

Универзитет у Београду - Грађевински факултет  
Одсек за хидротехнику и водно-еколошко инжењерство



## МАСТЕР РАД

**ТЕМА:**

**Анализа рада равних електромагнетних сензора брзине**

**Кандидат:**  
Лука Стојадиновић 540/16

**Ментор:**  
Проф. др Душан Продановић

Београд, 2017.

## ПРЕДГОВОР

Овај рад је настао у склопу истраживања при изради докторске дисертације под насловом: „Одређивање протока течности у сложеним условима струјања применом равних електромагнетних сензора“ Дамјана Иветића, асистента студента докторских студија Грађевинског факултета Универзитета у Београду. У раду ће бити приказани прелиминарни резултати једног дела мерења изведених у оквиру истраживања поменуте докторске дисертације као и анализа и дискусија резултата.

Аутор се овом приликом захваљује Дамјану Иветићу на несебичној помоћи, подршци и пријатној сарадњи током израде овог рада. Аутор се захваљује свом ментору, професору Душану Продановићу, на чијим предавањима је заволео област мерења у хидротехници. Такође, аутор дугује захвалност Ивору Кокотовићу, техничару у лабораторији Института за Хидротехнику, на великој помоћи при решавању разних техничких потешкоћа.

Аутор се такође захваљује фирми „Свет инструмената“ за уступљену опрему.

---

<b>1. УВОД</b> .....	<b>4</b>
<b>2. ПРЕГЛЕД САЗНАЊА ИЗ ОБЛАСТИ ИСТРАЖИВАЊА</b> .....	<b>6</b>
2.1. Мерење протока.....	6
2.2. Електромагнетни сензори за мерење брзине .....	8
<b>3. МЕТОДОЛОГИЈА</b> .....	<b>10</b>
3.1. Опис лабораторијске опреме .....	10
3.1.1. Равни електромагнетни сензор за мерење брзине.....	10
3.1.2. Сензор за мерење електромагнетног поља (магнетометар) .....	12
3.2. Лабораторијска инсталација.....	15
3.2.1. Опис лабораторијске процедуре за мерење електромагнетног поља ван хидрауличког канала .....	18
3.2.2. Опис лабораторијске процедуре за мерење електромагнетног поља у хидрауличком каналу .....	20
3.2.3. Опис лабораторијске процедуре за мерење равним ЕМ сензором са промењивом висином наноса .....	22
3.3. Обрада резултата .....	24
3.3.1. Обрада резултата мерења електромагнетног поља у тачки .....	24
3.3.2. Обрада резултата мерења електромагнетног поља у простору .....	26
3.3.3. Обрада резултата мерења равним ЕМ сензором .....	27
3.4. Анализа покретања наноса .....	28
3.5. Калибрација равног ЕМ сензора за мерење брзине .....	30
<b>4. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА</b> .....	<b>32</b>
4.1. Резултати мерења електромагнетног поља.....	32
4.1.1. Електромагнетно поље ван хидрауличког канала.....	32
4.1.2. Електромагнетно поље у хидрауличком каналу .....	35
4.1.3. Утицај феромагнетних објекта на електромагнетно поље.....	41
4.1.4. Утицај воде на електромагнетно поље.....	42
4.2. Резултати мерења у хидрауличком каналу .....	43

4.2.1. Резултати мерења хидрауличких величина .....	43
4.2.2. Резултати мерења излазних сигнала равног ЕМ сензора .....	45
4.3. Резултати анализе покретања наноса .....	46
4.4. Резултати калибрације равног ЕМ сензора за мерење брзине .....	47
<b>5. ЗАКЉУЧАК .....</b>	<b>53</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>55</b>
<b>ДОДАТАК 1 .....</b>	<b>57</b>
Објашњење рада неуралних мрежа.....	57

## 1. УВОД

Проток је једна од најбитнијих величина у хидротехници. Један од честих циљева пројектанта је да анализама и нумеричким методама што боље предвиди проток, један од циљева већине хидротехничких система је да проток на неки начин контролишу. Међутим, да би се хидротехничке дисциплине развијале и биле успешније у предвиђању протока и да би хидротехнички системи радили квалитетније, потребно је знати проток у реалном времену на реалним системима (природним или вештачким). Поред тога што је проток тешко предвидети, проток је исто тако тешко и измерити.

Сврха овог рада је испитивање равног електромагнетног сензора за мерење брзине домаћег произвођача „Свет инструмената“, пројектованог првенствено за рад у канализационим инфраструктурним системима. Иако поменути сензор мери брзине, сврха његове употребе је посредно мерење протока (под претпоставком да уређај мери средњу профилску брзину).

Основни принцип рада равног ЕМ сензора је следећи: сензор својим калемовима прави електромагнетно поље у води, а с обзиром да је вода проводник, проласком воде кроз електромагнетно поље индукује се напон (Цвитковац, Продановић, 2008 - Фарадејев закон индукције). Напон који се на овакав начин идукује пропорционалан је брзини воде. Сензор мери овај напон, и правилном калибрацијом се ова величина трансформише у средњу брзину у профилу. Независним мерењем дубине воде преко које је позната површина попречног пресека, долази се до протока, као главног циља мерења.

Из описаног принципа рада, јасно је да две величине имају кључни утицај на величину напона који ће се индуковати:

- Облик и јачина електромагнетног поља које прави сензор
- Поље брзина воде

Уколико се ова два поља на правилан начин доведу у зависност са излазним напоном сензора, за мерна места у условима реалног коришћења могуће је извршити калибрацију сензора компјутерским моделовањем поља брзина. Наравно, постоје и друге величине које имају утицај на јачину напона као што је на пример електропроводљивост воде – међутим усваја се претпоставка о хомогености електропроводности (Bevir, 1970).

У оквиру истраживања која су пратила израду овог рада испитани су разни аспекти електромагнетног поља које прави равни ЕМ сензор. У раду је приказана успостављена методологија и резултати мерења електромагнетног поља. Проверен је утицај проводног флуида као и феромагнетних објеката на облик и интензитет магнетног поља. Такође, у оквиру додатка раду, дати су основни принципи за коришћење хеуристичког алгоритма неуралних мрежа за обраду измерених вектора магнетног поља. Показано је да алгоритам неуралних мрежа, уз правилно постављање класификационог проблема, може ефикасно

обрадити измерени сигнал. Приказаће се кориснички интерфејс за употребу магнетометра, чија је улога олакшање ових мерења. Резултати мерења користиће се у даљим анализама (ван овог Мастер рада) на горе описан начин.

С обзиром да је сензор који се испитује у овом раду намењен првенствено за рад у канализацији, у испитивању рада равног ЕМ сензора потребно је симулирати реалне појаве који се могу десити при коришћењу. Једна од тих појава је засипање сензора наносом. У раду је приказана методологија и резултати анализе рада равног ЕМ сензора при различитим висинама пешчаног наноса (седимента). Ови резултати су искоришћени за процену могућности рада уређаја у реалним условима, као и за накнадну корекцију сигнала добијеног приликом рада. На основу добијених резултата, утврдиће се зависност средње профилске брзине од напона и дебљине слоја наноса. Показаће се да индуковани напона за фиксирану средњу профилску брзину, опада са повећањем висина пешчаног седимента.

## 2. ПРЕГЛЕД САЗНАЊА ИЗ ОБЛАСТИ ИСТРАЖИВАЊА

### 2.1. Мерење протока

Мерење хидрауличких величина у реалном времену је један од предуслова за ефикасно и правилно управљање било ког хидротехничког система (Schutze et al., 2002). Једна од најбитнијих хидрауличких величина је проток, међутим, проток је величина коју је управо најтеже измерити са задовољавајуће ниском неодређеношћу (Jeanbourquin et al., 2012). Ово је посебно изражено у канализационим системима, јер у се у њима налази на низ проблема који ометају правилан рад уређаја.

Не постоји универзални уређај чија је мерна метода прилагођена свим мерним местима, већ се за сваку ситуацију морају размотрити одређени услови при избору адекватне мерне методе. Неки од ових услова су (Godley, 2002):

- Хидраулички услови
- Карактеристике флуида
- Физичке карактеристике проводника
- Здравствени услови

Хидраулички услови у канализационим системима су често екстремни и врло неповољни са аспекта мерења протока. Однос минималног и максималног протока који је потребно мерити може бити и до 1:1000 (Hager, 2010), док је честа појава комбинованих услова течења тј. прелазак из течења са слободном површином у течење под притиском (Yen & Pansic, 1980). Одређивање протока у комбинованим условима течења, као и условима течења са слободном површином, се сматра прихватљивим уколико је мерна неодређеност мања од 5%, за разлику од система који су под притиском где је граница постављена ниже, на 1%, будући да је протицајни пресек непроменљив (Baker, 2002).

Карактеристике флуида утичу на избор мерне методе јер одређени уређаји могу радити само у „прљавој“ води (Godley, 2002). Пример су уређаји који раде по принципу Доплеровог ефекта, јер звучни талас чије се фази помак мери нема од чега да се одбије у „чистој“ води (Lohrmann et al., 1994).. Мана уређаја који раде по Доплеровом принципу је њихова осетљивост на таложене наноса на сам уређај па „прљави“ вода у исто време може и негативно да утиче на рад уређаја.

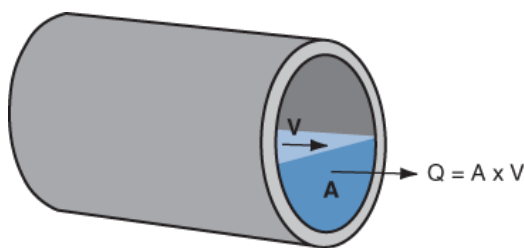
На основу пар наведених примера, може се закључити да избор мерног уређаја захтева озбиљнију хидрауличку анализу мерног места као и познавање принципа рада различитих уређаја. Наравно, уз све ово, увек је присутан и економски фактор на избор мерне опреме.

Проток је у отвореним токовима могуће мерити разним методама, међутим, две групе се посебно издвајају (Michalski, 2000.):

- Хидрауличке методе
- Методе брзина – протицајни пресек

Хидрауличке методе мере проток преко грађевине која мења ниво воде на или близу грађевине. Правилним избором облика и димензија грађевине, добија се једнозначна веза протока и нивоа воде. Иако су ове методе веома поуздане, оне углавном захтевају њихово предвиђање у хидротехничким системима још у фази пројектовања, јер је њихово касније уклапање у систем често веома скупо а неретко и немогуће.

Друга метода је брзина – протицајни пресек. Ова метода се издваја због њене могућности да покрије широк спектар хидротехничких проблема. Суштина ових метода своди се на одвојено мерење дубине, из које је релативно лако прорачунати попречни пресек, и мерење средње профилске брзине. Множењем попречног пресека са средњом брзином добија се проток. Међутим, мерење средње брзине није једноставан задатак (Kouyi et al., 2010).



Слика 2.1: Илустрација методе брзина-протицајни пресек

Најпопуларније технике за мерење брзине су ултразвучне и електромагнетне (Michalski, 2000.). Ултразвучно мерење брзине у отвореним каналима је проверена техника, и међу онима која се најбрже развија. Ово је захваљујући великом напредку технологије последњих година, посебно достигнућима у обради сигнала чиме је ова метода постала поуздана и економски приступачна. Технике које ове методе користе су transit time, методе доплеровог ефекта и крос-корелационе методе (Godley, 2002). Мане ових метода је то што не приказују добар рад у условима великог оптерећења тока наносом и малим брзинама јер долази до седиментације наноса (карактеристично за канализацију Michalski, 2000.). Електромагнетни мерачи протока биће обрађени у наредном поглављу.



Све технике за мерење брзине (укључујући и горе наведене) генерално спадају у једну од три методе (Steinbock et al., 2016):

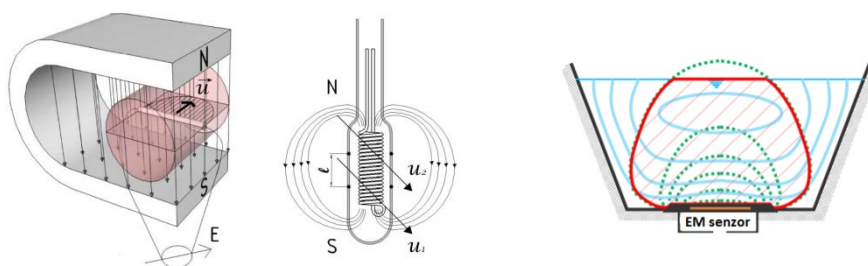
- Интегрална метода – цео протицајни пресек утиче на мерење брзине
- Полу-интегрална метода – део протицајног пресека утиче на мерење брзине
- Мерење брзине у тачки

Конкретан пример за сваку од метода биће приказан на електромагнетним сензорима у наредном поглављу.

## 2.2. Електромагнетни сензори за мерење брзине

Електромагнетни сензори за мерење брзине заснивају се на Фарадејевом принципу магнетне индукције. Основни принцип је следећи: вода која је проводник се креће одређеном брзином кроз електромагнетно поље које прави сензор, па се по Фарадејевом закону индукције, у води индукује струја, а на електродама сензора детектује напон (Shercliff, 1962). Напон који се детектује пропорционалан је брзини воде.

На Слици 2.1. илустроване су различите методе мерења ЕМ сензорима. Лево је приказана интегрална метода. Ова метода се највише корисити у системима под притиском. Суштина ове методе је да је цео попречни пресек цевовода под утицајем електромагнетног поља, тако да комплетно поље брзина утиче на коначну вредност напона. У средини је приказана метода мерења у „тачки“. Интегрална запремина, тј. електромагнетно поље је довољно мало па се мерење може сматрати као мерење у тачки. Десно је приказана полу-интегрална метода. Код ове методе, електромагнетно поље је мање од протицајног пресека. Ова метода је најмање изучена и биће разматрана у овом раду.



Слика 2.1: Илустрација метода мерења ЕМ сензорима. С лева на десно: 1-Интегрална метода  
2-Мерење у „тачки“ 3-Полу-интегрална метода

Напон који се мери се може описати разликом потенцијала на електродама преко једначине (Shercliff, 1962):

$$E = \int_A (\vec{B} \times \vec{j}) \cdot \vec{V} dA \quad (2.1)$$

Где је  $\vec{V}$  – брзина струјања,  $A$ - интеграциона зона ЕМ сензора,  $\vec{B}$  - магнетно поље, а  $\vec{j}$  представља „виртуелну струју“. Виртуелна струја представља густину струје која се успоставља у флуиду проласком јединичне струје из једне електроде у другу (Bevir, 1970). Векторски производ  $\vec{B} \times \vec{j}$  дефинише Бевиров тежински вектор  $\vec{w}$ . Бевир је дефинисао услов „идеалног“ мерача по ком је уређај неосетљив на варијације у распореду брзина уколико је ротор тежинског вектора једнак нули.

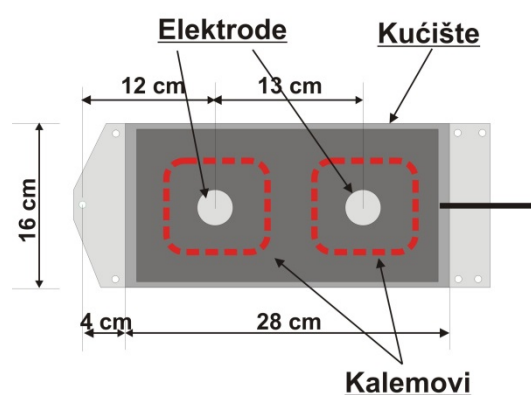
У пракси се уобичајно уместо вектора користе тежинске функције. Известан број истраживача се бавио формулисањем методологија за процену тежинских функција (Иветић, Продановић, Стојадиновић и Цвитковац, 2017.) помоћу Гринове теореме (Smyth, 1971), двоструких Фуријеових редова (Nemp *et al.*, 1986) или аналитичких решења еквивалентних Лапласових једначина (Hu *et al.*, 2009), међутим, ови истраживачи су се искључиво бавили системима под притиском.

### 3. МЕТОДОЛОГИЈА

#### 3.1. Опис лабораторијске опреме

##### 3.1.1. Равни електромагнетни сензор за мерење брзине

За анализу рада равног електромагнетног сензора за мерење брзине (у даљем тексту равни ЕМ сензор) коришћен је сензор произвођача „Свет инструмената“. Основне димензије и елементи сензора дате су на Слици 3.1.

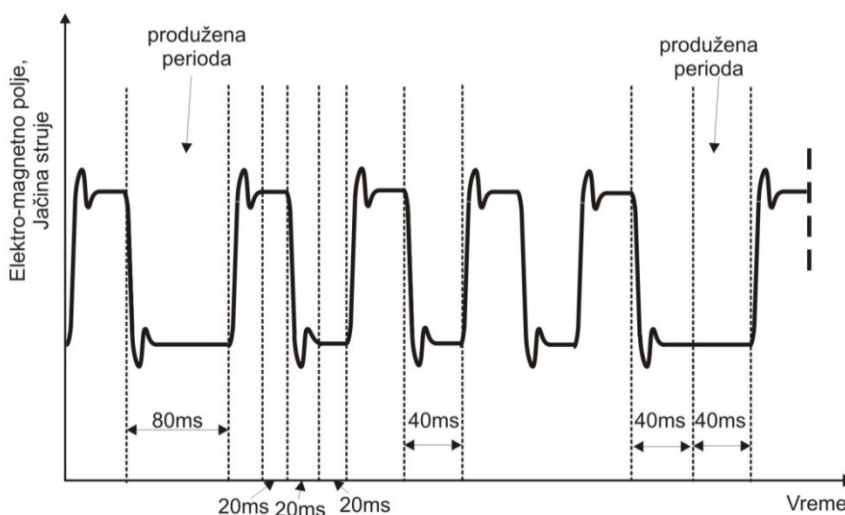


Слика 3.1: Основне димензије и елементи равног ЕМ сензора (калемови се налазе унутар кућишта)

Сензор се састоји од металног кућишта (маса), две електроде и два калема која су намотана у правоугаони облик око предње и задње електроде. Побуда калемова за генерисање електромагнетног поља врши се једносмерном струјом јачине 120 mA (Цвитковац, 2013.). Смер струје мења знак на сваких 40 ms (ефективна фреквенција побуде  $1/(2 \times 0,04) = 12,5$  Hz), са изузетком сваке четврте периоде где је периода продужена на 80 ms (Слика 3.2). Разлог за продужење, односно, промену фреквенције побуде, је смањење могуће грешке алијасинга (случај када се поклопи фреквенција побуде са умношком фреквенције вртлога) као и смањење утицаја промена електро-хемијског потенцијала на показивање сонде. При свакој промени знака, потребно је 20 ms да се магнетно поље у стабилизује (а самим тим и измерен индуковани напон на мерним електродама), па је користан сигнал задњих 20 ms пре нове промене знака (осим код продужене периоде где је користан сигнал 60 ms). Калемови су повезани на побуду на такав начин да је струја на предњем и задњем калему увек супротног знака.

Основни излазни сигнали равног ЕМ сензора који се мере су напони између сваке од две електроде и масе сензора, и импеданса. Мерење се врши помоћу универзалног индустријског мерног инструмента DC2.34. Инструмент врши аналогно/дигиталну

конверзију сигнала (AD конвертер AD7731 Analog Devices<sup>1</sup>) у тренуцима стабилне јачине струје (задњих 20 ms пре промене знака) и као коначну вредност даје осредњени напон две електроде једног циклуса продужене периоде. Инструмент DC2.34 је такође задужен за јачину и облик побуде раног ЕМ сензора, међутим сва мерења су рађена са претходно дефинисаним подешавањима.



Слика 3.2: Побуда равног ЕМ сензора

При мерењима равним ЕМ сензором, записивање резултата вршило се у txt фајлу преко серијске везе са инструментом DC2.34. Инструмент серијском везом прослеђује осредњене податке задњих 4 осредњавања у једном циклусу са продуженом периодом. Вредности које су у свим мерењима записиване су осредњени напон, средња брзина према фабричкој калибрацији и ефективна отпорност (импеданса).

Напајање инструмента DC2.34 врши се једносмерном струјом преко унутрашњег NiMh акумулатора. При свим мерењима, акумулатор је био прикључен на спољни извор (пуњач 12V прикључен на електричну мрежу). У случајевима потпуног пражњења акумулатора између мерења, пре новог мерења акумулатор се пунио 20 min због стабилизације напајања. Напон напајања током мерења се сматра константим (промена мања од 0.5%) тако да ова вредност није записивана.

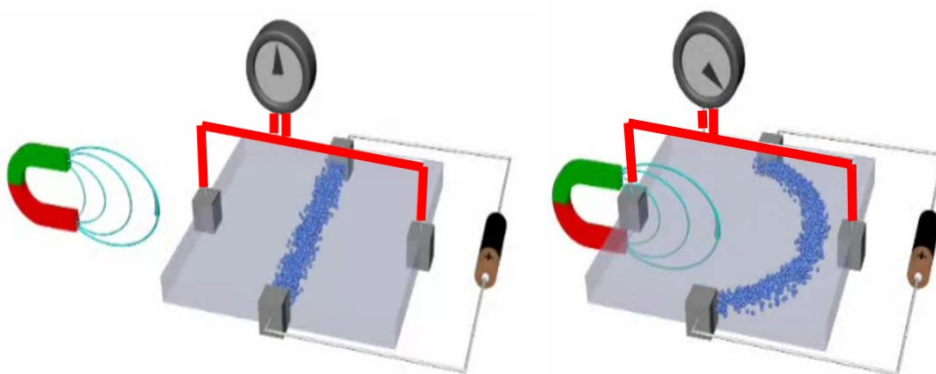
<sup>1</sup>: Low Noise, High Throughput 24-Bit Sigma-Delta ADC, 16 Bits p-p Resolution at 800 Hz Output Rate, Programmable Output Rates up to 6.4 kHz, Programmable Gain Front End, +/-0.0015% Nonlinearity



Слика 3.3 :Инструмент DC 2.34

### 3.1.2. Сензор за мерење електромагнетног поља (магнетометар)

За мерење електромагнетног поља користи се сензор произвођача Melexis ознаке MLX-90363 (у даљем тексту магнетометар) који мери јачину магнетног поља у три ортогонална правца. Мерење магнетног поља заснива се на Халовом принципу, тј. на појави да ток струје кроз широки проводник криви своју праву трајекторију услед присуства магнетног поља. Ово одступање од праве трајекторије може се измерити мерењем напона у правцу управном на ток струје. У случају када проводник није у магнетном пољу, поменути напон је једнак нули, док се у случају скретања струје напон мења сразмерно јачини магнетног поља које делује на проводник и криви ток (Vego, 1985). Ово је илустровано приказано на Слици 3.4.



Слика 3.3 : Илустрација мерења јачине електромагнетног поља Халовим ефектом. Лево: Случај када магнетно поље не утиче на ток струје Десно: случај када магнетно поље криви ток струје (screenshot [www.youtube.com](http://www.youtube.com))

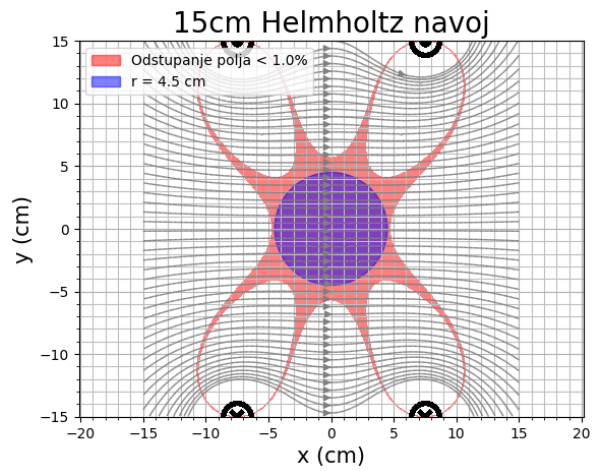
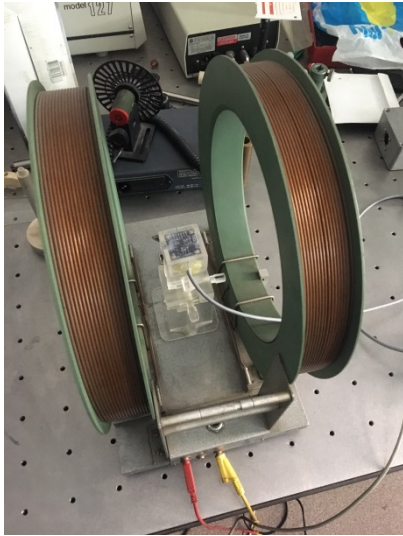
Магнетометар такође поседује сонду за мерење тренутне температуре која је потребна за температурну компензацију. Калибрација магнетометра је обухватила и калибрацију температурне зависности добијених резултата.

Магнетометар поседује више режима рада, од којих је најзначајнији брзо снимање (егл. *Burst mode*). У режиму брзог снимања, могуће је направити 60 мерења јачине електромагнетног поља са интервалом мерења (*sample rate*) од 11ms између сваког мерења. Овај режим рада се користи за мерење електромагнетног поља које генерише равни ЕМ сензор јер је фреквенца снимања више од дупло већа од фреквенце промене знака електромагнетног поља.

Сам магнетометар је постављен у кућиште од плексигласа приближних димензија 4x4x4 cm. Овим је омогућена заштита сензора као и могућност његовог прецизнијег позиционирања док само кућиште не утиче на мерено магнетно поље. Кућиште је могуће причврстити преко носача за позиционер у каналу (описан у Поглављу 3.2) ради снимања електромагнетног поља у каналу.

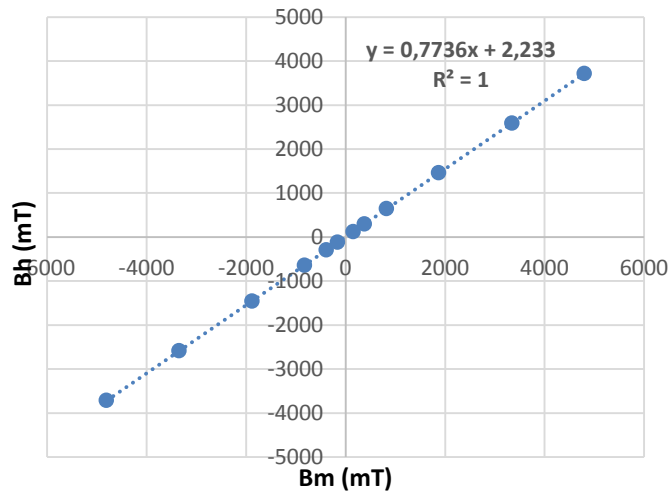
Комуникација и прикупљање снимљених података из магнетометра обавља се преко Arduino програмибилног чипа који се са компјутером повезује серијском везом преко USB порта.

Магнетометар је калибрисан уз помоћ Хелмхолцових (Helmholtz) навоја. Калибрација је извршена у лабораторији Електротехничког Факултета Универзитета у Београду, уз помоћ професора Пеђе Михаиловића са одсека за физичку електронику. Апаратура се састоји од два соленоида кроз које тече струја једнаког интензитета а који су постављени дуж исте осе на растојању које је једнако њиховом полупречнику. Оваквом поставком, у простору између два соленоида електромагнетно поље је униформно и у правцу осе на којој су соленоиди постављени (Vego, 1985). Јачина електромагнетног поља које праве соленоиди је у линеарној зависности од јачине струје која се пропушта кроз соленоиде, тако да је за калибрацију магнетометра потребно мерити само јачину струје. На слици 3.5 приказано је сивим линијама магнетно поље између два калема који се налазе на у одстојању  $\pm 15$  cm, а љубичастом бојом је приказана зона у којој су магнетне линије строго у  $x$  правцу и са одступањем електромагнетног поља мања од 1% од рачунске вредности (пример за  $I = 1.6$  A) ([github.com/tesyapo/loopfield](https://github.com/tesyapo/loopfield), Simpson *et al.*, 2001.).

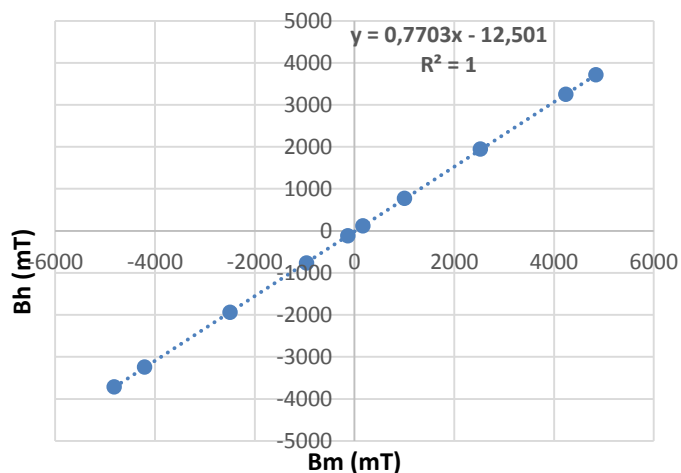


Слика 3.4: Калибрација магнетометра      Слика 3.5: Зона униформног поља Хелмхолцовог навоја

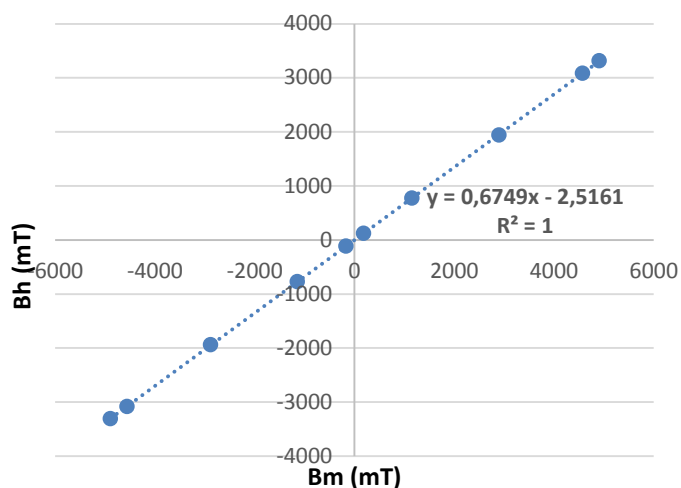
На Сликама 3.6, 3.7 и 3.8 приказани су резултати калибрације магнетометра. Калибрација је извршена за три ортогонална правца. На вертикалној оси ( $B_h$ ) су рачунске вредности Хелмхолцовог навоја а на хоризонталној ( $B_m$ ) вредности измерене магнетометром. Може се закључити да је калибрациона крива скоро идеално линеарна.



Слика 3.6: Калибрациона крива магнетометра за X правац



Слика 3.7: Калибрациона крива магнетометра за Y правац



Слика 3.8: Калибрациона крива магнетометра за Z правац

### 3.2. Лабораторијска инсталација

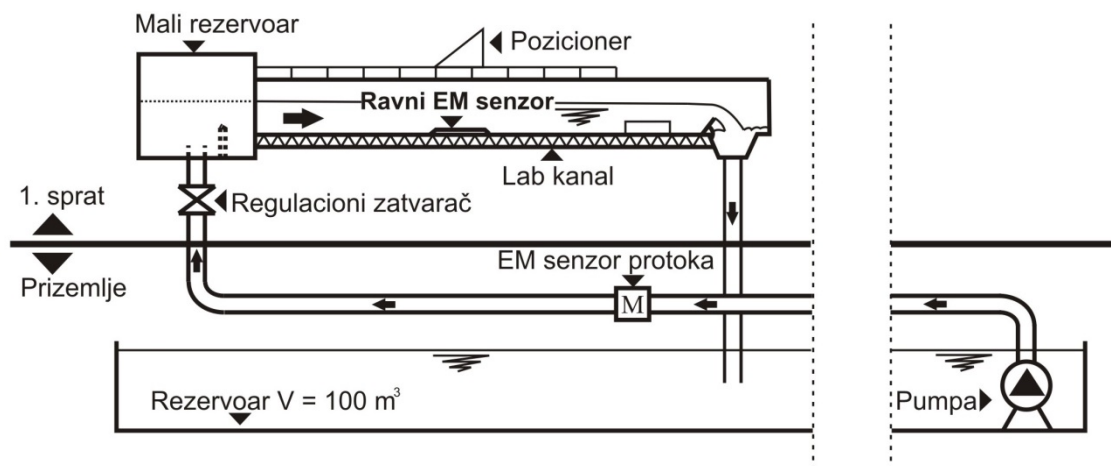
Мерења електромагнетног поља и излазних сигнала равног електромагнетног сензора за мерење брзине обављена су у лабораторији Института за Хидротехнику Грађевинског факултета Универзитета у Београду. На Слици 3.9 приказана је инсталација која је коришћена током мерења (осим мерења ЕМ поља ван канала). Основни елемент инсталације је хидраулички канал дужине 10 m. У првој половини канала зидови су од стакла док је у другој половини леви зид од префарбаног лима а десни од стакла. На



низводном крају канала налази се устава чији се нагиб подешава. Пре уставе налази се праг висине 15 cm. Нагиб канала је током свих мерења био 0 %.

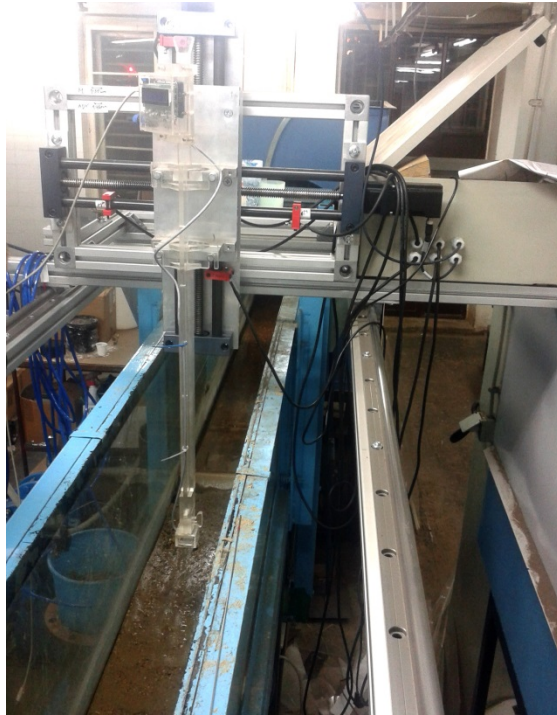
Канал се снабдева водом из малог резервоара из ког вода слободно истиче без преливања. Пре малог резервоара налази се регулациони затварач. Помоћу овог затварача се контролисао проток у каналу. Мали резервоар се напаја водом из великог резервоара помоћу пуме и ценовода. Пумпа поседује фреквентну регулацију као још један начин подешавања протока.

На доводном ценоводу се налази електромагнетно мерило протока под притиском произвођача Krohne ознаке IFC110. Тачност мерила је боља од 0,25%. Контролна табла и дисплеј ЕМ мерила изведена је на првом спрату. ЕМ мерило приказује тренутну вредност протока као и укупну протеклу запремину воде. Поред контролне табле ЕМ мерила, изведено је дугме за рестартовање сумарне запремине. Проток у каналу је мерен помоћу сумарне запремине, о чему ће више бити речи у каснијим поглављима.



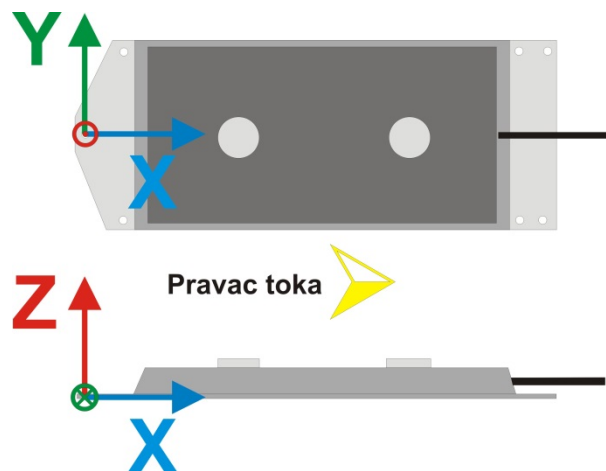
Слика 3.9 : Шема лабораторијске инсталације

За мерење просторног распореда електромагнетног поља у каналу коришћен је позиционер (Слика 3.10) којим се померао магнетометар. Позиционер се дуж канала креће по шинама монтираним изнад канала а у равни попречног пресека канала уз помоћ степ мотора. Овим су значајно олакшана тачкаста мерења у каналу јер је позиционеру могуће лако програмирати алгоритам кретања током мерења. За коришћење магнетометра направљен је кориснички интерфејс помоћу ког се уносе координате за померање позиционера као и алгоритам кретања. Такође, помоћу корисничког интерфејса могуће је пратити тренутни положај позиционера у односу на задати алгоритам кретања графичким путем.



Слика 3.10: Позиционер са магнетометром

С обзиром да су сва мерна места укључивала равну сонду за мерење протока, на сваком мерном месту усвојен је исти локални координатни систем десне оријентације чији се центар налази у центру предње рупе за причвршћивање равне сенде за мерење протока, као што је приказано на слици 3.11. Положај сваке тачке у тексту биће дефинисан у односу на описани локални координатни систем у облику X-Y-Z.



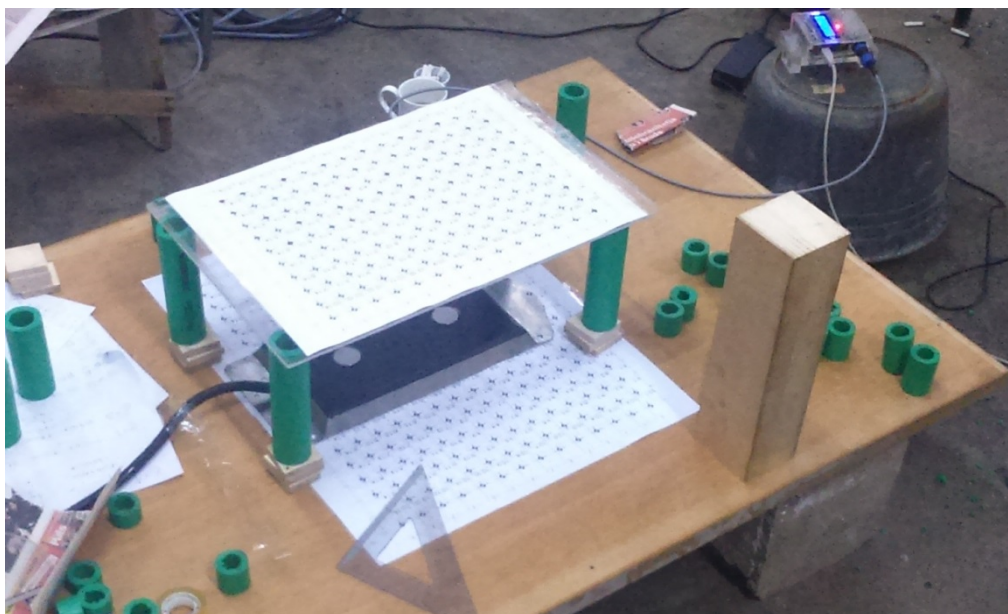
Слика 3.11: Локални координатни систем у односу на равну ЕМ сонду за мерење брзине

### 3.2.1. Опис лабораторијске процедуре за мерење електромагнетног поља ван хидрауличког канала

Да би се измерило електромагнетно поље које производе калемови равне сонде за мерење протока, потребно је поставити мерно место са што мање околних електромагнетних сметњи. Ово је постигнуто тако што је равни ЕМ сензор постављен на дрвену плочу која је удаљена од свих феромагнетних предмета и уздигнута од пода неармираним бетонским блоковима око 30 cm. Равни ЕМ сензор је током целог мерења држан у истом положају.

Мерења су извршена по тачкастом растеру у 3 димензије највеће густине 2.5 x 2.5 cm у хоризонталној равни и 1 cm у вертикалној равни. Удаљавањем од равног ЕМ сензора јачина електромагнетног поља се смањује тако да су мерене тачке по растеру проређиване, мада се основна шема растера по ком је јачина електромагнетног поља мерена задржала. Укупна ширина која је обухваћена мерењем је по 22,5 cm у оба смера Y осе, дужина 32,5 cm (позитиван смер X осе) док је највећа висина 22 cm (Z осе).

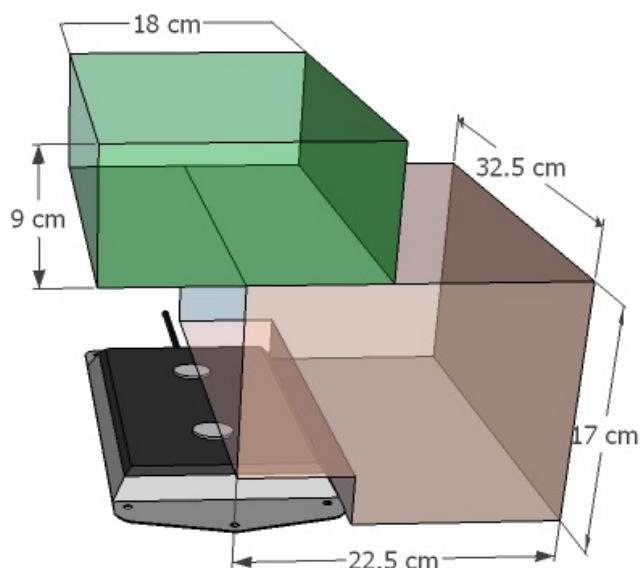
Позиционирање магнетометра у хоризонталној равни вршено је помоћу плоче од плексигласа на коју је залепљена шема растера одштампана на папиру густине 2.5 x 2.5 cm. Центар кућишта постављан је на центар одштампаног растера. Мерења су рађена у серијама по хоризонталној равни, где се после сваке хоризонталне серије плоча од плексигласа подигне за 1 или 2 cm уз помоћ ногара који су израђени од пластике.



Слика 3.12: Мерење електромагнетног поља у зони II.

Мерење електромагнетног поља подељено је у 4 зоне:

- I. „Десна“ зона уређаја – зона  $X = 0$  до  $X = 32.5$  cm,  $Y = -22.5$  до  $Y = 0$  cm,  $Z = 0$  до  $Z = 17$  cm. У овој зони су обављена најгушћа мерења.
- II. Горња зона изнад уређаја – зона  $X = 0$  до  $X = 32.5$  cm,  $Y = -9.5$  до  $Y = 9.5$  cm,  $Z = 19$  до  $Z = 22$  cm.
- III. Доња зона изнад уређаја – зона  $X = 2.5$  до  $X = 25$  cm,  $Y = -5$  до  $Y = 5$  cm,  $Z = 2.3$  cm. У овој зони магнетометар је постављен на равни ЕМ сензор за мерење брзине. Ова зона се по висинама не уклапа са постављеним растером других зона.
- IV. Зона лево од уређаја – ова зона је преликана по  $XZ$  равни у односу на зону I, и у њој је за сваки ниво снимљено по пар тачака ради провере симетричности електромагнетног поља.

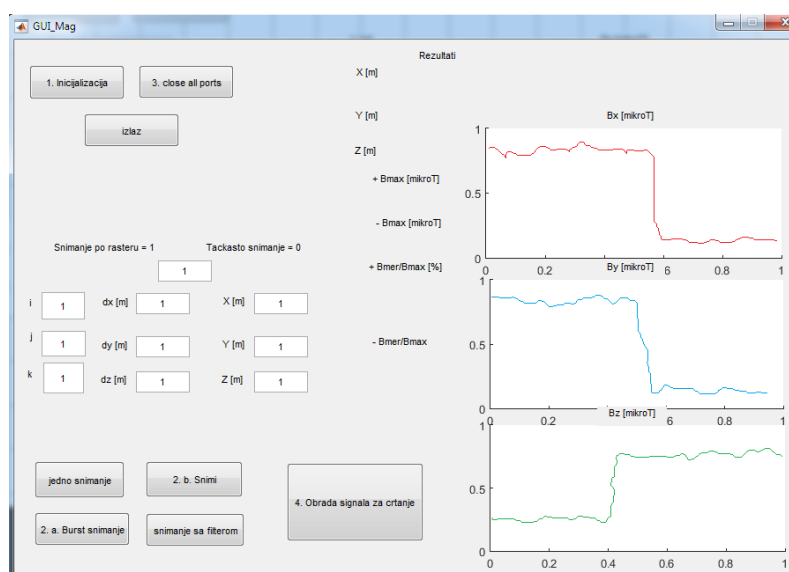


**Слика 3.13:** Приказ мерених зона – браон бојом је обележена зона I а зеленом зона 2. Због прегледности, нису приказане зоне III и IV

У свакој тачки магнетометром су снимљене по 3 узастопне *burst* серије (укупно 180 снимљених података са временским размаком од по 11ms по свакој тачки) као и тренутна температура. Ради лакше комуникације са магнетометром, направљено је графичко корисничко окружење (енг. *GUI – Graphic User Interface*) које записује снимљене податке сваке тачке у одвојени *txt* фајл где је име фајла позиција магнетометра у односу на релативни координатни почетак сваке зоне снимања. GUI приказује и графике сортираних снимљених вредности ради визуелне контроле мерених података. За сваки Z

ниво, GUI приказује максималне и минималне вредности снимљене у том нивоу као и релативни однос текуће тачке у односу на поменуте вредности. Уз помоћ ових података, растер за снимање је проређиван у околини где се сматрало да су вредности поља довољно мале. Поред тога, ради смањења могућности записивања података под погрешним именом (тј. погрешном позицијом магнетометра) инкременти за име фајла се аутоматски померају по унапред задатим распонем снимања у хоризонталним правцима. Уведена је и провера да ли фајл под текућим именом већ постоји.

Укупно је снимљено 2343 тачака.



Слика 3.14: GUI за снимање електромагнетног поља

### 3.2.2. Опис лабораторијске процедуре за мерење електромагнетног поља у хидрауличком каналу

Мерење електромагнетног поља у хидрауличком каналу обављано је уз помоћ позиционера на који је причвршћен магнетометар. Извршена су 3 мерења електромагнетног поља:

1. Густо мерење јачине електромагнетног поља у околини сонде за мерење средње профилске брзине
2. Мерење електромагнетног поља у 2 попречна профила ради утврђивања утицаја феромагнетних објекта на електромагнетно поље
3. Мерење електромагнетног поља у 4 тачака при различитим протоцима воде у каналу

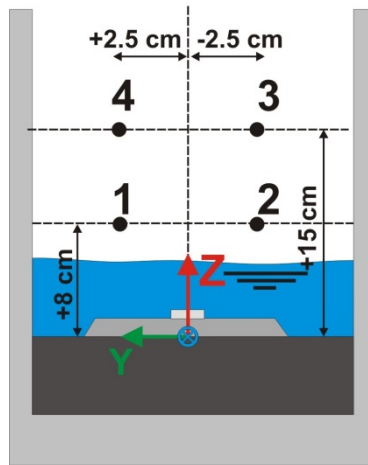
При првом мерењу најгушћег растера, равни ЕМ сензор за мерење брзине постављен је у делу хидрауличког канала где је леви зид (гледано у низводном правцу) од префарбаног лима а десни зид од стакла. Мерења су рађена у серијама по попречним пресецима управним на ток воде са аутоматским померањем између тачака уз помоћ позиционера.

Густина мерења електромагнетног поља је у доњој зони 1 cm у сва 3 правца ( $Z < 17$  cm по локалном координатном систему), док је за зону од 17 до 30 cm густина мерења 2 cm за вертикални и правац управан на ток воде, док је у правцу тока воде задржана густина од 1 cm у обе зоне. Најнижи ниво који је мерен је  $Z = 2.5$  cm (магнетометар на 2 mm од ЕМ сензора). Проређење мерења утврђено је на основу резултата мерења електромагнетног поља ван канала где се показало да је јачина електромагнетног поља у горњој зони занемарљива (мања од 2  $\mu$ T што је ред величине стандардне девијације магнетометра у 3 *burst* серије мерења амбијенталног магнетног поља).

Укупно је измерено 32 попречна пресека, што даје димензије снимљеног растера 34x19x27 cm (прва два попречна пресека су на међусобном растојању 1,5 cm док су остали пресеци на растојању 1 cm). Укупан број тачака који је измерен је  $372 \times 32 = 11904$ .

За друго мерење, сонда за мерење средње профилске брзине померена је у каналу у положај где су оба бочна зида од стакла. Ово мерење извршено је ради утврђивања да ли метални зид са леве стране сонде из првог мерења утиче на јачину и облик електромагнетног поља које генерише сензор. Ово мерење извршено је у 2 попречна пресека, на растојању по X оси од 12 и 26 cm, јер је првим мерењем утврђено да су ово карактеристични попречни пресеци где је јачина електромагнетног поља у два правца највећа док је у једном правцу приближно једнака нули.

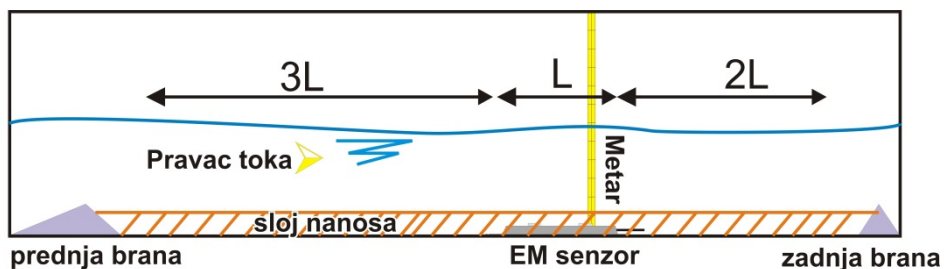
Треће мерење извршено је у положају сонде у каналу као и у другом мерењу, с изузетком да је у каналу испод равног ЕМ сензора постављен праг висине 15 cm. Циљ овог мерења је утврђивање да ли се електромагнетно поље мења уколико вода тече преко равног ЕМ сензора. Улога прага је да смањи дубину воде изнад ЕМ сензора јер магнетометар није отпоран на воду а потребно је измерити тачке са што јачим магнетним пољем ради поузданијег поређења (већ је речено да је зона изнад сонде где су електромагнетна поља која производи сонда мерљива до висине око 15 cm). Поред тога, прагом су се постигле веће брзине изнад ЕМ сензора, што је значајно јер је претпоставка да уколико се електромагнетно поље мења услед протока воде, феномен ће бити приметнији са већим брзинама воде преко сензора. Одређене су 4 тачке у попречном пресеку 12 где је мерена јачина електромагнетног поља за више различитих протока, укупно 18 протока у распону од 5,1 до 20,7 l/s. На слици 3.15 приказан је положај тачака у којима је мерено електромагнетно поље (поглед низводно).



Слика 3.15: Тачке у којима је мерено електромагнетно поље са водом која протиче

### 3.2.3. Опис лабораторијске процедуре за мерење равним ЕМ сензором са промењивом висином наноса

Основна сврха ових мерења је провера утицаја наноса на излазне сигнале равног ЕМ сензора. Поставка мерног места приказана је на слици 3.16.



Слика 3.16: Мерно место за мерење утицаја наноса на ЕМ сензор

Мерно место се налази у средини хидрауличког канала (оба зида канала од стакла), и ограничено је бранама испред и иза равног ЕМ сензора. Сврха брана је ограничење зоне наноса на део канала у ком се налази ЕМ сензор. Ограничењем бранама постиже се боља стабилизација наноса и лакша и бржа контрола промене висине наноса. Облик и положај брана је усвојен са идејом што мањег утицаја брана на струјну слику у околини равног ЕМ сензора. Бране су израђене од плексигласа, док су странице бране које належу на канал обложене слојем гуме због лакшег постављања и бољег пријањања уз зидове канала. Размак предње бране од уређаја је приближно  $3L$  уређаја (105 cm), а задње бране  $2L$  (70 cm). Растојање предње бране усвојено је на основу визуелне провере дужине вртлога који се ствара иза бране пропуштањем облака ситног праха приближне густине  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  кроз канал (seeding за мерење брзине АДВ сондом). Растојање задње бране усвојено је након мерења брзине АДВ сондом изнад равног ЕМ сензора где је

установљено да за мање растојање присуство бране значајно утиче на смањење локалне брзине око равног ЕМ сензора.

Мерења су подељена у групе мерења. Свака група мерења састоји се од постављања одговарајуће висине слоја наноса између брана у празном каналу а затим пуштањем воде кроз канал и постепеним повећањем протока за свако мерење. Равнање и провера висине слоја наноса се вршило визуелно и градуисаном иглом од прохрома са обележеним зарезима на сваких 5 mm. За свако мерење, проток је повећаван отварањем регулационог затварача непосредно пре малог резервоара (Слика 3.9). Између два мерења са различитим протоцима у једној групи мерења, прављена је пауза од минимално 5 минута. Овај период се сматра довољним за успостављање устаљеног течења у каналу.

Мерење за један устаљени проток обухвата снимање излазних сигнала равног ЕМ сензора, мерење тренутног протока помоћу електромагнетног мерила на цевоводу и мерења дубине воде у каналу. Излазни подаци равног ЕМ сензора који се снимају су средња профилска брзина по фабричкој калибрацији (m/s), осредњени напон (V) и импеданса (kΩ). За сваки проток, снимања излазних сигнала су трајала око 3 минута са фреквенцом узорковања од 1.4Hz (према опису у Поглављу 3.1.1). Проток је добијен помоћу сумарне протекле запремине коју мери електромагнетни сензор на цевоводу у интервалу од приближно 3 минута (за ово време снимани су излазни подаци равног ЕМ сензора). Овим се постигло осредњавање протока који мери електромагнетни сензор на цевоводу на целом интервалу снимања равним ЕМ сензором. Дубина воде мерена је метром који је постављен приближно између две електроде равног ЕМ сензора са унутрашње стране зида канала. Нула метра поклапа се са дном канала.

Прва група мерења извршена је без наноса. Мерења у овој групи вршена су за опсег протока од 1 – 50 l/s. Све наредне групе мерења вршене су са слојем наноса висине од 5 mm до 45 mm. У свакој групи мерења са наносом, висина наноса се повећавала за по 5 mm. Изузетак је група мерења за слој висине 23 mm, тј. тренутак када је цела сонда осим електрода прекривена наносом. За сваку групу мерења са наносом, вршена су мерења у опсегу протока оквирно од 1 – 18 l/s са кораком 1-1.5 l/s (оквирно од 12 до 15 мерења по групи). Усвојен је мањи опсег мерења јер се при протоку већем од 14 l/s покреће нанос и стварају наносне формације (набори и дине).



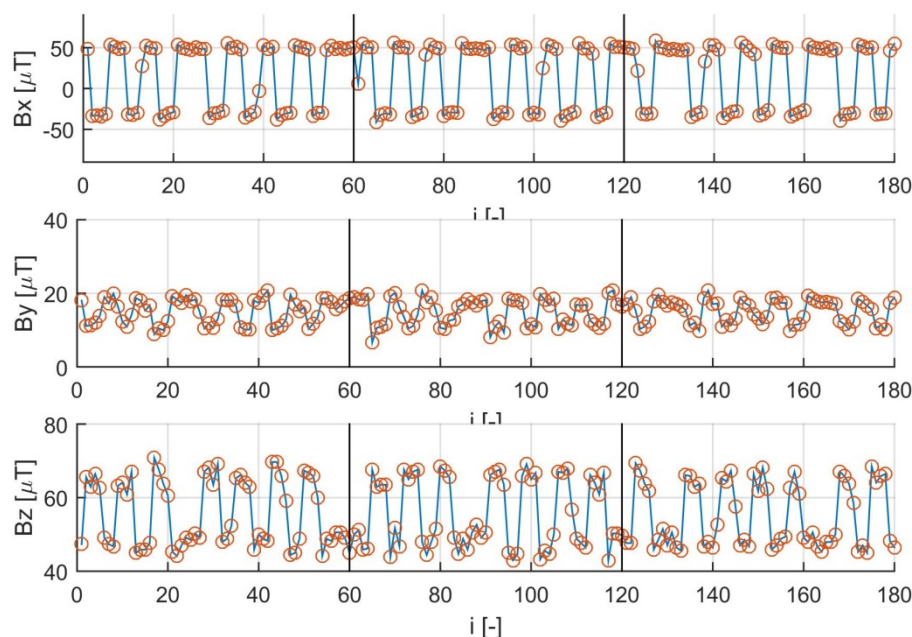


Слика 3.17: Формирање наносних формација. Равна ЕМ сонда је прекривена наносом

### 3.3. Обрада резултата

#### 3.3.1. Обрада резултата мерења електромагнетног поља у тачки

Електромагнетно поље је у свакој тачки на свим мерним местима мерено магнетометром са три узастопна *Burst* снимања (60 снимања у једном *Burst*-у на по 11 ms). С обзиром да се промена електромагнетног поља које генерише равни ЕМ сензор за мерење брзине услед промене смера струје кроз калемове сензора дешава на сваких 40 ms, у једном смеру струје се очекују по 3 или 4 података о јачини генерисаног електромагнетног поља. Међутим, магнетометар ће снимити и јачину електромагнетног поља у тренуцима промене електромагнетног поља услед промене смера струје (промена поларитета електромагнетног поља), као и тренутке у којима се електромагнетно поље стабилизује (првих 20 ms у периоди према Слици 3.2 Поглавља 3.1.1.). Пример сирових података добијених магнетометром у три ортогонална правца за једну тачку приказан је на Слици 3.18.



**Слика 3.18:** Измерене вредности магнетог поља у једној тачки (тачка 22.5-0-9 на мерном месту у каналу). Вертикалним линијама су раздвојене серије *Burst* снимања

Да би се добио коначни податак о јачини електромагнетног поља у једној тачки, потребно је раздвојити податке који су снимљени у тачки при различитим полоаритетима електромагнетног поља на две групе, избацити податке који су снимљени током промене и стабилизације електромагнетног поља и одредити у којој групи се дешава продужење периоде.

Користи се усвојена конвенција о знаку електромагнетног поља таква да је поље ком припада знак продужене периоде „позитивно“, док је супротно поље „негативно“.

За обраду података на горе описан начин коришћене су неуралне мреже. Детаљнији опис рада неуралних мрежа налази се у Додатку I, док ће се у овом поглављу дати кратки опис филтрирања података.

Као што је већ описано, снимање електромагнетног поља записује се у txt фајл. Заглавље фајла садржи податке о положају магнетнометра у тренутку снимања као и тренутну температуру, док су у сваком следећем реду записане вредности електромагнетног поља за три ортогонална вектора. Из фајла се учитавају ови подаци, и прави матрица где је свака колона матрице серија *Burst* снимања од 180 података за сваки вектор. Улазни податак за неуралну мрежу је једна колона матрице, тј. вредности снимања једног вектора.

Задатак неуралне мреже је да подели податке у 4 групе према њиховом положају у 1-D простору. Основна идеја је да ће се у две унутрашње групе наћи резултати који су снимљени у тренуцима промене поларитета док ће спољне групе садржати корисне податке о јачини електромагнетног поља у супротним поларитетима. Као коначна вредност јачине позитивног и негативног електромагнетног поља узимају се средње вредности спољних група. Осредњавање спољних група има још једну функцију. С обзиром да није било могуће успешно раздвојити податке у тренуцима стабилног магнетног поља (задњих 20 ms полупериоде) од података снимљених током стабилизације магнетног поља, осредњавањем целе спољне групе се смањује утицај тачака снимљених током стабилизације магнетног поља на коначну вредност.

Након што је неурална мрежа вратила две осредње вредности, потребно је одредити која вредност припада продуженој периоди, тј раздвојити их по усвојеној конвенцији знака електромагнетног поља. Ово се врши простом претрагом излаза из неуралне мреже, где се у спољним групама тражи 6 узастопних вредности које су класификоване у истој групи. Група која задовољава овај критеријум је група са продуженом периодом, тј. група позитивног електромагнетног поља. Уколико је немогуће одредити знак, за вредности позитивног и негативног електромагнетног поља усваја се 0. Ово је оправдано претпоставком да уколико је немогуће одредити знак, разлика позитивног и негативног магнетног поља је занемарљиво мала.

### 3.3.2. Обрада резултата мерења електромагнетног поља у простору

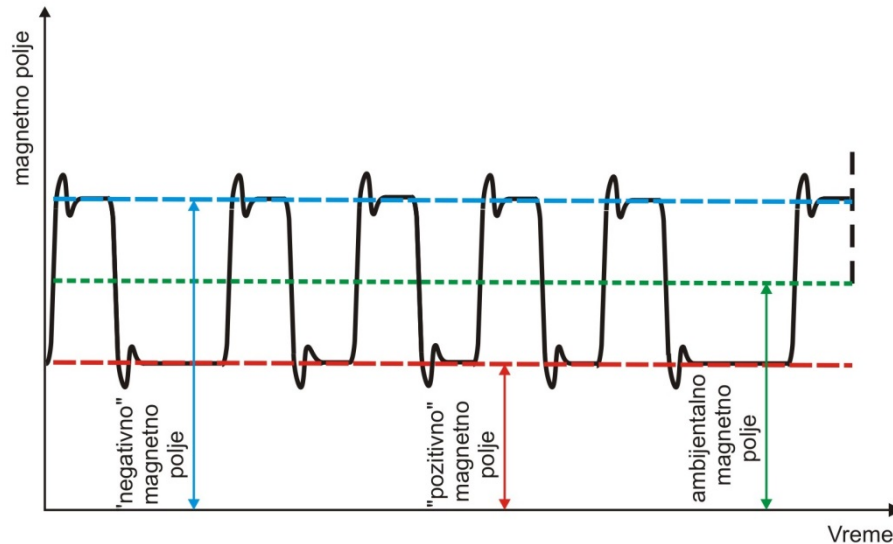
Обрада мерења електромагнетног поља неуралном мрежом као резултат даје позитивно и негативно електромагнетно поље у свакој тачки према усвојеној конвенцији. Ови резултати су померени у односу на нулу за јачину амбијенталног магнетног поља (земљино геомагнетно поље чија је магнитуда реда величине 60 $\mu$ T и околне сметње), као што је приказано на слици 3.19.

Уводи се претпоставка да је амбијентално магнетно поље непромењиво у току једног снимања као и да калемови равног ЕМ сензора за мерење брзине праве једнако поље у оба смера али са различитим предзнаком. Да би се при спајању резултата у простору избегла анализа два електромагнетна поља (позитивно и негативно) и из резултата избацила вредност амбијенталног магнетног поља, примењена је следећа формула:

$$B = \frac{B_p - B_n}{2} \quad (3.1)$$

Као коначна вредност јачине електромагнетног поља у тачки, узима се одступање позитивног поља са одговарајућим предзнаком у односу на амбијентално магнетно поље. Са овако обрађеним резултатима приступиће се анализи електромагнетног поља у простору. Овим се оправдава поступак у обради резултата неуралним мрежама где се за

занемарљиву разлику позитивног и негативног поља усваја вредност и једног и другог поља нула а не амбијентално магнетно поље.



Слика 3.19: Конвенција о знаку ЕМ поља и уклањање амбијенталних сметњи

### 3.3.3. Обрада резултата мерења равним ЕМ сензором

При мерењима равним ЕМ сензором, поред излазних сигнала ЕМ сензора, мериле су се и следеће величине:

- Сумарна запремина на ЕМ сензору на цевоводу под притиском ( $V_{EM}$ )
- Време за које се мерила сумарна запремина на ЕМ сензору на цевоводу ( $t_{EM}$ )
- Дубина воде мерена од дна канала ( $h$ )

Проток при сваком мерењу добија се једноставном једначином:

$$Q_{EM} = \frac{V_{EM}}{t} \quad (3.2)$$

Овако добијен проток се сматра устаљеним протоком за време мерења излазних сигнала равном ЕМ сензора за мерење брзине. Иако ЕМ сензор на цевоводу приказује и тренутну вредност протока, показало се да се осредњавањем на горе објашњени начин добијају нешто ниже вредности протока. Из овог разлога, мерење без слоја наноса где није усвојена објашњена методологија за мерење протока неће бити приказано у овом раду већ ће бити поновљено у даљим анализама ван овог Мастер рада (као и друга мерења равним ЕМ сензором која нису поменути у овом раду).

Дубина воде је мерена метром чија се нула поклапа са дном канала, тако да је права дубина воде дубина измерена на метру од које је одузета висина наноса током мерења.

Средња профилска брзина рачуната је за пресек у ком је мерена дубина, тј пресек у ком се налази равни ЕМ сензор. Површина попречног пресека је рачуната узимајући у обзир површину попречног пресека равне ЕМ сонде. Због лакшег прорачуна, уведена је апроксимација да је попречни пресек равне ЕМ сонде правоугаоног облика а не реалног трапезног са ширином правоугаоника 15.1cm (средња ширина трапеза). Коначна формула за средњу профилску брзину је:

$$V_{SR} = \frac{Q_{EM}}{A}; \quad A = \begin{cases} (h - h_N) \cdot B - (h_S - h_N) \cdot B_S & (h_S > h_N) \\ (h - h_N) \cdot B & (h_S \leq h_N) \end{cases} \quad (3.3)$$

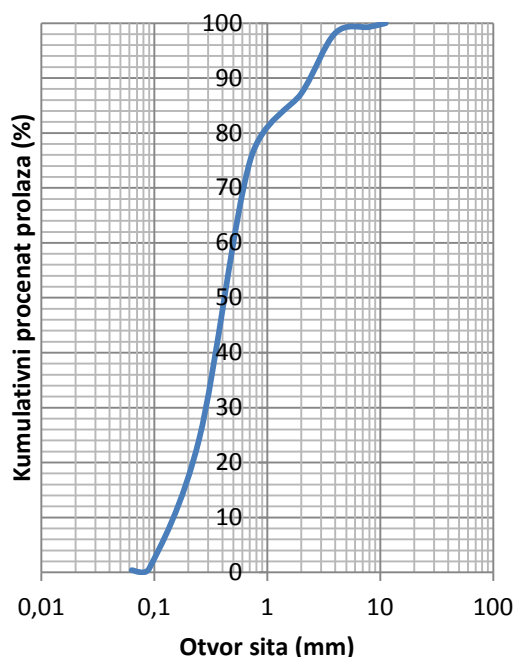
Где је  $h_N$  - висина наноса током мерења,  $h_S = 2.3$  cm – висина сонде,  $B = 25$  cm – ширина канала,  $B_S = 15.1$  cm – усвојена ширина сонде.

Излазни сигнали равне ЕМ сонде који се снимају су средња профилска брзина по фабричкој калибрацији, напон и импеданса. С обзиром да су излазни сигнали за свако мерење снимани оквирно 2-3 min за време мерења сумарног протока на ЕМ сонди на цевоводу, као коначни резултат снимања ЕМ сонде узимају се средње вредности задњих 120 података. Са фреквенцом узорковања од 1.4Hz, добија се да се осредњавање врши на задњих 87 секунди снимања.

### 3.4. Анализа покретања наноса

Мерења са различитим висинама слоја наноса вршена су у интервалу протока од 1 до 19 l/s. Међутим, како је већ речено, при протоцима приближно 14 l/s или већим примећено је покретање ситнијих фракција наноса и стварање наносних формација (набора и дина) и формирање колмирајућег слоја непосредно иза предње бране. Овим појавама је локална струјна слика а и дебљина наноса поремећена, тако да резултате који су снимљени након формирања наносних формација треба занемарити у даљим анализама. С обзиром да се ова појава није прецизно пратила и бележила при мерењима, у овом поглављу ће се теријски одредити које резултате треба занемарити, тј. када долази до значајнијег покретања наноса.

Улазни податак за анализу је гранулометријска крива коришћеног наноса, приказана на Слици 3.20. Испитивање гранулометријског састава извршено је у лабораторији за геотехнику на Институту за Саобраћајнице и Геотехнику Грађевинског факултета Универзитета у Београду.



Слика 3.20: Гранулометријска крива наноса

Анализа покретања наноса вршиће се помоћу Шилдсовог дијаграма<sup>2</sup> (Слика 3.21). Шилдсова крива може се дефинисати јединственим регресионим изразом:

$$\Theta_c = 0.009148 / Re_* + 0.05449 \cdot \left(1 - \exp\left(-0.5661 \cdot Re_*^{0.5224}\right)\right) \quad (3.4)$$

Где је  $\Theta_c$  – критични бездимензионални тангенцијални напон (Шилдсов број) а  $Re_*$  - Рејнолдсов број зрна. Изрази за  $\Theta_c$  и  $Re_*$  гласе:

$$\Theta = \frac{\tau_0}{g \cdot (\rho_s - \rho) \cdot d} = \frac{u_*^2}{g \cdot \Delta \cdot d} \quad (3.5)$$

$$Re_* = \frac{u_* \cdot d}{\nu} \quad (3.6)$$

У изразима (3.6)-(3.7)  $d$  представља величину зрна које се покреће,  $u_*$  смичућу брзину,  $\rho_s$  - густину наноса ( $2.65 \text{ t/m}^3$ ),  $\rho$  - густину воде ( $1 \text{ t/m}^3$ ),  $\nu$  - кинематички коефицијент вискозности. Детаљније објашњење свих израза може се наћи у литератури.

<sup>2</sup> Теоријска анализа у овом поглављу рађена је према литератури М. Јовановић: „Регулација река, речна хидраулика и морфологија“

Смичућа брзина може се изразити преко Манинговог израза за отпор трења:

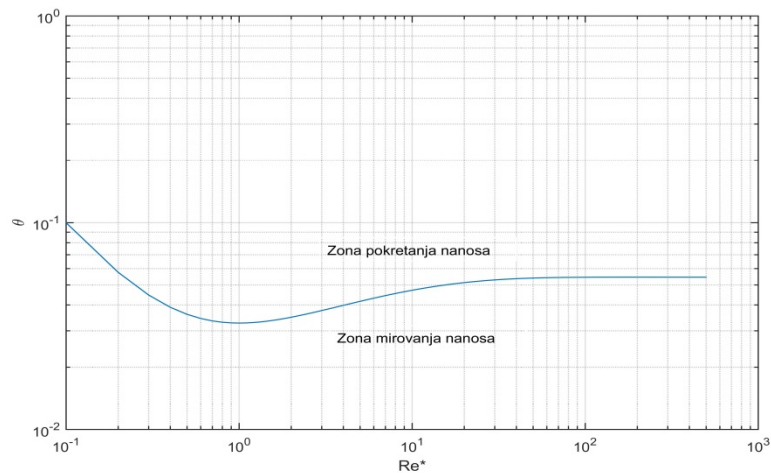
$$\frac{V}{V_*} = \frac{R^{1/6}}{n_{ek} \sqrt{g}}; \quad n_{ek} = \frac{n_d \cdot B + n_{st} \cdot 2 \cdot (h - h_N)}{B + 2 \cdot (h - h_N)} \quad (3.7)$$

Где се  $n_{ek}$  – еквивалентни Манингов отпор трења рачуна као средњи отпор трења зидова од стакла и дна са наносом. У изразу (3.7) за рачунање средње профилске смичуће брзине користи се средња профилска брзина преко израза (3.3). За отпор трења стакла усвојено је  $n_{st} = 0.009 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$  док се отпор трења дна рачуна по формули:

$$n_d = \frac{d_{90}^{1/6}}{26} \quad (3.8)$$

За зрно  $d_{90}$  са гранулометријске криве се читава вредност 3.1 mm.

Када су познате вредности  $\Theta$  и  $Re_*$  за величину зрна за које се испитује да ли ће доћи до покретања зрна, вредности се нанесу на дијаграм  $Re_* - \Theta$ . Уколико је вредност Шилдсовог броја већа од Шилдсовог критичног броја  $\Theta_c$  према формули (3.4), зрно ће бити у покрету.



Слика 3.21: Шилдсов дијаграм – зависност критичног Шилдсовог броја од Рејнолдсовог броја зрна

### 3.5. Калибрација равног ЕМ сензора за мерење брзине

Пре него што се приступи анализи калибрације, уkratко ће се поменути појаве које се дешавају при свакој промени висине наноса.

Прва појава је укидање зоне интеграције где се налази нанос. С обзиром да су брзине воде у зони наноса једнаке нули, ова зона на даље не утиче на коначну вредност снимљеног напона на електродама равног ЕМ сензора. Ако се узме у обзир да је јачина електромагнетног поља опада по степеном закону са удаљењем од ЕМ сензора, ова појава може значајно утицати на резултате. Следећа појава је промена профила брзина по висини пресека. Сваким новим слојем смањује се протицајни пресек и мења хрпавост па се сходно томе очекује и промена профила брзина. Такође, равни ЕМ сензор својим обликом утиче на поље брзине око себе. Сваком променом висине наноса мења се и локални утицај облика ЕМ сензора на брзине због промене облика чврсте границе.

Да би се анализирао ефекат сваке од ове појаве, потребно је знати профил брзина око сензора. С обзиром на релативно кратку дужину канала (гранични слој није потпуно формиран) као и на локалне отпоре који утичу на профиле брзина (предња и задња брана), немогуће је користити теоријске расподеле брзине јер услови у којима су изведени нису важећи.

С обзиром на горе наведено, описане појаве неће бити појединачно анализирани већ ће се приступити регресионој анализи, где су све појаве представљене у коефицијената калибрационе функције.

Претпоставља се да је излазни сигнал равне ЕМ сонде (напон  $U$ ) у линеарној вези за средњом профилском брзином:

$$V_{SR} = f(U) = a \cdot U + b \quad (3.9)$$

Коефицијент  $b$  у једначини (3.10) је последица одступања мерења ЕМ сензора од нуле при мерењу без протока (*drift*). Такође, претпоставља се да је коефицијент  $a$  у зависности од дебљине слоја наноса ( $h_N$ ):

$$a = g(h_N) \quad (3.10)$$

Коефицијент  $a$  у једначини (3.9) за различите висине наноса добија се линеарном регресијом методом најмањих квадрата. С обзиром да ће се тражити права која пролази кроз тачку (0,0), потребно вредности напона компензовати за вредност одступања од нуле тј. дрифта. Уводи се претпоставка да је ова вредност константна за све висине слоја наноса. Заменом Једначине (3.10) у једначину (3.9) добија се коначна калибрациона функција:

$$V_{SR} = f(h_N, U) = g(h_N) \cdot U + b \quad (3.11)$$

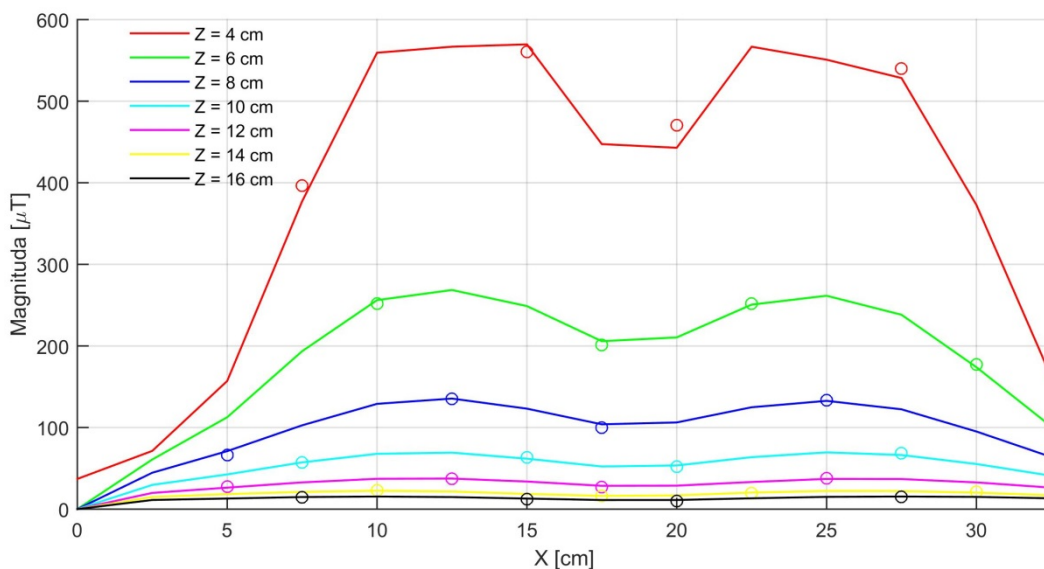


## 4. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА

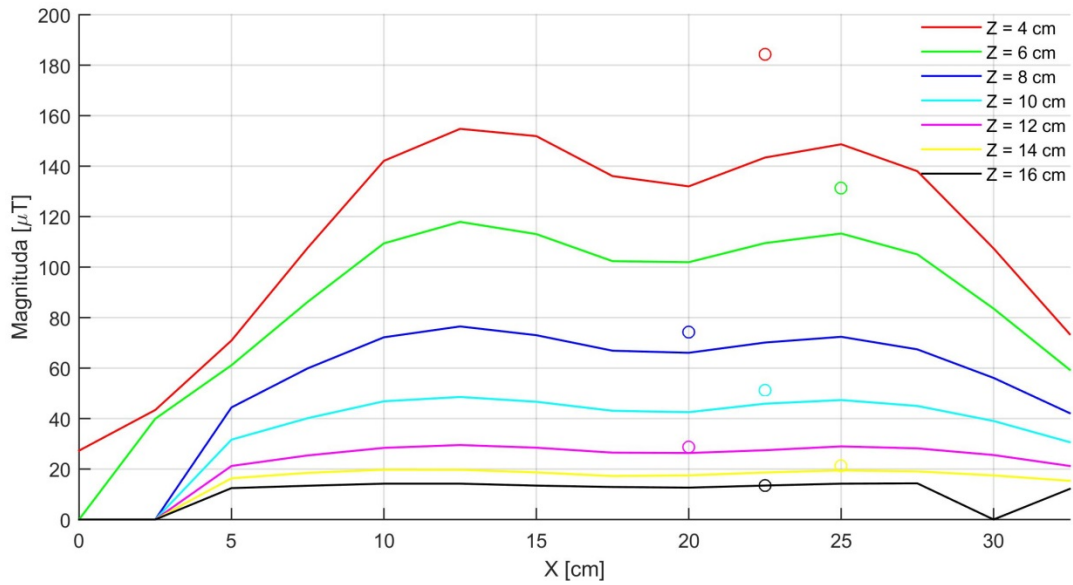
### 4.1. Резултати мерења електромагнетног поља

#### 4.1.1. Електромагнетно поље ван хидрауличког канала

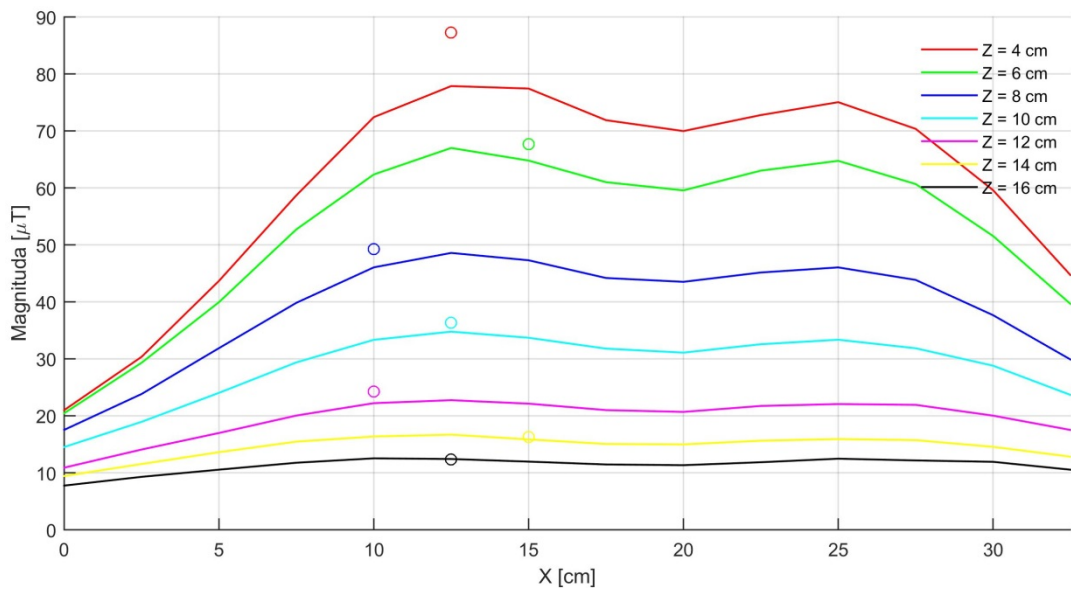
У овом поглављу приказаће се резултати мерења електромагнетног поља ван хидрауличког канала. Мерно место је описано у поглављу 3.3.1. С обзиром да су мерења електромагнетног поља с десне стране равног ЕМ сензора (мерна зона I) била доста гушћа у односу на леву страну (мерна зона III), потребно је пре пре приказа резултата мерења утврдити да ли је оправдано податке са десне стране пресликати на леву ради визуелизације поља, тј. проверити симетричност поља. Симетричност поља се очекује у равни XZ према координатном систему описаном у ранијим поглављима. На графицима 4.1, 4.2 и 4.3 приказане су вредности магнитуде електромагнетног поља снимљене у десној зони I које су пресликане на леву зону III (линије) као и одговарајуће тачке које су снимљене у зони III (тачке на графику). Графици су представљени дуж различитих XZ пресека, а различитим бојама су представљени различити Z нивои. На основу графика, може се закључити да је поље довољно симетрично да се за потребе визуелизације може приказати комплетно пресликано поље. Претпоставља се да су мала одступања од симетричних вредности проузрокована несавршеном симетричношћу калемова у равном ЕМ сензору као и грешком услед позиционирања магнетометра.



Слика 4.1: Приказ магнитуде електромагнетног поља у XZ равни за тачке снимљене на левој (спојено линијом) и десној страни (представљено кружићима) Y = 5 cm



**Слика 4.2:** Приказ магнитуде електромагнетног поља у XZ равни за тачке снимљене на левој (спојено линијом) и десној страни (представљено кружићима) Y = 10 cm

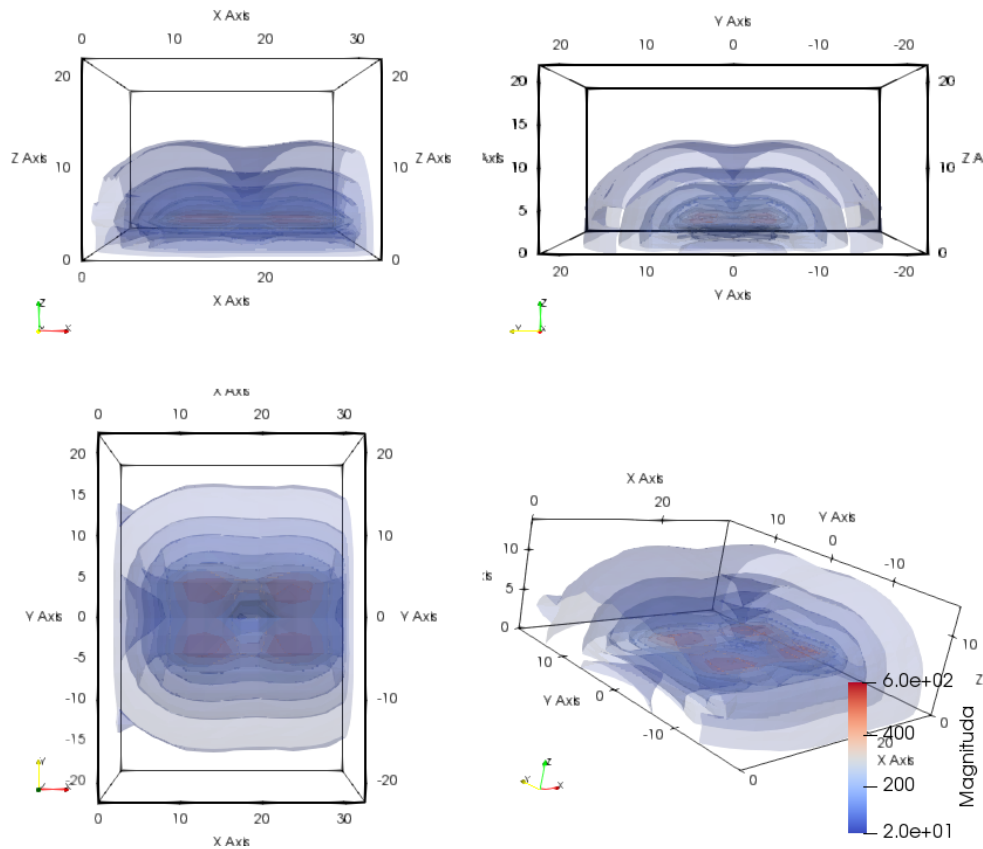


**Слика 4.3:** Приказ магнитуде електромагнетног поља у XZ равни за тачке снимљене на левој (спојено линијом) и десној страни (представљено кружићима) Y = 12.5 cm

Приказ електромагнетног поља у 3 димензије остварен је уз помоћ софтверског пакета ParaView. Резултати који су приказани настали су спајањем резултата из мерне зоне I (десна страна) и зоне II (зона изнад уређаја за висине Z > 17 cm). Овако спојени подаци су пресликани на леву страну а затим интерполовани по целом растеру густине 2.5 x 2.5 x 1 cm ради попуњавања тачака које нису мерене. Потребно је напоменути да су

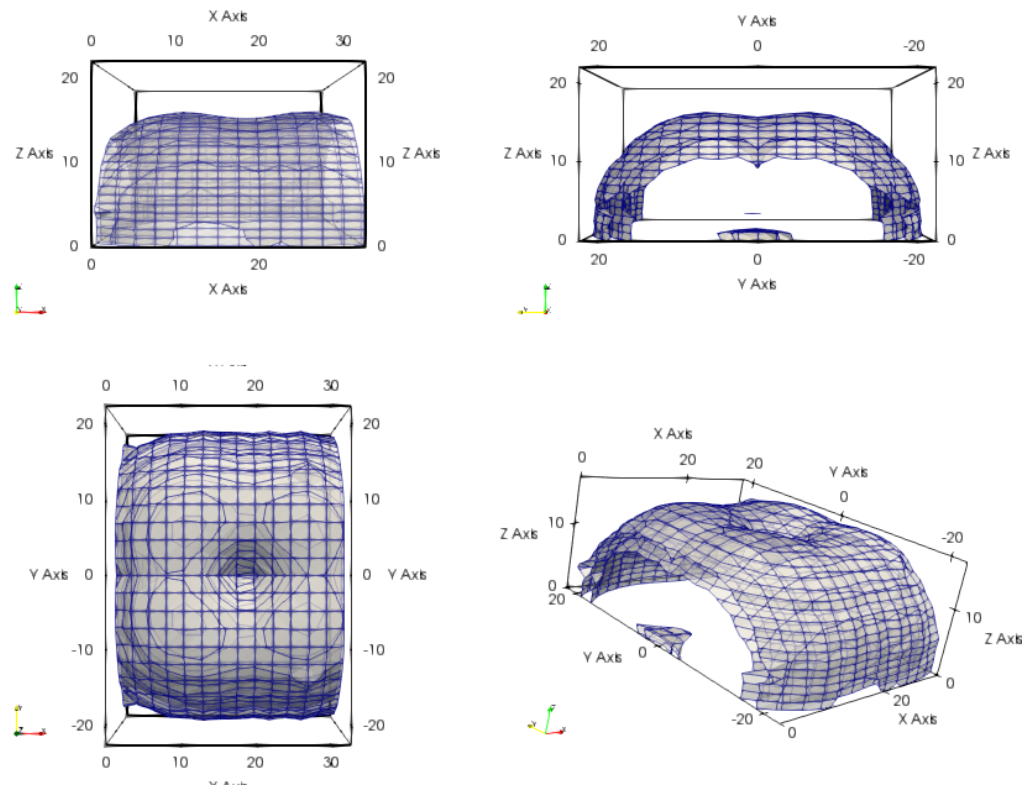
при оваквом приказу резултата интерполоване и тачке где се физички налази равна сонда за мерење протока, као и тачке у зони 1 cm изнад саме сонде (подаци измерени у зони IV који нису убачени у приказ због неуклапања растера по висини при мерењу). У 3-D приказу електромагнетног поља, податке у овом делу не треба разматрати. Резултати из зоне IV (непосредно изнад уређаја) биће приказани одвојено јер се у тој зони налазе вектори електромагнетног поља најјачег интензитета.

На Слици 4.4 приказане су контурне површи магнитуде електромагнетног поља за вредности 20, 50, 100, 200, 300, 400, 500 и 600  $\mu\text{T}$ .



Слика 4.4: Контурне површи магнитуде за електромагнетно поље мерено ван канала

У зони изнад самог уређаја (зона IV), где је магнетометар био постављен на равну сонду за мерење протока измерене су највеће вредности јачине електромагнетног поља. Највећа измерена вредност магнитуде је 1137  $\mu\text{T}$  ( $B_x = 239 \mu\text{T}$ ;  $B_y = -110 \mu\text{T}$ ;  $B_z = 1106 \mu\text{T}$ ). Зона у којој су вредности електромагнетног поља већа од приближно 1% од максималне измерене вредности приказана је на Слици 4.5 (контурна површ  $B = 15 \mu\text{T}$ ).



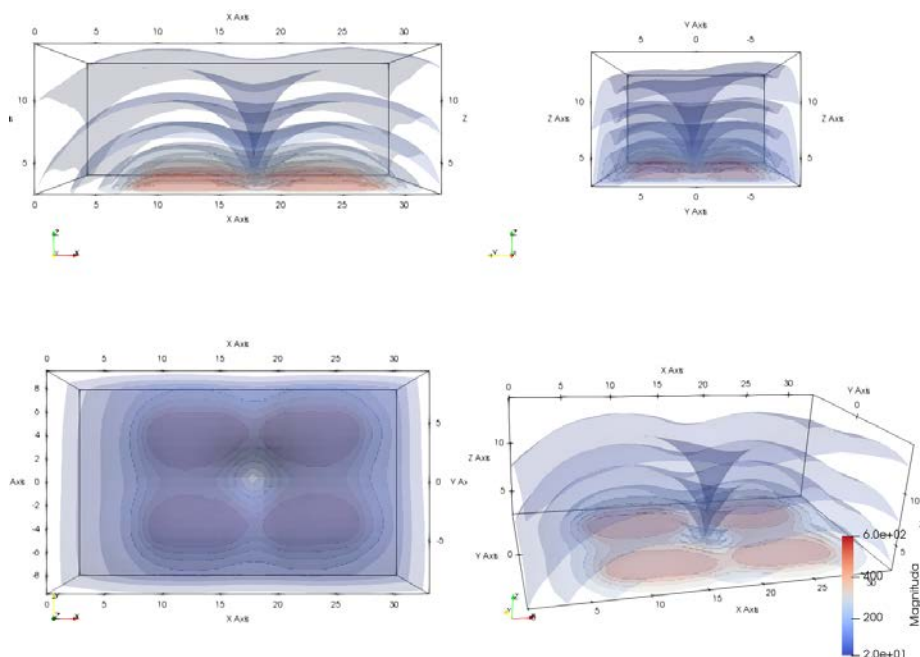
Слика 4.5: Контурне површи магнитуде  $V = 15 \mu\text{T}$  за електромагнетно поље мерено ван канала

Највећа висина до које ова контурна линија долази је  $Z = 15.2 \text{ cm}$ , док је ширина по  $21 \text{ cm}$  са леве и десне стране.

#### 4.1.2. Електромагнетно поље у хидрауличком каналу

Мерења електромагнетног поља у хидрауличком каналу вршена су од висине  $Z = 2.5 \text{ cm}$  ( $3 \text{ mm}$  изнад врха електроде равног ЕМ сензора). Електромагнетно поље је мерено гушће, са растером  $1 \times 1 \text{ cm}$ . Поред тога, позиционирање магнетометра у каналу је са мањом грешком, јер је рађено уз помоћ позиционера.

На Слици 4.6 приказане су контурне површи магнитуде електромагнетног поља у хидрауличком каналу за вредности  $20, 50, 100, 200, 300, 400, 500$  и  $600 \mu\text{T}$ .



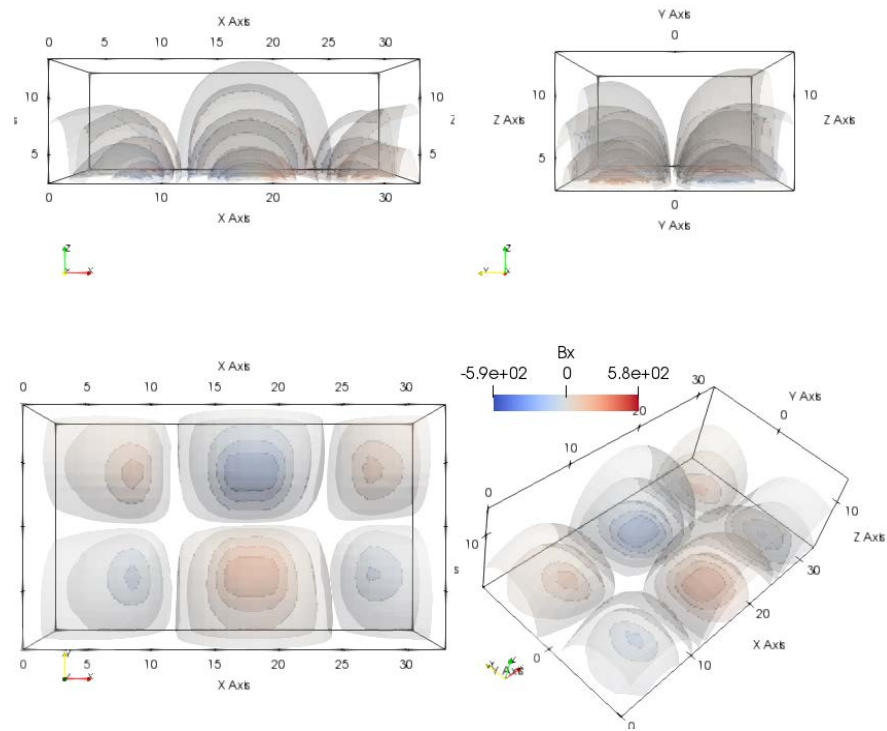
Слика 4.6: Контурне површи магнитуде за електромагнетно поље мерено у каналу

На Слици 4.6 може се приметити да се електромагнетно поље „искривило“ у горњој левој зони (поглед у X правцу). Даљом анализом утврдиће се да ли је у питању утицај металног зида и других околних сметњи са леве стране хидрауличног канала. На слици се уочава симетрија магнитуде поља у XZ равни за  $Y = 0$  cm као и око YZ равни за  $X = 18$  cm.

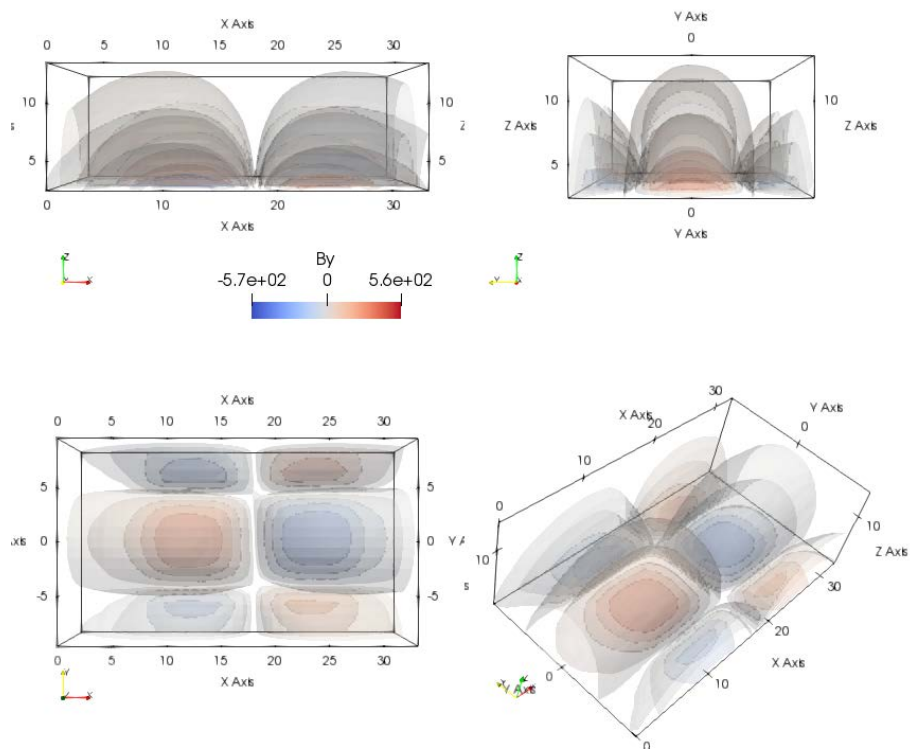
На Сликама 4.7, 4.8 и 4.9 приказане су контуре ортогоналних вектора  $V_x$ ,  $V_y$  и  $V_z$  електромагнетног поља. Примећује се да су поља која праве камелови равне сонде за мерење брзине супротних знакова. На слици 4.10 приказане су струјнице из линијских извора.

С обзиром да је магнитуда највећа у пресецима  $Y = +/-4.5$  cm и  $X = 12$  и  $22$  cm, приказаће се контурне линије за те пресеке. На Сликама 4.11, 4.12 и 4.13 приказане су контурне линије јачине електромагнетног поља за пресеке  $Z = 2.5$  cm,  $Y = -4.5$  cm и  $X = 12$  cm, за сва три ортогонална правца као и магнитуде вектора.

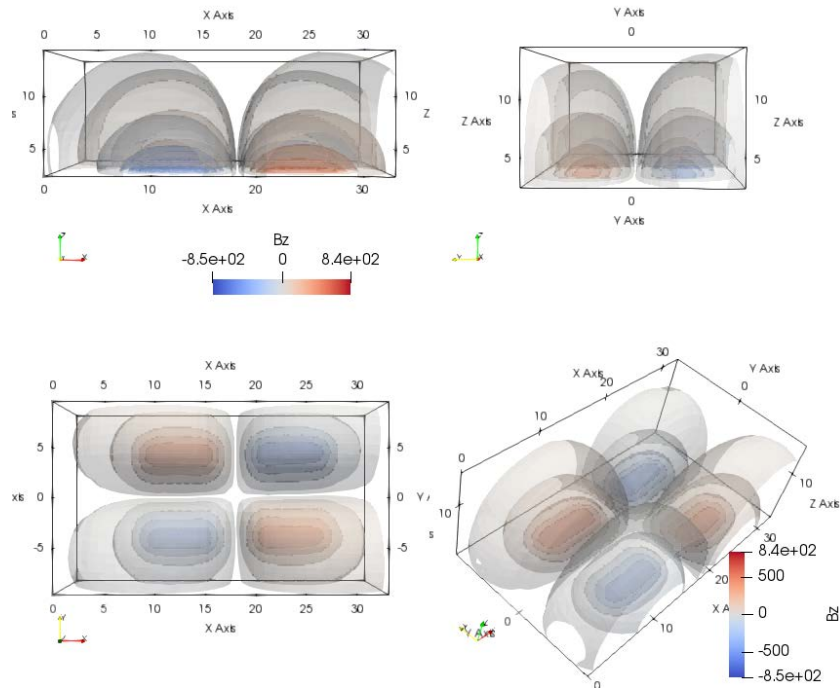
На слици 4.14. приказане су јачине ортогоналних вектора  $V_x$ ,  $V_y$  и  $V_z$  електромагнетног поља по вертикали у тачкама где појединачни вектори имају максималне вредности. Координате тачака за сваки вектор дате су у легенди графика.



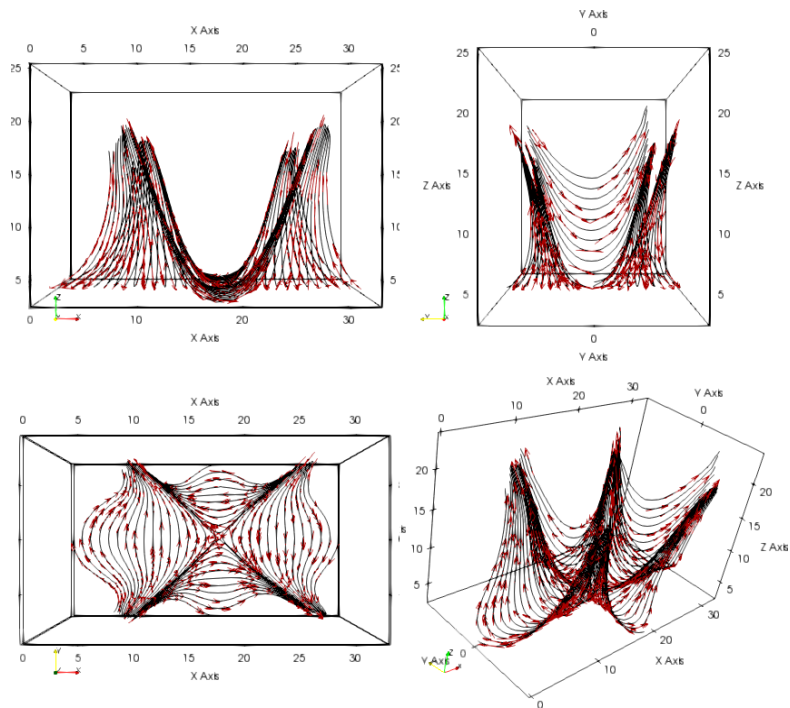
Слика 4.7: Приказ контура за вектор  $B_x$  електромагнетног поља у каналу



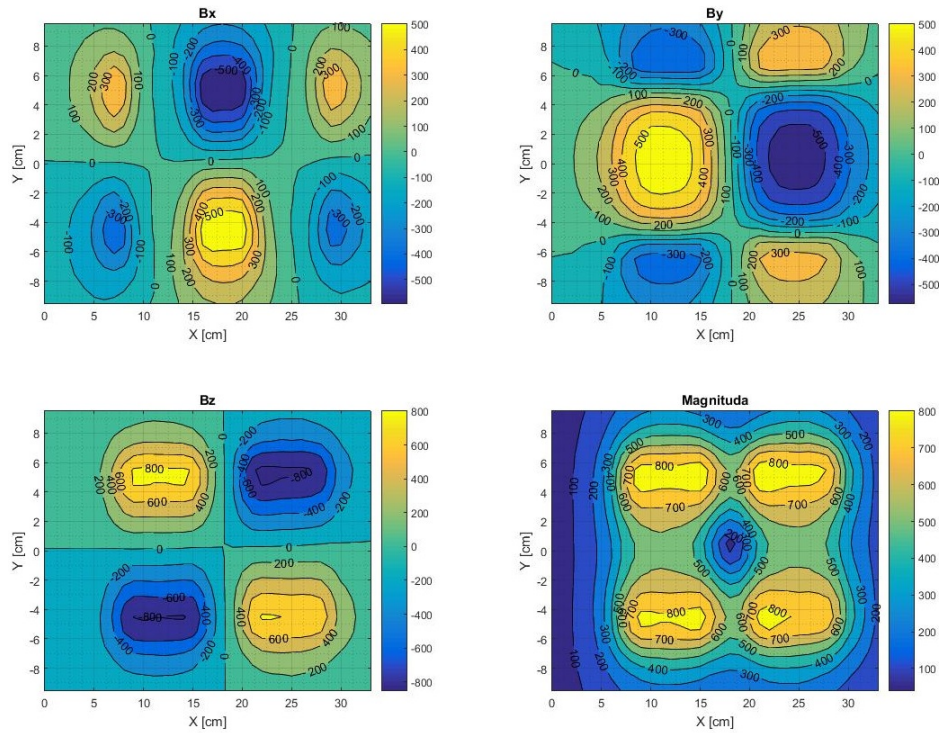
Слика 4.8: Приказ контура за вектор  $B_y$  електромагнетног поља у каналу



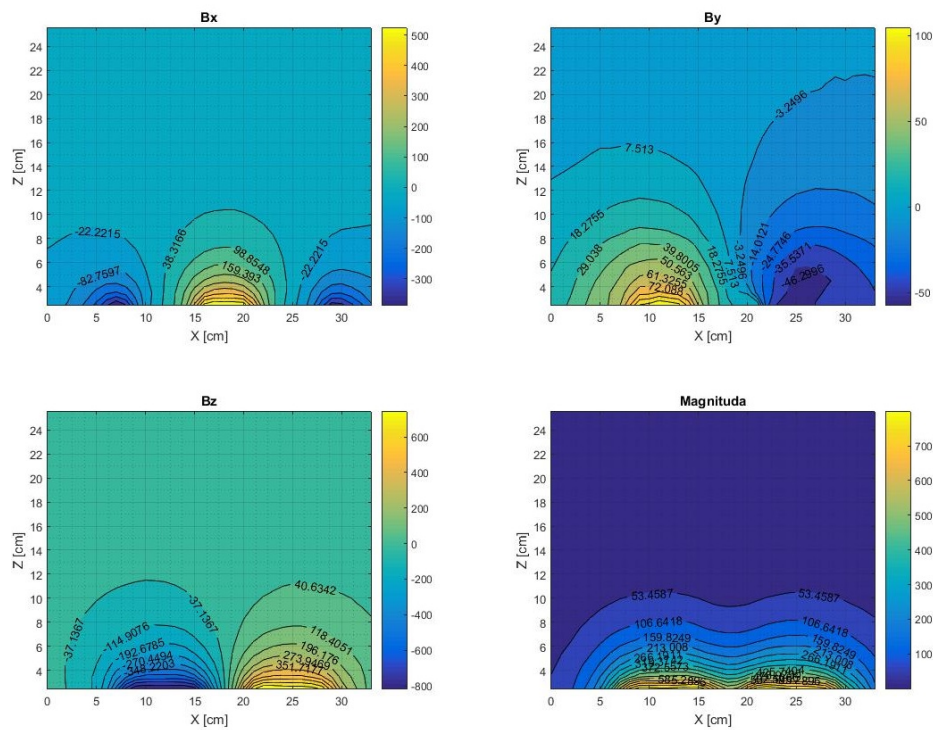
Слика 4.9: Приказ контура за вектор  $B_z$  електромагнетног поља у каналу



Слика 4.10: Приказ струјница

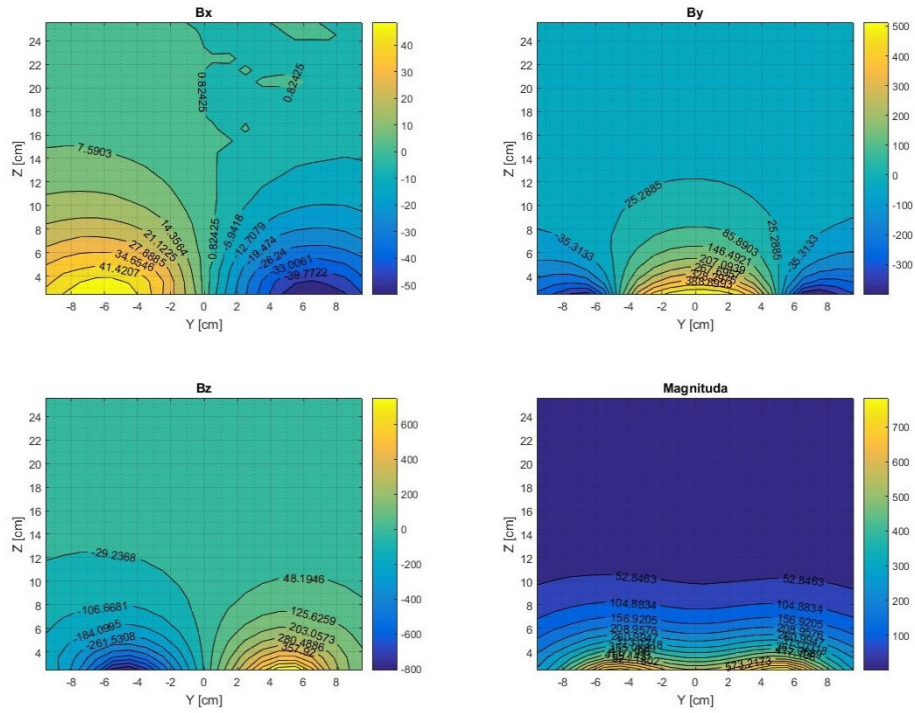


Слика 4.11: Приказ контурних линија у каналу за пресек  $Z = 2.5$  cm

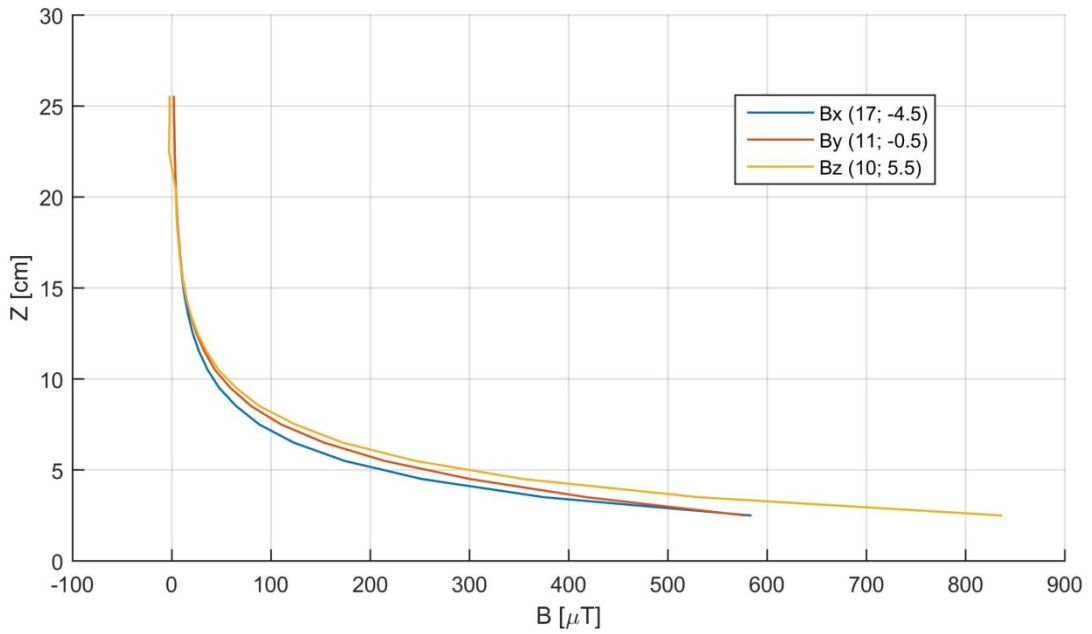


Слика 4.12: Приказ контурних линија у каналу за пресек  $Y = -4.5$  cm





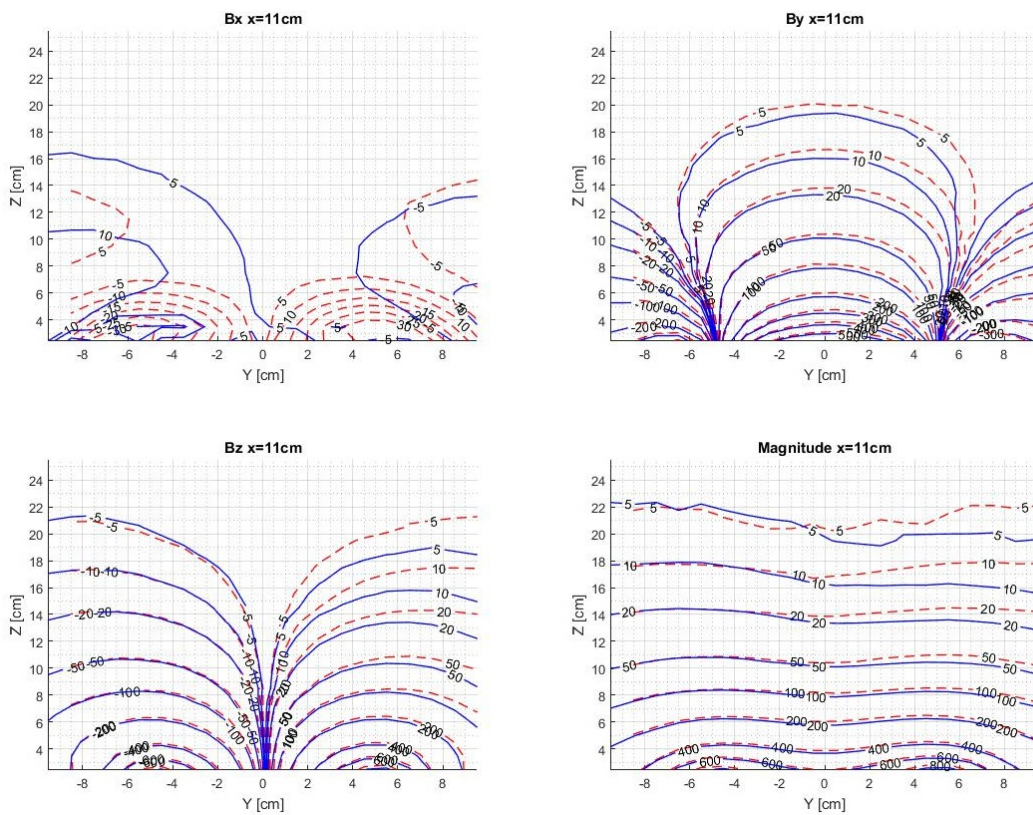
Слика 4.13: Приказ контурних линија у каналу за пресек  $X = 12$  cm



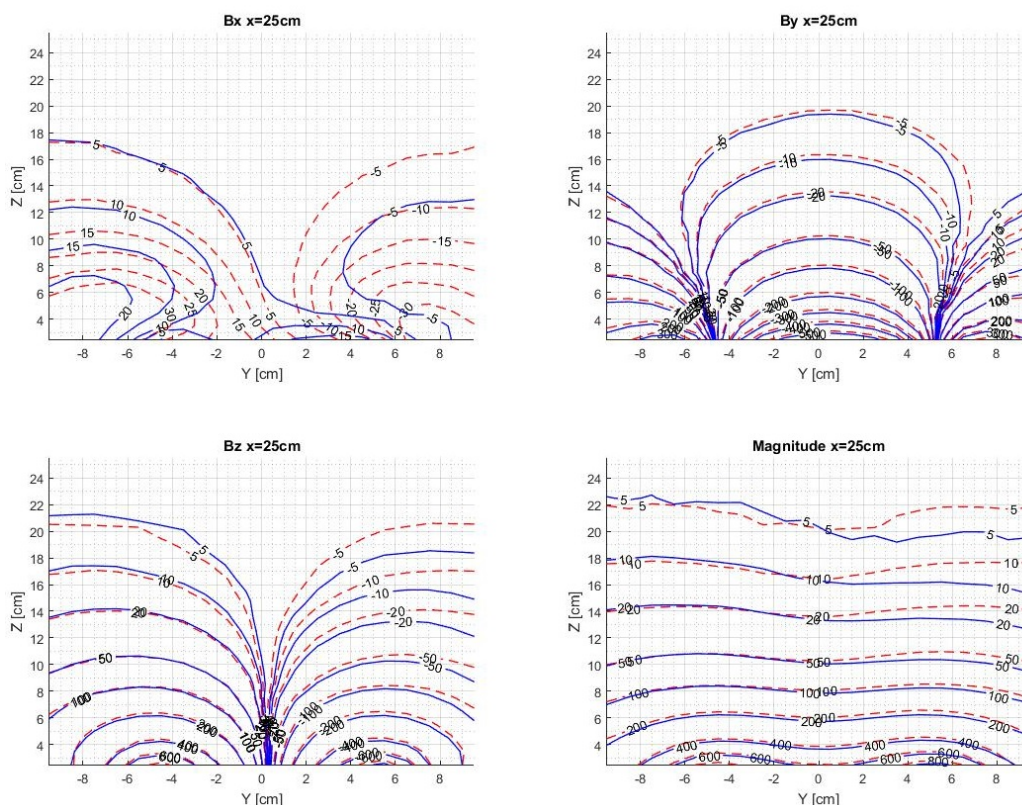
Слика 4.14: Вредности вектора ЕМ поља по вертикали. У легенди је приказан ХУ положај вертикале за сваки вектор

### 4.1.3. Утицај феромагнетних објекта на електромагнетно поље

С обзиром на уочену несиметричност електромагнетног поља у хидрауличком каналу, мерење је поновљено у два карактеристична пресека,  $X = 11 \text{ cm}$  и  $X = 25 \text{ cm}$ . Равни ЕМ сензор за мерење брзине је сада померен у део канала где су оба зида од стакла. На Сликама 4.15 и 4.16 приказани су резултати овог мерења. Пуном плавом линијом су приказани резултати из густог мерења електромагнетног поља где се метални зид налазио са леве стране равне сонде ( $Y > 0$ ), док је црвеном испрекиданом линијом приказано поновљено мерење. Код поновљеног мерења, електромагнетно поље је симетрично. Такође, поновљено мерење се у десној зони поклапа са претходним густим мерењем.



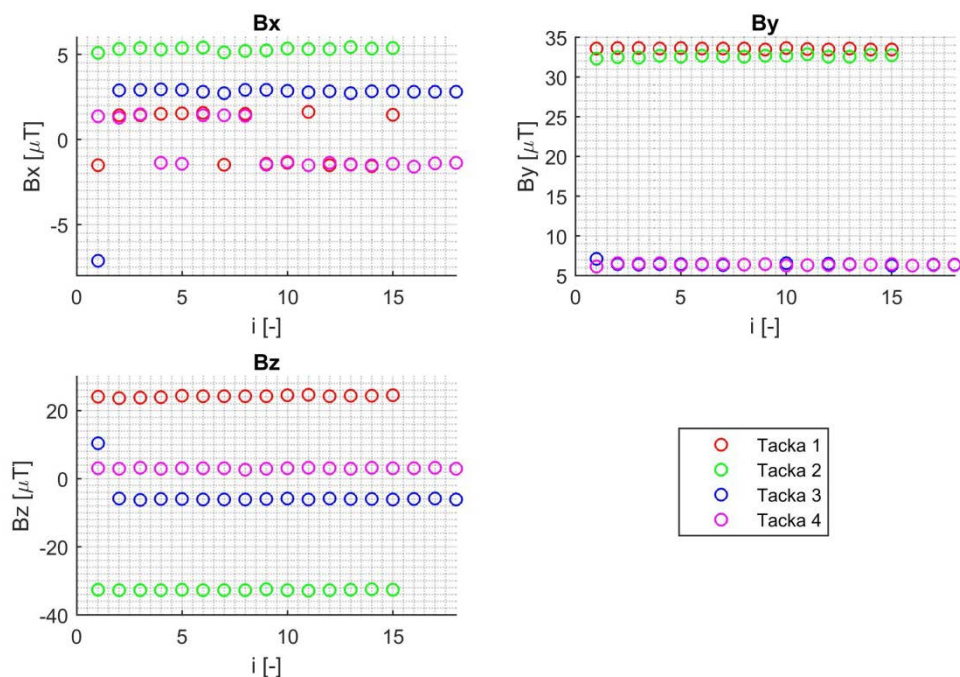
Слика 4.15: Поновљено мерење електромагнетног поља у зони зидова од стакла за пресек  $X = 11 \text{ cm}$



Слика 4.16: Поновљено мерење електромагнетног поља у зони зидова од стакла за пресек  $X = 25\text{ cm}$

#### 4.1.4. Утицај воде на електромагнетно поље

Резултати мерења електромагнетног поља са водом која протиче у каналу приказани су на Слици 4.17. Мерење је описано у Поглављу 3.2.1. (мерење 3). На хоризонталној оси су представљени редни бројеви различитих протока. Различитим бојама су представљене тачке у којима се мерило електромагнетно поље. Примећује се да се за са различитим протоцима јачина електромагнетног поља не мења, што доводи до закључка да вода не утиче на електромагнетно поље. На слици се такође примећује да вредности  $B_x$  вектора електромагнетног поља за тачке 1 и 4 узимају вредности  $+1.75$  или  $-1.75\text{ }\mu\text{T}$ . Највероватнији узрок ове појаве је погрешно одређивање знака продужене периоде у неуралној мрежи. Ова грешка се може занемарити јер су ове вредности мање од шума магнетометра ( $2\text{ }\mu\text{T}$ ).



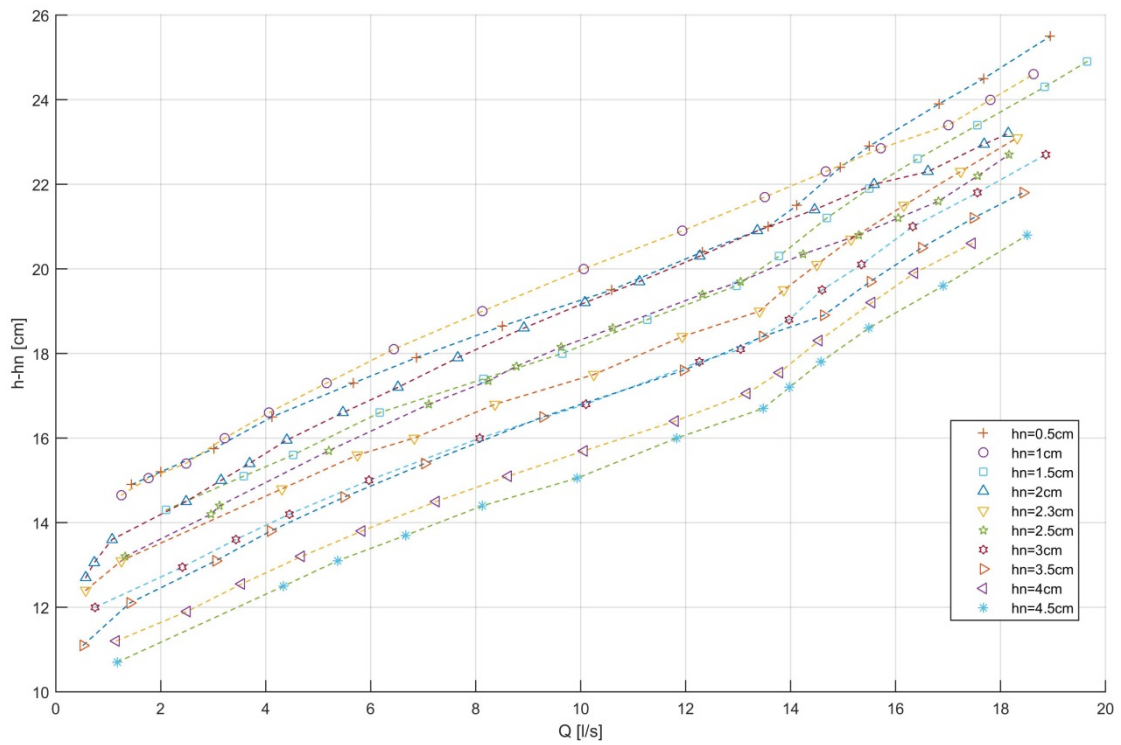
Слика 4.17: Резултати мерења електромагнетног поља са текућом водом

## 4.2. Резултати мерења у хидрауличком каналу

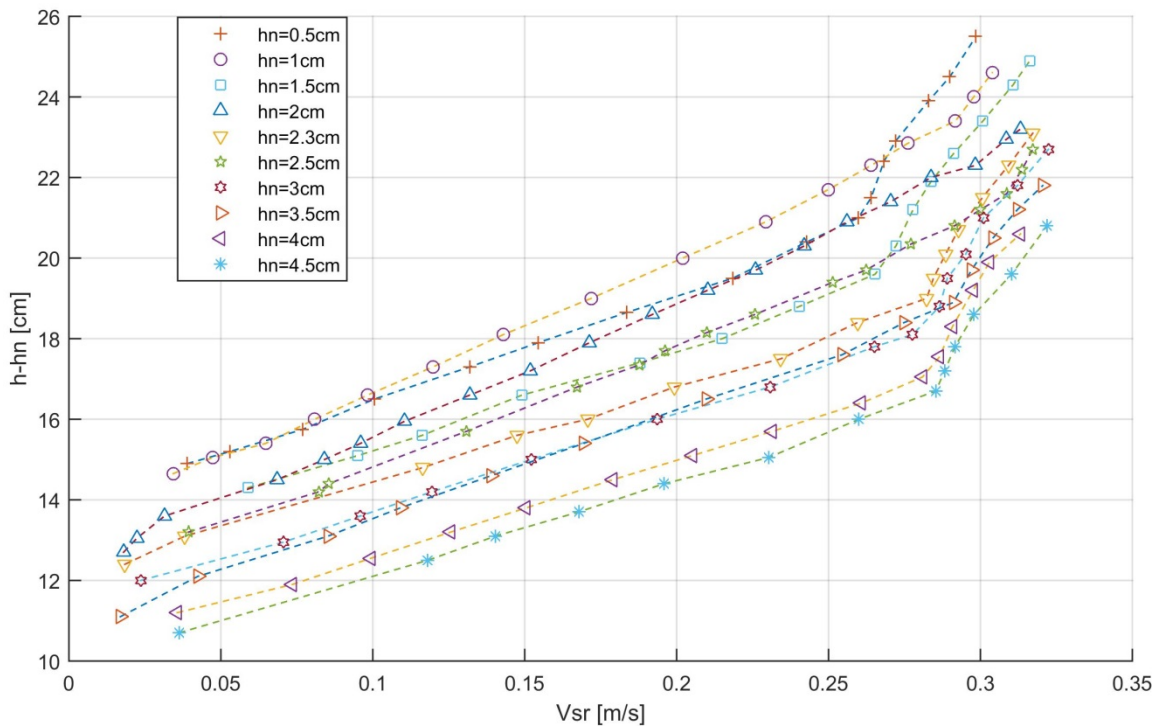
### 4.2.1. Резултати мерења хидрауличких величина

На Слици 4.18 приказане су  $Q-(h-h_N)$  криве за висине наноса од 0.5 – 4.5 cm (дубина мерена на метру компензована за висину слоја наноса). Иако би се очекивало да се криве једна у односу на другу крећу у истом смеру са порастом слоја наноса, примећује се да се ово не дешава за све висине наноса. Уколико се погледа Слика 4.19 где су представљене  $Vsr - (h-h_N)$  криве, ова појава је још уочљивија. Такође, примећује се да криве које једна у односу на другу опадају са порастом слоја наноса имају наглу промену нагиба за вредности протока између 13-15 l/s, док су криве које су „искочиле“ (1, 2 и 2.5 cm) линеарне без нагле промене нагиба.

Један од могућих разлога за ову појаву је стварање наносних формација које мењају хидрауличке услове течења. Такође, неуједначена консолидација наноса пре мерења може утицати на овакве резултате. Поновљеним мерењима ће се утврдити да ли је у питању нека од поменутих појава или грубе грешке при мерењу.

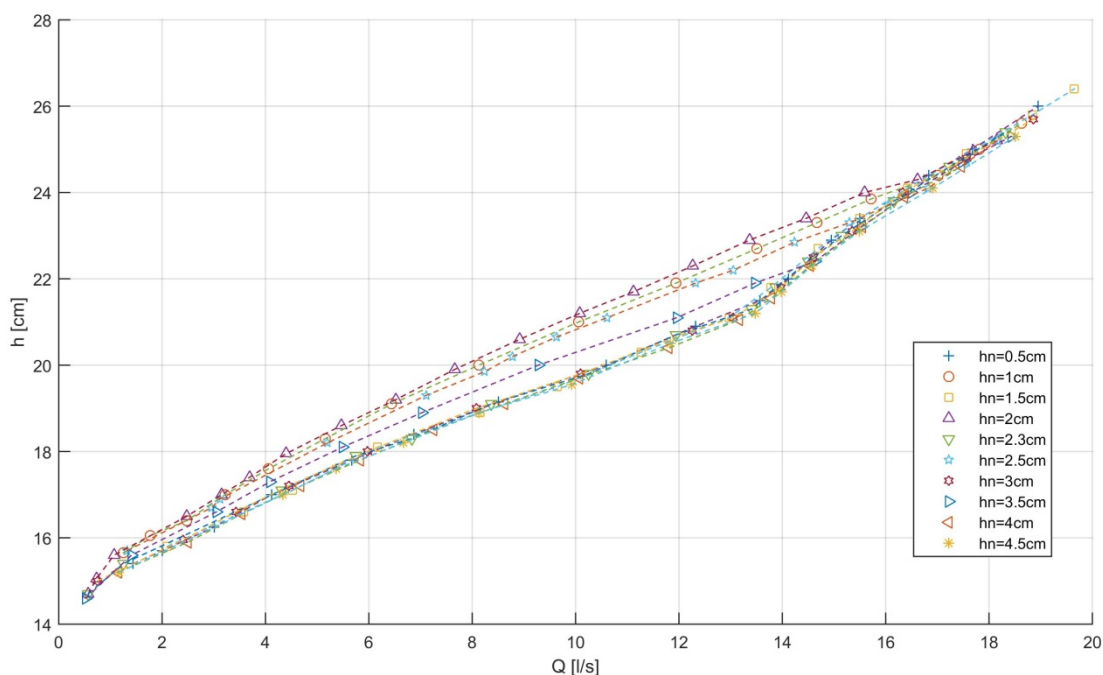


Слика 4.18:  $Q-(h-h_N)$  криве за висине наноса 0.5-4.5 cm



Слика 4.19:  $V_{SR}-(h-h_N)$  криве за висине наноса 0.5-4.5 cm

На Слици 4.20 приказане су Q-h криве без корекције висине наноса. На овим кривама се може приметити да је за већину мерења дубина очитана на лењиру (мерено од дна канала) непромењена за различите висине наноса. Изузетак су поново висине наноса 1, 2, и 2.5 cm. Због ове појаве, подаци за поменуте висине наноса биће анализирани засебно.

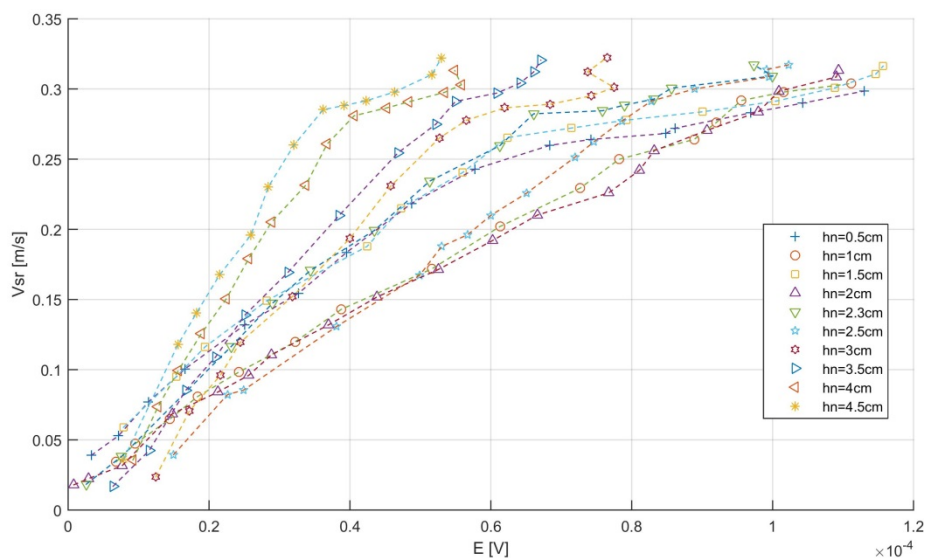


Слика 4.20: Q-h криве без корекције висине наноса

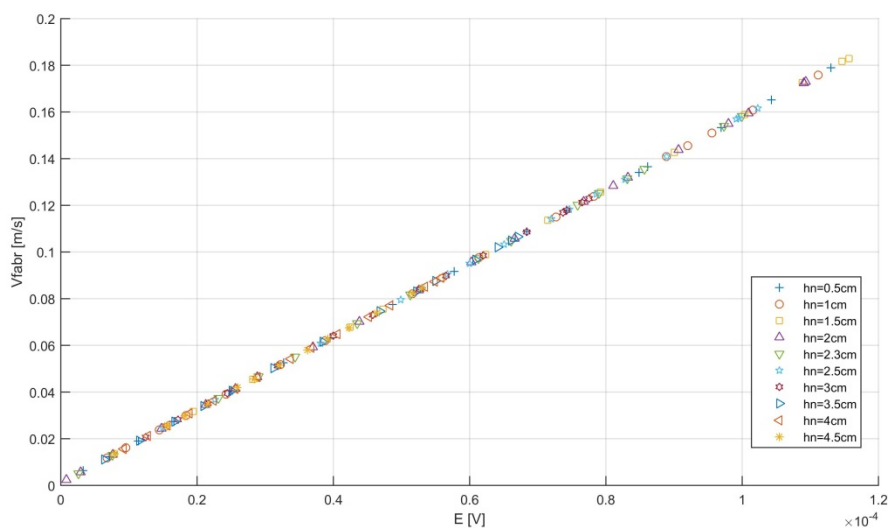
#### 4.2.2. Резултати мерења излазних сигнала равног ЕМ сензора

На Слици 4.21 приказан је индуковани напон равног ЕМ сензора у зависности од средње профилске брзине. На слици се може уочити део линеарне зависности до брзине 0.25 – 0.3 m/s а затим промене нагиба. На слици се поново примећује одступање вредности за висине наноса 1, 2 и 2.5 cm које су најниже на графику, без промене нагиба.

На Слици 4.22 приказане су вредности средње брзине фабричке калибрације у односу на индуковани напон. Може се закључити да је фабричка калибрациона крива линеарна, без одсека на осаму.



Слика 4.21: Зависност индукованог напона од средње профилске брзине

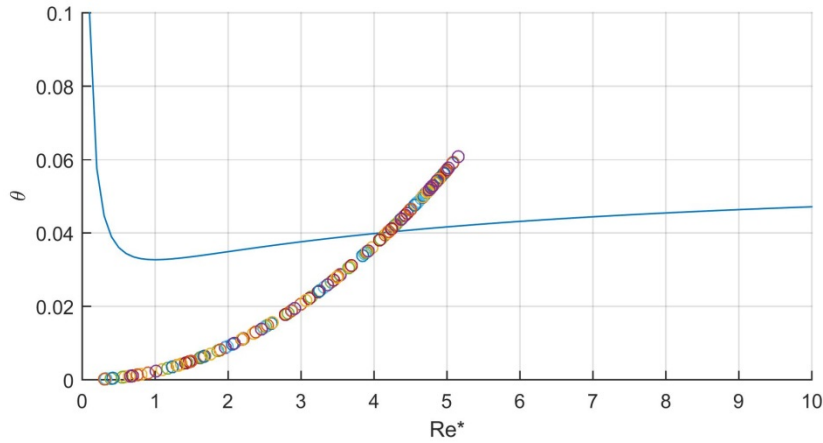


Слика 4.22: Зависност брзине фабричке калибрације у односу на мерену брзину

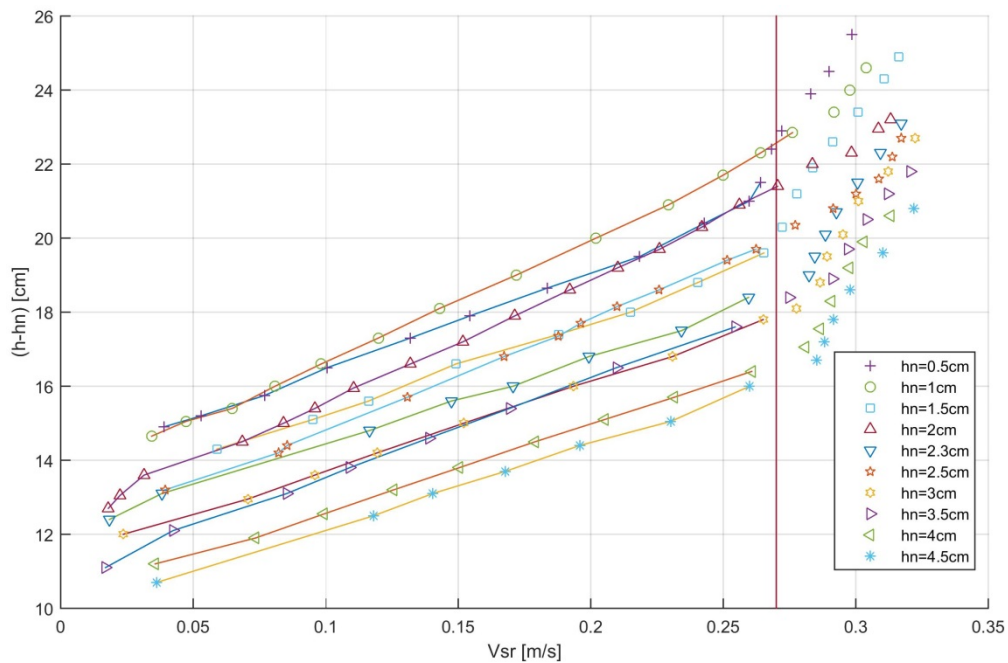
### 4.3. Резултати анализе покретања наноса

На Слици 4.23 приказани су резултати анализе покретања наноса. За величину зрна за које се испитује покретање усвојено је зрно  $d_{30}$  са гранулометријске криве, величине 0.3 mm. На Шилдсовом дијаграму су нанесене вредности за сва мерења, док је плавом линијом представљен критични Шилдсов број. На дијаграму се може приметити да један део мерења припада зони покретања наноса. На Слици 4.24 линијама су спојене вредности за које према прорачуну није дошло до покретања наноса. Због лакше обраде

даљих резултата, сматраће се да су наносне формације формиране при брзинама већим од 0,27 m/s, што се поклапа са визуелним опажањима.



Слика 4.23: Шилдсов дијаграм са резултатима покретања наноса



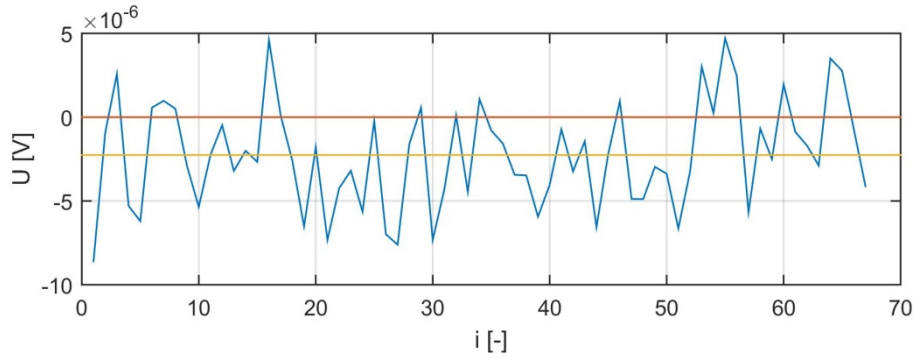
Слика 4.24: Приказ мерења за која се прорачуном показало да долази до покретања наноса. Линијом су спојена мерења у серији за која нанос није у покрету. Ветикалном линијом приказана је средња прифлска брзина  $V=0.27$  m/s

#### 4.4. Резултати калибрације равног ЕМ сензора за мерење брзине

Да би се приступило регресионој анализи, потребно је одредити одступање од нуле равног ЕМ сензора за мерење без протока а затим све мерене напоне транслирати за ову

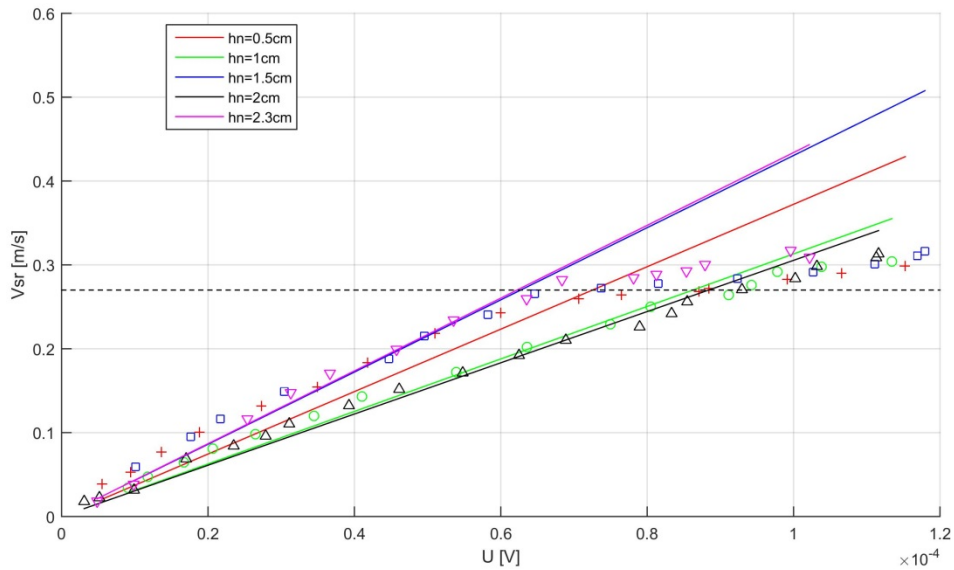


вредност. На Слици 4.25 приказан је мерени напон у каналу без протока и без слоја наноса. При мерењу, канал и уређај су били влажни али без воде у каналу. Средња вредност одступања (приказана жутом линијом на графику) износи  $-2.26 \cdot 10^{-6}$  V. Претпоставља се да је вредност иста за различите слојеве наноса.

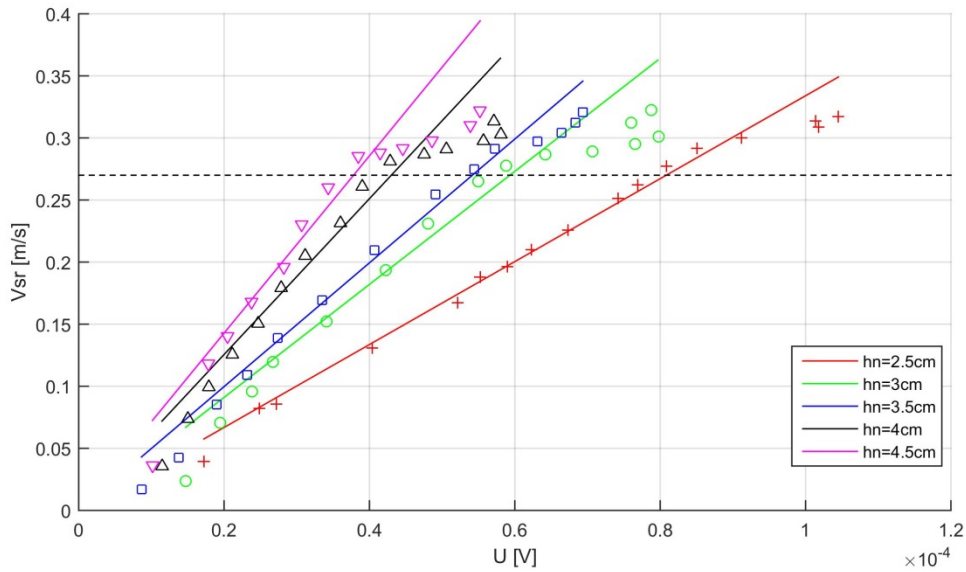


Слика 4.25: Мерења напона ЕМ сензора без протока

У складу са анализом покретања наноса, за одређивање калибрационе криве сваке групе мерења узимаће се мерене вредности за брзину мању од 0.27 m/s. На Слици 4.26 и 4.27 приказане су добијене калибрационе криве које пролазе кроз координатни почетак.

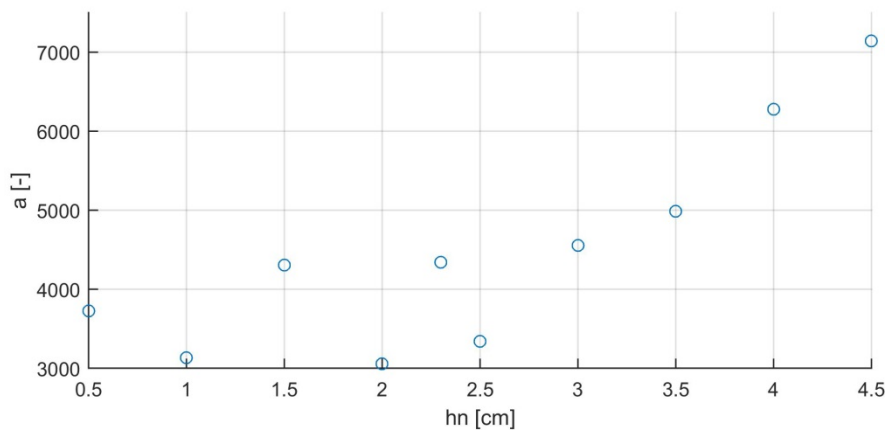


Слика 4.26: Калибрационе криве зависности средње профилске брзине од мереног напона за висине наноса од 0.5 до 2.3 cm



**Слика 4.27:** Калибрационе криве зависности средње профилске брзине од мереног напона за висине наноса од 2.5 до 4.5 cm

На Слици 4.28 приказани су коефицијенти нагиба калибрационих кривих у односу на висину наноса  $h_N$ . На слици се уочава одступање за вредности висине наноса 1, 2 и 2.5 cm, па ће се у складу са резултатима у претходним поглављима ове вредности занемарити у даљој анализи.



**Слика 4.28:** Коефицијенти нагиба  $a$  у односу на висину наноса

Уколико се са Слике 4.28 изузму вредности за висине наноса 1, 2 и 2.5 cm, најбоље уклапање има крива полинома трећег степена. Формула полинома је:

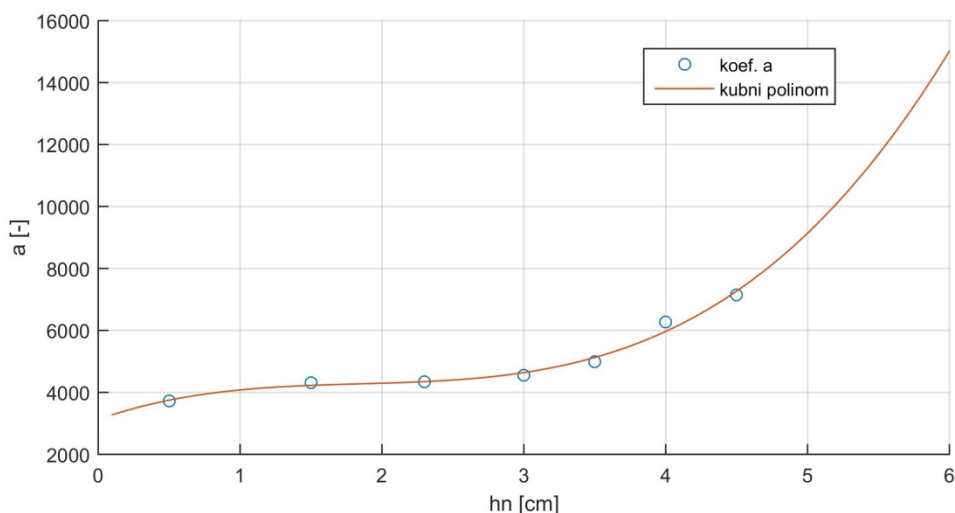
$$a = 141.3 \cdot h_N^3 - 797.5 \cdot h_N^2 + 1607 \cdot h_N + 3126 \quad (4.1)$$

Па се као коначна калибрациона функција према једначини (3.11) добија:

$$V_{SR}(h_N, U) = (141.3 \cdot h_N^3 - 797.5 \cdot h_N^2 + 1607 \cdot h_N + 3126) \cdot U + 2.26 \cdot 10^{-6} \quad (4.2)$$

$V_{SR} - [m/s] \quad h_N - [cm]$

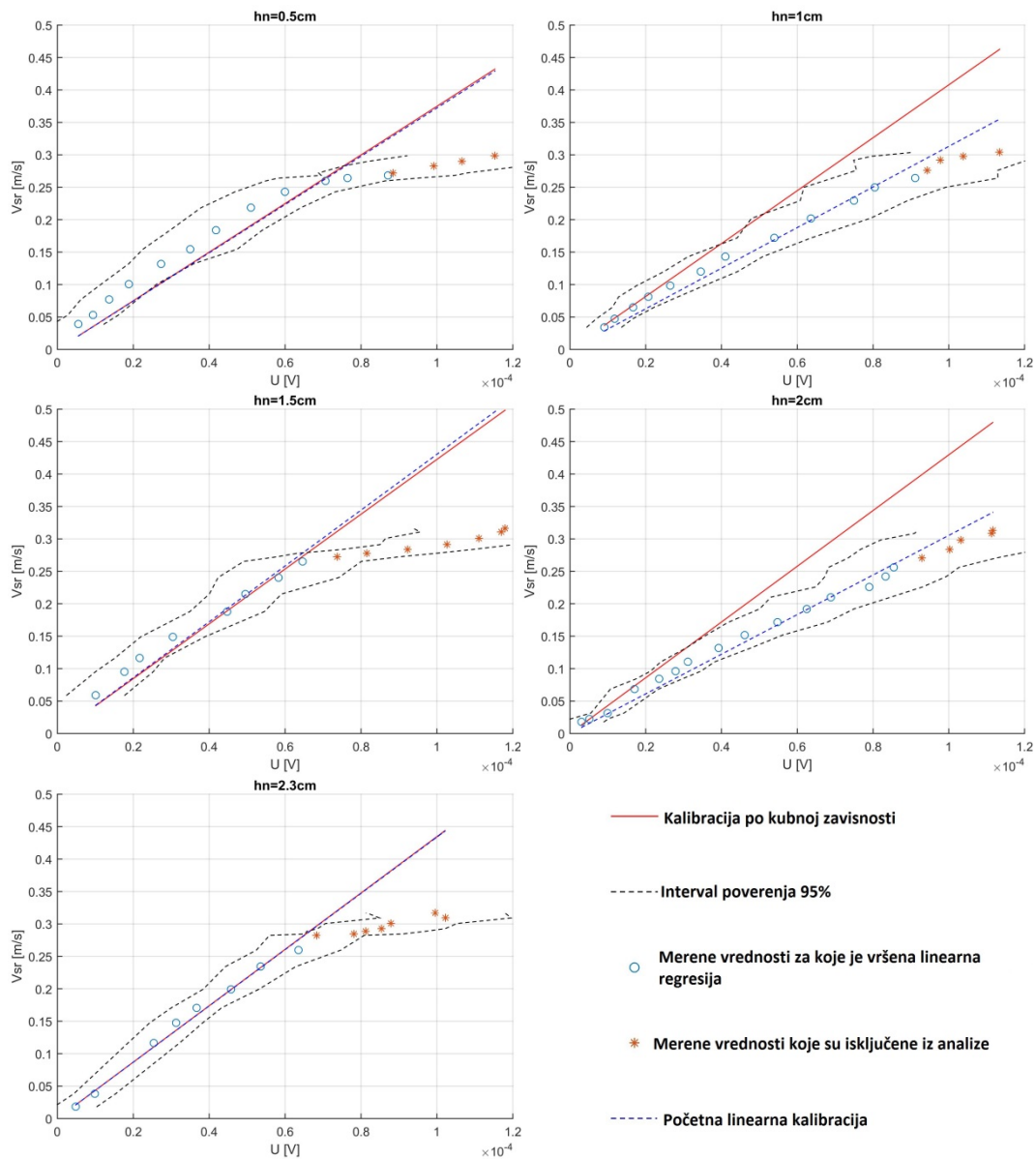
На Слици 4.29 приказана је крива по једначини (4.1).



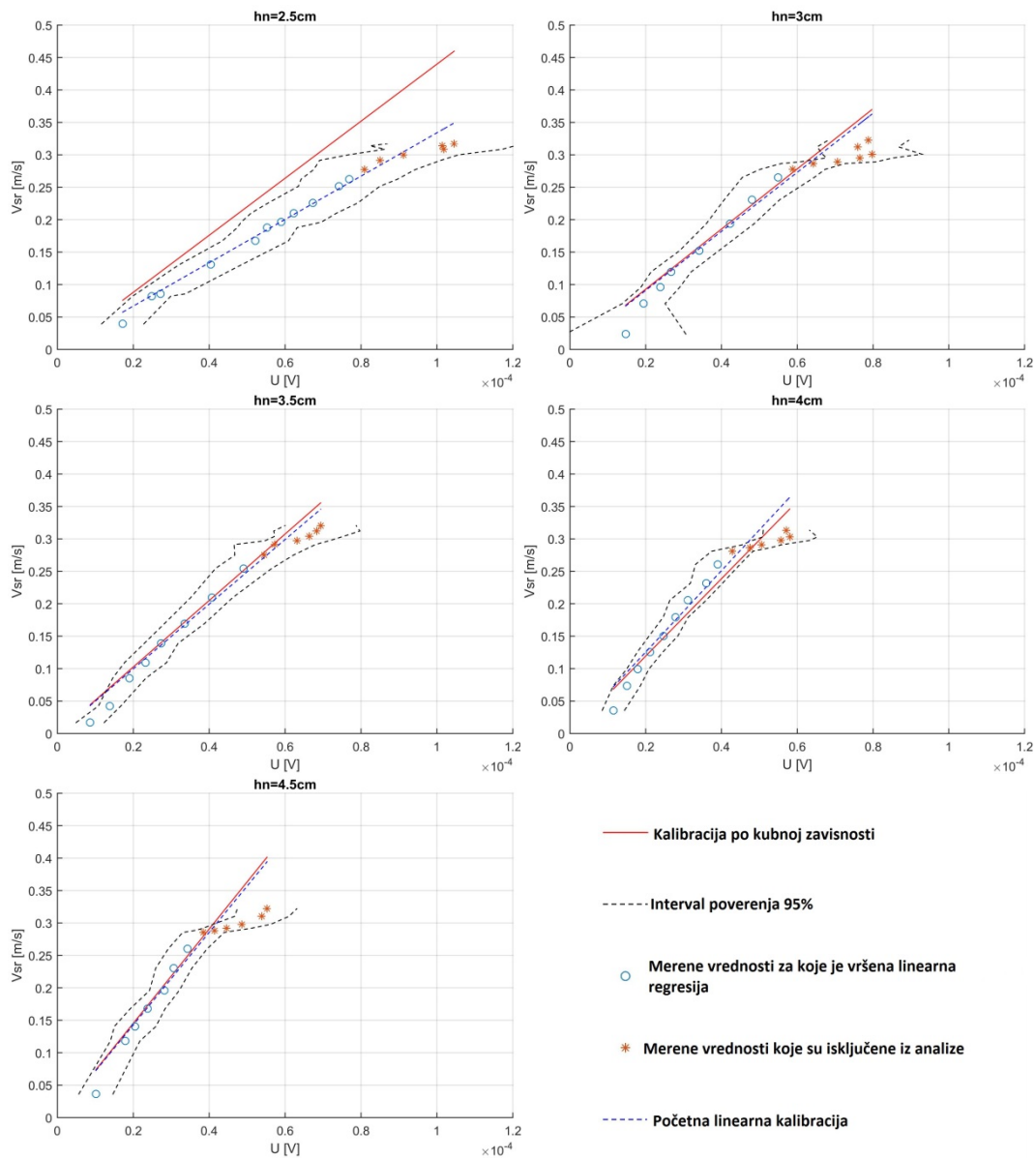
**Слика 4.29:** Коефицијенти нагиба  $a$  у односу на висину наноса  $h_N$  са кривом полинома трећег степена

На Слици 4.30. и 4.31. приказане су почетне калибрационе криве испрекиданом плавом линијом, калибрационе криве по кубној зависности (4.2) пуном црвеном линијом, интервал поверења од 95 % мерених вредности црним испрекиданим линијама (+/- две стандардне девијације мерења напона) као и мерене вредности за које је калибрација рађена и које су искључене из анализе.

Иако је су мерења са висином наноса 1, 2 и 2.5 cm занемарена у одређивању зависности коефицијента  $a$  од висине наноса, резултати за ова мерења су такође приказани. Примећује се да све калибрационе криве осим искључених из анализе по кубној зависности падају у интервал поверења мереног напона од 95%.



Слика 4.29: Приказ калибрационих кривих за различите висине наноса



Слика 4.30: Приказ калибрационих кривих за различите висине наноса

## 5. ЗАКЉУЧАК

Мерење електромагнетног поља које генеришу калемови равне ЕМ сонде за мерење брзине могуће је сензором Melexis MLX-90363 након његове калибрације. Магнетометар заједно са филтером класификујуће неуралне мреже може да измери и веома мале промене електромагнетног поља које су за ред величине мање од амбијенталног магнетног поља, (промена знака у опсегу од 4  $\mu\text{T}$  у односу на магнитуду амбијенталног поља од 60  $\mu\text{T}$ ). Филтрирање података класификујућим неуралним мрежама даје прихватљиве резултате, јер се при вредностима већим од стандардне девијације шума магнетометра (2  $\mu\text{T}$ ) ни у једној тачки (од 11000 у каналу и скоро 2500 ван канала) није приметило погрешно одређивање „знака“ електромагнетног поља у односу на околне тачке. Такође, контурне линије су чак и при јако ниским вредностима континуалне, тј. прате облик какав би се и очекивао без „тестерастих“ делова који би указивао на лоше резултате.

GUI за снимање ЕМ поља ван канала је доста олакшало и убрзало ово заморано и дуго мерење. Захваљујући GUI, на 2500 ручно мерених тачака направљена је само једна груба грешка погрешног позиционирања. Оно што је значајније унапредило мерење ЕМ поља је коришћење аутоматизованог позиционера. Уз помоћ позиционера, практично једини кораци у мерењу су ручно померање позиционера дуж канала и поновно покретање алгорита кретања након обављеног снимања у једном пресеку, што се грубо своди на пар минута посла на сваких два сата за један пресек.

Анализом резултата утврђено је да феромагнетни објекти имају утицај на изглед и јачину електромагнетног поља. Такође, утврђено је да вода не утиче на изглед и јачину електромагнетног поља.

Резултати калибрације равног ЕМ сензора за мерење брзине показали су добру линеарну зависност средње профилске брзине од напона који мери ЕМ сензор у интервалу мерења у ком није дошло до покретања наноса. Да би се утврдио да ли је ова зависност важећа на већем интервалу, потребно установити методологију при којој неће доћи до масовног порекатања наноса. У раду је претпостављено да је узрок нагле промене нагиба скоро свих кривих покретање наноса, међтим, док се не утврди тачан разлог за ову појаву, резултате треба узети са резервом.

Показало се да је нагиб праве линеарне зависности средње профилске брзине од мереног напона у зависности од висине наноса. Ова зависност је облика полинома трећег степена.

Претпоставка да је дрефт ЕМ сензора при свим мерењима иста може да се доведе у питање на основу приказаних резултата. С обзиром да ова вредност утиче на нагиб регресионе праве, ова вредност се мора поново измерити пре доношења даљих закључака.

У оквиру даљих истраживања, потребно је пре свега утврдити тачан узрок нагле промене нагиба  $Q-h$  кривих. Аутор сумња на могућност да је у цевоводу између мерења дошло до увлачења ваздуха па је из тог разлога могуће да показивања ЕМ мерила протока на цевоводу нису веродостојна. Уколико се ово покаже као тачно, потребно је поновити мерења са наносом (седиментом). Потребно је и поновити мерења без наноса на ширем распону протока према описаној методологији.

Такође, потребно је проверити да ли нанос утиче на јачину и облик електромагнетног поља.

Да би се боље утврдила веза средње профилске брзине са индукованим напонам, потребно је установити методологију за обраду резултата мерења брзина АДВ сондом. У оквиру мерења приказаних у овом раду, пралалено су вршења мерења брзина око равне ЕМ сонде, међутим, методологија за обраду резултата није још увек утврђена.

Један од могућих индикатора засипаности сонде може бити импеданса. Са произвођачем равног ЕМ сензора је потребно проверити за које струјно коло се импеданса мери, а затим проверити да ли се ова величина може употребити у поменути сврху.

Даља истраживања ће ићи у правцу истраживања других врста седимената и њихових утицаја на излазни напон равног ЕМ сензора. Претпоставља се да би седимент са кохезивним карактеристикама (нпр глина), омогућио испитивање на већем опсегу средњих профилских брзина. Такође, потребно је истражити и рад сензора у другим реалним условима у канализацији, као што је на пример случај качења пластичне кесе на сензор.

**ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Baker, R. (2002). *An Introductory Guide to Flow Measurement*. John Wiley & Sons.
- [2] Bego, V. (1985). *Мјерења у електротехници*. Техничка књига - Загреб
- [3] Bevir, M. K. (1970). The theory of induced voltage electromagnetic flowmeters. *Journal of Fluid Mechanics*, 43(3), 577-590.
- [4] Цвитковац, М. (2013). DC.2.34 Универзални индустријски мерни инструмент REV 1.17
- [5] Цвитковац, М. Продановић, Д. Вучуревић, В. (2008). Електромагнетне сонде за мерење протока отпадних вода – пример Београдске Канализације
- [6] Godley, A. (2002). Flow measurement in partially filled closed conduits. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13(5), 197-201.
- [7] Hager, W. (2010) *Wastewater Hydraulics: Theory and Practice*. Springer Science & Business Media.
- [8] Hemp, J., & Versteeg, H. K. (1986). Prediction of electromagnetic flowmeter characteristics. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 19(8), 1459.
- [9] Hu, L., Zou, J., Fu, X., Yang, H. Y., Ruan, X. D., & Wang, C. Y. (2009). Divisionally analytical solutions of Laplace's equations for dry calibration of electromagnetic velocity probes. *Applied Mathematical Modelling*, 33(7), 3130-3150.
- [10] Иветић, Д., Продановић, Д., Стојадиновић, Л., Цвитковац, М., (2017). Унапређење методологије мерења протока помоћу равних електромагнетних сензора брзине. *Водопривреда*, 49 (285-287), 93-101
- [11] Jeanbourquin, D., Sage, D., Nguyen, L., Schaeli, B., Kayal, S., Barry, D. A., Rossi, L. (2011) Flow measurements in sewers based on image analysis: automatic flow velocity algorithm. *Water Science & Technology*, 64 (5), 1108-1114.
- [12] Јовановић, М. (2008) Регулација река – Речна хидраулика и морфологија. Грађевински факултет - Београд
- [13] Kouyi, G. L., Besson, F., Bier, M. A., Chocat, B., & Lucchinacci, P. (2010). Assessment of flow rate in a complex sewer pipe by means of a water depth sensor and modelling. *NOVATECH 2010*.
- [14] Lohrmann, A., Cabrera, R., & Kraus, N. C. (1994). Acoustic-Doppler velocimeter (ADV) for laboratory use. *In Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation*: (pp. 351-365). ASCE.



- [15] Michalski, A. (2000). Flow measurements in open irrigation channels. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 3(1), 12-16.
- [16] Schütze, M., Butler, D., Beck, M. B., & Verworn, H. R. (2002). Criteria for assessment of the operational potential of the urban wastewater system. *Water science and technology*, 45(3), 141-148.
- [17] Shercliff, J. A. (1962). The theory of electromagnetic flow measurement. Cambridge University Press.
- [18] Simpson, J. C., Lane, J. E., Immer, C. D., & Youngquist, R. C. (2001). Simple analytic expressions for the magnetic field of a circular current loop.
- [19] Smyth, C. C. (1971). Derivation of weight functions for the circular and rectangular channel magnetic flowmeters, by means of Green's theorem and conformal mapping. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 4(1), 29.
- [20] Steinbock, J., Weissenbrunner, A., Juling, M., Lederer, T., & Thamsen, P. U. (2016). Uncertainty evaluation for velocity–area methods. *Flow Measurement and Instrumentation*, 48, 51-56.
- [21] Yen, B. C., & Pansic, N. (1980). Surge of sewer systems. WRC Research Report No. 149.

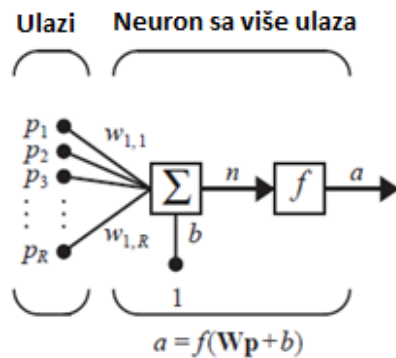
## ДОДАТАК 1

### Објашњење рада неуралних мрежа

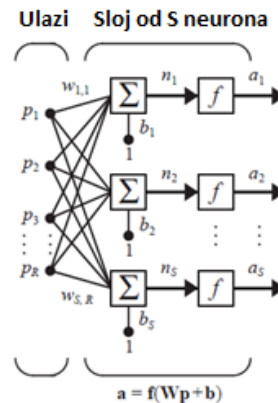
Неуралне мреже припадају методама машинског учења (енг. *Machine learning*). Машинско учење се повезује са појмом вештачке интелигенције (AI) јер је основна одлика ових мрежа да побољшавају своје резултате кроз искуство тј. са сваким новим улазним податком који се мрежи прилаже из спољне околине. Ово се постиже учењем (тренирањем) мреже, тј. итеративним мењањем параметра у елементима мреже ради добијања адекватног одговора мреже.

Основна идеја за настанак неуралних мрежа потекла је од идеје симулирања рада људског мозга, тј. обављања сложених процеса уз помоћ мноштва међусобно повезаних простих елемената (неурална ћелија у мозгу и њене везе) па је према томе основна јединица виртуелне неуралне мреже неурон (слика 6.1). Неурон добија улазни вектор из спољне околине или других неурона ( $p_1, p_2, \dots, p_R$  тј. вектор  $\mathbf{p}$ ), врши просте операције над улазним вектором и даје излаз (скалар  $a$ ). Операције унутар неурона најчешће се свде на множење улазног вектора тежинским коефицијентима  $w_1, w_2, \dots, w_R$  (вектор  $\mathbf{W}$ ), сумирање, додавање бијаса  $b$  чиме се добија скаларна величина  $n$  која је улаз трансфер функције  $f$ . Излаз из трансфер функције је поменути скалар  $a$  који је даље улаз у нови неурон или се враћа околина као одговор мреже. Унутар једног неурона, у процесу учења се мења вектор тежинских коефицијената као и бијас. Вектор тежинских коефицијената контролише међусобну повезаност неурона тј. јачину међусобних веза неурона док се бијасом додатно контролише утицај неурона.

Неурони који су повезани тако да обављају сличне функције чине један слој (слика 6.2), а више различитих слојева чини неуралну мрежу. Различите конфигурације слојева као и неурона који чине слојеве заслужни су за адаптивност неуралних мрежа различитим проблемима. Неуралне мреже могу решавати проблеме класификације и регресије. Код проблема класификације, од мреже се очекује да улазне улазне векторе класификује у дискретне групе. Код проблема регресије, од мреже се очекује да на сваки улазни вектор одговори новим излазним вектором (ово се може схватити као апроксимација излаза функције где је улазни вектор аргумент непознате функције).



Слика 6.1: Неурон



Слика 6.2: Слој неурона

За обраду података мерења електромагнетног поља користиће се мреже које решавају проблеме класификације јер је задатак управо класификовати податке у две групе (јачина електромагнетног поља при различитим поларитетима).

Након дефинисања проблема који неурална мрежа треба да реши, потребно је одабрати начин учења мреже. Алгоритми учења мреже деле се на надгледано и ненадгледано учење. Надгледано учење се одликује тиме да је у проблемима класификације за одређени број улазних вектора познато којој групи ти вектори припадају. Уз помоћ ових података, неурони у мрежи мењају своје тежинске коефицијенте и бијасе, тако да је мрежа сада способна да сваки наредни улаз правилно класификује. Код ненадгледаног учења од алгоритма се очекује да сам препозна групације (кластере) у улазним векторима и сваки улазни вектор придружи одговарајућој класи. У филтрирању података мерења електромагнетног поља користиће се алгоритми ненадгледаног учења.

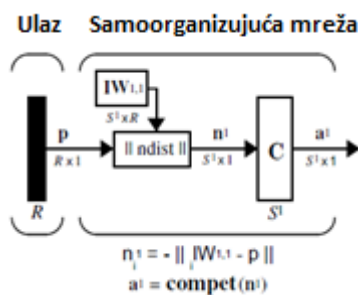
Један од модела класификујућих неуралних мрежа ненадгледаног учења су компетитивне мреже. Основни алгоритам компетитивних (такмичарских) мрежа је да за сваки улазни податак (улазни вектор) одреди најближи неурон у простору (победнички неурон) и њега приближи улазном вектору. Процес приближавања победничког неурона улазним векторима представља учење неуралне мреже. Након довољно итерација, неурони би требало да буду постављени у различитим групама улазних вектора. Када се мрежи као улаз проследи један од улазних вектора, у мрежи реагује неурон у чијем се кластеру улазни вектор налази, чиме се врши класификација. Име ове мреже потиче од компетитивног слоја у мрежи, чија је улога да неурону који је најближи улазном вектору у слој додели излаз 1 док сви остали неурони имају излаз 0.

На слици 12 приказана је упрошћена шема компетитивне мреже. Матрица  $\mathbf{IW}$  представља положаје у простору свих неурона док је улаз у слој (вектор  $\mathbf{R}$ ) положај у простору улазног вектора. Елемент  $ndist$  одређује раздаљине свих неурона од улазног вектора, додаје им знак минус и резултат се прослеђује елементу  $\mathbf{C}$ . Елемент  $\mathbf{C}$  одређује

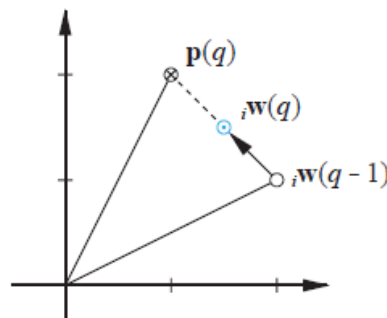
индекс највећег члана његовог улазног вектора (вектор  $\mathbf{p}$ ) чиме је одређен најближи неурон. Једначина по којој се рачуна нови положај победничког неурона је

$${}_i\mathbf{W}^{1,1}(q) = {}_i\mathbf{W}^{1,1}(q - 1) + \alpha(p(q) - {}_i\mathbf{W}^{1,1}(q-1)) \quad (6.1)$$

где је  $i$  индекс победничког неурона,  $\alpha$  коефицијент учења,  $q$  тренутна итерација а  $q-1$  претходна итерација. На слици 6.4 приказана је графичка интерпретација ове формуле у 2-D простору.



Слика 6.3: Шема конкурентне мреже



Слика 6.4: Промена положаја победничког неурона након једне итерације

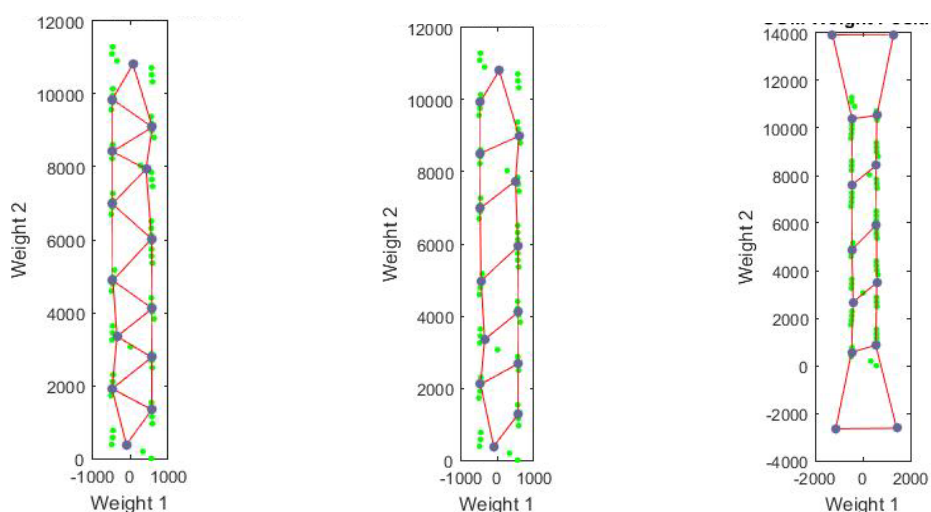
Овако описана мрежа има неколико проблема. Један од њих је да уколико је неки од неурона постављен превише далеко од било ког кластера, такав неурон никада неће бити победнички неурон, па се самим тим неће ни приближавати улазним векторима. Такав неурон назива се мртав неурон. Могући проблем настаје и у случају када су два кластера улазних података блиски у простору. Када један неурон дође у позицију између два оваква кластера, он ће надаље за све улазне векторе из поменутих кластера бити победнички неурон и избацити друге неуроне, чиме се спречава боља класификација. Једно од могућих решења је увећање бијаса у сваком неурону који ће мртве неуроне вештачки приближити улазним подацима уколико довољно дуго нису победници. Други начин је надоградња алгоритма учења такозваном самоорганизујућом мапом атрибута.

Самоорганизујуће мапе атрибута (*Self-organising feature map*, у даљем тексту SOFM), су врста конкурентних мрежа које уводе појам топологије. У процесу учења, поред тога што се победнички неурон приближава улазном вектору, приближавају се и околни неурони. Који неурони припадају околини зависи од одабране топологије мреже. Након завршеног учења мреже, неурони и њихове везе приказују топологију улазних вектора.

У SOFM мрежама учење се не одвија у итерацијама где се са сваком улазним вектором померају неурони, већ се мрежи представе сви улазни вектори, а за сваки неурон се проверава за које улазне векторе су он и неурони из околине тог неурона победници. Победнички неурон се поставља у средину простора свих улазних вектора

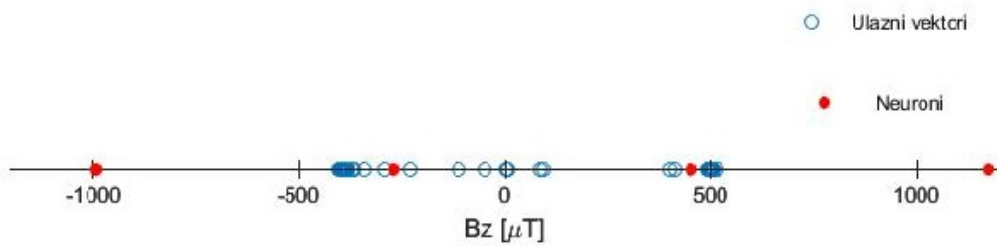
који су задовољили претходни услов (*Batch* алгоритам). Овим се процес учења знатно убрзава.

У зависности од димензионалности улазних вектора, SOFM мреже могу бити једнодимензионалне, дводимензионалне и вишедимензионалне. На слици 5.5 приказани су примери дводимензионалних мрежа различитих топологија након завршеног тренинга, међутим показало се да у обради мерења електромагнетног поља дводимензионална мрежа нема значајних предности у односу на једнодимензионалну мрежу, па ће се према томе на даље објаснити рад једнодимензионалне мреже која је на крају и коришћења.



**Слика 6.5:** Различите 2-D мреже. На хоризонталној оси је јачина ЕМ поља а на вертикалној број мерења у Burst серији скалиран тако да је растојање две периоде једнако разлици минимума и максимума јачине ЕМ поља. С лева на десно: 1. хексагонална топологија 2. правоугаона топологија 3. алгоритам учења без околине

При прављењу SOFM мрежа, један од првих корака је одређивање потребног броја неурона тј, број група у које је потребно поделити улазне векторе. У једнодимензионалној мрежи усвојено је 4 неурона. Иако је податке потребно раздвојити на 2 основне групе, претпоставља се да ће распоред неурона у 1-D простору бити такав да ће за два унутрашња неурона класификовати подаци који су снимљени у тренуцима мењања поларитета електромагнетног поља, док ће два спољашња неурона класификовати само реалне податке за различите поларитете. Међутим, спољни неурони ће класификовати и податке у тренуцима стабиловања магнетног поља. Одступања од вредности стабилног магнетног поља су у оба знака, па се уводи претпоставка да ће се ова одступања међусобно поништити на довољно великом узорку снимања. У једнодимензионалним мрежама, избор топологије мреже нема утицаја на резултате, јер су неурони постављени на истој прави.

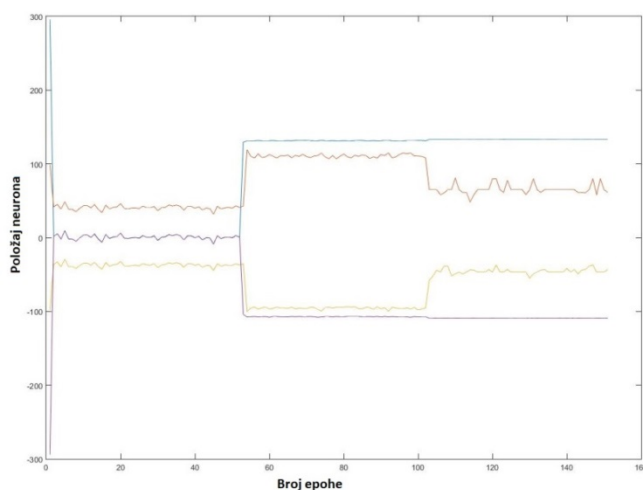


**Слика 6.6:** Приказ улазних вектора (мерених података) и почетног положаја неурона у 1-D простору

Да би мрежа започела учење, потребно је иницијализовати мрежу, тј. одредити почетни положај неурона. Користиће се линеарна функција иницијализације према којој се неурони у почетном положају равномерно распоређују у простору који је шири од простора који заузимају улазни вектори (Слика 6.6).

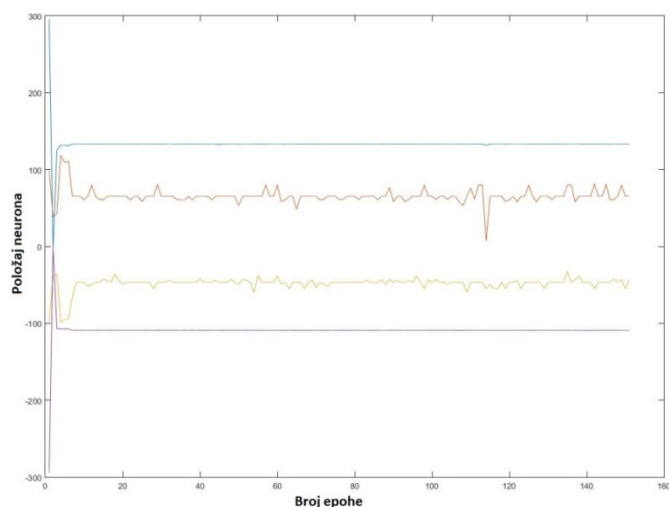
Следећи корак је одређивање почетне околине мреже. У процесу учења, околина се линеарно смањује у одређеном броју корака. У почетним пролазима кроз улазне векторе, околина је постављена на већу вредност да би неурони што брже заузели простор који заузимају улазни вектори, а са смањењем околине на коначну вредност 1 мрежи се омогућује фино прилагођавање.

На Слици 5.7 приказана је промена положаја неурона за сваку епоху (појам епоха у неуралним мрежама представља један пролазак кроз све улазне векторе). У овој мрежи коришћене су подразумеване вредности мреже: почетна околина 3, линеарно смањење околине у 100 епоха. На слици се јасно уочавају три зоне, зона до 50 епоха, до 100 епоха и зона преко 100 епоха. У свакој од ових зона, величина околине се мењала, од 3 до коначне вредности 1 за преко 100 епоха. Примећује се да је за исту вредност околине, положај неурона остао непромењен без обзира на број епоха. На слици се може приметити још једна занимљива појава. За вредности околине 3, сви улазни вектори су у околини сваког неурона, па би нови положаји свих неурона после прве епохе требало бити у средини улазних вектора. Ово се не дешава из разлога што при прорачуну средње вредности улазних вектора који се налазе у околини неурона, вектори који за које неурон коме се рачуна нови положај заиста јесте победнички беурон улазе два пута у средњу вредност.



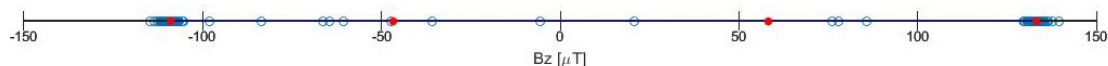
**Слика 6.7:** Промена положаја неурона кроз итерације за почетну околину 3 и смањење у 100 епоха. Вредности на вертикалној оси заправо представљају јачину ЕМ поља

Може се закључити да је почетна околина превише велика, или да околина може да се смањује доста брже јер за исту вредност околине нема промене у положају неурона. Наредни график приказује промену положаја неурона у мрежи са почетном величином околине 2 и где се околина смањује на сваке 2 епохе.



**Слика 6.8:** Промена положаја неурона кроз итерације за почетну околину 2 и смањење кроз 4 епохе. Вредности се стабилизују после пар епоха.

Примећује се да су вредности спољних неурона (чији се положај заправо тражи јер је њихов задатак да класификују ваљане податке) стабилне после пар епоха. На основу тога, усвојиће се број епоха за учење мреже 20 за све даље тачке.



**Слика 6.9:** Промена положаја неурона кроз итерације за почетну околину 2 и смањење кроз 4 епохе. Вредности се стабилизују после пар епоха.

Након што је мрежа класификовала улазне векторе, потребно је одредити коначну вредност електромагнетног поља у оба поларитета. Ово се може постићи на два начина, усвајањем положаја спољних неурона као коначне вредности, или узимањем средње вредности свих улазних вектора које су спољни неурони класификовали. Користиће се средње вредности улазних вектора, јер на положај неурона утичу и подаци из околине који се сматрају за податке које треба одстранити из резултата.

За сада је познато које су вредности електромагнетног поља у оба поаритета, међутим потребно је раздвојити их на позитивно и негативно електромагнетно поље по усвојеној конвекцији, тј. одредити у којој групи података се појављује продужена периода. Ово је релативно лако, јер је потребно наћи групу о којој је класификовано 6 или 7 мерених података који су хронолишки један за другим. Међутим, при веома малим вредностима електромагнетног поља, дешава се да услед грешке магнетометра нека од вредности из продужене периоде буде класификована у једну од унутрашњих група, чиме је низ од 6 или 7 узастопних вредности у једној групи поремећен. Овај проблем је решен новом неуралном мрежом, која ради по истим објашњеним принципима, са изузетком да се подаци класификују у две групе. Поново се тражи низ од 6 или 7 узастопних података. С обзиром да су сада подаци класификовани у 2 групе, могуће је и да се у групи у којој не припада продужена периода нађе 6 узастопних података, међутим ово се дешава веома ретко, тако да је коначна група са продуженом периодом она група у којој се налази више оваквих узастопних низова (с обзиром на учесталост с којом се дешава продужење периоде, у 3 *Burst* серије би узастопних низова требало бити 4 или 5). Напоменуће се и да се се у тачкама у околини спајања појединачних *Burst* серија (тачке 60 и 120) могући низ од 6 узастопних података не узима у обзир јер нису снимљене са растојањем од 11ms већ мало већим услед кратке паузе између две узастопне *Burst* серије.

#### ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Demuth, H., Beale, M., & Hagan, M. (2008). *Neural network toolbox™ 6. User's guide*
- [2] Demuth, H. B., Beale, M. H., De Jess, O., & Hagan, M. T. (2014). *Neural network design*. Martin Hagan.
- [3] Kohonen, T. (2012). *Self-organization and associative memory*(Vol. 8). Springer Science & Business Media.