83 (enačba (2)) in 0,81 (enačba (3)).



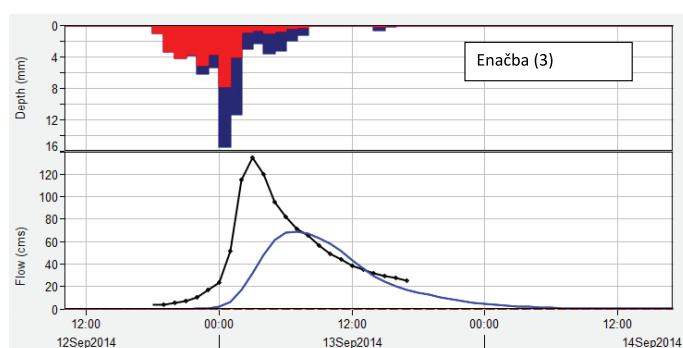
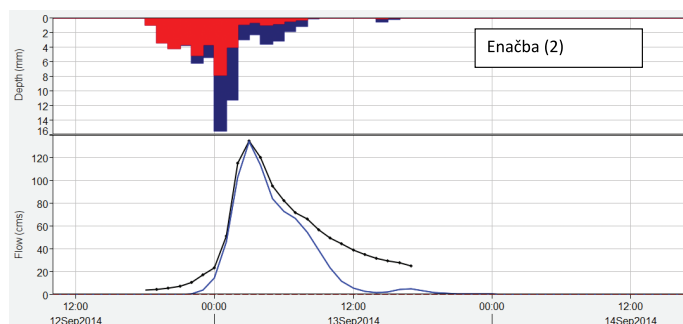
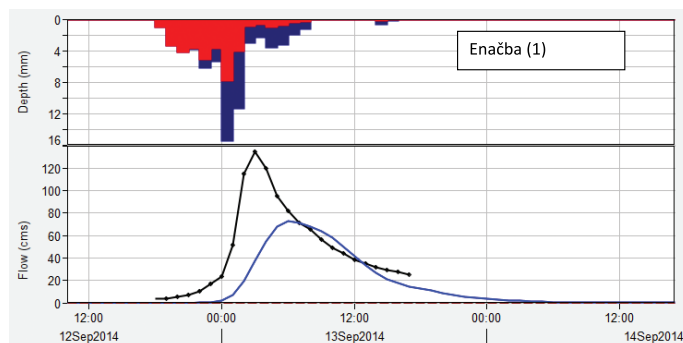
Slika 5. Primerjava med izračunanimi časi zakasnitve glede na splošno enačbo Snyder [Brilly, 2018] in časi zakasnitve, določenimi na podlagi merjenih podatkov o pretokih in padavinah (povprečje 5-ih visokovodnih dogodkov).

4 PRIMER UPORABE

Za validacijo novih enačb smo izbrali porečje Medije do vodomerne postaje Zagorje (površina približno 97 km²). Tudi za to območje smo na podlagi urnih podatkov o padavinah (postaja Hrastnik) in pretokih izbrali nekaj večjih dogodkov, s pomočjo katerih smo preverili ustreznost predlaganih enačb (1)-(3). V tem primeru se je kot najustreznejša izkazala enačba (2), po kateri je ocenjen čas zakasnitve za to porečje znašal približno 1,8 h (slika 6 in slika 7). Po enačbah (1) in (3) je bil ocenjen čas zakasnitve daljši in je znašal 4,3 h oziroma 4,8 h. Te vrednosti so za porečje Medije očitno prevelike (vsaj za izbrane visokovodne dogodke), saj je glede na meritve odziv porečja na padavine hitrejši, kot kažejo izračuni z uporabo enačb (1) in (3). Glede na rabo tal in vrednost odtočnega potenciala smo ocenili tudi parameter CN (ocenjena vrednost 82), ki je bil uporabljen za izračun padavinskih izgub po metodi Soil Conservation Service (SCS) [Brilly, 2018]. Primerjava merjenih in modeliranih pretokov z uporabe enačbe (2) se je pri večini izbranih dogodkov izkazala za relativno ustrezno (slika 6 in slika 7). Poudariti je treba, da je v primeru porečij z drugačnimi lastnostmi (npr. bolj ravninska območja) lahko ustreznost enačb (1)-(3) drugačna in se lahko enačbi (1) in (3) v določenih primerih morda izkažeta kot primernejši. Posledično je smiselno ustreznost enačb dodatno preveriti na dodatnih porečjih.



Slika 6. Primer ujemanja simuliranih (modra črta) in merjenih pretokov (črna črta) za dogodek, ki se je zgodil na vodometri postaji Zagorje (Medija) julija 2019. Modri stolpci so padle padavine, rdeči stolpci so padavinske izgube. Za oceno časa zakasnitve so bile uporabljene vse tri izpeljane enačbe (1)-(3).



Slika 7. Primer ujemanja simuliranih (modra črta) in merjenih pretokov (črna črta) za dogodek, ki se je zgodil na vodometri postaji Zagorje (Medija) septembra 2014. Modri stolpci so padle padavine, rdeči stolpci so padavinske izgube. Za oceno časa zakasnitve so bile uporabljene vse tri izpeljane enačbe (1)-(3).

5 SKLEP

Prispevek prikazuje nove empirične enačbe za izračun časa zakasnitve, izpeljane na podlagi podatkov za porečja v Sloveniji, in postopek izpeljave teh enačb, ki jih lahko uporabimo v primeru nemerjenih porečij v Sloveniji. Enačbe so primerne predvsem za območja, ki imajo lastnosti podobne kot 20 izbranih porečij (preglednica 1). Enačbe so izpeljane na podlagi lastnosti slovenskih porečij in so v primerjavi z enačbami, razvitimi na tujih porečjih, v večini primerov podale boljše ocene časa zakasnitve. Prikazali smo 3 različne enačbe, ki podajo nekoliko različne ocene časov zakasnitve, ujemanje s časi

zakasnitve, določenimi na podlagi merjenih podatkov o pretokih in padavinah, pa je bilo v vseh treh primerih podobno. Izpeljane enačbe smo preverili na porečju Medije do vodomerne postaje Zagorje, kjer se je kot najbolj ustrezna izkazala enačba (2). Ustreznost prikazanih enačb (1)-(3) pa je lahko v primeru porečij z drugačnimi lastnostmi tudi drugačna, in se lahko enačbi (1) in (3) v določenih primerih morda izkažeta kot primernejši. Izpeljane enačbe se lahko uporabijo za oceno časa zakasnitve v primeru nemerjenih porečij v Sloveniji. Kljub temu pa je pomembno poudariti, da je umerjanje hidroloških modelov seveda še vedno nujno potrebno, saj pri hidrološkem modeliranju nastopajo tudi drugi paramet-

tri, ki jih je smiselno umeriti glede na merjene podatke o pretokih in padavinah. Izpeljane enačbe bo v prihodnosti treba preveriti še na dodatnih porečjih na območju Slovenije.

6 ZAHVALA

Prispevek je nastal v okviru ciljnega raziskovalnega projekta V2-2137 »Razvoj metodologije za izračun visokovodnih valov na podlagi ekstremnih padavinskih dogodkov«, ki ga financirata Javna agencija za raziskovalno dejavnost RS (ARRS) in Ministrstvo za okolje in prostor (MOP). Prispevek je tudi rezultat dela v okviru programske skupine P2-0180, ki jo financira ARRS.

7 LITERATURA

Alexopoulos, M. J., Use of the reanalysis products for the hydrological rainfall-runoff modelling = Uporaba produktov reanaliz za namen hidrološkega modeliranja: izbrani primeri v Sloveniji, Magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2021.

ARSO, Kategorizacija vodotokov, spletna stran: https://gis.arso.gov.si/wfs_web/faces/WFSLayersList.jspx, Republika Slovenija, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje, datum vpogleda 14.12.2022, 2022.

Bezak, N., Šraj, M., Mikoš, M., Vpliv padavin na projektne pretoke, Gradbeni vestnik, 66, 241-248, 2017.

Brilly, M., Šraj, M., Modeliranje površinskega odtoka, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2018.

CLC Corine, Spletna stran: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018>, datum vpogleda 14.12.2022, 2022.

Dirnbeek, L., Šraj, M., Hidrološko modeliranje: Vpliv histograma padavin na hidrogram površinskega odtoka, Gradbeni vestnik, 59(3), 48-56, 2010.

HEC-HMS, HEC-HMS User's Manual, v. 4.7; US Army Corps of Engineers: Davis, CA, USA, 2021.

Gericke, O. J., Smithers, J. C., Review of methods used to estimate catchment response time for the purpose of peak discharge estimation. Hydrological Sciences Journal, 59(11), 1935-1971, 2014.

Mavri, D., Predlog razvoja enačbe za določitev sintetičnega hidrograma enote na podlagi podatkov z območja Slovenije, Diplomaska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, spletna stran: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=140895&lang=slv>, 2022.

R Core Team., A Language and Environment for Statistical Computing: R. Dunaj, Avstrija, R Foundation for Statistical Computing. Spletna stran: <http://www.R-project.org/>, datum vpogleda 14.12.2022, 2022.

RS MOP, Digitalni model višin Slovenije, spletna stran: <https://www.e-prostor.gov.si/podrocja/drzavni-topografski-sistem/digitalni-modeli-visin/>, Republika Slovenija, Ministrstvo za okolje in prostor, datum vpogleda 14.12.2022, 2022.

UL BF, Trajnostna raba vode za krepitev rastlinskega pridelovalnega potenciala v Sloveniji, Projekt V4-1066, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, 2011.