

ПРИМЕНА РАВНИХ ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИХ СОНДИ ЗА МЕРЕЊЕ ПРОТОКА У КАНАЛИЗАЦИЈИ

FLAT ELECTROMAGNETIC PROBES IN SEWER FLOW MEASUREMENT

ДУШАН ПРОДАНОВИЋ¹, ДАМЈАН ИВЕТИЋ²

Резиме: Мерење протока у канализацији представља изазов јер не постоји једна најбоља метода, већ је неопходно добро познавати радне услове и сходно њима изабрати оптималну мерну методу. У овом раду је приказана електромагнетна (ЕМ) метода која користи равне сонде, прилагођене уградњи у канализационе системе. Равне ЕМ сонде су робусне, могу да мере изузетно мале брзине (при успору) као и велике брзине током кишних епизода, могу да раде са јако малим дубинама а и отпорне су на нанос и прљавштину која може да се на њима наталожи. Код већих протицајних профила је могуће више равних ЕМ сонди повезати у један интегрисани систем, чиме се добија боља просторна интеграција брзина а укупна цена система остаје релативно мала. У раду су дати резултати детаљних испитивања сонди спроведених на Грађевинском факултету: снимања 3D магнетног поља ради дефинисања контролне запремине и тежинског вектора у реалним радним условима, рад равних ЕМ сонди под наносом и корекцију мерења у таквим условима, као и методологија примене CFD ради анализе утицаја реалних услова течења. На крају рада су дати и примери употребе равних ЕМ сонди на неколико система.

Кључне речи: мерење протока, канализација, отворени токови, електромагнетне сонде

Abstract: Flow measurement in sewer systems is still a challenge: there is no one “the best” method which can solve all requests, but user has to optimize the selection of equipment to fulfill the existing flow and working conditions. One of the possibilities is to use the flat electromagnetic (EM) probes, presented in this paper. Flat EM probe is designed to suit the needs of sewer systems, i.e. they are robust, can operate with low velocities of few cm/s and at the same time can measure high velocities during heavy storms, can work with shallow water and even will operate if covered with sludge and sediments of reasonable height. In large flow profiles, user can easily integrate more flat EM probes into one system, improving the spatial integration of measured velocities and at the same time keeping the low overall

¹ Душан Продановић, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

² Дамјан Иветић, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

costs. Results of laboratory investigation at Faculty of Civil Engineering in Belgrade are presented in the paper: mapping of 3D magnetic field to delineate the control volume and calculate the weighting function in real conditions, operation of probe under the heavy sediment load of different height and usage of CFD to analyze the influence of real flow field. Few examples of flat EM probe applications are presented at the end of the paper.

Key words: flow measurement, sewer systems, open channel, electromagnetic probes

1. Увод

Основни физички параметар према коме се димензионише већина хидротехничких система и према коме се управља тим системима, је проток. Међутим, управо је проток у отвореним токовима (канализација) најтеже измерити [17] због сложених хидрауличких услова [1], присуства седимената и суспендованих честица и неповољних услова по мерну опрему због присуства агресивних, запаљивих и корозивних гасова. Континуално мерење протока у овим случајевима представља велики изазов како у пракси тако и истраживачима.

При избору оптималне методе и мерне опреме за мерење протока могуће је издвојити доминантне факторе које треба узети у разматрање [24] као што су: хидраулички услови, карактеристике флуида, физичке карактеристике проводника, карактеристике средине и могућност напајања/комуникације. Хидраулички услови на изабраном мерном месту су свакако најважнији. Уколико постоји једнозначна веза између протока и дубине ($Q - h$), мерење протока се може спровести посредно, само помоћу одговарајућих сензора дубине. У канализационим системима, на жалост, то најчешће није могуће па се проток одређује паралелним мерењем брзине тока V и дубине h (метода $V - A$). У овој методи је кључни извор грешке, односно неодређености (непоузданости) протока у одређивању средње профилске брзине V .

Одређивање средње профилске брзине V у отвореним токовима је осетљив и компликован задатак, који захтева експертско знање пројектанта мерног система како из области хидраулике тако и из физичких принципа мерних техника. Познавањем хидрауличких услова на мерном месту могуће је успоставити одрживу екстраполацију којом се од измерене брзине V_{mer} (или више измерених брзина) долази до средње профилске брзине V потребне за прорачун протока. Са друге стране, потребно је знати и радни принцип коришћене мерне сонде како би се правилно тумачиле измерене брзине V_{mer} и одредила средња профилска брзина.

У овом раду ће се приказати равна електромагнетна (ЕМ) сонда за мерење протока у канализацији. Мерна метода је базирана на познатој методи рада електромагнетних мерача протока у цевима под притиском. Метода је развијана у оквиру сарадње фирме Свет инструмената (СИ) и Грађевинског факултета, а примењена је први пут у београдској канализацији у оквиру националног научног пројекта ТР-22013. Поред приказа методе, даће се и поређење са ултразвучним доплер сондама које се у последње време најчешће користе. У

раду ће се дати резултати детаљних испитивања сонди спроведених на Грађевинском факултегу: снимања магнетног поља ради одређивања радних параметара, рад равних ЕМ сонди под наносом и могућност корекције мерења у таквим условима, као и методологија примене CFD анализе за предикцију струјне слике у реалној протицајној геометрији ради анализе њеног утицаја на измерени проток. На крају рада ће се дати и примери примене равних ЕМ сонди.

2. Ултразвучна и Електромагнетна метода мерења

У канализационим системима се стандардно јавља течење са слободном површином, иако у појединим случајевима (нпр. интрузивног отицаја у кишној или комбинованој канализацији), може доћи до изливања и течења под притиском. Такође, изазов за мерење протока је и што се у комбинованим канализационим системима јављају велике разлике између протока у сувом и кишном периоду, некада и до 1:1000 [26]. Због свега овога, прихватљива неодређеност у мерењу протока у канализационим системима је уобичајено за ред величине виша него у системима под притиском и износи од 5 – 10% [14].

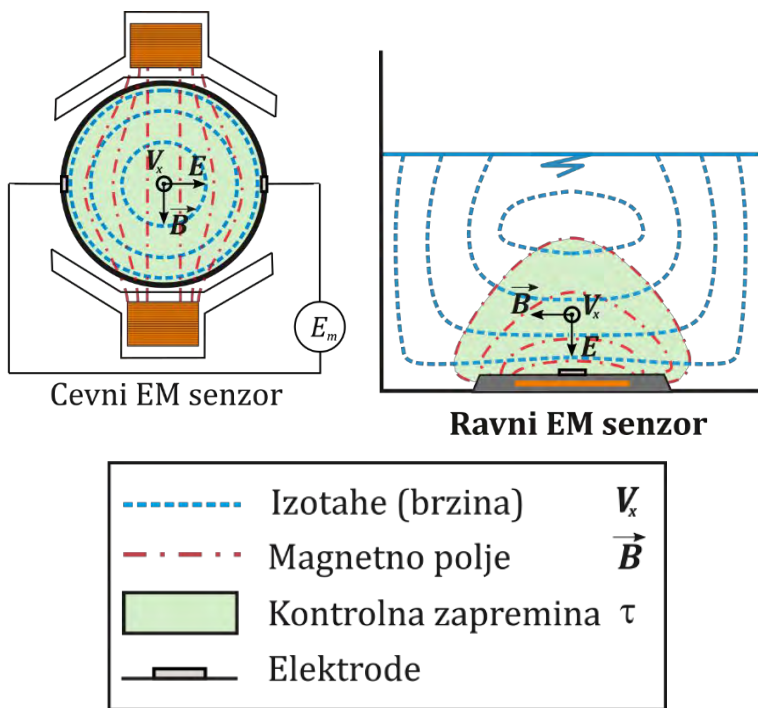
За одређивање средње профилске брзине V , у канализационим системима, инжењери се у последње време углавном одлучују за примену папучастих АДВ (енг. Acoustic Doppler Velocimeter – ADV) уређаја [21]. Радни принцип ових уређаја се заснива на примени Доплеровог ефекта: сонда емитује ултразвук који се одбија од честица у води и враћа са промењеном фреквенцијом/фазом. Због радног принципа захтева се да ток поседује одређену минималну концентрацију суспендованих честица. При томе, кориснику није баш јасно које честице, у ком делу протицајног профила су коришћене да би се одредиле брзине, што ограничава тачност методе¹. Поред тога, досадашња искуства су указала на значајне проблеме са високом мерном неодређеношћу у условима седиментације, као и малих дубина и малих брзина [11, 22, 25,].

Алтернативно у канализационим системима се могу користити сензори који раде на принципу електромагнетне (ЕМ) индукције, односно Фарадејевог закона индукције: кретање проводне течности кроз управно магнетно поље, доводи до индуковања напона на електродама сензора. Излазни сигнал, односно напон U_m , се математички може описати преко релације (Bevir, 1970):

$$U_m = - \int_{\tau} (\vec{V} \times \vec{B}) \cdot \vec{j} d\tau = \int_{\tau} \vec{V} \cdot (\vec{B} \times \vec{j}) d\tau = \int_{\tau} \vec{V} \cdot \vec{W} d\tau \quad (1)$$

где је \vec{V} вектор брзине струјања, \vec{B} вектор магнетне индукције, \vec{j} запреминска густина „виртуелне“ струје (придев виртуелна се користи да би се ова струја раздвојила од струја унутар самог уређаја), $\vec{W} = \vec{B} \times \vec{j}$ је тежински вектор а τ је контролна (мерна) запремина, односно запремина тока која доприноси генерисању излазног сигнала.

¹ Постоје и сонде које могу да измере комплетан профил брзина, али су непримерене за редовну и масовну употребу због високе цене.



Слика 1. Радни принцип цевних и равних ЕМ сензора

У системима под притиском се углавном користе тзв. цевни ЕМ сензори, где контролна запремина τ (најчешће) обухвата цео протицајни пресек (слика 1 лево). Са друге стране, у канализационим системима се користе папучасте конструкције које се причврсте за дно или зид проводника, где τ обухвата само део протицајног пресека (слика 1 средина).

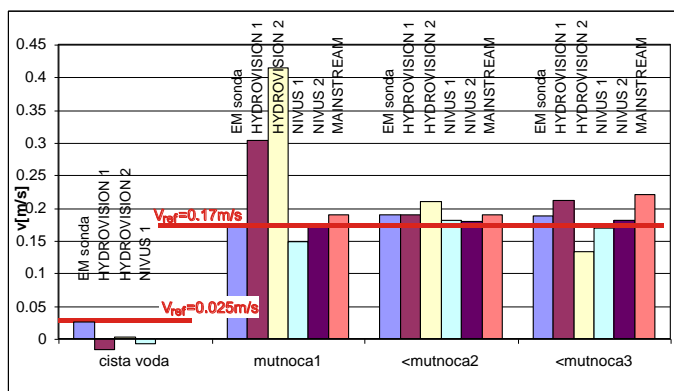


Слика 2. Пример равног ЕМ сензора за мерење брзине и дубине, са преносним логером

Равни ЕМ сензори, домаћег произвођача Свет инструмената (слика 2) представљају пример ЕМ сензора папучасте конструкције. Досадашња истраживања [1, 4, 15] су показала да равни ЕМ сензори поседују одређене предности у односу на АДВ сензоре, као што су капацитет за рад како при малим

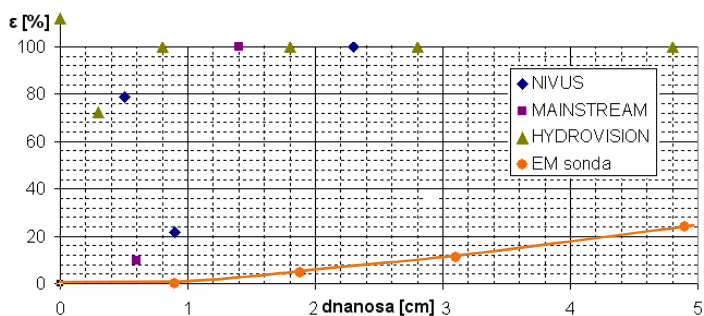
брзинама (слика 3) и дубинама тако и у условима седиментације порозног наноса преко кућишта сензора (слика 4).

Са слике 3 се види да равна ЕМ сонда без проблема мери јако мале брзине воде, као и воде са различитим степеном мутноће. Коришћене АДВ сонде практично нису могле да мере брзине испод 10 cm/s а и показивање им је при брзини од 17 cm/s значајно зависило од степена мутноће воде (присуства лебдећег наноса).



Слика 3. Пример утицаја чистоће воде (отицај са и без кише) и малих брзина на рад равне ЕМ сонде и 5 различитих АДВ палуца

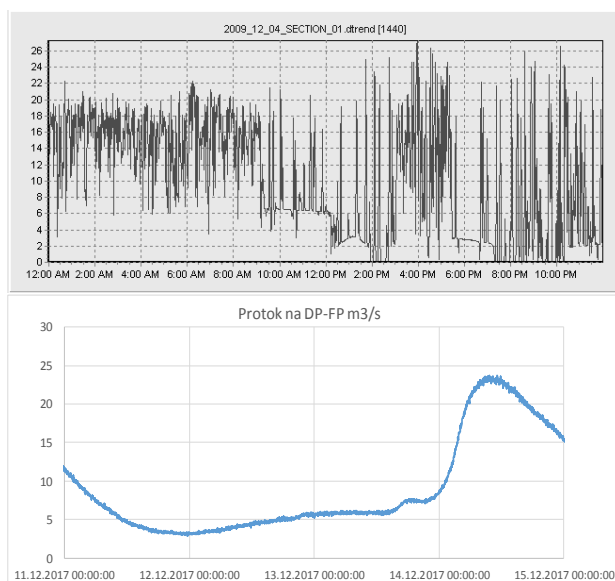
На слици 4 су дати резултати теста рада 3 АДВ сонде и равне ЕМ сонде у условима постојања наноса различите дебљине.



Слика 4. Резултати прелиминарног испитивања рада АДВ и ЕМ сензора под покривком од порозног наноса

Поред дијаграма на слици 4 је дата и фотографија једне од АДВ сонди (NIVUS) у стандардним радним условима, када нанос прекрије УЗВ примопредајник. У лабораторијском тесту је коришћен ситнозрни песак као порозни нанос. У зависности од произвођача АДВ папуче, сви испитани модели су престали да раде када је дебелина наноса достигла 0,9 cm (грешка у мерењу од 100%) док равна ЕМ сонда се „успешно“ и приближно „линеарно“ борила са наносом до дебљине од 5 cm. У наставку текста су дати резултати детаљнијег испитивања рада равне ЕМ сонде под наносом као и приказ добијене тачности рада након обављене корекције која зависи од висине наноса.

Поред робусности равних ЕМ сонди за рад у условима малих брзина и „прљавих“ вода, на слици 5 је јасно приказана и „интегративна“ особина ЕМ принципа рада, која омогућава стабилан и миран рад у свим условима. На истој локацији (излаз из тунела Фатничко поље – језеро Билећа) је био постављен УЗВ мерач са 4 паралелна трага. Ако се погледа сирови, нефилтрирани сигнал, податак о протоку јако флукутира (скала за проток је 0-30 m³/s). За исти распон протока, када су на излазу из тунела уграђене 4 равне ЕМ сонде, добијен је знатно квалитетнији сирови сигнал (десна страна слике 5 – водити рачуна да су у датом примеру су приказани различити догађаји: са леве стране је из децембра 2009-те а са десне стране из децембра 2017-те).



Слика 5. Сирови нефилтрирани сигнал ултразвучног мерења протока са 4 трага (децембар 2009, 1 дан мерења) и мерења на истој локацији помоћу 4 равна ЕМ сензора (децембар 2017, 4 дана мерења)

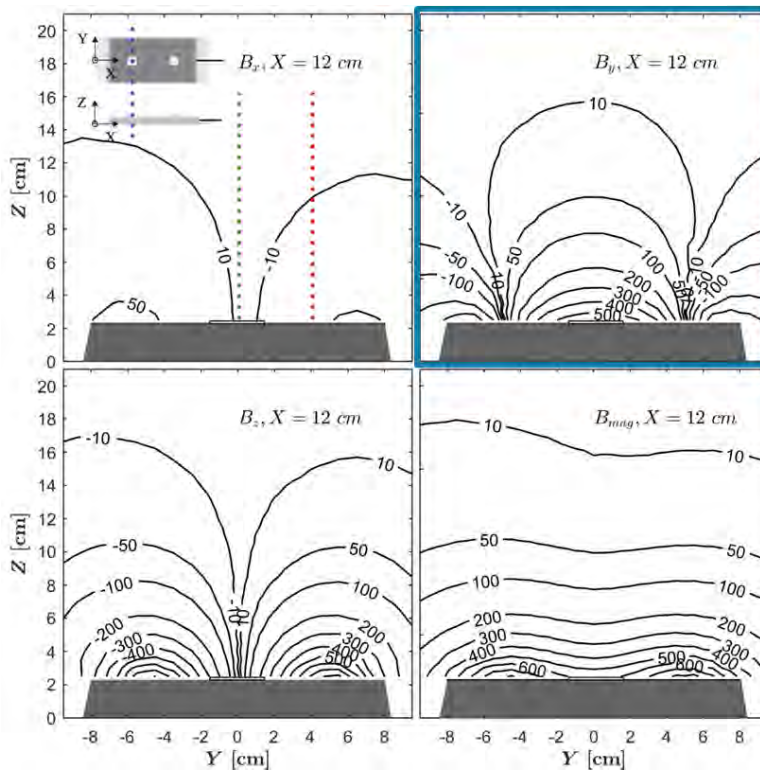
3. Испитивања ЕМ равних сонди

Како би се детаљно испитале радне карактеристике равних ЕМ сензора у добро контролисаним условима, као и могућност унапређења поузданости

мерења протока помоћу ових уређаја, спроведена је серија експеримената [1] у хидрауличкој лабораторији Грађевинског факултета, Универзитета у Београду. У овом раду анализирани су резултати мапирања магнетног поља сензора, која су спроведена у циљу испитивања радног принципа сензора, као и експериментални резултати рада у условима седиментације порозног наноса преко кућишта сензора. Такође, у овом поглављу је размотрена и примена CFD, нумеричких симулација просторног турбулентног течења са циљем унапређења поузданости мерења протока.

4. Снимање магнетног поља

У кућишту равних ЕМ сензора су уграђени калемови кроз које се пропушта импулсна, биполарна побудна струја са двојном фреквенцијом, тако да је и индуковано магнетно поље импулсно, као и индуковани напон на мерним електродама U_m . Измерени напон на електродама сензора је пропорционалан интегралу брзине течења течности кроз магнетно поље сензора, односно једнак је запреминском интегралу три векторска поља: магнетног \vec{B} , густине струје \vec{j} и брзина \vec{V} (1).



Слика 6. Контурне линије магнетног поља \vec{B} и магнитуде за FLAT DC-2 ЕМ сензор унутар мерног канала (у горњем левом углу је дат координатни систем и тачкастом линијом пресек $X = 12 \text{ cm}$)

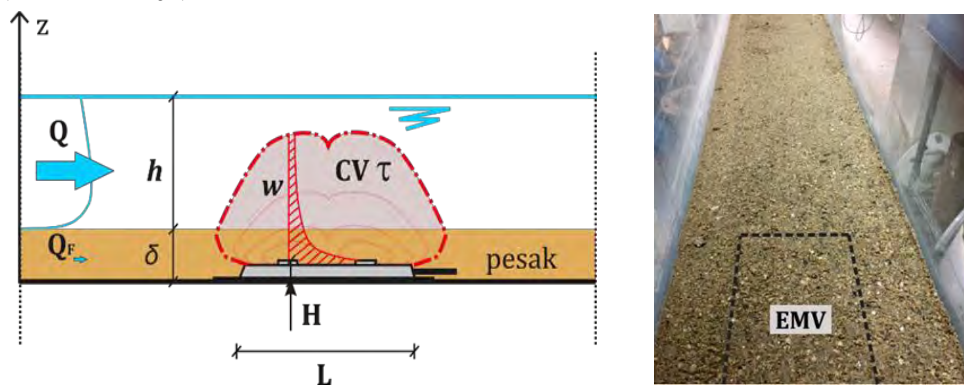
Магнетно поље \vec{B} је карактеристика одређеног модела ЕМ сензора и у општем случају не зависи од мерног места нити од хидрауличких услова. Доминантни технички параметри ЕМ сензора који директно утичу на генерисани излазни напон (једначина 1) су контролна запремина сензора τ (слика 1 средина, слика 7 лево) која је у директној вези са распоредом магнетног поља \vec{B} и тежински вектор \vec{W} који је по дефиницији одређен магнетним пољем \vec{B} .

Распоред магнетног поља \vec{B} за FLAT DC-2 модел равног ЕМ сензора је мапиран уз помоћ калибрисаног магнетометра, чији се принцип рада заснива на Халовом ефекту. На слици 6. су приказани резултати мапирања за попречни пресек сензора кроз узводну електроду.

За генерисање излазног сигнала кључна је компонента B_y вектора магнетне индукције (према правилу десне руке које описује Фарадејев закон индукције, слика 1). На основу снимљеног распореда може се уочити да реална контролна запремина испитиваног сензора τ обухвата удаљења до 16 cm од сонде.

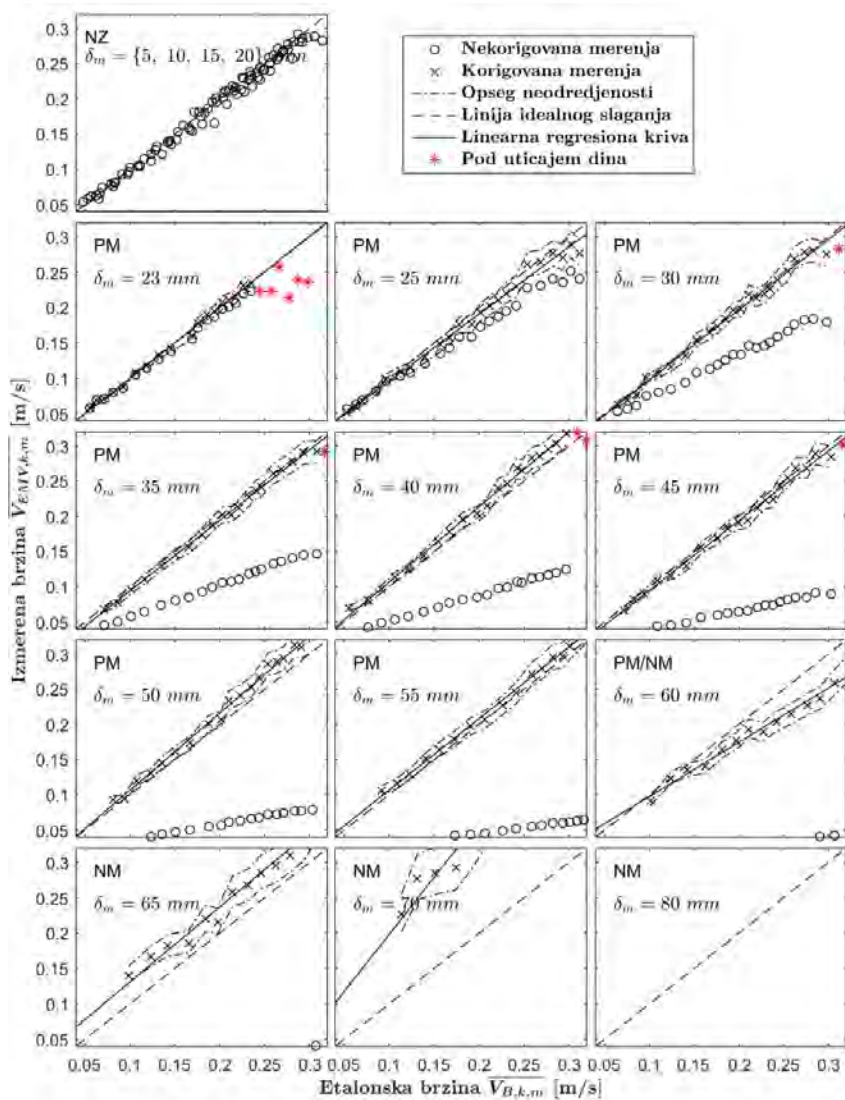
5. Рад под наносом

Раније је констатовано да у случају папучастих АДВ сензора, појава седимента дубине од свега пар mm, доводи до потпуног губитка сигнала. Са друге стране, у случају равних ЕМ сензора наноси од пар cm утичу на постепено слабљење сигнала, али не и до потпуног губитка. Како би се детаљније испитала могућност рада ЕМ уређаја под наносом порозног седимента, обављена су испитивања у контролисаним лабораторијским условима користећи речни песак (слика 7). Употреба речног песка је оправдана будући да су [23] уочили да је већина седимента у кишним канализацијама (и нешто мање у комбинованим канализационим системима) неорганског порекла и растресита (нема кохезије).



Слика 7. Схематски приказ испитивања капацитета FLAT DC-2 ЕМ сензора за рад под порозним наносом (лево), Фотографија са лабораторијског испитивања (десно).

На слици 7 је приказан са леве стране подужни пресек кроз канал и равну ЕМ сонду. Преко сонде се налази песак, који у потпуности прекрива мерне електроде. Са плавом линијом је представљен распоред долазних брзина, а са црвено линијом распоред магнетног поља и контролна мерна запремина. Резултат мерења равне ЕМ сонде је производ два поља, који очигледно зависи од дебљине наноса. Са десне стране слике 7 је дата фотографија канала у фази испитивања: сонда се не види па је њено присуство назначено испрекиданом линијом.



Слика 8. Резултати испитивања капацитета FLAT DC-2 ЕМ сензора за рад под порозним наносом пре и након примене линеарног регресионог модела корекционих функција.

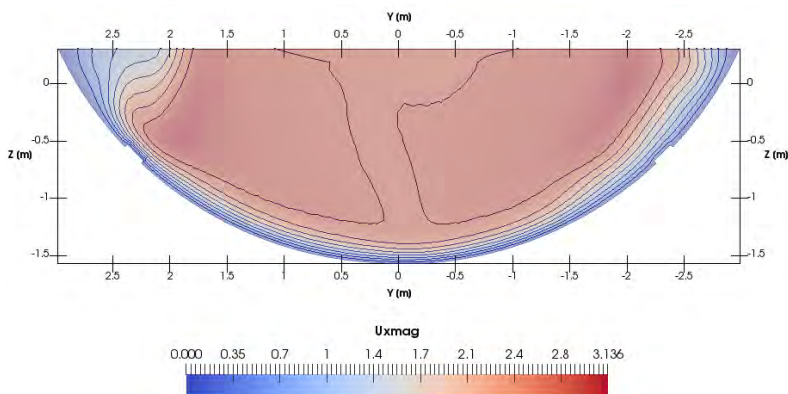
На слици 8 су дати резултати испитивања сонде FLAT DC-2 EM под порозним наносом. Кружићима су дата сирова, некоригована мерења. Према очекивању, са порастом дебљине наноса, излазни сигнал постепено слаби.

Анализом добијених резултата, констатовано је да је слабљење излазног сигнала U_m директно пропорционално дубини седимента δ . На основу тих резултата, предложена је процедура за дефинисање линеарног регресионог модела корекционих функција, помоћу којих је могуће кориговати излазни сигнал на основу измерене дубине седимента δ [1, 5]. Резултати добијени након примене линеарног регресионог модела за различите дубине седимента δ , су приказани на слици 8 кристићима.

7. Примена CFD

Највећи простор за унапређење поузданости мерења протока се налази у аспекту дефинисања одговарајуће корелационе функције којом се измерена брзина V_{mer} доводи у везу са средњом профилском брзином V . Како би се омогућило дефинисање поуздане корелације $V_{mer} - V$, у случају примене равнoг EM сензора је разматрана могућност употребе поступка локалне калибрације. Локална калибрација подразумева корекцију излазног сигнала на основу симулирања одзива сензора, у овом случају равних EM сензора, коришћењем математичког модела сензора и познатог распореда брзина у његовој контролној запремини τ [3, 4].

Као посебан алат за дефинисање распореда брзина у контролној запремини сензора могу се користити нумеричке симулације просторног турбулентног течења, CFD (Computation Fluid Dynamics). Карактеристично за примену овог алата је спора припрема рачунске мреже и велико рачунарско оптерећење. Са друге стране кључна предност се огледа у томе што се на овај начин, у случају адекватно спроведених симулација, могу добити хидраулички подаци са високом просторном и временском резолуцијом.



Слика 9. Распоред подужне компоненте вектора брзине на мерном месту у тунелу Фатничко поље – Билећка акумулација за проток од $Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$ добијен применом нумеричких симулација просторног турбулентног течења

Пример резултата примена нумеричких симулација на изведеном мерном месту у оквиру система „Хидроелектране на Требишњици – Горњи хоризонти“ је приказан на слици 9. Коришћен је CFD програм отвореног кода OpenFOAM. За прорачун је формирана мрежа од преко 5 милиона елемената, а прорачун је трајао око 4 сата на систему са максимум 100 процесора.

8. Примери из праксе

У наставку се даје неколико примера примене равних ЕМ сонди, у канализацији већег попречног пресека и под успором, у тунелу великог пресека са мешовитим течењем (са отвореним током и под притиском) и са појавом повратног тока, као и у канализацији под притиском, низводно од црпне станице.

9. Мерење протока на изливу код Панчевачког моста, БВК

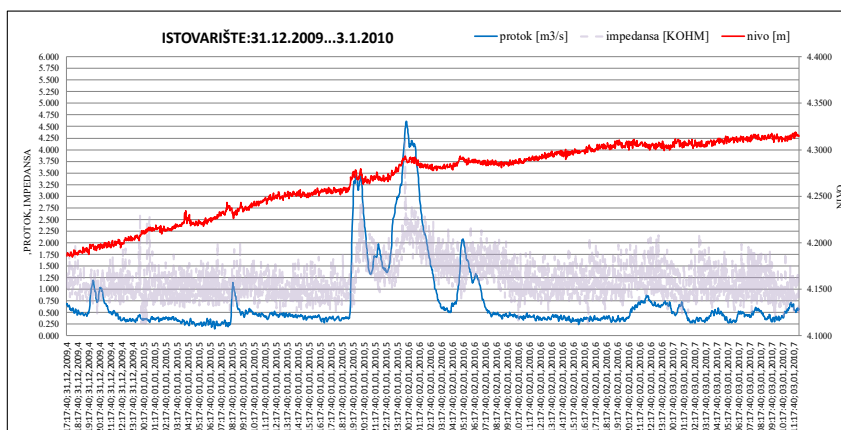
Београдска канализација је у току 2006-2007. опремила 8 значајнијих комбинованих излива у Саву и Дунав са опремом за мерење протока [18]. Коришћене су АДВ папуче фирме Mainstream, монтиране или при дну у колекторима мањих пречника или на површини воде преко савитљивих пливајући F150 цеви, као на пример на локацији излива код Панчевачког моста (пресек колектора 300x450 см, носач сонде се види на слици 10, доле средина).



Слика 10. Локација излива код Панчевачког моста (Истовариште) са АДВ мерачем протока

На локацији излива код Панчевачког моста добијени подаци након уградње АДВ папуче углавном нису били поуздани, јер је мерно место под великим успором од Дунава, па се често јављају јако мале брзине. Поред утицаја Дунава, на мерења утиче и рад низводне локалне фабрике бетона која ту већ годинама испира своје мешалице за бетон и због тога постепено подиже коту дна на изливу.

У оквиру научног пројекта ТР-22013 постављене су две равне ЕМ сонде на пресеку узводно од места где је постављен носач АДВ папуче. ЕМ сонде су фиксиране на зид на различитим висинама, како би се покрио шири опсег протока и дубина.



Слика 11. Резултати мерења протока, нивоа и импедансе на Истоваришту помоћу равних ЕМ сонди

На слици 11. је приказан један снимљени кишни догађај. На слици се види и континуални пораст коте Дунава која подиже мерену дубину током приказаних три дана.

Са слике се може видети да сонде лепо мере при јако малим брзинама (при ноћном базном протоку брзине су биле око 1-2 cm/s а проток око 0,2 m³/s) као и у периоду падавина када је проток био око 4,7 m³/s. С обзиром на метод рада, сонда може истовремено да мери и отпорност између електрода (реципрочно од електропроводљивости) тако да се лепо види наилазак чистије воде током падавина.

10. Мерење протока у тунелу Дабарско поље – Фатничко поље

Деривациони тунел који спаја Дабарско и Фатничко поље је део великог система ХЕТ у Републици Српској, БиХ. Тунел омогућава превођење воде из Дабарског Поља у Фатничко и даље ка Билећкој акумулацији у периодима великих вода. Дужина тунела је 3250 m у самом тунелу смењују се наизменично обложени (пречник 5,0 m) и необложени делови (пречник 5,6 m) а просечан пад тунела је 1 % од Дабарског ка Фатничком пољу.

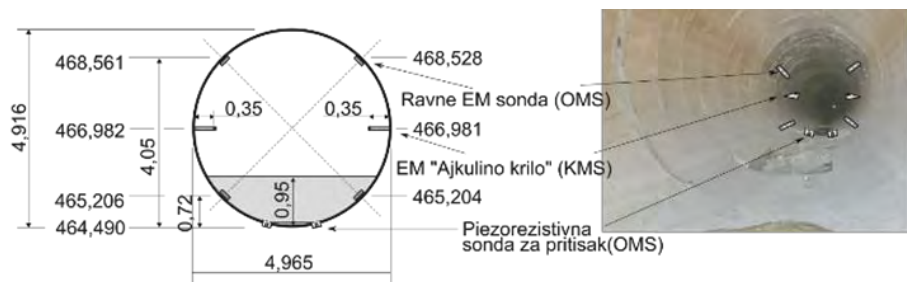
У већини случајева вода тече у правцу Фатничког поља али у појединим ситуацијама се јавља течење и у супротном смеру. Течење са слободном површином (односно комбиновани услови течења) се могу јавити искључиво у случају течења ка Фатничком пољу док се у обрнутом смеру јавља течење под притиском [7].



Поглед према Дабарском пољу



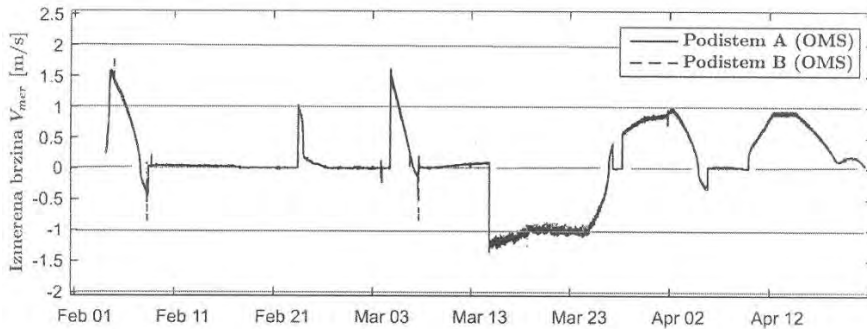
Детаљи ЕМ сонди



Слика 12. Мерно место на излазу тунела Дабарско поље – Фатничко поље

У мерном профилу (слика 12) су постављене 4 равне ЕМ сонде, свака димензија 800x380 mm. Као контролне сонде, постављене су и две ЕМ сонде специјалне конструкције, облика „ајкулиног крила“ ширине 700 mm и дубине продирања (висине) 300 mm, са малом интеграционом зоном (тачкасто мерење).

Фабричка калибрационе крива, која се добија у хомогеном струјном пољу на мерном каналу са колицима, је прерачуната на стварну локацију, док су подаци о облику струјног поља у различитим режимима течења добијени CFD анализом. На слици 13 су дате измерене брзине одвојено за две сонде са леве стране тунела (подсистем А) и са десне стране (подсистем Б).



Слика 13. Измерене брзине током 2018-те године (позитивне су ка Фатничком пољу)

Користећи податке приказане на слици 13, као и одвојено податке са две сонде „ајкулина крила“ (нису овде приказани), обављена је локална рекалибрација. Иначе, са датог дијаграма се види период када тунел ради са максималним протоком (брзина око +1,55 m/s) као и негативан проток (брзине од -1,2 па до 1,0 m/s).

11. Мерење протока на КЦС Земун Поље, Београд

Канализациона црпна станица Земун Поље је у разматраном периоду (2010-га) имала четири пумпе (2x210 L/s и 2x300 L/s) и два потисна цевовода пречника по 500 mm (предвиђено је прављење нове КЦС на истој локацији). Научним пројектом ТР-22013 је било предвиђено опремање постојеће КЦС на потисним цевоводима мерилима протока.



Слика 14. Кружна равна ЕМ сонда и снимљене брзине на једном од два цевовода (осредњене брзине са леве и десне сонде)

Како није било згодне локације за уградњу класичних ЕМ или УЗВ мерила, постављене су равне кружне ЕМ сонде, пречника 100 mm такве конструкције да омогућавају лаку монтажу/демонтажу на постојећем цевоводу (слика 14, горњи десни угао). Претходно, пре уградње, обављено је снимање реалног профила брзина на оба цевовода, са обе стране, чиме су добијени потребни калибрациони подаци.

Постављањем мерила протока на потису, добијени су вредни подаци о режиму рада постојећих црпки, као и о стању повратне клапне на усису. Наиме, уочено је да повремено клапне не затворе кроз усис, те да се догађа да се вода из једног цевовода враћа кроз други цевовод поново у црпни базен (види се као негативне брзине у другом делу дијаграма на слици 12).

12. Закључак

Мерење протока у отвореним токовима, као што је течење у канализацији, представља још увек изазов. Не постоји једна најскупља/најбоља метода коју корисник може да купи и без много разумевања процеса (хидрауличких услова и радних услова) добије сигуран податак о протоку. Уместо тога, неопходно је добро познавати услове и сходно њима изабрати оптималну методу. У овом раду је приказана једна од могућности за мерење протока у канализацији, равна електромагнетна (ЕМ) сонда.

Мерна метода је базирана на познатој методи рада електромагнетних мерача протока у цевима под притиском. Равне ЕМ сонде су робусне, омогућавају поуздано мерење у свим условима рада у канализацији, при чему могу да мере изузетно мале брзине (и до пар mm/s) као и велике брзине (стандардно до 5 m/s), могу да раде са јако малим дубинама (од 1 cm па на више) а и отпорне су на нанос и прљавштину која се може на њима наталожити. Посебна предност код мерења у већим профилима је што је могуће више равних ЕМ сонди повезати на један давач, где ће саме сонде обавити просторну интеграцију унутар својих мерних домена, а цена целог система остаје релативно мала.

У раду су дати резултати детаљних испитивања сонди спроведених на Грађевинском факултету: снимања магнетног поља ради дефинисања контролне запремине и тежинског вектора који одређују калибрацију сонде у реалним радним условима, рад равних ЕМ сонди под наносом и методологија за корекцију мерења у таквим условима, као и методологија примене CFD анализе за предикцију струјне слике у реалној протицајној геометрији и анализу њеног утицаја на измерени проток. Такође, у раду су дати и примери употребе равних ЕМ сонди на неколико система. У свим примерима су коришћена равна ЕМ сонде фирме Свет инструмената (СИ).

13. Захвалност

Аутори се захваљују Министарству просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије на подршци у реализацији пројекта TR37010 под називом:

„Системи за одвођење кишних вода као део урбане и саобраћајне инфраструктуре“, чији је саставни део било истраживање у проблематици описаној у овом раду.

14. Литература

- [1] Иветић Д, Одређивање протока течности у сложеним условима струјања применом равних електромагнетних сензора. Докторска дисертација, Грађевински факултет Универзитета у Београду, 2019.
- [2] Ivetić, D, Prodanović D. and Stojadinović, L, *Bed-mounted Electro Magnetic meters: Implications for robust velocity measurement in Urban Drainage Systems*. Journal of Hydrology, 566(11), pp.455-469, 2018.
- [3] El Bahlouli, A. and Larrarte, F, *Proposal for improving discharge quantification in urban drainage*. Flow Measurement and Instrumentation, 60, pp.51-56, 2018.
- [4] Иветић Д, Д. Продановић, Л. Стојадиновић, *Лабораторијско одређивање мерне неодређености равних ЕМ сензора*. Зборник радова 18. саветовања СДХИ и СДХ, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Ниш, стране: -. 2018.
- [5] Ivetić D, D. Prodanović, L. Stojadinović, *Electro-Magnetic Velocity meters: Assessment of the (Missing) Technical Parameters*. New Trends in Urban Drainage Modelling. UDM 2018. Green Energy and Technology, Springer, Cham. Edited by Giorgio Mannina, pages: 638-643. DOI: 10.1007/978-3-319-99867-1_110, 2018.
- [6] Стојадиновић Л, Д. Иветић, Д. Продановић, *Лабораторијско испитивање магнетног поља равних електромагнетних сензора*. Зборник радова 18. саветовања СДХИ и СДХ, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Ниш, стране: -, 2018.
- [7] Иветић Д, Д. Продановић, М. Цвитковац, *Мерење протока воде у тунелима при комбинованим условима течења: пример тунела Дабарско поље - Фатничко поље*. Водопривреда, година: 50/4-6, број: 294-296, стране: 229-244, 2018.
- [8] Иветић Д, Д. Продановић, Л. Стојадиновић, М. Цвитковац, *Унапређење методологије мерења протока помоћу равних електромагнетних сензора брзине*. Водопривреда, година: 49/1-3, број: 285-287, стране: 93-102, 2017.
- [9] Ivetić D, D. Prodanović, M. Cvitkovic, *Improved flow measurement using EM flat probes in mixed flow conditions*, 14th IWA/IAHR International conference on Urban Drainage (ICUD), Prague, Czech Republic. Published by IWA/IAHR, pages: 1734-1737, 2017.
- [10] Ivetić D, D. Prodanović, M. Cvitkovic, *Improvement of EM flow meter's accuracy through site-specific CFD calibration – case study HPS Trebinje*, 9th Eastern European Young Water Professionals Conference, Budapest, organized by IWA, 2017.
- [11] Aguilar M. F, McDonald W. M, and Dymond R. L, *Benchmarking laboratory observation uncertainty for in-pipe storm sewer discharge measurements*. Journal of Hydrology, 534, pp.73-86, 2016.

- [12] Иветић Д, Ј. Ђорђевић, Д. Продановић, *Аспекти мерења брзине воде акустичном Dopler анемометријом*. Водопривреда, година 48, број: 282-284, стране: 181-190, 2016.
- [13] Јауковић А, Д. Бићанић, Д. Продановић, Р. Крстић, *Stalna merenja na izlivima Beogradske kanalizacije – naučene lekcije*. 14-ta međunarodna konferencija: Vodovodni i kanalizacioni sistemi, Jahorina, Pale, Republika Srpska, strane: 263-272, 2014.
- [14] Campisano A, Cabot Ple J, Muschalla D, Pleau M. and Vanrolleghem, P. A, *Potential and limitations of modern equipment for real time control of urban wastewater systems*. Urban Water Journal, 10(5), pp.300-311, 2013.
- [15] Продановић Д, А. Дјаčić, Н. Бранисављевић, Ј. Рукавина, *Laboratorijsko poredjenje ultrazvučnih i elektromagnetnih sondi za merenje protoka u kanalizaciji*. Aktualna problematika u vodoopskrbi i odvodnji, Bol, otok Brač, Croatia, strane: 461-471, 2012.
- [16] Дјаčić А, Н. Бранисављевић, Ј. Рукавина, Д. Продановић, А. Јауковић, *Izazovi pri merenju protoka u kanalizaciji mobilnim ultrazvučnim uređajima*. 12-ta međunarodna konferencija: Vodovodni i kanalizacioni sistemi, Jahorina, Pale, Republika Srpska, strane: 236-243, 2012.
- [17] Jeanbourquin D, Sage D, Nguyen L, Schaeli B, Kayal S, Barry D. A, Rossi L, *Flow measurements in sewers based on image analysis: automatic flow velocity algorithm*. Water Science & Technology, 64 (5), 1108-1114, 2011.
- [18] Јауковић А, М. Миајловић, Д. Продановић, Ј. Вукић, Д. Бићанић, *Measurement of waste water quantity and quality at Belgrade sewerage and stormwater system*. Regional Expert Meeting: Regional Rainfall 2010, Beograd. Edited by J. Despotović, pages: 95-102, 2010.
- [19] Свитковач М, Д. Продановић, В. Вучуревић, *Elektromagnetne sonde za merenje protoka otpadnih voda - primer Beogradske Kanalizacije*. 10-ta međunarodna konferencija: Vodovodni i kanalizacioni sistemi, Jahorina, Pale, Republika Srpska, strane: 231-239, 2010.
- [20] Технолошко развојни пројекат ТР-22013, *Развој система за мерење количине и квалитета воде у отвореним токовима базираног на GPRS комуникацији са WEB приступом за потребе надзора и управљања*. Носилац пројекта: Институт Михајло Пупин, финансира Министарство науке и заштите животне средине, 2008-2009.
- [21] Larrarte F, Bardiaux J. B, Battaglia P. and Joannis C, *Acoustic Doppler flow-meters: a proposal to characterize their technical parameters*. Flow Measurement and Instrumentation, 19(5), pp.261-267, 2008.
- [22] McIntyre N. and Marshall M, *Field verification of bed-mounted ADV meters*. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management, Vol. 161, No. 4, pp. 199-206. ICE Publishing, 2008.
- [23] Butler D, May R. and Ackers J, *Self-cleansing sewer design based on sediment transport principles*. Journal of Hydraulic Engineering. 129(12), 276-282, 2003.
- [24] Godley A, *Flow measurement in partially filled closed conduits*. Flow Measurement and Instrumentation, 13(5-6), 197-201, 2002.

- [25] Maheepala U. K, Takyi A. K. and Perera, B. J. C, *Hydrological data monitoring for urban stormwater drainage systems*. Journal of Hydrology, 245(1-4), pp.32-47, 2001.
- [26] Harremoës P, Capodaglio A. G, Hellström B. G, Henze M, Jensen K. N, Lynggaard-Jensen A, Otterpohl, R. and Søeberg, H. *Wastewater treatment plants under transient loading-Performance, modelling and control*. Water Science and Technology, 27(12), p.71, 1993.
- [27] Bevir M. K. *The theory of induced voltage electromagnetic flowmeters*. Journal of Fluid Mechanics, 43(3), pp.577-590, 1970.
- [28] OpenFOAM: <https://openfoam.org> (датум последње посете: 11.09.2019.)
- [29] СИ, Свет Инструмената: <http://www.si.co.rs/index.html> (датум последње посете: 11.09.2019.)