

ОБРАДА МЕРЕНИХ ПОДАТАКА У ЦИЉУ ФОРМИРАЊА ЛИНИЈСКОГ МОДЕЛА

Мирјана Хорват¹
Золтан Хорват²

УДК: 532.57 : 519.6

DOI:10.14415/zbornikGFS26.02

Резиме: Приликом формирања линијског модела струјања воде и транспорта наноса за мрежу отворених токова дефинисање граничних услова представља проблем за себе. Ова проблематика је у приказаном раду анализирана на примеру гранате мреже отворених токова за случај петогодишњег симулационог периода, а последица је величине области модела и дужине периода предвиђеног за симулацију. Задавање граничних услова за хидраулички део прорачуна није био посебно проблематичан. Приликом дефинисања граничних услова за прорачун транспорта наноса и деформације корита је, услед недостатка података потребних за квалитетну калибрацију и верификацију модела, било неопходно дефинисање помоћних зависности како би се постојећи подаци комплетирали. У раду су приказане разматране опције за превазилажење проблема непотпуних података код линијских модела струјања воде и транспорта наноса.

Кључне речи: Линијски модел, мрежа отворених токова, помоћне зависности

1. УВОД

Предност линијских модела струјања воде и транспорта наноса у односу на раванске или просторне моделе се огледа у брзини симулација и мањем броју потребних улазних података. Из тога и произилази њихова примена за дугорочне симулације система отворених токова. Након развијања нумеричког модела потребно је спровести детаљна тестирања како би се проверило његово исправно функционисање. Тестирање модела обично обухвата његову примену на шематским примерима [4] за проверу појединих елемената модела или њиховог утицаја на резултате [2,3,6] и поређење резултата симулација са резултатима лабораторијских мерења [5]. Коначна фаза провере је његова примена на реалан ток ради анализе способности репродукције сложених процеса струјања и транспорта у природним водотоковима. Формирање линијског модела у мрежи отворених токова захтева припреме које обухватају преглед и систематизацију расположивих мерења. Недостатак мерења значајно отежава формирање модела и ограничава квалитет резултата [7]. У оквиру овог рада је разматран поступак

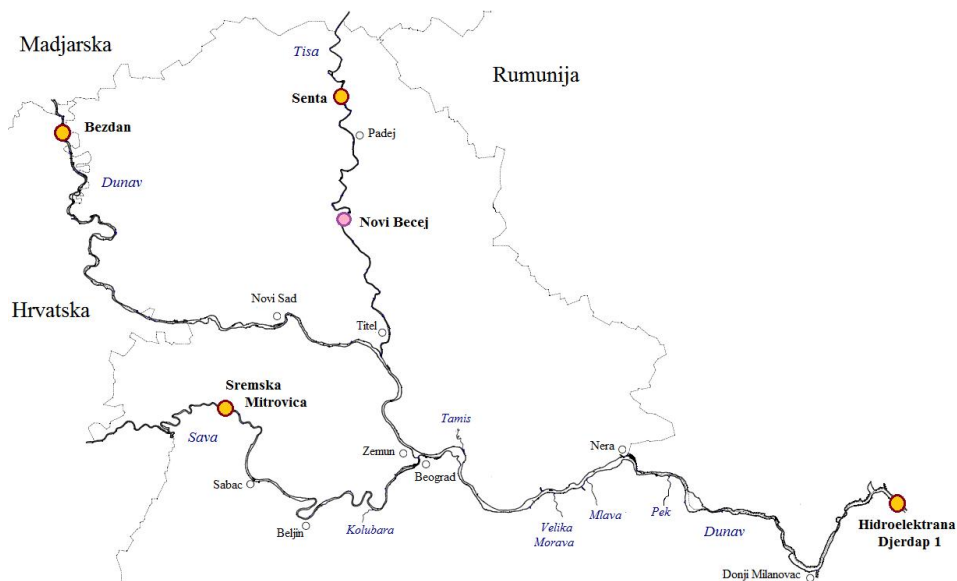
¹ dr. Mirjana Horvat, dipl.inž. grad., University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, Serbia, tel: +381 24 554 300, e – mail: isic_mirjana@gmail.com

² dr. Zoltan Horvat, dipl.inž. grad., University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, Serbia, tel: +381 24 554 300, e – mail: horvath.czoczek.zoltan@gmail.com

формирања модела струјања воде и транспорта наноса на деоници Дунава у Србији са његовим главним притокама Тисом и Савом. Са циљем дефинисања граници хидрауличног дела модела је спроведена анализа расположивих података у оквиру које су разматрани подаци о мереним попречним пресецима, подаци о мереним хидрауличким величинама као што су нивои или протицаји за дефинисање узводних и низводних граничних услова као и пресеци који би послужили за калибрацију и верификацију хидрауличног дела модела [8]. Прорачун траспорта наноса захтева задавање граничног услова само на узводним границама. Због тога је потребна анализа постојећих мерења везаних за нанос на узводним границама области модела уз додатне пресеке унутар моделисане области ради успешне калибрације и верификације модела транспорта наноса.

2. ОБЛАСТ МОДЕЛА

Са циљем детаљног тестирања развијеног нумеричког модела је предвиђена његова примена на деоницу Дунава са главним притокама за пуштање петогодишње симулације. Модел треба да обухвати деоницу Дунава приближне дужине 486 км која се протеже од Бездана на граници са Мађарском (ркм 1430.44) до Хидроелектране Ђердап 1 (ркм 943.00), са главним притокама у Србији, Тисом и Савом.



Слика 1. Област предвиђена за моделисање

Деоница Тисе која би се моделисала је дужине око 123 км а простире се од Сенте на узводној граници (ркм 122.96) до ушћа у Дунав. Разматрана деоница Саве је око 132 км, од Сремске Митровице (ркм 132.85) до ушћа у Дунав. Поред ове две притоке такође је предвиђено да се моделом обухвате и мање притоке као што су

Колубара, Млава, Нера, Пек, Тамиш и Велика Морава. Предвиђена област за моделисање је приказана на слици 1.

Временски период који је планиран за симулирање моделом је од 01.01.2006. године до 31.12.2010. године. За дефинисање области модела је неопходно постојање мерних попречних пресека дуж области предвиђене за моделисање. Имајући у виду временски период од интереса, циљ је обезбеђивање мерења попречних профила из периода са почетка симулације (2006. година). Детаљна анализа расположивих мерења попречних профила је дата у [4] где је показано да је област предвиђена за моделисање у погледу међусобне удаљености пресека са мереном батиметријом довољно покривена и у складу са препорукама датим у [1]. Како би се приступило формирању модела још је потребно анализирати расположивост података потребних за дефинисање граничних услова.

3. ГРАНИЧНИ УСЛОВИ ЗА ФОРМИРАЊЕ МОДЕЛА

Хидраулички прорачун захтева задавање граничних услова на свим границама. Са узводне границе се разматрају Дунав код Бездана, Тиса код Сенте и Сава код Сремске Митровице. С обзиром да се на деоници Тисе предвиђеној за моделисање, код Новог Бечеја налази брана, овај објекат је потребно обухватити моделом. Ако би се брана код Новог Бечеја моделисала као унутрашњи гранични услов, онда би се са познатим нивограмом узводно од бране, користећи једначину континуитета, могао одредити протицај низводно. Одавде следи да је поред узводних граница потребно обезбедити хидрауличка мерења и на брани код Новог Бечеја. Низводна граница комплетне моделисане области је Хидроелектрана Ђердап 1 на Дунаву.

Модел транспорта наноса захтева граничне услове само на узводним границама. Што се тиче моделисања унутрашњег граничног услова (брана код Новог Бечеја), сматра се да се суштина проноса наноса одвија кретњем суспендованог наноса који се преноси са водом преко прелива. Користећи ову претпоставку, прорачун транспорта наноса не захтева додатна мерења на брани, него се исписивањем једначине континуитета прорачун транспорта суспендованог наноса може наставити. У погледу прорачуна наноса на и при дну се претпоставља да нема транспорта кроз брану.

Квалитетна калибрација а касније и верификација модела захтевају додатне пресеке са мереним подацима унутар моделисане области. Зато се преглед расположивих мерења разматра за комплетну област модела.

Расположива мерења морфологије попречних пресека корита су приказана у [4] за Дунав, Тису, Саву и Колубару, Поречку, Пек, Неру, Млаву, Велику Мораву и Тамиш. Укупан број расположивих профила на разматраној деоници Дунава износи 354 са просечним растојањем између два суседна профила од 1.378км. За деоницу Дунава од ХЕ Ђердап 1 до ушћа Нере у Дунав су обезбеђена мерења профила из 2006. и 2010. године. На деоници реке од ХЕ Ђердап 1 до Новог Сада су прибављена мерења из 2010. године али недостају подаци из 2006. године уместо којих су искоришћена мерења из 2005. године. Најмање расположивих мерења је било на деоници од Новог Сада до узводне границе модела. На модеилсаној деоници Тисе није било мерења из 2006. године због чега су узета мерења из претходне године. Укупан број измерених пресека на деоници Тисе је

66 са просечним растојањем приказаних профила од 1.75 км. Укупан број расположивих профила на Сави је 58 а просечно растојање између профила износи 2.33 км. На Колубари је измерено свега четири профила са којима је обухваћена деоница од 2.68 км мерено од ушћа. Мерни профили су на просечном међусобном растојању од 0.78 км. На Поречкој има свега четири измерена пресека на међусобном растојању од 0.5 км при чему је први пресек на 0.10 км од ушћа у Дунав, дакле дужина деонице која је обухваћена мерењима износи 1.6 км. На Пеку су, такође за 2005. и 2006. годину измерена три пресека на просечном растојању од 0.37 км, док на Нери има свега два мерења у 2006. години. Нешто више мерења има на Великој Морави (шест мерених пресека за 2005. години), и на Тамишу (укупно седамнаест мерења за 2005. годину). Просечно растојање између датих профила на Великој Морави износи 4.05 км, а на Тамишу 0.36 км. Мада је удаљеност пресека са мереном батиметријом у складу са препорукама датим у [1], приликом анализе резултата симулација треба имати у виду њихову временску неусклађеност.

Након што су дефинисани расположиви попречни пресеци планиране области модела, прелази се на преглед расположивих мерења протицаја, нивоа, преноса наноса и површинске концентрације. Подаци су разврстани по рекама уз напомену да на реци Поречка није било мерења ни једног од анализираних параметара у периоду 2006. до 2010. године, због чега је ова притока изостављена у прегледу који следи. Сврха ове анализе је идентификација што ближе рачунске тачке за сваку станицу на којој постоје мерења. Поред тога, овај преглед треба да пружи увид у могућа решења за дефинисање граничних услова и постојећих пресека који би послужили као контролне тачке модела.

Преглед мерења на Дунаву је приказан у [4]. Просечно растојање између места са измереним профилем и станице са мереним параметрима је 0.56 км, док је највеће растојање 1.55 км (Стари Бановци). Мада се међусобна удаљеност познатог профила од станице са мерењима може прихватити као задовољавајућа за формирање модела, следећи фактор који значајно утиче на применљивост одређене станице у моделу јесте параметар који је у њој мерен. Као пример се разматра Доњи Милановац где се стационажна пресека и мерне станице поклапају, међутим у поменутом пресеку има само мерења водостаја. Може се закључити да овај пресек није погодан као гранични услов за прорачун наноса, али би могао да послужи као контролна тачка у унутрашњости модела за поређење рачунатих и мерених вредности нивоа. С обзиром да је на низводној граници модела (ХЕ Ђердап 1) познат ниво горње воде за временски интервал од 2006. до 2010. године, као низводни гранични услов се усваја познати нивограм током времена.

Приликом избора узводног граничног услова није довољно постојање података о познатим протоцима или нивоима јер модел захтева и податке о наносу. Прегледом података приказаних у [4] се примећује да је најузводнији пресек на Дунаву са паралелним мерењима протицаја и података о наносу код Новог Сада, где за 2006. годину недостаје 23 података о мереним површинским концентрацијама. Следећи пресек са постојећим мерењима воде и наноса је Смедерево, при чему мерења површинских концентрација током прве две године нису била континуална (недостаје 49 података за 2006. годину и 17 за 2007. годину). Осим ова два пресека, ни један други пресек нема континуална паралелна мерења података о води и наносу током периода од интереса. У Старим Бановцима

има доста мерења површинских концентрација, међутим нема ни једног податка који би послужио за дефинисање граничног услова за хидраулички прорачун. Овим се закључује да је једна опција да се модел ограничи до Новог Сада а да се подаци који недостају интерполују користећи постојеће вредности. Друга могућност је да се са циљем продужетка модела до Бездана нађе други начин за формулисање узводног граничног услова за прорачун транспорта наноса на Дунаву.

Преглед расположивих мерења са стациоณาма мерних места и називом и стационом најближег профила на Тиси је дат у [4]. Просечно растојање између мерне станице и постојећег попречног пресека износи 0.63 км, док је највеће растојање 1.1 км (Тител). Само растојање између мерне станице и постојећег профила не представља значајну препреку, за разлику од временске и просторне неједначености података. И на Тиси се јавља исти проблем као и на Дунаву, јер је једини пресек у којем има паралелних мерења података везаних за воду и нанос, током свих разматраних година, Тител при чему су подаци за нанос и овде некомплетни. Осим тога, пресек у којем је мерен водостај је удаљен 10.60 км од ушћа, а пресек са подацима о наносу 4.50 ркм. Када би се ови подаци наметнули као узводни гранични услов на Тиси, моделисана деоница би била дугачка свега 10.60 км а укупно 115 дана мерења би било интерполовано.

На Сави је ситуација по питању растојања мерних станица и познатих профила мало лошија јер је просечно растојање између пресека са познатом морфологијом и пресека са мереним параметрима 2.23 км, док је највеће растојање 6.39 км (Сремска Митровица). На Сави код Београда постоје континуална мерења површинске концентрације наноса на 5.2 км од ушћа и континуална мерења водостаја на 1.0 км од ушћа. Недостатак ових мерења је што би се њиховом применом за узводни гранични услов река Сава малтене изоставила из модела.

На основу досадашњег излагања је јасно да расположиви подаци нису довољни за формирање предвиђеног модела. Због тога се разматра другачији приступ за дефинисање граничних услова за прорачун наноса. Без додатних података би било неопходно значајно редуковати област модела. Са циљем да се што већи део области предвиђене за моделисање задржи, разматрани су алтернативни приступи за дефинисање граничних услова.

4. УСПОСТАВЉАЊЕ ПОМОЋНИХ ЗАВИСНОСТИ

Уопштено се расположиви подаци о наносу састоје од мерења проноса наноса P (податке је обезбедио Републички Хидрометеоролошки Завод Србије, у даљем тексту РНМЗ) који представља производ запреминске средње профилске концентрације суспендованог наноса и протицаја, и подаци о мереним средњим профилским и површинским концентрацијама суспендованог наноса (подаци обезбеђени од стране Привредног Друштва „Хидроелектране Ђердап”, у даљем тексту Ђердап).

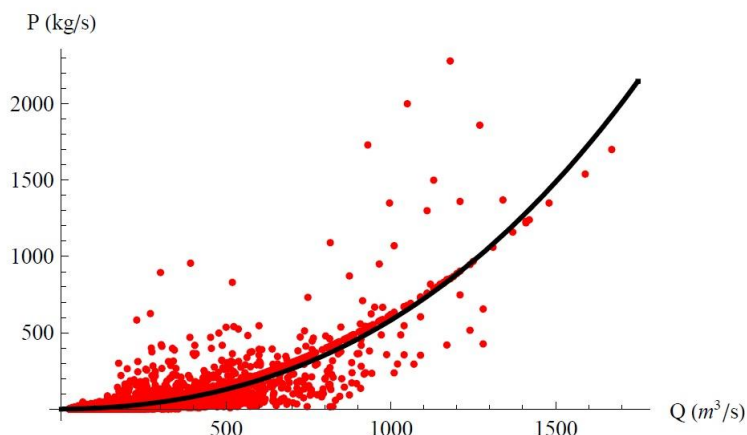
Успостављањем математичке везе проноса наноса са протицајем за произвољан пресек би се омогућило да се са познатим протицајем неког пресека израчуна пронос наноса и средња профилска концентрација. Формирање ове зависности би омогућило да се у пресеку где има мерења проноса наноса из неке године направи

веза облика $P=P(Q)$ и да се са мереним протицајем одреди пронос наноса. За дефинисање овакве зависности је пожељно користити што више мерења. У том светлу се разматрају расположиви подаци о мереним вредностима проноса наноса за што дужи временски период. Детаљан преглед података је дат у [4].

Друга опција је одређивање везе површинске и средње профилске концентрације суспендованог наноса што би омогућило да се са мереном површинском концентрацијом добије средња профилска концентрација. Овај приступ се разматра јер је у оквиру пројекта Министарства за образовање, науку и технолошки развој Републике Србије, партиципант Привредно Друштво „Хидроелектране Ђердап” на располагање ставило податке прикупљене од стране Института за Водопривреду „Јарослав Черни” (у даљем тексту ЈС). Поменути подаци обухватају дневна мерења средњих профилских и површинских концентрација. Преглед симултаних мерења ових концентрација је дат у [4]. Анализом расположивих података се приметило да дефинисање квалитетне функције C_{sr} (C_{pov}) захтева што је могуће више података.

Још један могући приступ је дефинисање везе проноса наноса и протока користећи ЈС податке дате у [4]. Предност овог поступка у односу на дефинисање исте зависности са подацима RHMZ-а се огледа у томе да су овде једнозначне вредности које улазе у функцију (мерена вредност средње профилске концентрације и мерен протицај). Са друге стране, недостатак је неупоредиво мањи број расположивих података за формулисање зависности.

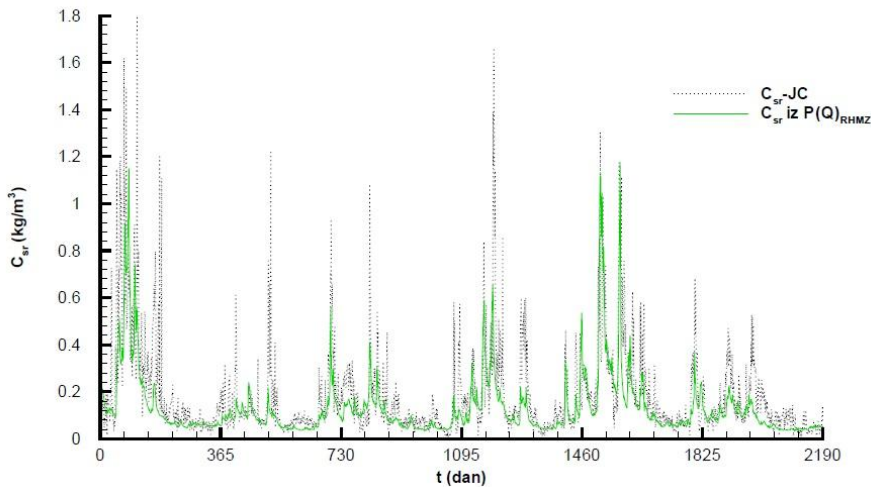
Најкомплетнији подаци о наносу могу да се нађу на Великој Морави на мерном месту Љубичевски мост, због чега је овај пресек изабран као пример на којем се приказује принцип даљег истраживања. Успостављене зависности су примењене за одређивање средње профилске концентрације за период од 2006. до 2011. године и поређене са дневним вредностима средњих профилских концентрација суспендованог наноса обезбеђених од стране ХЕ Ђердап (а чије прикупљање је спровео ЈС).



Слика 2. Мерења RHMZ и усвојена зависност $P(Q)_{RHMZ}$

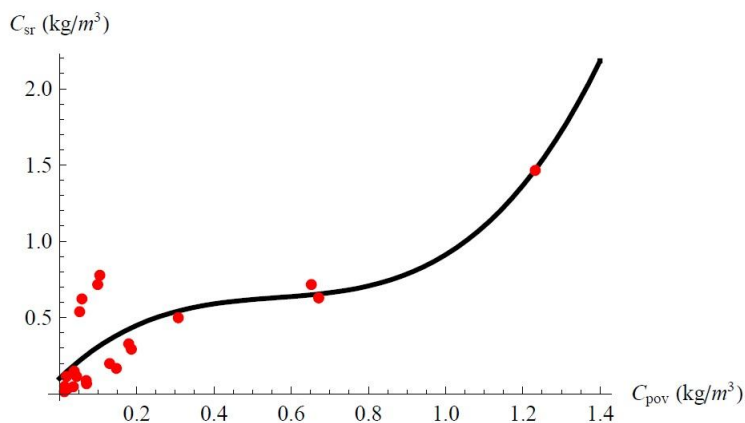
Прво се разматра зависност проноса наноса и протицаја применом података RHMZ-а. Мерења проноса наноса у пресеку Љубичевски мост на Великој Морави постоје од 1987. до 2007. године. Да би се успоставила тражена зависност, од RHMZ су тражени подаци о мереним протицајима у истом периоду. На слици су тачкама приказана сва мерења протицаја и проноса наноса у периоду од 01.01.1987. до 31.12.2007. године, а усвојена апроксимација је приказана пуном линијом. Приликом избора најпогодније функције за описивање тражене зависности су разматране логаритамске, експоненцијалне, степене функције и полиноми вишег степена. У овом случају је коначно усвојен полином трећег степена као зависност која најбоље описује мерења. Добијена зависност $P(Q)_{RHMZ}$ је тестирана поређењем израчунатих средњих профилских концентрација C_{sr} са средњим профилским концентрацијама $C_{sr}-JC$ из извештаја JC за период од 2006. до 2011. године. Вредности средњих профилских концентрација у овим извештајима нису директно мерене вредности концентрација. Приликом дневних мерења се због једноставнијег узорковања узимају узорци за одређивање површинских концентрација, након чега се применом сличних зависности које се и овде разматрају дефинише веза којом се из мерених површинских концентрација долази до средње профилске концентрације. Ипак, због одсуства бољих података, ове вредности средњих профилских концентрација се узимају као референтне, те се даљи резултати пореде са њима.

Слика 3. приказује средње профилске концентрације које даје JC у својим годишњим извештајима и израчунате вредности средњих профилских концентрација користећи зависност $P(Q)_{RHMZ}$, слика 2., за период од 2006. до 2011. године. Са приказаних резултата се види да је слагање вредности доста добро и да C_{sr} добијено из $P(Q)_{RHMZ}$ по облику прати криву $C_{sr}-JC$. Већа одступања се јављају у случајевима наглог повећања концентрација где усвојена зависност $P(Q)_{RHMZ}$ није успела да репродукује максимуме. Код умереног прираштаја концентрације, резултати добијени применом $P(Q)_{RHMZ}$ дају доста добра слагања са $C_{sr}-JC$.

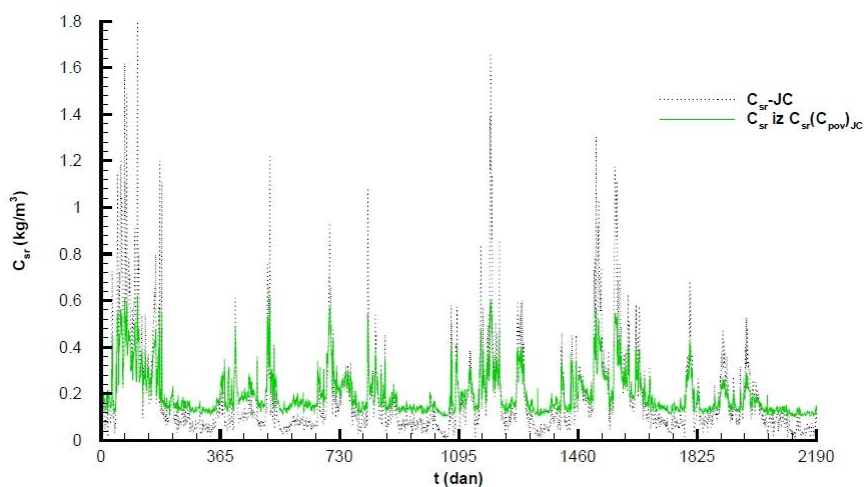


Слика 3. Поређење C_{sr} из зависности $P(Q)_{RHMZ}$ са $C_{sr}-JC$ датим у извештајима

Следећи тип функције који се разматра даје везу средње профилске и површинске концентрације. Слика 4. приказује мерене средње профилске и површинске концентрације (подаци пореклом из извештаја ЈС) и усвојену функцију $C_{sr}(C_{pov})_{JC}$. За успостављање зависности је усвојен полином трећег степена јер се показао као најпогоднији за описивање расположивих мерења. Добијена функција је тестирана поређењем са подацима C_{sr} - JC за период 2006. до 2011. године, слика 5.



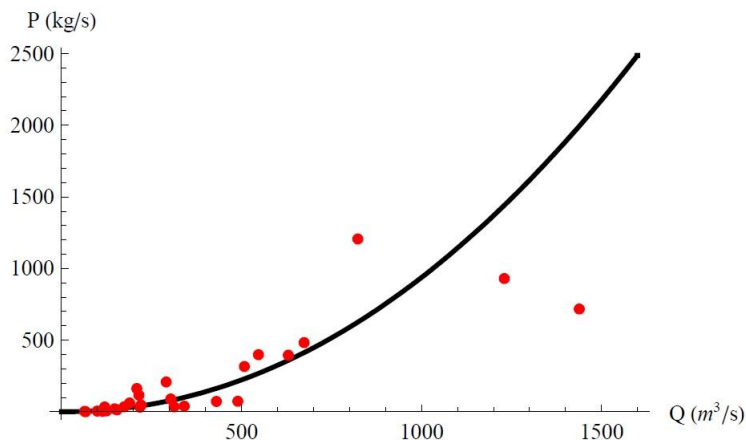
Слика 4. Мерења Института „Јарослав Черни” и усвојена зависност $C_{sr}(C_{pov})_{JC}$



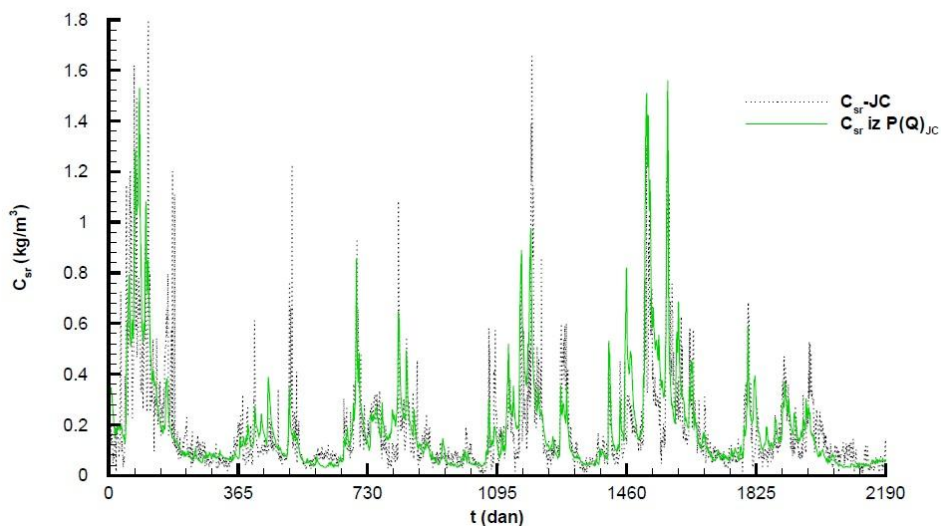
Слика 5. Поређење C_{sr} из зависности $C_{sr}(C_{pov})_{JC}$ са C_{sr} - JC датим у извештајима

У разматраном случају се уочава да усвојена зависност $C_{sr}(C_{pov})_{JC}$ код екстремних вредности даје мање концентрације од C_{sr} - JC , док се у периодима где су концентрације генерално мање и нема наглих скокова, вредности добијене применом $C_{sr}(C_{pov})_{JC}$ изнад вредности датих у Јарослав Чернијевим извештајима.

Поред ове опције је анализиран још један приступ с тиме да се овај пут тражи веза проноса наноса и протицаја. Множењем измерених средњих профилских концентрација и одговарајућих протицаја се добио пронос наноса, који се комбиновао са припадајућим протицајима. Ови подаци су заједно са усвојеном апроксимацијом, $P(Q)_{JC}$ (степен функција) приказани на слици 6.



Слика 6. Мерења Института „Јарослав Черни” и усвојена зависност $P(Q)$



Слика 7. Поређење P_{sr} из зависности $P(Q)_{JC}$ са C_{sr-JC} датим у извештајима

Након успостављања једнозначне везе, функција је проверена поређењем са подацима C_{sr-JC} за исти период као у два претходна случаја. Овде се примећује знатно боље слагање резултата него раније. Функција боље репродукује средње профилске концентрације у мирнијим периодима од функције $C_{sr}(C_{pov})_{JC}$ и боље

прати максимуме од функције $P(Q)_{RHMZ}$. Прегледом резултата се лако долази до закључка да је последња корелација најповољнија за дефинисање узводних граничних услова. Међутим, пре доношења такве одлуке треба имати у виду да је број симултаних мерења средње и површинске концентрације у пресеку Љубићевски мост на Великој Морави релативно велик (22 податка). Пресеци као што су Добра, Илок, Смедерево, Сурдук и Богојево на Дунаву, или Жабалски мост на Тиси имају много мање података који би дали мање квалитетну зависност. Због тога није могуће једнозначно препоручити зависност $P(Q)_{JC}$ као најповољнију.

5. ЗАКЉУЧАК

У приказаном раду су разматране потешкоће које се јављају приликом формирања модела струјања воде и транспорта наноса које се пре свега односе на расположивост података и дефинисање граница области модела у складу са постојећим подацима. Други значајан фактор који треба имати у виду при дефинисању области модела су потенцијални пресеци са мерењима који ће послужити у фазама калибрације и верификације нумеричког модела. Коначно, за случај недовољног броја података су разматране могућности успостављања помоћних зависности ради допуњавања оскудних мерења. У оквиру анализе помоћних зависности је закључено да се ни један од разматраних приступа не може усвојити као најбољи, већ се приликом дефинисања зависности предност даје $P(Q)_{JC}$ функцији уколико је број симултаних мерења прихватљив, а у супротном да се прибегне функцији типа $P(Q)_{RHMZ}$. Дефинисањем зависности проноса наноса и протикаја за пресеке са мереним протицајима се може добити реална вредност проноса наноса те се на тај начин може превазићи проблем малобројних мерења. Коначно, након спроведених анализа могу да се усвоје границе моделисане области. У разматраном примеру је усвојена моделисана област која обухвата деоницу Дунава од Бездана до бране ХЕ Ђердап 1, деоница Тисе од Сенте до ушћа у Дунав, Деоница Саве од Сремске Митровице до ушћа у Дунав и Велика Морава од Љубићевског моста до ушћа.

ЗАХВАЛНИЦА

Приказано истраживање је спроведено у оквиру пројекта Мерење и моделирање физичких, хемијских, биолошких и морфодинамичких параметара река и водних акумулација, број пројекта ТР 37009, који је финансиран од стране Министарства за образовање, науку и технолошки развој Републике Србије.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Castellarin, A., Baldassarre, G. D., Brath, A. Optimal Cross-Sectional Spacing in Preissmann Scheme 1D Hydrodynamic Models. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009., vol. 135, № 2, p.p. 96-105.
- [2] Хорват, З., Спасојевић, М., Исић, М. Математичко моделирање мреже отворених токова. *Зборник радова Грађевинског факултета 19*, 2010., ст. 21-34.

- [3] Husain, T., Abderrahman, W.A., Khan, H. U., Khan, S. M., Khan, A. U., Eqnaibi, B. S. Flow Simulation Using Channel Network Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **1988.**, vol. 114, № 3, p.p. 424-441.
- [4] Исић, М., Линијски модел интеракције воде и наноса у мрежи природних водотока. Докторска дисертација, Универзитет у Новом Саду, Грађевински факултет Суботица, **2014.**
- [5] Исић, М., Хорват, З., Спасојевић, М. Експериментална верификација линијског модела неустаљеног течења. *Зборник радова Грађевинског факултета 20*, **2011.**, стр. 25-31.
- [6] Martin-Vide, J. P., Moreta, P. J. M., Lopez-Querol, S. Improved 1-D modelling in compound meandering channels with vegetated floodplains. *Journal of Hydraulic Research*, **2008.**, vol. 46, № 2, p.p. 265-276.
- [7] Patro, S., Chatterjee, C., Singh, R., Raghuvanshi, N. S. Hydrodynamic modelling of a large flood-prone river system in India with limited data. *Hydrological Processes*, **2009.**, vol. 23, p.p. 2774-2791.
- [8] Vidal, J-P., Moisan, S., Faure, J-B., Dartus, D. Towards a reasoned 1D river model calibration. *Journal of Hydroinformatics*, **2005.**, vol. 7, № 2, p.p. 91-104.

PROCESSING OF MEASURED DATA FOR THE DEVELOPMENT OF A 1-D MODEL

Summary: *Assigning the boundary conditions for water flow and sediment transport simulation in a looped river network can be challenging. Possible difficulties are presented on the example of a five year simulation period in a river network, and they appear as a result of the extensive model domain (both spatial and temporal sense). In the considered example, greater difficulties arose while defining the boundary conditions for the sediment transport model. These challenges were a result of incomplete measurements. Since the successful calibration and verification of the model requires complete measurements, additional equations were defined that enabled the authors to complement the deficient data.*

Keywords: *One dimensional model, looped river network, auxiliary equations*