

ZBORNIK RADOVA

**18. naučnog savetovanja
Srpskog društva za hidraulička istraživanja
Srpskog društva za hidrologiju
Niš 2018.**



Srpsko društvo za hidraulička istraživanja (SDHI)
Srpsko društvo za hidrologiju (SDH)

ZBORNİK RADOVA

**18. naučnog savetovanja
Srpskog društva za hidraulička istraživanja i
Srpskog društva za hidrologiju**

Niš, 25-26. oktobar 2018.

Priredili:
MARKO IVETIĆ
RADOMIR KAPOR
JASNA PLAVŠIĆ

Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet
Beograd

Zbornik radova 18. naučnog savetovanja
Srpskog društva za hidraulička istraživanja i
Srpskog društva za hidrologiju
Niš, 25-26. oktobar 2018.

Elektronsko izdanje na CD-u

Urednici

Marko Ivetić, Radomir Kapor, Jasna Plavšić

Izdavač

Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Beograd, 2019.

Za izdavača

Prof. dr Vladan Kuzmanović, dekan

Produkcija CD izdanja

Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Beograd

Dizajn i priprema

Nenad Jaćimović i Jasna Plavšić

Tiraž

120 primeraka

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

626/628(082)(0.034.2)

532.5(082)(0.034.2)

СРПСКО друштво за хидрауличка истраживања (Београд). Научно
саветовање (18 ; 2018 ; Ниш)

Zbornik radova 18. naučnog savetovanja Srpskog društva za hidraulička istraživanja
i Srpskog društva za hidrologiju, Niš, 25-26. oktobar 2018. [Elektronski izvor] /
priredili Marko Ivetić, Radomir Kapor, Jasna Plavšić. - Beograd : Univerzitet,
Građevinski fakultet, 2019 (Beograd : Univerzitet, Građevinski fakultet). - 1 elektronski
optički disk (CD-ROM) ; 12 cm

Sistemski zahtevi: Nisu navedeni. - Nasl. sa naslovne strane dokumenta. - Radovi na srp.
i engl. jeziku. - Tiraž 120. - Bibliografija uz svaki rad. - Abstracts ; Apstrakti.

ISBN 978-86-7518-204-7

1. Српско друштво за хидрологију (Београд). Научно саветовање (18 ; 2018 ; Ниш)

a) Хидротехника -- Зборници b) Хидродинамика -- Зборници
v) Хидраулика -- Зборници

COBISS.SR-ID 278467596

18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Sadržaj

Naučni odbor savetovanja	vii
Organizacioni odbor savetovanja	vii
Predgovor	ix
O numeričkom modeliranju recirkulacionog strujanja na ulazu u zaliv.....	1
<i>Miodrag Jovanović</i>	
Procena hidrauličke hrapavosti betonskih kanalizacionih cevi primenom laserskog skeniranja	13
<i>Nikola Stanić, François H.L.R. Clemens, Jeroen G. Langeveld</i>	
Adverse-slope stilling basins: machine learning approach to estimation of hydraulic jump features.....	31
<i>Robert Ljubičić, Budo Zindović, Ljubodrag Savić</i>	
Analiza uticaja kompleksnosti 1D modela tečenja na postupak asimilacije podataka zasnovane na primeni PID regulatora – preliminarni rezultati	44
<i>Miloš Milašinić, Budo Zindović, Nikola Rosić, Dušan Prodanović</i>	
Preračunavanje stepena korisnosti sa testiranog modela na glavno izvođenje hidraulične turbine	56
<i>Miroslav Benišek</i>	
U susret monografiji „Velike vode Srbije na profilima hidroloških stanica“	71
<i>Stevan Prohaska, Aleksandra Ilić, Vladislava Bartoš-Divac, Milena Jelovac, Samir Čatović, Srđan Marjanović</i>	
Analiza srednjih voda u Srbiji na osnovu kartiranih klimatoloških podataka u periodu 1961-2010	75
<i>Jovan Blagojević, Jasna Plavšić, Samir Čatović, Andrijana Todorović</i>	
Krive trajanja protoka kao sredstvo za kalibraciju i verifikaciju HBV-light modela neizučenog sliva.....	88
<i>Petar Praštalo, Borislava Blagojević, Žana Topalović</i>	
Analiza suše za područje leskovačke kotline	100
<i>Dženita Idrizović, Enika Gregorić, Vesna Počuča, Gordana Matović</i>	
Hidraulička modelska ispitivanja evakuacionih objekata HE „Riga“	112
<i>Danica Starinac, Predrag Vojt, Dimitrije Mladenović, Radomir Kapor, Ljubodrag Savić</i>	
Hidraulička modelska ispitivanja složenog brzotoka brane Subela	125
<i>Danica Starinac, Predrag Vojt, Dimitrije Mladenović, Radomir Kapor, Ljubodrag Savić</i>	
Hidraulička modelska ispitivanja PK preliva – primer brane Tarzout	135
<i>Dimitrije Mladenović, Danica Starinac, Predrag Vojt, Radomir Kapor, Ljubodrag Savić</i>	
Kritički osvrt na rezultate sa fizičkih modela.....	147
<i>Božidar Batinić</i>	
Утицај комплексности модела на хидролошке симулације	153
<i>Андријана Тодоровић, Јасна Плавишић</i>	

18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Teorijski hidrogrami velikih voda – tema i dilema	166
<i>Stevan Prohaska, Aleksandra Ilić</i>	
Primena radarskih slika u hidrološkoj rekonstrukciji poplave na reci Bjelici marta 2016. godine.....	177
<i>Nikola Zlatanović, Vanja Damjanović, Stevan Prohaska</i>	
Disaster risk reduction management and resilience – Flood Resilience Index (FRI) as communication tool	185
<i>Jelena Batica, Philipe Gourbesville</i>	
Development of real-time flood forecasting and warning system for the Sava River basin	202
<i>Klaas-Jan van Heeringen, Hanneke Schuurmans, Mihailo Anđelić, Victor Simončić, Imra Hodzic, Sabina Hadziahmetovic</i>	
Sava-FFWS: integrisana platforma za unapređenje sistema za hidrološku prognozu na slivu reke Save, primena u RHMZ.....	215
<i>Marija Ivković, Samir Čatović, Srđan Marjanović, Predrag Živadinović, Vida Despotović</i>	
Praćenje promene saliniteta vode u nezasićenom zemljištu i stanja ekosistema kao odgovor na depolderovanje Rammegorsa	224
<i>Nikola Stanić, Perry G.B. de Louw</i>	
Nagnuti oštroični preliv za merenje hidrograma oticaja	238
<i>Lajoš Hovanj</i>	
Bezkontaktno merenje protoka u otvorenim tokovima	250
<i>Predrag Vojt, Dušan Prodanović, Jasna Plavšić</i>	
Laboratorijsko određivanje merne neodređenosti ravnih EM senzora.....	259
<i>Damjan Ivetić, Dušan Prodanović, Luka Stojadinović</i>	
Analiza primene akustičnih metoda za merenje suspendovanog nanosa	272
<i>Predrag Vojt, Nevena Cvijanović, Dimitrije Mladenović, Mladen Kostić, Nikola Rosić, Mira Ivljanin</i>	
Merenje protoka vode u tunelima pri kombinovanim uslovima tečenja: primer tunela Dabarsko Polje – Fatničko polje	285
<i>Damjan Ivetić, Dušan Prodanović, Mile Cvitkovic</i>	
Koicidencija velikih voda na ušću reke Tise u Dunav primenom modela PROIL i KOPULA metode	303
<i>Aleksandra Ilić, Stevan Prohaska, Boris Pokorni</i>	
Uticaj dužine osmotrenih nizova na stohastičko generisanje vremenskih serija na više hidroloških stanica	317
<i>Đurica Marković, Jasna Plavšić</i>	
Modeliranje vremenskih serija godišnjih i mesečnih protoka na reci Savi kod Sremske Mitrovice.....	331
<i>Ranka Erić, Jasna Plavšić, Vesna Đukić</i>	
Statistička analiza trajanja leda na Dunavu kod hidrološke stanice Bezdán	348
<i>Ognjen Gabrić, Jasna Plavšić</i>	
Laboratorijsko ispitivanje magnetnog polja ravnih elektromagnetnih senzora.....	357
<i>Luka Stojadinović, Damjan Ivetić, Dušan Prodanović</i>	
Анализа ублажавања поплавних таласа у акумулацији Мохарач	373
<i>Марија Миловановић, Андријана Тодоровић, Роберт Љубичић, Јасна Плавишић</i>	

18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Управљање акумулацијама Врба и Клиње у периоду наиласка великих вода.....	385
<i>Тамара Судар, Тина Дашић</i>	
Analiza uticaja merenja potrošnje vode za piće na specifičnu potrošnju u domaćinstvima.....	399
<i>Ognjen Govedarica, Dragan Savić, Aleksandar Đukić, Branislav Babić</i>	
U susret 60. godišnjici regionalne saradnje eksperata podunavskih zemalja u oblasti hidrologije u okviru programa IHP UNESCO	412
<i>Stevan Prohaska</i>	
Uvođenje „pametnih komponenti“ u instalacije vodovoda i kanalizacije „pametnih gradova budućnosti“	417
<i>Denisa Đorđević, Željka Ostojić</i>	
Efekti primene savremenih sistema za smanjenje kišnog oticaja na primeru naselja Vojlovica, Pančevo	433
<i>Lazar Anđelić, Dušan Prodanović, Nenad Jaćimović, Damjan Ivetić</i>	
Simultaneous collection of flow, sediment, and selected water-sediment-quality field data on the Danube stretch at Belgrade	450
<i>Miodrag Spasojević, Mileta Bojović, Bojan Palmar, Milica Nadeždić, Miroslav Tanasković</i>	
Monitoring i modelisanje tečenja, sedimenta, morfodinamike i kvaliteta vode i sedimenta Dunava i njegovih pritoka u Srbiji.....	464
<i>Miodrag Spasojević, Zlatan Kovačević, Aleksandar Ostojić, Zoran Marinković, Dušan Krstić</i>	
Modeliranje transporta zagađujuće materije u poroznoj sredini primenom Cellular Automata principa – preliminarni rezultati	480
<i>Miloš Milašinović, Anja Ranđelović, Nenad Jaćimović, Dušan Prodanović</i>	
Analiza transporta nanosa u kanalima Dunav – Tisa – Dunav	489
<i>Vesna Đukić, Ranka Erić</i>	
Примена модела размене количине кретања за процену криве протока у кориту за велику воду природног водотока	507
<i>Дејана Ђорђевић, Марија Ивковић, Иван Стојнић</i>	
Komparativna analiza primene vodostana i sinhronih regulatora turbina u cilju zaštite hidroelektrana pri prelaznim režimima	517
<i>Aleksandar Petković, Ivan Božić, Jovan Ilić</i>	
Прорачун силовитог течења у тунелу са хоризонталном кружном кривином.....	530
<i>Милена Лучић, Радомир Капор, Љубодраг Савић</i>	
Хидрауличка анализа пропусне моћи колектора испод флотацијског јаловишта „Veliki Krivelj“	539
<i>Nevena Anđelić, Marko Ivetić</i>	
Меродавни хидродинамички утицаји на бочне зидове слапишта	553
<i>Бојан Миловановић, Владан Кузмановић, Љубодраг Савић, Предраг Војт, Будо Зиндовић</i>	
Меродавни хидродинамички утицаји на дно слапишта	564
<i>Бојан Миловановић, Владан Кузмановић, Љубодраг Савић, Предраг Војт, Будо Зиндовић</i>	
Утицај регенерације инфилтрационих базена на нивоу подземних вода: примјер изворишта Novoselija	576
<i>Milan Jakšić, Nenad Jaćimović, Dragan Gligorić</i>	
Preparation of a monitoring system on the Palic and Ludas Lakes.....	588
<i>Zoltan Horvat, Mirjana Horvat, Ognjen Gabrić, Biljana Isic</i>	

18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Uređenje dela Rokovog potoka u Petrovaradinu.....	600
<i>Igor Radović, Srđan Kolaković, Goran Jeftenić, Andrea Salvai</i>	
Primeri analize hidrauličkog udara u vodovodnim sistemima primenom softverskog paketa AFT Impulse.....	608
<i>Danilo Stipić, Ljubomir Budinski</i>	
Crpne stanice u kanalizacionim sistemima	620
<i>Matija Stipić, Slobodan Tašin</i>	
Analiza uzroka pojave vode u podrumskim prostorijama objekta u Nišu.....	631
<i>Dragan Radivojević, Borislava Blagojević, Aleksandra Ilić</i>	
Hidrotehnički objekti u ekstremnim uslovima – primeri ponašanja i neke pouke kroz praksu.....	643
<i>Goran Radović</i>	
Домаћа мобилна опрема за одбрану од поплава и управљање поплавама	654
<i>Раде Милутиновић</i>	
Studija obezbeđenja vodnih resursa na slivu reke Cheliff (Alžir)	666
<i>Jovana Anđelić, Miloš Ivetić</i>	
The Nile Water, Food and Energy Nexus Model.....	682
<i>Hamdy Elsayed, Slobodan Djordjević, Dragan Savić</i>	
Експериментално одређивање хидрауличких карактеристика супстрата коришћеног за изградњу зеленог крова.....	693
<i>Филип Станић, Pierre Delage, Yu-Jun Cui</i>	
IN MEMORIAM: Vojislav Vukmirović (1933–2017)	713
<i>Dragutin Pavlović</i>	
Indeks autora	717

Naučni odbor savetovanja

Prof. dr Marko Ivetić (Predsednik)
Prof. dr Dragan Arandelović
Doc. dr Borislava Blagojević
Prof. dr Jovan Despotović
Prof. dr Slobodan Đorđević
Prof. dr Aleksandar Gajić
Doc. dr Lajoš Hovanj
Prof. dr Nenad Jaćimović
Mr Dragan Janković
Prof. dr Miodrag Jovanović
Prof. dr Zoran Kapelan
Prof. dr Radomir Kapor
Prof. dr Srđan Kolaković
Prof. dr Čedo Maksimović
Prof. dr Ana Mijić
Prof. dr Zorana Naunović
Prof. dr Miloš Nedeljković
Prof. dr Sava Petković
Prof. dr Slobodan Petković
Prof. dr Jasna Plavšić
Prof. dr Dubravka Pokrajac
Prof. dr Dušan Prodanović
Prof. dr Stevan Prohaska
Doc. dr Zoran Radić
Prof. dr Ratko Ristić
Prof. dr Dragan Savić
Prof. dr Ljubodrag Savić
Prof. dr Miodrag Spasojević
Mr Slavimir Stevanović
Dr Mladen Todorović
Prof. dr Zoran Vojinović

Organizacioni odbor savetovanja

Prof. dr Marko Ivetić
Prof. dr Jasna Plavšić
Prof. dr Nenad Jaćimović
Doc. dr Borislava Blagojević
Doc. dr Dragan Radivojević
Doc. dr Andrijana Todorović
Doc. dr Anja Randelović

Predgovor

Poštovane kolegice i kolege,

Pred Vama je zbornik radova sa 18. naučnog savetovanja Srpskog društva za hidraulička istraživanja i Srpskog društva za hidrologiju održanog u Nišu 25. i 26. oktobra 2019. godine. Kao i na prethodna dva savetovanja, zbornik izdajemo samo u elektronskoj formi, na CD-u, sa radovima u PDF formatu, dok je knjiga apstrakata na srpskom i engleskom jeziku štampana i podeljena na samom savetovanju. Ovaj pristup je omogućio da damo fleksibilnije rokove za dostavljanje radova, kao i da prihvatimo i radove sa većim brojem strana nego što je to bio ranije slučaj.

Zajednička organizacija Savetovanja Srpskog društva za hidraulička istraživanja (SDHI) i Srpskog društva za hidrologiju (SDH) ponovo je doprinela ne samo da se prikaže veći broj radova, već i da se prošire oblasti interesovanja. Za razliku od ranijih savetovanja, sada je bilo uočljivo veliko preklapanje tematskih oblasti koje su unapred bile definisane pa je programski odbor imao nemoguć zadatak da radove razvrsta po tim oblastima. Kao rezultat, zbornik nije podeljen po tematskim oblastima, već su svi radovi deo jedne celine.

Pored bazičnih tema iz oblasti hidraulike kao što je rečna hidraulika i hidraulika hidrotehničkih objekata, odnosno tradicionalnih tema inženjerske hidrologije kao što je ocena velikih ili srednjih voda, veliki broj radova bio je inspirisan praktičnim problemima. Na taj način Savetovanje je ispunilo svoj cilj da obezbedi prožimanje nauke i prakse, kao i razmatranje važnih problema u domaćoj hidrotehnici i vodoprivredi.

Broj pristiglih radova je i ovog puta bio značajan (oko 60), iako manji u odnosu na prethodno savetovanje 2015. godine kada je bilo oko 80 radova i kada je najveći broj njih bio vezan za tekuće naučno istraživačke projekte Ministarstva nauke. Zbog izostanka novog ciklusa naučnih projekata očigledno je smanjenje intenziteta publikovanja naučnih radova fokusiranih na određene teme.

Posebno nam je drago što smo za ovo Savetovanje animirali najmlađe kolege – studente osnovnih i master studija – u pisanju radova koji su proistekli iz njihovih kvalifikacionih radova. Po prvi put je uvedena „studentska sesija“ i dodeljene su nagrade za najbolje studentske radove. Takođe, u zborniku ćete naći i rezultate istraživanja studenata doktorskih studija i mladih istraživača koji su skoro doktorirali. Značajno učešće mladih zato uliva nadu da će se u ovim oblastima ostvariti kontinuitet i napredak.

U periodu od prethodnog savetovanja do sada, napustio nas je prof. Vojislav Vukmirović, dugogodišnji član SDHI i SDH. Na njegov veliki doprinos istraživanjima u oblasti nanosa i hidrologije podsetili su nas njegovi bliski saradnici na Savetovanju i kroz kratak tekst u ovom zborniku.

Kao predsednici dva društva zahvaljujemo se kolegama Nenadu Jaćimoviću, Draganu Radivojeviću i Borislavi Blagojeviću na značajnom doprinosu u organizovanju i realizaciji ovog savetovanja. Zbog svega ovoga se nadamo da će ovaj zbornik mnogima biti zanimljivo štivo za čitanje.

Beograd, oktobar 2018.

Prof. dr Marko Ivetić
Predsednik SDHI

Dr Jasna Plavšić
Predsednik SDH

Примена модела размене количине кретања за процену криве протока у кориту за велику воду природног водотока

Дејана Ђорђевић¹, Марија Ивковић², Иван Стојнић³

АПСТРАКТ: У свету се већ двадесет пет година разматрају могућности за побољшање процене криве протока у случајевима када се вода излије из главног корита на плавне површине. Разлог за то је чињеница да су испитивања у лабораторијским условима показала да се при високом степену потопљености плавних површина ($> 0,3$) применом класичног приступа, заснованог на подели корита за велику воду на хидраулички хомогене сегменте и примени Манингове једначине, вредности протока прецењују за више од 60%. Математички модели који су током овог периода развијани и/или унапређивани првенствено су проверавани на основу мерења у лабораторијским каналима у условима устаљеног једноликог и неједноликог течења. Циљ овог рада је да се размотри могућност примене једног од тих модела за процену криве протока у кориту за велику воду природног водотока. Реч је о моделу линијског течења заснованом на размени количине кретања између главног корита и плавних површина. Осим размене количине кретања турбулентном дифузијом, овај модел узима у обзир и размену количине кретања услед неприматичности корита, што је једна од битних одлика корита природних водотока. Као пример ће послужити попречни пресек хидролошке станице Словац на реци Колубари, за коју постоје доступни подаци осматрања у домену великих вода. Вредности протока које се добијају за највише забележене водостаје применом класичног приступа (методе хидраулички хомогених сегмената) и методе размене количине кретања упоредиће се са званичним вредностима РХМЗ Србије.

Кључне речи: крива протока, корито за велику воду, модел линијског течења, метода размене количине кретања, река

Application of the exchangedischarge model for the estimation of the rating curve in the compound channel – a case study

ABSTRACT: The hydraulic engineering community has been making continuous efforts to improve the procedure for estimation of a stage discharge curve in a compound channel over the last twenty five years. The reason for this is the fact that tests in laboratory conditions have shown that the classical approach based on the divided channel method, which uses Manning's equation, overestimates the discharge by more than 60% for high floodplain submergence ratios (> 0.3). Mathematical models that were developed and/or improved during this period were primarily tested using uniform or non-uniform flow data from laboratory flumes. This paper aims at applying one of these models in estimating the stage discharge curve under the flood conditions at one gauging station. More precisely, this will be the exchange discharge model, which is a 1D flow model. Apart from the momentum exchange due to turbulent diffusion, this model also considers the momentum exchange due to mass transfer between the main channel and floodplains, as rivers and streams have non-prismatic channels. The Slovak gauging station on the Kolubara River will be used for the case study, since there are floods observation data for this station available. The discharge values obtained for the highest recorded water levels using the classical approach (divided channel method) and the exchange discharge method will be compared with the official records of the Republic hydrometeorological service of Serbia.

Keywords: rating curve, compound channel, 1D flow model, exchange discharge model, river

¹ Доц. др Дејана Ђорђевић, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, dejana@grf.bg.ac.rs

² Марија Ивковић, Републички хидрометеоролошки завод, marija.ivkovic@hidmet.gov.rs

³ Иван Стојнић, IST Lisbon, Portugal, EPFL, Lausanne, Switzerland, istojnic@gmail.com

1 Увод

Течење у домену великих вода, које се изливају из основног корита, је изузетно сложено и као такво тешко га је описати једноставним математичким моделима применљивим у инжењерској пракси. У овом раду приказана је примена једног од модела линијског течења у кориту за велику воду за прорачун криве протока у природним водотоцима, који је детаљно проверен коришћењем података лабораторијских мерења. Резултати досадашњих лабораторијских истраживања указују да одступања вредности протока израчунатих коришћењем традиционалних метода од измерених протока могу бити значајна. Анализе спроведене у раду [2] показују да су вредности протока процењене коришћењем методе јединственог пресека мање, а вредности израчунате по методи хидраулички хомогених сегмената веће од измерених. Применом методе размене количине кретања између главног корита и плавних површина (МРКК) за прорачун криве протока у кориту за велику воду (КВВ), коју су крајем 1990их предложили Бузмар и Зек [1], добијају се вредности које су најприближније измереним вредностима како у призматичним [2], тако и у непризматичним каналима [3].

Стога се у раду разматра се могућност примене ове методе за одређивање криве протока у домену великих вода у природним коритима која су по правилу непризматична и имају попречне пресеке неправилног облика. За овакву анализу погодни су они попречни пресеци водотока у којима постоје одговарајућа хидрометријска мерења, а то су најчешће профили хидролошких станица. Један од таквих профила је профил хидролошке станице Словац на реци Колубари. Ова хидролошка станица изабрана је зато што за њу постоји довољан број мерења у домену водостаја који прелазе границе основног корита. Подаци са ове водомерне станице послужили су за подешавање параметара модела и проверу квалитета МРККа, а потом и за дефинисање криве протока у домену великих вода. Овако дефинисана крива протока употребљена је за одређивање хидрограма поплавног таласа из маја 2014. године и његово поређење са званичним хидрограмом добијеним коришћењем званичне криве протока Републичког хидрометеоролошког завода Србије ради сагледавања неизвесности која се јавља у процесу трансформације водостаја у проток у екстремним хидролошким ситуацијама.

У наставку се прво даје кратак приказ МРККа са посебним освртом на чланове којима се описује размена количине кретања између главног корита (ГК) и плавних површина (ПП) услед непризматичности корита, тзв. „геометријска” размена. Након тога се наводе основне карактеристике КВВ реке Колубаре на потезу хидролошке станице Словац и изабрани подаци хидрометријских мерења из домена великих вода. Потом следе процена вредности Манинговог коефицијента отпора за главно корито и плавне површине, анализа осетљивост модела на промену вредности параметара и улазних величина и приказ методе за подешавање вредности параметара математичког модела. На крају се пореде хидрограми директног отицаја поплавног таласа из 2014. године и даје коментар о могућности примене МРККа за процену криве протока у КВВ природних водотока.

2 Математички модел

У овом раду користи се модел линијског течења који су предложили Бузмар и Зек [1]. Моделирање течења у КВВ заснива се на подели попречног пресека вертикалним равнима на ГК (сегмент 2) и две ПП (сегменти 1 и 3, слика 2) и на претпоставци да је ниво воде у попречном пресеку хоризонталан. Једначине се исписују за сваки део сложеног попречног пресека, што значи да једначине одржања масе садрже члан којим се обухвата размена масе између суседних сегмената КВВ, а једначине одржања количине кретања, додатне чланове који описују размену количине кретања између ових делова попречног пресека. Дефинисање криве протока у КВВ за сада се још увек заснива на претпоставци да је течење устаљено, тако да се једначине одржања количине кретања погодним трансформацијама преводе у једначине одржања енергије, којих има укупно три (за сваки сегмент сложеног попречног пресека):

$$I_e \equiv -\frac{\partial}{\partial x} \left(Z + \frac{U^2}{2g} \right) = I_{tr,i} + \underbrace{\frac{q_{ul,i}(U_i - u_{b,i})}{gA_i}}_{I_{rkk,i}}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

где је x независно променљива – просторна координата у смеру главног тока, I_e је нагиб линије енергије који је јединствен за цео попречни пресек, Z је ката нивоа у попречном пресеку, U је средња профилска брзина, U_i је средња брзина у сегменту i , A_i је површина сегмента i , $q_{ul,i}$ је бочни доток у сегмент i , $u_{b,i}$ је компонента брзине суседног сегмента у правцу главног тока којом се остварује унос количине кретања у сегмент i , $I_{tr,i}$ је нагиб линије енергије услед трења за сегмент i , а $I_{rkk,i}$ нагиб линије енергије услед размене количине кретања такође за сегмент i . Бузмар и Зек однос ове две компоненте нагиба линије означавају са χ_i ($= I_{rkk,i} / I_{tr,i}$), па се може скраћено написати да је нагиб линије енергије $I_e = I_{tr,i} (1 + \chi_i)$, $i = 1, 2, 3$. Бочни доток у сегмент i потиче од турбулентне дифузије (q_{ul}^t), која је последица разлике брзина у ГК и на ПП, и од размене масе због непризматичности корита, или тзв. „геометријске” размене (q_{ul}^g). Бочни доток и бочно истицање q_{ul}^t су симетрични и описују се моделом мешања у хоризонталној равни [1 и 2]:

$$q_{gpp}^t = q_{ppg}^t = |\bar{v}^t| (H - h_{pp}) = \psi^t \left| U_{gk} - U_{pp} \right| (H - h_{pp}) \quad (2)$$

где доњи индекси показују да ли је реч о дотоку из главног корита на плавну површину „gpp” или о дотоку са плавне површине у главно корито „ppg”. Апсолутна вредност временски осредњене флукуације брзине уравни пресека $|\bar{v}^t|$ сразмерна је апсолутној вредности разлике средњих брзина суседних сегмената $\left| U_{gk} - U_{pp} \right|$, а коефицијент пропорционалности ψ^t је параметар модела МРКК. Дубине воде у ГК и на ПП означене су, редом, са H и h_{pp} .

Смер бочног дотока, који је последица „геометријске” размене зависи од тога да ли се ПП шири (q_{gpp}^g) или сужава (q_{ppg}^g); за објашњење обе величине видети слику 5 из [3]. Увођењем параметра κ , који показује смер кретања воде у односу на орт нормале на границу ГК [3], бочни дотоци, односно истицања могу се скраћено написати на следећи начин:

$$q_{ppg}^g = \psi^g \kappa_{ppg} \frac{dK_{pp}}{dx} I_{tr,pp}^{1/2} \quad \text{и} \quad q_{gpp}^g = \psi^g \kappa_{gpp} \frac{dK_{pp}}{dx} I_{tr,pp}^{1/2} \quad (3)$$

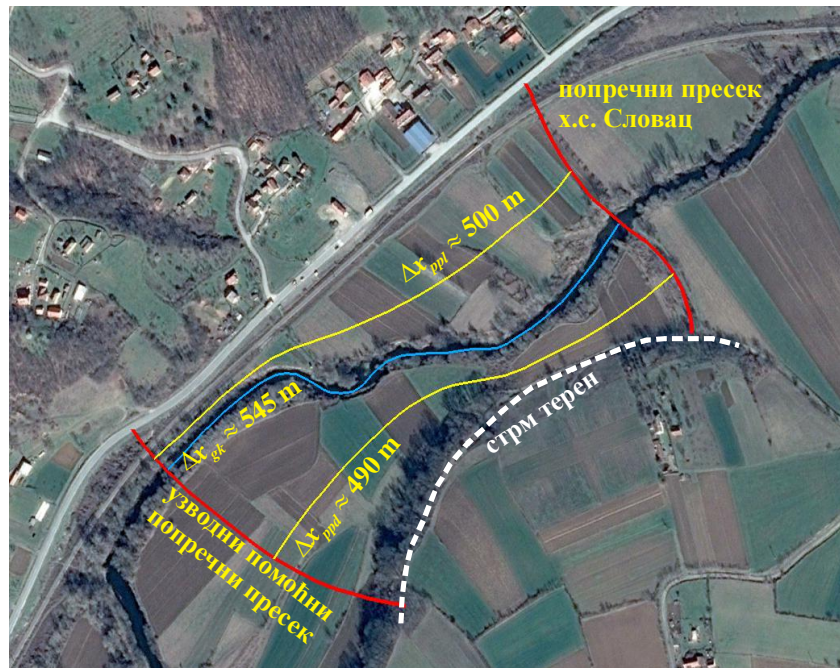
где доњи индекси, имају исто значење као у случају бочног дотока услед турбулентне дифузије, а одговарајући параметри κ дефинишу се у зависности од промене проточности ПП (K_{pp}):

$$\kappa_{ppg} = \begin{cases} 0, & \frac{dK_{pp}}{dx} > 0 \\ -1, & \frac{dK_{pp}}{dx} < 0 \end{cases} \quad \wedge \quad \kappa_{gpp} = \begin{cases} 1, & \frac{dK_{pp}}{dx} > 0 \\ 0, & \frac{dK_{pp}}{dx} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Када је $\kappa = 1$, вода истиче из ГК на ПП, јер се смер кретања воде поклапа са смером орта спољне нормале, а када је $\kappa = -1$ вода са ПП дотиче у ГК, тј. смер кретања воде је супротан од смера орта спољне нормале.

3 Хидролошка станица Словац на реци Колубари

Река Колубара је последња велика десна притока реке Саве и настаје спајањем река Обнице и Јабланице непосредно узводно од Ваљева. Хидролошка станица Словац налази се 88 km узводно од ушћа у реку Саву (слика 1). У овом пресеку се од 1955. године прати облик речног корита и мери проток. Средњи вишегодишњи проток у овом пресеку износи $9,47 \text{ m}^3/\text{s}$ [4].



Слика 1. Долина реке Колубаре у близини х.с. Словац (април 2014. године) са назначеним попречним пресецима и растојањима између делова корита за велику воду

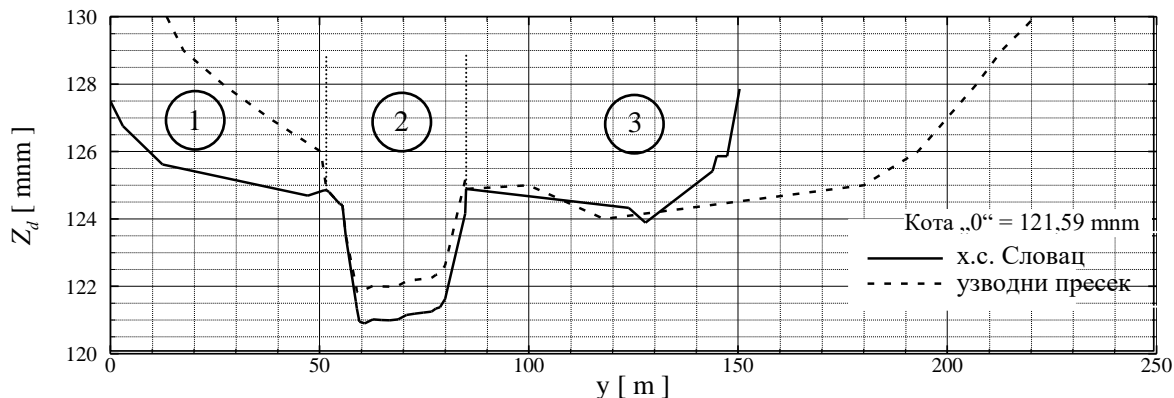
Figure 1. Kolubara River valley in the vicinity of the Slovak gauging station (April 2014) with the indicated cross-sections and distances between different parts of the compound channel

Од расположивих података мерења водостаја и протока у пресеку х.с. Словац, из периода од 1955. до 2017. године, изабрани су они подаци чије су вредности у домену великих вода. За одређивање криве протока изабране су вредности четири највиша водостаја и њима одговарајућих протока (табела 1). Мерења из маја 1979., априла 1985. и децембра 1999. године послужила су за подешавање вредности параметара модела, а мерење из јуна 1985. године за проверу модела. Пошто се промене облика основног корита редовно прате, водило се рачуна да се за сваку од ове три године користе одговарајући подаци.

Табела 1. Четири највиша водостаја измерена у попречном пресеку х.с. Словац

Table 1. Four highest water stages recorded at Slovak gauging station

датум	H	Q_{mer}
	[cm]	[m^3/s]
13. мај 1979.	342	201
18. април 1985.	387	222
13. јун 1985.	380	220
29. децембар 1999.	340	208



Слика 2. Попречни пресек хидролошке станице Словац снимљен 1979. године и узводни попречни пресек читан са сателитских снимка из 2002. године (Google Earth), удаљен 544 m

Figure 2. Cross-section of the Slovak gauging station surveyed in 1979 and the cross-section taken from Google Earth images of the year 2002; the cross-section is located 544 m upstream of the gauging station

На слици 2 приказан је попречни пресек хидролошке станице Словац за 1979. годину заједно са пресеком који се налази око 545 m узводно и који је коришћен за утврђивање промене проточности плавних површина дуж анализираних деонице реке Колубаре. Податак о промени проточности ПП неопходан је за утврђивање износа „геометријске” размене између ГК и ПП. У недостатку геодетских мерења, геометрија плавних површина у узводном попречном пресеку одређена је коришћењем сателитских података из 2002. године (Google Earth), док је облик основног корита задржан као у пресеку хидролошке станице. Процењено је да је нагиб дна износио око 0,25%. Као што се са слике 1 може видети, КВВ реке Колубаре је на разматраном потезу изразито непризматично – лева ПП се у смеру тока проширује, а десна ПП се сужава, што пружа могућност да се испита успешност МРКК у одређивању криве протока у непризматичним коритима. За одређивање „геометријске” размене између ГК и ПП потребна су растојања између два попречна пресека дуж леве и десне ПП. Ова растојања дата су на слици 1.

4 Процена вредности Манинговог коефицијента отпора

Врста и степен развоја вегетације значајно утичу на вредност Манинговог коефицијента отпора [5]. Вредности протока које су коришћене за подешавање вредности параметара модела и његово тестирање измерене су у различитим периодима године, тако да је приликом процене вредности Манинговог коефицијента отпора узет у обзир и различит степен развоја вегетације. Вредности су процењене засебно за главно корито и плавне површине на основу фотографија снимљених током обиласка терена и фотографија у близини анализираних профила доступних на интернету. Фотографије са слике 3 и силазак на реку омогућили су да се стекне увид у састав речног дна и обала, као и то да се сагледају врста и густина вегетације која расте на косинама обала ГК и на плавним површинама у јесењем периоду.

Вредности Манинговог коефицијента отпора за сва четири мерења одређене су применом поступка који је предложен у Правилнику за избор коефицијента отпора у каналима [5]. Овај поступак подразумева да се прво изабере вредност Манинговог коефицијента рапавости за право призматично корито без вегетације на обалама сачињено од природних материјала – земље, стене или шљунка. Потом се процењују утицаји: 1) непризматичности корита, 2) величине и облика



Слика 3. Корито реке Колубаре код хидролошке станице Словац (лево) и у близини узводног попречног пресека (десно)

Figure 3. Kolubara River channel near Slovak gauging station (left) and near the upstream cross-section (right)

Табела 2. Оквирне вредности Манинговог коефицијента отпора за главно корито и плавне површине у зависности од годишњег доба изражене у $m^{-1/3}s$

Table 2. Seasonal values of the Manning's coefficient for the main channel and floodplains (in $m^{-1/3}s$)

корак бр.	опис	главно корито		плавне површине	
		пролеће/лето	јесен/зима	пролеће/лето	јесен/зима
1.	избор основне вредности Манинговог коефицијента отпора	0,024	0,024	0,020	0,020
2.	додатак услед наносних облика на дну	0,005-0,01	0,005-0,01	0,005-0,01	0,005-0,01
3.	додатак услед присуства вегетације	0,025-0,050	0,01-0,025	0,025-0,050	0,01-0,025
Збирно:		0,054-0,084	0,039-0,059	0,050-0,080	0,035-0,055

корита, 3) постојања препрека у току, 4) вегетације и 5) степена меандрирања. Процењене њихове вредности додају се основној вредности за право, призматично корито без вегетације на обалама. С обзиром на то да је утицај непризматичности у моделу већ обухваћен оним члановима у једначини којима се описују размена масе и количине кретања, додатак на основну вредност Манинговог коефицијента отпора услед непризматичности корита није узет у обзир. Додаци услед препрека и меандрирања такође нису узети у обзир, јер на разматраном потезу нема препрека, а закривљеност корита није изражена. Оквирне вредности осталих компонената коефицијента отпора на потезу х.с. Словац приказане су у табели 2.

5 Анализа осетљивости на промену вредности параметара

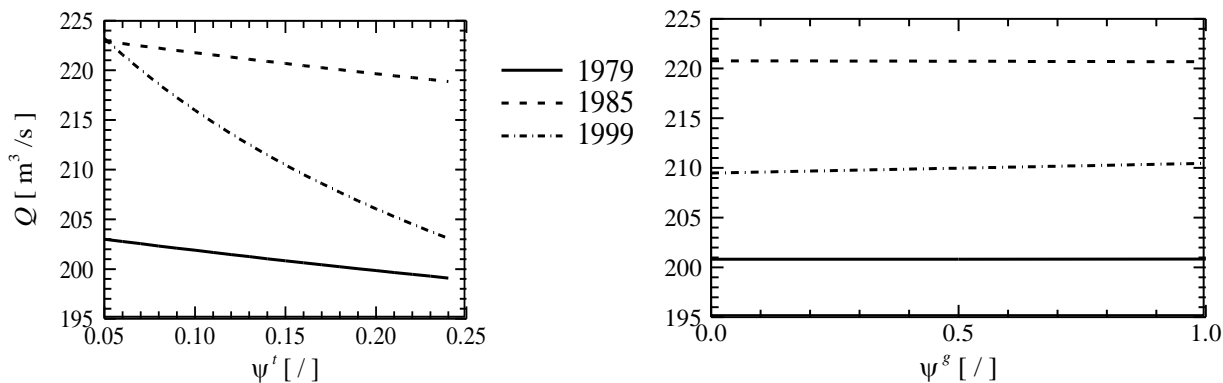
Мале промене вредности параметара модела могу изазвати велике промене вредности протока. Ако се изузме Манингов коефицијент, који је улазни податак за све моделе линијског течења, МРКК има два параметра – ψ^f и ψ^g . Уобичајени распон вредности ова два параметра у досадашњим истраживањима био је између 0,05 до 0,24 за ψ^f и 0,0 до 1,0 за ψ^g [1, 2 и 3]. Анализа осетљивости модела најпре је спроведена са вредностима Манинговог коефицијента отпора из табеле 3.

Посматрањем вредности протока добијених варирањем параметра ψ^f , при фиксној вредности параметра $\psi^g = 1$, уочено је да се она смањује када се вредност параметра ψ^f повећава. Градијент

Табела 3. Вредности Манинговог коефицијента отпора за главно корито и плавне површине коришћене у анализи осетљивости

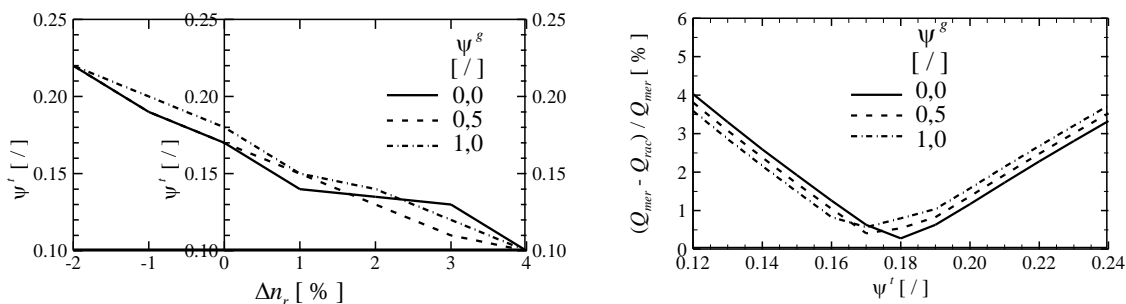
Table 3. Values of the Manning's coefficient for the main channel and floodplains used in sensitivity analysis

година	$n_{gk} [m^{-1/3} s]$	$n_{pp} [m^{-1/3} s]$
1979.	0,055	0,065
1985.	0,060	0,070
1999.	0,048	0,058



Слика 4. Анализа осетљивости модела на промену вредности параметра ψ^1 , при $\psi^2 = 1$ (лево) и на промену вредности параметра ψ^2 , при $\psi^1 = 0,15$ (десно) – профил х.с. Словац

Figure 4. Model sensitivity to ψ^1 parameter changes when $\psi^2 = 1$ (left) and to ψ^2 parameter changes when $\psi^1 = 0,15$ (right) – Slovak gauging station



Слика 5. Промена оптималне вредности параметра ψ^1 у зависности од одступања Манинговог коефицијента отпора од претпостављене оптималне вредности (лево); промена вредности критеријумске функције у зависности од промене параметра ψ^1 ($\psi^2 = \{0,0; 0,5; 1,0\}$) (десно)

Figure 5. Variations of the optimal ψ^1 parameter value with the percentage difference in the Manning coefficient value from its optimum (left); variations in the objective function with ψ^1 parameter values when ($\psi^2 = \{0.0; 0.5; 1.0\}$) (right)

смањења није исти за све поплавне таласе. За таласе из 1979., 1985. и 1999. године релативне разлике протока које одговарају вредностима $\psi^1 = 0,05$ и $\psi^1 = 0,25$ износе редом 1,92, 1,76 и 9,05% (слика 4, лево). За разлику од параметра ψ^1 , промена вредности параметра ψ^2 не изазива значајније промене вредности протока (проток се незнатно повећава, слика 4, десно), што значи да модел није осетљив на промену вредности овог параметра.

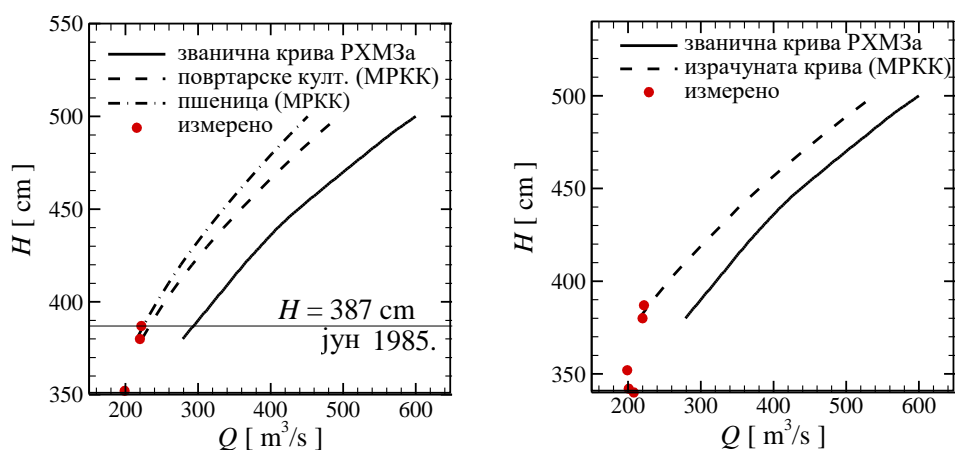
У наредном кораку је анализирано у којој мери промена вредности Манинговог коефицијента отпора (Δn_r) утиче на оптималне вредности параметара ψ^1 и ψ^2 . Као критеријумска функција у процесу оптимизације коришћен је збир апсолутних вредности релативне грешке између осмотрених и израчунатих вредности протока. Вредности параметара ψ^1 и ψ^2 за које ова функција има минималну вредност сматраће се оптималним сетом

параметара. Резултати ове анализе приказани су на слици 5. Уочава се да параметар ψ^s нема значајнији утицај на карактер промене вредности параметра ψ^t при варирању вредности Манинговог коефицијента отпора (слика 5, лево). Са повећањем вредности Манинговог коефицијента смањује се оптимална вредност параметра ψ^t . Критеријумска функција опада до $\psi^t = 0,17$ за $\psi^s = 0$ и $\psi^s = 0,5$ или до $\psi^t = 0,18$ ако је $\psi^s = 1$ (слика 5, десно). Минималну вредност функција има за вредности параметара $\psi^t = 0,18$ и $\psi^s = 1$ и она износи 0,279. Ове вредности параметара усвојене су као оптималне и коришћене су у даљој анализи.

6 Провера модела

Модел је проверен коришћењем података из јуна 1985. године када је при водостају од 387 cm измерен проток од 222 m³/s. За прорачун протока потребно је знати која је пољопривредна култура расла на плавним површинама у том периоду, зато што густина и висина засада утиче на брзину воде преко плавних површина. Претпоставиће се да су на плавним површинама били заступљени поврће или млад кукуруз, ливаде и пшеница. Имајући уз то у виду и степен обраслости корита, усвојене су следеће вредности Манинговог коефицијента отпора: $n_{gk} = 0,060 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ за главно корито, $n_{pp} = 0,065 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ на ПП за поврће и млад кукуруз и $n_{pp} = 0,080 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ за ливаду или зрелу пшеницу.

Криве протока, добијене под претпоставком да се на плавним површинама налазе различите културе, све више се удаљавају једна од друге са порастом водостаја. При водостају од 380 cm одступање износи 3,26% док при водостају од 500 cm оно износи 8,58%. За измерени водостај од 387 cm проток у случају да се на плавним површинама налазе повртарске културе износи око 227 m³/s, што је за 2,45% већа вредност од измерене, док би у случају да постоје ливаде или пшеница та вредност била приближно 221 m³/s, што је за 0,56% нижа вредност од измерене (слика 6 лево). Одступање протока са званичне криве протока РХМЗа при овом водостају значајно превазилази грешку мерења и износи 32%. С обзиром на то да су одступања израчунатих од измерених протока унутар граница грешке мерења, закључује се да могуће културе на плавним површинама у овом случају немају значајнији утицај на процену протока у КВВ. На слици 6 десно дат је упоредни приказ званичне криве протока РХМЗа, измерених протока из табеле 1 и криве израчунате по методи размене количине кретања. Као што се види, званична крива протока даје веће вредности протока са скоро једнаком разликом у целом дијапазону разматраних вредности водостаја. Разлика просечно износи 59 m³/s.



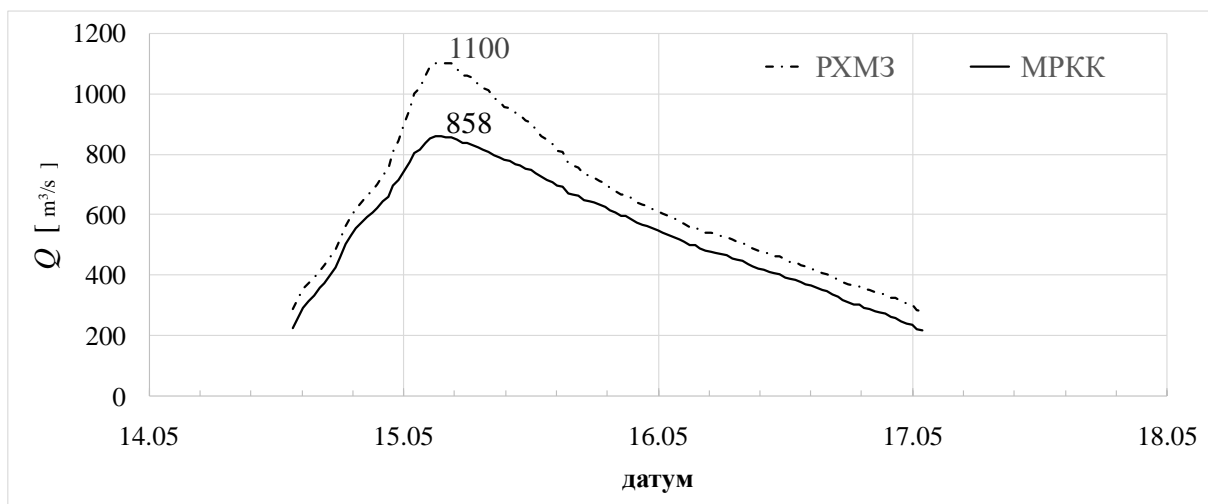
Слика 6. Криве протока за случај присуства различитих култура на плавним површинама 1985. године (лево); званична крива протока РХМЗа и крива добијена применом МРКК за 1985. годину (десно)

Figure 6. Rating curves for different crops on floodplain in 1985 (left); official rating curve of RHMS and the one calculated using EDM for 1985 (right)

7 Хидрограм директног отицаја поплавног таласа из 2014. годину

У мају 2014. године на сливу реке Колубаре догодила се катастрофална поплава која је проузроковала огромну штету односећи велики број људских жртава. Због обимног изливања Колубаре тешко је било проценити који се део запремине падавина трансформисало у отицај. С обзиром на то да се профил хидролошке станице Словац налази у сужењу којим се завршава ваљевска долина, кроз њега би требало да прође целокупна запремина отекле воде са узводног дела слива.

Као улазни подаци за одређивање криве протока за 2014. годину коришћени су подаци снимања речног корита у профилу х.с. Словац РХМЗа, док су подаци о узводном пресеку изван основног корита добијени читавањем снимка са Google Eartha из 2014. године. Основно корито је, као и у претходном случају, пресликовано из пресека х.с. Словац водећи рачуна о нагибу речног дна. Усвојене су следеће вредности Манинговог коефицијента отпора: $0,048 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ за ГК и $0,058 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ за ПП. Хидрограм таласа из маја 2014. године одређен је коришћењем криве протока РХМЗа и криве протока одређене коришћењем МРККа. Вршни протоци ова два хидрограма разликује се за $242 \text{ m}^3/\text{s}$ (слика 7) или 22%. Према званичној процени, запремина поплавног таласа износила је $137 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, док се применом МРККа добија да она износи око $116 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Ова разлика од $21 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ даје неизвесност у процени од 15%.



Слика 7. Хидрограми поплавног таласа из маја 2014. године добијени коришћењем званичне криве протока из РХМЗа и криве израчунате коришћењем МРКК

Figure 7. Flow hydrographs of the May 2014 flood reconstructed using the official rating curve of the HMS of the Republic of Serbia and the EDM

8 Закључак

У овом раду размотрена је могућност примене једне од савремених метода за процену криве протока у кориту за велику воду на једном водотоку. Реч је о методи размене количине кретања између главног корита и плавних површина која омогућава да се на основу забележених трагова великих водаи података о врсти вегетације на плавним површинама на релативно једноставан начин процени проток у кориту за велику воду, јер користи податке о геометрији корита и Манинговом коефицијенту отпора.

18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Метода је претходно успешно проверена коришћењем резултата лабораторијских огледа, а поређење са подацима осматрања са х.с. Словац потврдила су њену применљивост за процену криве протока и у природним коритима. Ово истраживање показало је да:

1. Оптимална вредност параметра ψ' од којег зависи размена количине кретања турбулентном дифузијом зависи од процене вредности Манинговог коефицијента отпора услед вегетације. Са повећањем отпора на плавним површинама (услед присуства вегетације) смањује се оптимална вредност овог параметра, што је у складу са закључцима до којих се дошло поређењем са лабораторијским мерењима.
2. Утицај непризматичности корита на процену вредности протока у кориту за велику воду у профилу х.с. Словац занемарљив је у односу на утицај турбулентне дифузије, па би удео овог члана у укупној размени количине кретања требало додатно испитати на још неким примерима.
3. Применом МРКК одступања од измерених вредности не прелазе 5%, док званична крива РХМ3а систематски прецењује вредности протока – транслаторно је померена за око $59 \text{ m}^3/\text{s}$ у односу на МРКК криву.
4. Чињеница да се запремине поплавног таласа из маја 2014. године добијене применом различитих метода разликују за приближно 15%, а врхови поплавног таласа за 22%, указује на то да би и код нас у наредном периоду требало посветити пажњу изучавању и анализи метода за процену кривих протока у домену великих вода.

Литература

1. Bousmar, D. and Zech, Y. (1999): Momentum transfer for practical flow computation in compound channels, J. Hydr. Eng., ASCE, 125(7), 696-706
2. Đorđević, D., Stojnić, I., Muhić, F., (2015): Prikaz modela linijskog tečenja u koritu za veliku vodu zasnovanog na razmeni količine kretanja između glavnog korita i plavnih površina, Vodoprivreda, Vol. 47, No.273-275, p. 79-91
3. Đorđević, D., Stojnić, I., Rosić, N., (2017): Proračun linije nivoa u neprizmatičnom koritu za veliku vodu primenom metode razmene količine kretanja između glavnog korita i plavnih površina (primer korita jednostavne geometrije), Vodoprivreda, Vol. 49, No. 288-290, p. 349-361
4. Водопривредна основа републике Србије http://www.srbijavode.rs/Data/Files/vodoprivredna_osnova_republike_srbije.pdf
5. Fasken B. G. (1963) Guide for selecting roughness coefficient “n” values for channels, Soil Conservation Service, Lincoln, Nebraska, 1963