

## Laboratorijsko ispitivanje magnetnog polja ravnih elektromagnetnih senzora

Luka Stojadinović<sup>1</sup>, Damjan Ivetić<sup>2</sup>, Dušan Prodanović<sup>3</sup>

APSTRAKT: Princip rada elektromagnetnih (EM) senzora brzine ili protoka se zasniva na Faradejevom zakonu indukcije. Kretanje provodne tečnosti kroz magnetno polje senzora indukuje na krajevima elektroda koje su u kontaktu sa tečnošću napon proporcionalan brzini kretanja tečnosti. U opštem slučaju, veličina napona je rezultat integracije vektorskog proizvoda nelinearnog polja brzina i nelinearnog magnetnog polja. Za potrebe ispitivanja osetljivosti EM senzora, od interesa je poznavati raspored magnetnog polja koje generiše uređaj. Takođe, potrebno je definisati koji uslovi, koji se mogu javiti u eksploataciji, utiču na oblik indukovanog magnetnog polja a samim tim i na pokazivanje samog uređaja. U ovom radu predstavljeni su rezultati ispitivanja magnetnog polja ravnog EM senzora brzine, sprovedenih u laboratoriji Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu.

Ključne reči: merenje protoka, merenje brzine, merenje magnetnog polja, elektromagnetni senzori, neuralne mreže

## Laboratory assessment of the flat electromagnetic meter's magnetic field

ABSTRACT: The operating principle of the Electro Magnetic (EM) velocity, or flow meters is based on the Faraday's law of the induction. The motion of the conductive fluid through the magnetic field of the sensor generates, on the electrodes, the voltage proportional to the flow velocity. In general, the output voltage value is a result of the integration of the non-linear flow field and non-linear magnetic field. In order to assess the sensitivity of the EM probes, the magnetic field distribution is needed. Also, it is required to determine which operational conditions can affect the distribution of the induced magnetic field, and thus the sensor's output voltage. In this paper, results of the laboratory analysis of the magnetic field of the flat EM velocity meter are presented. Laboratory tests were performed at the Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade.

Keywords: flow measurements, velocity measurements, magnetic field measurements, electromagnetic meters, neural networks

---

<sup>1</sup> Luka Stojadinović, dipl. inž. građ., Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Pinosava-Beograd, [st\\_luka@hotmail.com](mailto:st_luka@hotmail.com)

<sup>2</sup> Damjan Ivetić, dipl. inž. građ., Građevinski fakultet - Univerzitet u Beogradu, [divetic@grf.bg.ac.rs](mailto:divetic@grf.bg.ac.rs)

<sup>3</sup> Prof. dr Dušan Prodanović, Građevinski fakultet - Univerzitet u Beogradu, [dprodanovic@grf.bg.ac.rs](mailto:dprodanovic@grf.bg.ac.rs)

## 1 Uvod

Procena količine zagađujućih materija u kanalizacionim sistemima i njihov uticaj na životnu okolinu je tema koja u vremenu značajne urbanizacije gradskih centara sve više u centru pažnje. Preduslov za navedene pouzdane procene je poznavanje protoka u kanalizacionim sistema u realnom vremenu. Međutim, merenje protoka kanalizacionih sistema je zahtevan zadatak, jer u se u njima nailazi na niz problema koji ometaju pravilan rad uređaja. Neki od tih problema su veliki odnosi minimalnog i maksimalnog protoka koje je potrebno meriti (i do 1:1000), kombinovani uslovi tečenja (prelazak iz tečenja sa slobodnom površinom u tečenje pod pritiskom), „prljava“ voda koja sa sobom nosi nanos i mnogi drugi.

Jedna od popularnijih metoda za merenje protoka u kanalizaciji je metoda „brzina – proticajni presek“. Suština ove metode svodi se na odvojeno merenje dubine, iz koje je relativno lako proračunati poprečni presek, i merenje srednje profilske brzine. Množenjem poprečnog preseka sa srednjom brzinom dobija se protok. Međutim, merenje srednje brzine nije jednostavan zadatak [1].

Metode za merenje brzine u otvorenim tokovima koje su među najzastupljenijim su ultrazvučne (UZV) metode [2]. Zahvaljujući velikom napretku tehnologije poslednjih godina, a posebno dostignućima u obradi signala, UZV metode su postala pouzdane i ekonomski pristupačne. Mane ovih metoda su to što su osetljive na rad u uslovima velikog opterećenja toka nanosom usled prljanja UZV senzora prilikom sedimentacije nanosa (što je često slučaj u merenjima u kanalizaciji) kao i nepouzdana rezultati merenja pri malim brzinama i/ili malim dubinama vode (opet, čest slučaj pri usporima u kanalizaciji).

Kao alternativa UZV merenju brzine u otvorenim tokovima, na tržištu se pojavljuju ravni (pločasti) elektromagnetni (EM) merači brzine. Merni princip je takav da elektromagnetni senzori treba da rade bez poteškoća u uslovima zaprljanosti senzora nanosom kao i da pokazuju veliku linearnost izmerenog signala pri minimalnim brzinama i dubinama vode. Tehnika elektromagnetnog merenja protoka u cevovodima pod pritiskom je odavno zauzela svoje mesto na tržištu kao veoma pouzdana i u stručnoj literaturi je obrađena, međutim, elektromagnetno merenje brzine u otvorenim tokovima je još uvek nedovoljno izučena oblast u literaturi.

Svi EM senzori rade po principu Faradejevog zakona: kalemovi u senzoru prave elektromagnetno polje, a voda koja prolazi kroz polje indukuje struju. Indukovana struja je proporcionalna brzini vode u zoni elektromagnetnog polja. Iz opisanog principa rada, jasno je da dve veličine imaju ključni uticaj na veličinu napona koji će se indukovati: oblik i jačina elektromagnetnog polja koje pravi senzor kao i polje brzina vode. Ukoliko se ova dva polja na pravilan način dovedu u zavisnost sa izlaznim naponom senzora, za merna mesta u uslovima realnog korišćenja moguće je izvršiti kalibraciju senzora kompjuterskim modelovanjem polja brzina.

U okviru istraživanja koja su opisana u ovom radu ispitani su razni aspekti elektromagnetnog polja koje pravi ravni EM senzor. U radu je prikazana uspostavljena metodologija i rezultati merenja elektromagnetnog polja. Proveren je uticaj provodnog fluida kao i feromagnetnih objekata na oblik i intenzitet magnetnog polja. Takođe, dati su osnovni principi za korišćenje heurističkog algoritma neuralnih mreža za obradu izmerenih vektora magnetnog polja. Pokazano je da algoritam neuralnih mreža, uz pravilno postavljanje klasifikacionog problema, može efikasno obraditi izmereni signal.

## 2 Metodologija

### 2.1 Teorijske osnove rada EM senzora

Elektromagnetni senzori za merenje brzine zasnivaju se na Faradejevom principu magnetne indukcije. Osnovni princip je sledeći: voda koja je provodnik se kreće određenom brzinom kroz elektromagnetno polje koje pravi senzor, pa se po Faradejevom zakonu indukcije, u vodi, na elektrodama senzora indukuje razlika potencijala proporcionalna brzini vode [3]. Napon koji se meri  $E$  se može opisati razlikom potencijala na elektrodama preko jednačine [4]:

$$E = \int_A (\vec{B} \times \vec{j}) \cdot \vec{V} dA \quad (1)$$

gde je  $\vec{V}$  – brzina strujanja,  $A$ - integraciona zona EM senzora,  $\vec{B}$  - magnetno polje, a  $\vec{j}$  predstavlja „virtuelnu struju“. Virtuelna struja predstavlja gustinu struje koja se uspostavlja u fluidu prolaskom jedinične struje iz jedne elektrode u drugu. Vektorski proizvod  $\vec{B} \times \vec{j}$  definiše Bevirov težinski vektor  $\vec{w}$ . Bevir je definisao uslov „idealnog“ merača po kom je uređaj neosetljiv na varijacije u rasporedu brzina ukoliko je rotor težinskog vektora jednak nuli [5].

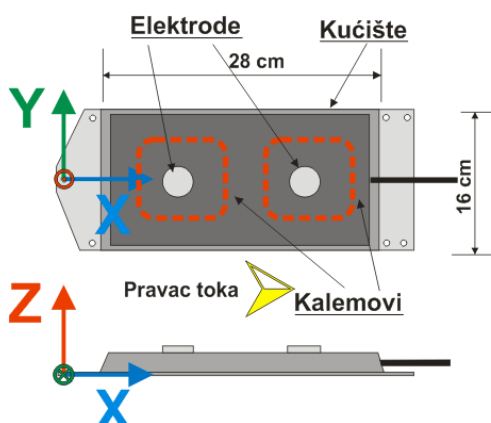
U praksi se uobičajno umesto vektora koriste težinske funkcije. Izvestan broj istraživača se bavio formulisanjem metodologija za procenu težinskih funkcija pomoću Grinove teoreme [6], dvostrukih Furijeovih redova [7] ili analitičkih rešenja ekvivalentnih Laplasovih jednačina [8], međutim, ovi istraživači su se isključivo bavili sistemima pod pritiskom.

## 2.2 Opis laboratorijske opreme

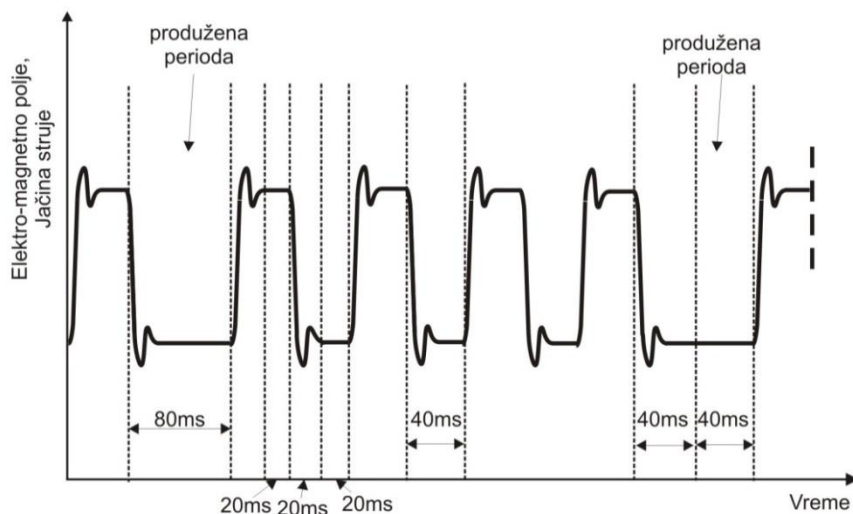
### 2.2.1 Ravni elektromagnetni senzor za merenje brzine

Za analizu magnetnog polja ravnog elektromagnetnog senzora za merenje brzine (u daljem tekstu ravni EM senzor) korišćen je senzor DC-2 proizvođača „Svet instrumenata“. Senzor se sastoji od inox kućišta (masa), dve elektrode i dva kalemova koja su namotana u pravougaoni oblik oko prednje i zadnje elektrode (Slika 1). Prema podacima koje nudi proizvođač, tačnost uređaja je  $\pm 1\%$ , preciznost je 0.001 m/s, dok je mereni opseg  $\pm 15$  m/s u oba smera. Fabrička kalibracija uređaja pokazuje veliku linarnost indukovano napona i izmerene brzine.

Pobuda kalemova za generisanje elektromagnetnog polja vrši se jednosmernom strujom jačine 80 mA. Smer struje menja znak na svakih 40 ms (efektivna frekvencija pobude  $1/(2 \times 0,04) = 12,5$  Hz), sa izuzetkom svake četvrte periode gde je perioda produžena na 80 ms (Slika 2). Razlog za produženje, odnosno, povremenu promenu frekvencije pobude, je smanjenje moguće greške alijasinga (slučaj kada se poklopi frekvencija pobude sa umnoškom frekvencije vrtloga) kao i smanjenje uticaja promena elektro-hemijskog potencijala na pokazivanje sonde. Pri svakoj promeni znaka, potrebno je 20 ms da se magnetno polje stabilizuje (a samim tim i izmeren indukovani napon na mernim elektrodama), pa je koristan signal zadnjih 20 ms pre nove promene znaka (osim kod produžene periode gde je koristan signal 60 ms). Struja prednjeg i zadnjeg kalemova je uvek suprotnog pravca.



Slika 1. Skica ravnog EM senzora sa lokalnim koordinatnim sistemom.



Slika 2. Pobuda ravnog elektromagnetnog senzora.

Osnovni izlazni signali ravnog EM senzora su osrednjeni napon između svake od dve elektrode i mase senzora, kao i tzv. unutrašnja impedansa (koja se koristi kao kvalitativni indikator promene provodnosti vode i prisustva sedimenta na elektrodama). Merenje izlaznih signala se vrši pomoću univerzalnog industrijskog mernog instrumenta DC2.34 [9]. Instrument vrši analogno/digitalnu konverziju signala u trenucima stabilne jačine struje (zadnjih 20 ms pre promene znaka) i kao konačnu vrednost daje osrednjeni napon dve elektrode jednog ciklusa produžene periode. DC2.34 se koristi definisanje parametara pobudne struje, frekvencije uzorkovanja i dužine osrednjavanja ravnog EM senzora.

Napajanje instrumenta DC2.34 vrši se jednosmernom strujom preko unutrašnjeg NiMh akumulatora. Pri svim merenjima, akumulator je bio priključen na spoljni izvor (punjač 12V priključen na električnu mrežu). U slučajevima potpunog pražnjenja akumulatora između merenja, pre novog merenja akumulator se punio 20 min zbog stabilizacije napajanja. Napon napajanja tokom merenja se smatra konstantim (promena manja od 0.5%).

### 2.2.2 Senzor za merenje elektromagnetnog polja (magnetometar)

Za merenje elektromagnetnog polja korišćen je senzor proizvođača Melexis oznake MLX-90363 (u daljem tekstu magnetometar) koji meri jačinu magnetnog polja u tri ortogonalna pravca. Merenje magnetnog polja zasniva se na Halovom principu, tj. na pojavi da tok struje kroz široki provodnik krivi svoju pravu trajektoriju usled prisustva magnetnog polja. Ovo odstupanje od prave trajektorije može se izmeriti merenjem napona u pravcu upravnom na tok struje. U slučaju kada provodnik nije u magnetnom polju, pomenuti napon je jednak nuli, dok se u slučaju skretanja struje napon menja srazmerno jačini magnetnog polja koje deluje na provodnik i krivi tok.

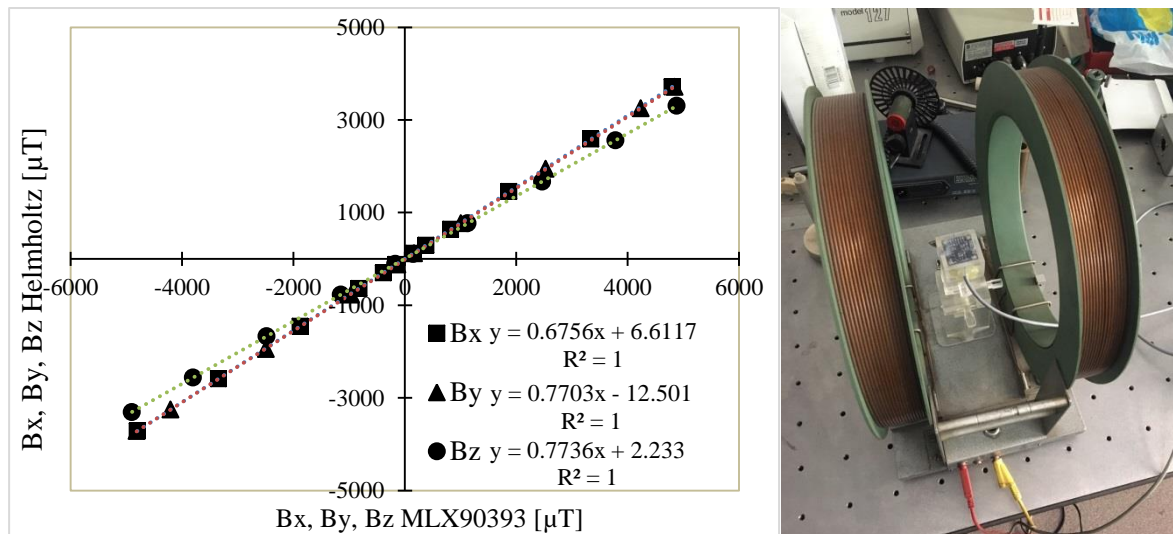
Magnetometar poseduje više režima rada, od kojih je najznačajniji brzo snimanje (egl. Burst mode). U režimu brzog snimanja, moguće je napraviti 60 merenja jačine elektromagnetnog polja sa intervalom merenja (sample rate) od 11 ms između svakog merenja. Ovaj režim rada se koristi za merenje elektromagnetnog polja koje generiše ravni EM senzor jer je frekvencija snimanja više od duplo veća od frekvencije promene znaka elektromagnetnog polja.

Sam magnetometar je postavljen u kućište od pleksiglasa približnih dimenzija 4x4x4 cm. Ovim je omogućena zaštita senzora kao i mogućnost njegovog preciznijeg pozicioniranja dok samo kućište ne utiče na mereno magnetno polje. Kućište je moguće pričvrstiti preko nosača za pozicioner u kanalu (opisan u Poglavlju 2.2.3) radi snimanja elektromagnetnog polja u kanalu.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Komunikacija i prikupljanje snimljenih podataka iz magnetometra obavlja se preko Arduino programabilnog čipa koji se sa kompjuterom povezuje serijskom vezom preko USB porta.



Slika 3. Kalibracija i rezultati kalibracije magnetometra.

Magnetometar je kalibrisan uz pomoć Helmholtzovih (Helmholtz) navoja. Kalibracija je izvršena u laboratoriji Elektrotehničkog Fakulteta Univerziteta u Beogradu, uz pomoć profesora Peđe Mihailovića sa odseka za fizičku elektroniku. Aparatura se sastoji od dva solenoida kroz koje teče struja jednakog inteziteta a koji su postavljeni duž iste ose na rastojanju koje je jednako njihovom poluprečniku. Jačina elektromagnetog polja koje prave solenoidi je u linearnoj zavisnosti od jačine struje koja se propušta kroz solenoide, tako da je za kalibraciju magnetometra potrebno meriti samo jačinu struje. Magnetometar takođe poseduje sondu za merenje trenutne temperature koja je potrebna za temperaturnu kompenzaciju. Kalibracija magnetometra je obuhvatila i eksperimentalno utvrđivanje krive temperaturne kompenzacije izmerenih jačina magnetnog polja.

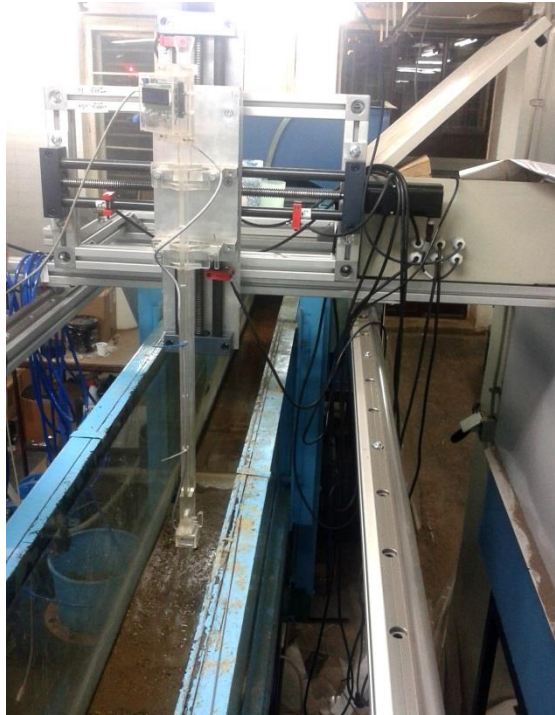
Kalibracija magnetometra izvršena je u tri ortogonalna pravca. Rezultati kalibracije pokazali su da je kalibraciona kriva magnetometra skoro idelano linearna (Slika 3).

### 2.2.3 Kontrola položaja magnetometra i sistematizacija izmerenih podataka

Jedan deo merenja elektromagnetnog polja ravnog EM senzora vršena su u hidrauličkom kanalu u laboratoriji Instituta za Hidrotehniku Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Radi lakšeg i preciznijeg merenja magnetnog polja u kanalu korišćen je pozicioner za kontrolu položaja magnetometra. Pozicioner se duž kanala kreće po šinama montiranim iznad kanala a u ravni poprečnog preseka kanala uz pomoć step motora (Slika 4). Ovim su značajno olakšana tačkasta merenja u kanalu jer je pozicioneru moguće lako programirati algoritam kretanja tokom merenja.

Za korišćenje magnetometra i pozicionera napravljeno je grafičko korisničko okruženje (eng. GUI – *Graphic User Interface*) pomoću kog se unose koordinate za pomeranje pozicionera kao i algoritam kretanja. Takođe, pomoću korisničkog okruženja moguće je pratiti trenutni položaj pozicionera u odnosu na zadati algoritam kretanja grafičkim putem. GUI zapisuje snimljene podatke svake tačke u kojoj se meri jačina magnetnog polja u odvojeni *txt* fajl gde je ime fajla pozicija magnetometra u odnosu na relativni koordinatni početak svake zone snimanja.

Za potrebe merenja magnetnog polja van hidrauličkog kanala gde se magnetometar pomerao ručno, GUI prikazuje i grafike sortiranih snimljenih vrednosti radi vizuelne kontrole merenih podataka. Za svaki Z nivo, GUI prikazuje maksimalne i minimalne vrednosti snimljene u tom nivou kao i relativni odnos tekuće tačke u odnosu na pomenute vrednosti. Uz pomoć ovih podataka, raster za snimanje je proređivan u okolini gde se smatralo da su vrednosti polja dovoljno male.



Slika 4. Pozicioner sa magnetometrom.

### 2.3 Opis mernih mesta

U cilju određivanja jačine i oblika magnetnog polja koje generiše ravni EM senzor, izvršena su dva osnovna merenja magnetnog polja, merenje van hidrauličkog kanala („ručno“ merenje) i merenje u hidrauličkom kanalu (automatizovano merenje pozicionerom). Oba merenja vršena su u po unapred definisanom 3D rasteru.

Pored toga, u hidrauličkom kanalu izvršena su i dva dodatna merenja. Cilj ovih merenja je ispitivanje uticaja na jačinu i oblik elektromagnetnog polja feromagnetnih objekata u okolini ravnog EM senzora kao i uticaj vode koja teče na oblik elektromagnetnog polja.

Na Slici 1 prikazan je lokalni koordinatni sistem u odnosu na ravni EM senzor koji se koristi za određivanje pozicije magnetometra i vektora izmerenog elektromagnetnog polja pri svim merenjima.

Sva merenja obavljena su u laboratoriji Instituta za Hidrotehniku Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

#### 2.3.1 Merenja van kanala

Osnovna svrha ovog merenja je početno određivanje zone do koje magnetno polje ravnog EM senzora doseže, kao i merenje onih delova magnetnog polja koje u hidrauličkom kanalu nije moguće izmeriti zbog fizičkog ograničenja širine kanala.

Da bi se magnetno polje izmerilo što tačnije, potrebno je postaviti merno mesto sa što manje okolnih elektromagnetnih smetnji. Ovo je postignuto tako što je ravni EM senzor postavljen na drvenu ploču koja je udaljena od svih feromagnetnih predmeta i uzdignuta od poda nearmiranim betonskim blokovima oko 30 cm. Ravni EM senzor je tokom celog merenja držan u istom položaju.

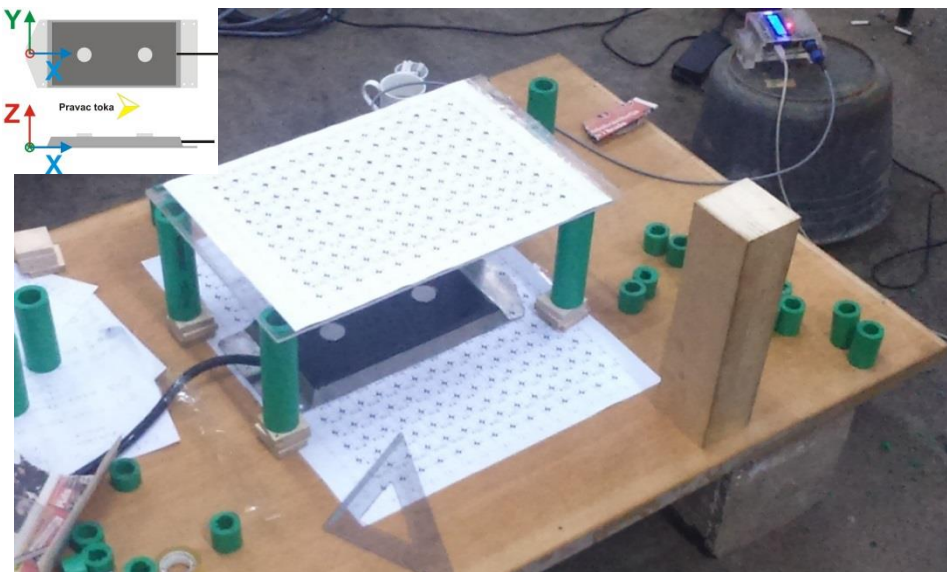
Merenja su izvršena po tačkastom rasteru u 3 dimenzije najveće gustine 2.5 x 2.5 cm u horizontalnoj ravni i 1 cm u vertikalnoj ravni. Pozicioniranje magnetometra u horizontalnoj ravni vršeno je pomoću ploče od pleksiglasa na koju je zalepljena šema rastera odštampana na papiru gustine 2.5 x 2.5 cm. Centar kućišta postavljan je na centar odštampanog rastera. Merenja su rađena u

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

serijama po horizontalnoj ravni, gde se posle svake horizontalne serije ploča od pleksiglasa podigne za 1 ili 2 cm uz pomoć nogara koji su izrađeni od plastike.

Udaljavanjem od ravnog EM senzora jačina elektromagnetnog polja se smanjuje tako da su merene tačke po rasteru proređivane, mada se osnovna šema rastera po kom je jačina elektromagnetnog polja merena zadržala. Ukupna širina koja je obuhvaćena merenjem je po 22,5 cm u oba smera Y ose, dužina 32,5 cm (pozitivan smer X ose) dok je najveća visina 22 cm (Z osa). Takođe, merenja sa leve strane rastera u odnosu na Y osu su urađena sa dosta proređivanja u odnosu na desnu stranu.

Na Slici 5 prikazano je merno mesto van kanala. U gornjem desnom uglu slike vidi se Arduino uređaj za komunikaciju sa magnetometrom.



Slika 5. Merenje magnetnog polja van kanala.

## 2.3.2 Merenja u kanalu

Pri prvom merenju najgušćeg rastera, ravni EM senzor za merenje brzine postavljen je u delu hidrauličkog kanala gde je levi zid (gledano u pozitivnom pravcu X ose) od prefarbanog lima a desni zid od stakla. Merenja su rađena u serijama po poprečnim presecima upravim na X osu sa automatskim pomeranjem između tačaka uz pomoć pozicionera.

Gustina merenja elektromagnetnog polja je u donjoj zoni 1 cm u sva 3 pravca ( $Z < 17$  cm po lokalnom koordinatnom sistemu), dok je za zonu od 17 do 30 cm gustina merenja 2 cm za vertikalni i pravac upravan na X osu, dok je u pravcu X ose zadržana gustina od 1 cm u obe zone. Najniži nivo koji je meren je  $Z = 2.5$  cm (magnetometar na 2 mm od vrha EM senzora). Proređenje merenja utvrđeno je na osnovu rezultata merenja elektromagnetnog polja van kanala gde se pokazalo da je jačina elektromagnetnog polja u gornjoj zoni zanemarljiva (manja od  $2 \mu T$  što je red veličine standardne devijacije magnetometra u 3 *burst* serije merenja ambijentalnog magnetnog polja).

Ukupno je izmereno 32 poprečna preseka, što daje dimenzije snimljenog rastera  $34 \times 19 \times 27$  cm (prva dva poprečna preseka su na međusobnom rastojanju 1,5 cm dok su ostali preseki na rastojanju 1 cm). Ukupan broj tačaka koji je izmeren je  $372 \times 32 = 11904$ .

### 2.3.3 Uticaj feromagnetnih objekata i vode koja teče

Za merenje uticaja feromagnetnih objekata, ravni EM senzor pomeren je u hidrauličkom kanalu u položaj gde su oba bočna zida od stakla. Ovo merenje izvršeno je radi utvrđivanja da li metalni zid sa leve strane sonde iz prvog merenja utiče na jačinu i oblik elektromagnetnog polja koje generiše senzor. Ovo merenje izvršeno je u 2 poprečna preseka, na rastojanju po X osi od 12 i 26 cm, jer je prvim merenjem utvrđeno da su ovo karakteristični poprečni preseki gde je jačina elektromagnetnog polja u dva pravca najveća dok je u jednom pravcu približno jednaka nuli.

Merno mesto za merenje uticaja na magnetno polje vode koja teče je skoro identično prethodno opisanom mernom mestu, s izuzetkom da je u kanalu ispod ravnog EM senzora postavljen prag visine 15 cm. Tokom merenja magnetometrom kroz hidraulički kanal je tekla voda različitim kontrolisanim protocima. Uloga praga je da smanji dubinu vode iznad EM senzora jer magnetometar nije otporan na vodu a potrebno je izmeriti tačke sa što jačim magnetnim poljem radi pouzdanijeg poređenja (već je rečeno da je zona iznad sonde gde su elektromagnetna polja koja proizvodi sonda merljiva do visine oko 15 cm). Pored toga, pragom su se postigle veće brzine vode iznad EM senzora, što je značajno jer je pretpostavka da ukoliko se elektromagnetno polje menja usled protoka vode, fenomen će biti primetniji sa većim brzinama vode preko ravnog EM senzora. Određene su 4 tačke u poprečnom preseku  $X=12$  cm gde je merena jačina elektromagnetnog polja za više različitih protoka, ukupno 18 protoka u rasponu od 5,1 do 20,7 l/s.

## 2.4 Obrada rezultata

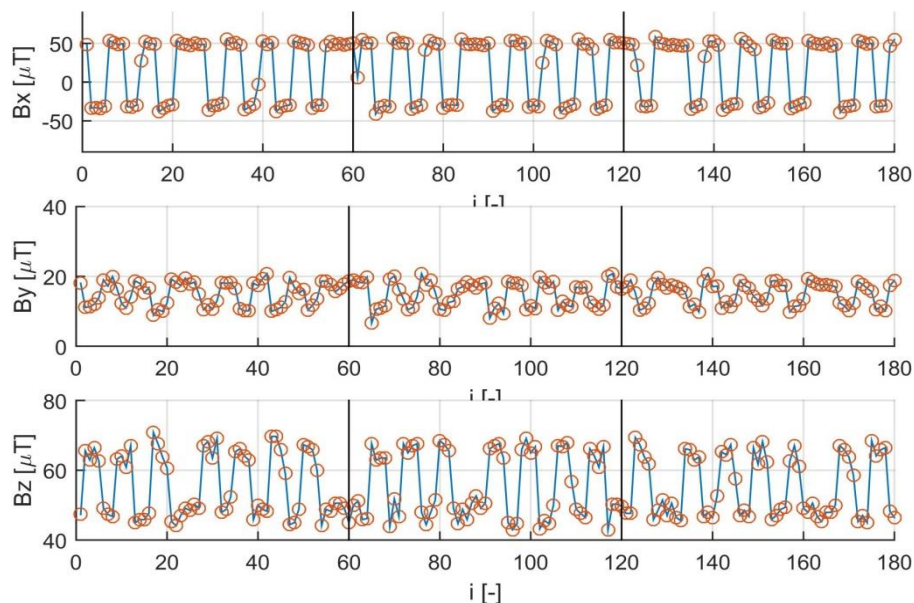
### 2.4.1 Obrada merenja magnetnog polja u tački

Elektromagnetno polje je u svakoj tački na svim mernim mestima mereno magnetometrom sa tri uzastopna *Burst* snimanja (60 snimanja u jednom *Burst*-u na po 11 ms). S obzirom da se promena elektromagnetnog polja koje generiše ravni EM senzor za merenje brzine usled promene smera struje kroz kalemovce senzora dešava na svakih 40 ms, u jednom smeru struje se očekuju po 3 ili 4 podataka o jačini generisanog elektromagnetnog polja. Međutim, magnetometar će snimiti i jačinu elektromagnetnog polja u trenucima promene elektromagnetnog polja usled promene smera struje (promena polariteta elektromagnetnog polja), kao i trenutke u kojima se elektromagnetno polje stabilizuje (prvih 20 ms u periodu prema Slici 2).

Da bi se dobio konačni podatak o jačini elektromagnetnog polja u jednoj tački, potrebno je razdvojiti podatke koji su snimljeni u tački pri različitim polaritetima elektromagnetnog polja na dve grupe, izbaciti podatke koji su snimljeni tokom promene i stabilizacije elektromagnetnog polja i odrediti u kojoj grupi se dešava produženje periode. Podaci snimljeni magnetometrom u jednoj tački prikazani su na Slici 6.

Koristi se usvojena konvencija o znaku elektromagnetnog polja takva da je polje kom pripada znak produžene periode „pozitivno“, dok je suprotno polje „negativno“.





Slika 6. Izmerene vrednosti magnetnog polja u jednoj tački. Vertikalnim linijama su razdvojene serije *Burst* snimanja

## 2.5 Obrada rezultata neuralnim mrežama

Za obradu podataka o magnetnom polju koristi se neuralna mreža koja pripada grupi kompetitivnih klasifikujućih neuralnih mreža [10]. Zadatak ovakve mreže je da za ulazni vektor odredi kojoj klasi (grupi) on pripada. Svaki neuron u mreži predstavlja po jednu klasu. Neuron je definisan svojim težinskim vektorom koji je iste dimenzionalnosti kao i ulazni vektor. Težinski vektor neurona može se shvatiti kao položaj neurona u prostoru u kom se nalaze ulazni vektori. Kada se mreži prosledi ulazni vektor, unutar mreže se računa razdaljina ulaznog vektora i svakog težinskih vektora tj. neurona, a zatim se neuronu koji je najbliži ulaznom vektoru dodeli izlaz 1 dok svi ostali neuroni imaju izlaz 0 čime se vrši klasifikacija.

Prvi korak pri formiranju mreže je definisanje broja grupa u koje će se ulazni vektori grupisati. Nakon toga sledi treniranje mreže, tj. određivanje težinskih vektora mreže. Osnovni algoritam treniranja kompetitivnih (takmičarskih) mreža je da za ulazni vektor odredi najbliži neuron u prostoru (pobednički neuron) i njega približi odgovarajućem ulaznom vektoru. Proces približavanja pobedničkog neurona ulaznom vektoru predstavlja učenje neuralne mreže. Nakon dovoljno iteracija, neuroni su postavljeni u različitim grupama (klasterima) ulaznih vektora [11].

U zavisnosti od dimenzionalnosti ulaznih vektora, klasifikujuće neuralne mreže mogu biti jednodimenzionalne, dvodimenzionalne i višedimenzionalne. Iako je ulazni vektor za obradu elektromagnetnog polja dvodimenzionalan (jačina polja i vreme), u obradi merenja elektromagnetnog polja pokazalo se da dvodimenzionalna mreža nema značajnih prednosti u odnosu na jednodimenzionalnu mrežu.

Rezultat snimanja elektromagnetnog polja u jednoj tački je matrica dimenzije 180,3 gde svaki red predstavlja po jedno snimanje EM polja u *Burst* modu a svaka kolona jačinu EM polja za tri ortogonalna pravca. Ulazni podatak za neuralnu mrežu je jedna kolona matrice, tj. 180 jednodimenzionalnih vektora.

Zadatak neuralne mreže je da podeli ulazne podatke u 4 grupe prema njihovom položaju u 1-D prostoru. Osnovna ideja je da će se u dve unutrašnje grupe naći rezultati koji su snimljeni u trenucima promene polariteta dok će spoljne grupe sadržati korisne podatke o jačini elektromagnetnog polja u suprotnim polaritetima. Kao konačna vrednost jačine pozitivnog i negativnog elektromagnetnog polja

uzimaju se srednje vrednosti spoljnih grupa. Osrednjavanje spoljnih grupa ima još jednu funkciju. S obzirom da nije bilo moguće uspešno razdvojiti podatke u trenucima stabilnog magnetnog polja (zadnjih 20 ms poluperiode) od podataka snimljenih tokom stabilizacije magnetnog polja, osrednjavanjem cele spoljne grupe se smanjuje uticaj tačaka snimljenih tokom stabilizacije magnetnog polja na konačnu vrednost.

Nakon što je neuralna mreža vratila dve osrednje vrednosti, potrebno je odrediti koja vrednost pripada produženoj periodi, tj razdvojiti ih po usvojenoj konvenciji znaka elektromagnetnog polja. Ovo se postiže novom neuralnom mrežom koja vrši klasifikaciju u dve grupe. Nakon izvršene klasifikacije, u svakoj grupi se vrši se pretraga za 6 uzastopno izmerenih podataka. Grupa koja ima više ovakvih podataka je grupa u kojoj je snimljena produžena perioda. Ukoliko ni jedna grupa nema 6 uzastopnih podataka, smatra se da je jačina magnetnog polja dovoljno mala da se može uzeti vrednost 0. U tačkama u okolini spajanja pojedinačnih *Burst* serija (tačke 60 i 120) mogući niz od 6 uzastopnih podataka ne uzima u obzir jer nisu snimljene sa rastojanjem od 11ms već malo većim usled kratke pauze između dve uzastopne *Burst* serije.

Obrada merenja elektromagnetnog polja neuralnom mrežom kao rezultat daje pozitivno i negativno elektromagnetno polje u svakoj tački prema usvojenoj konvenciji. Ovi rezultati su pomereni u odnosu na nulu za jačinu ambijentalnog magnetnog polja (zemljino geomagnetno polje čija je magnituda reda veličine 60  $\mu$ T i okolne smetnje). Uvodi se pretpostavka da je ambijentalno magnetno polje nepromenjivo u toku jednog snimanja kao i da kalemovi ravnog EM senzora za merenje brzine prave jednako polje u oba smera ali sa različitim predznakom. Da bi se pri spajanju rezultata u prostoru izbegla analiza dva elektromagnetna polja (pozitivno i negativno) i iz rezultata izbacila vrednost ambijentalnog magnetnog polja, primenjena je sledeća formula:

$$B = \frac{Bp - Bn}{2} \quad (2)$$

Kao konačna vrednost jačine elektromagnetnog polja u tački, uzima se odstupanje pozitivnog polja sa odgovarajućim predznakom u odnosu na ambijentalno magnetno polje. Sa ovako obrađenim rezultatima pristupiće se analizi elektromagnetnog polja u prostoru. Ovim se opravdava postupak u obradi rezultata neuralnim mrežama gde se za zanemarljivu razliku pozitivnog i negativnog polja usvaja vrednost i jednog i drugog polja nula a ne ambijentalno magnetno polje.

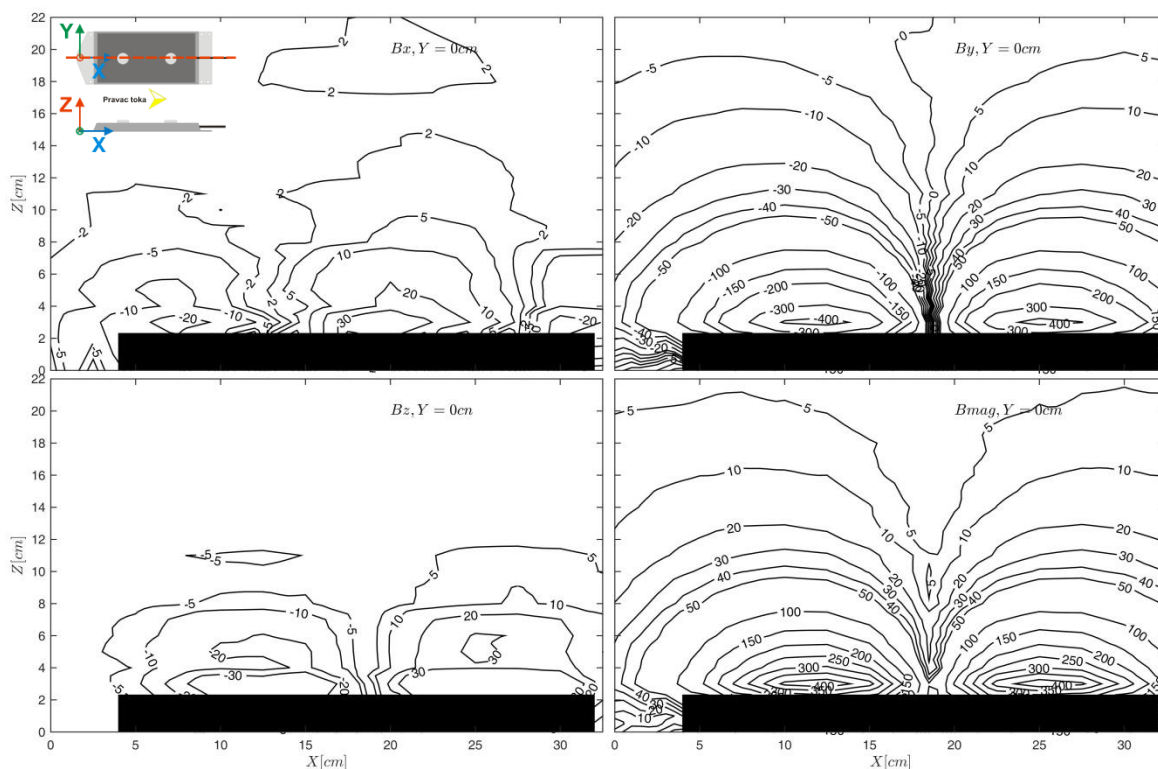
## 3 Rezultati i diskusija rezultata

### 3.1 Elektromagnetno polje van kanala

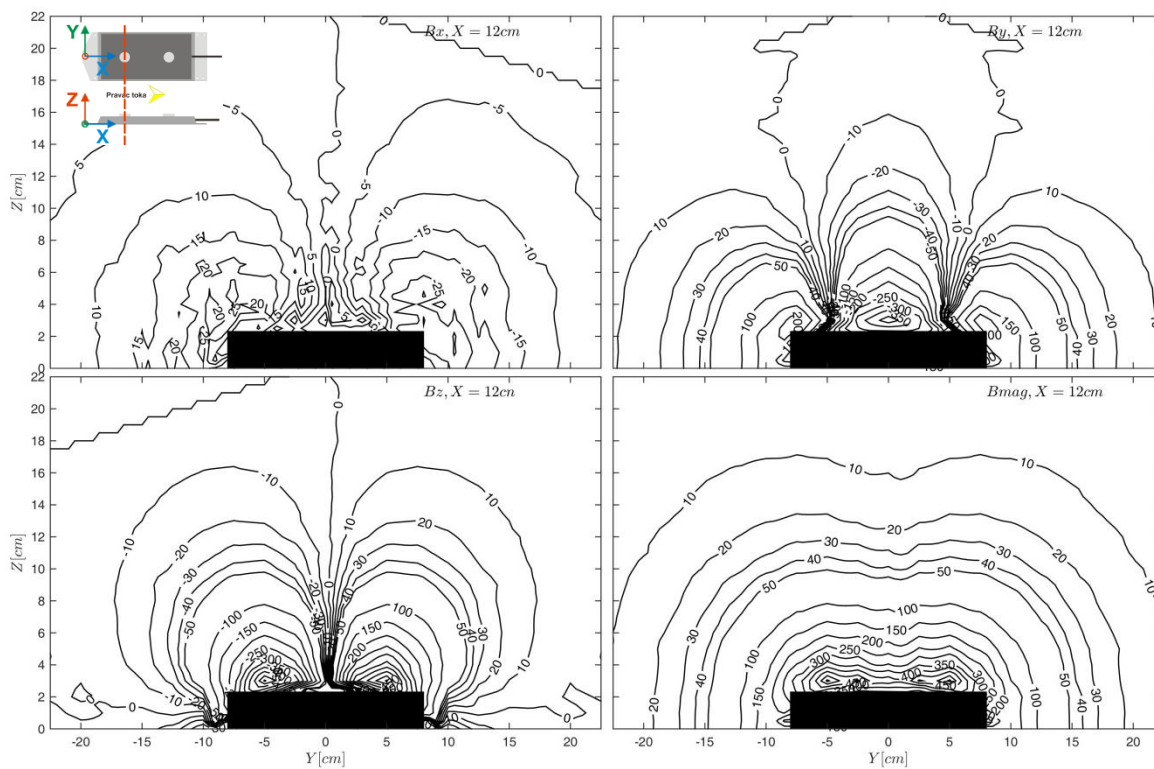
U ovom poglavlju prikazaće se rezultati merenja elektromagnetnog polja van hidrauličkog kanala. Merno mesto je opisano u poglavlju 2.3.1. Merenja elektromagnetnog polja s desne strane ravnog EM senzora u odnosu na XZ osu bila su dosta gušća u odnosu na levu stranu. Upoređivanjem rezultata sa leve i desne strane utvrđeno je da je polje dovoljno simetrično da se za potrebe grafičkog prikaza polja, polje sa leve strane može preslikati na desnu stranu. Pretpostavlja se da su mala odstupanja od simetričnih vrednosti prouzrokovana nesavršenom simetričnošću kalemova u ravnom EM senzoru kao i greškom usled pozicioniranja magnetometra. Na Slici 7 prikazane su konturne linije elektromagnetnog polja za vektore polja  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  kao i konturne linije magnitude polja za ravan XZ,  $Y = 0$ . Na slici 8 prikazan je presek po Y ravni za  $X = 12$  cm (presek iznad prve elektrode).

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 7. EM polje na mernom mestu van kanala,  $Y = 0$ . Crvenom linijom na skici EM senzora je obeležen presek za koji su prikazani rezultati.



Slika 8. EM polje na mernom mestu van kanala,  $X = 12 \text{ cm}$ . Crvenom linijom na skici EM senzora je obeležen presek za koji su prikazani rezultati.

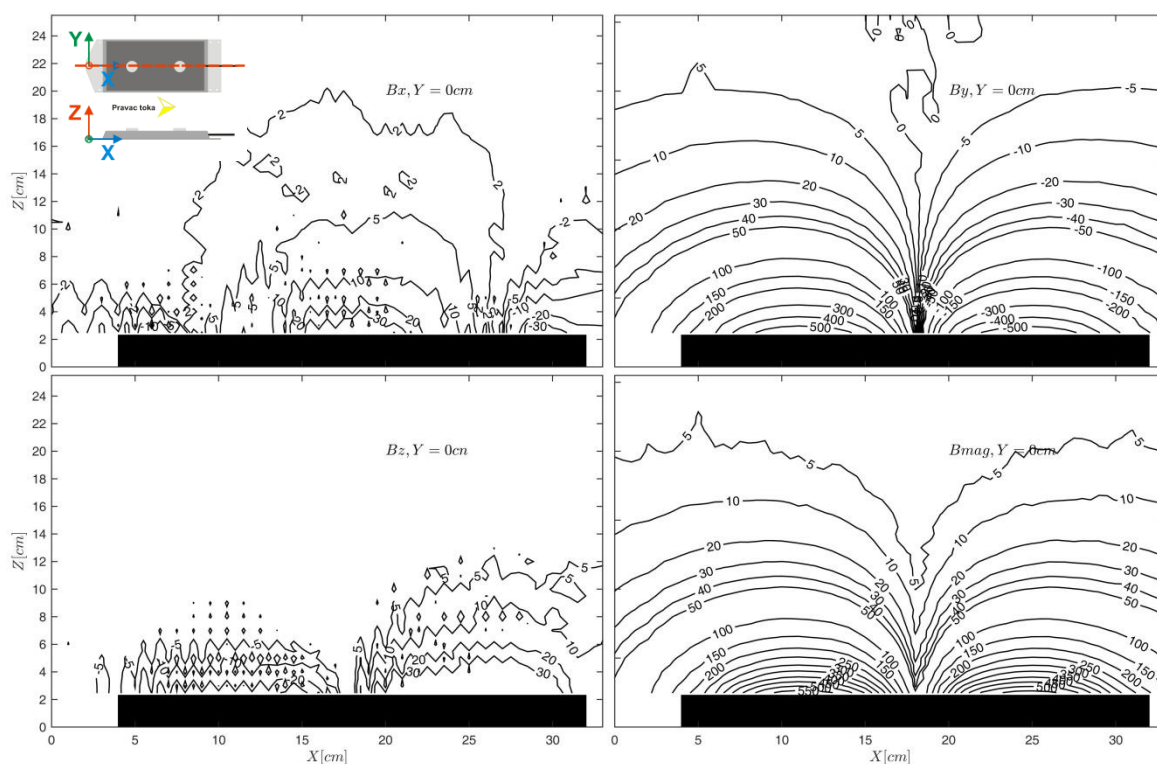
U prikazu na Slikama 7 i 8 nisu uključena merenja u zoni iznad samog uređaja, gde je magnetometar bio postavljen na ravni EM senzora. U ovoj zoni su izmerene najveće vrednosti jačine elektromagnetnog polja. Najveća izmerena vrednost magnitude je  $1137 \mu\text{T}$  ( $B_x = 239 \mu\text{T}$ ;  $B_y = -110 \mu\text{T}$ ;  $B_z = 1106 \mu\text{T}$ ). Zona u kojoj su vrednosti elektromagnetnog polja približno 1% od maksimalne izmerene vrednosti je  $Z = 15.2 \text{ cm}$ , dok je širina po 21 cm sa leve i desne strane.

### 3.2 EM polje u kanalu

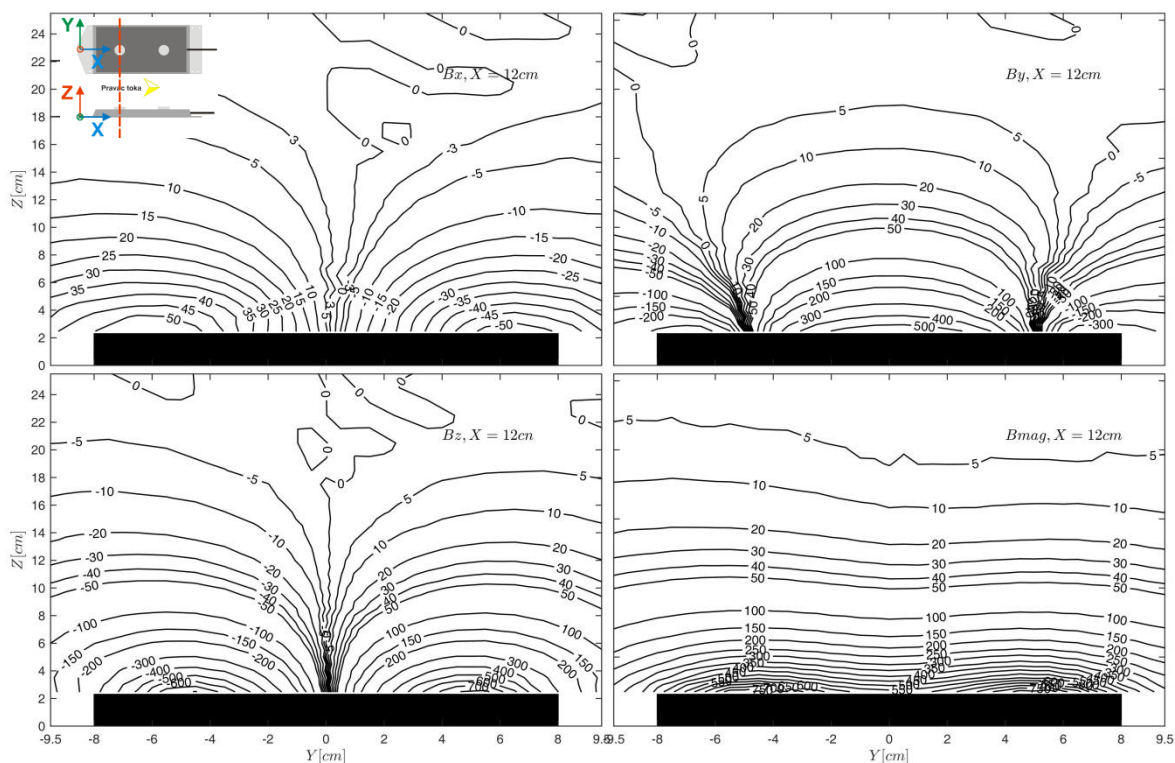
Merenja elektromagnetnog polja u hidrauličkom kanalu vršena su od visine  $Z = 2.5 \text{ cm}$  (3 mm iznad vrha elektrode ravnog EM senzora). Elektromagnetno polje je mereno gušće, sa rasterom  $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}$ . Pored toga, pozicioniranje magnetometra u kanalu je sa manjom greškom, jer je rađeno uz pomoć pozicionera.

Na Slici 9 prikazane su konturne linije elektromagnetnog polja za vektore polja  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  kao i konturne linije magnitude polja za ravan  $XZ$ ,  $Y = 0$ . Na Slici 10 prikazan je presek po  $Y$  ravni za  $X = 12 \text{ cm}$  (presek iznad prve elektrode).

Na Slici 10 može se primetiti da se elektromagnetno polje „iskrivilo“ u gornjoj levoj zoni (pogled u  $X$  pravcu). Merenjem uticaja feromagnetnih objekata na elektromagnetno polje utvrdiće se da li je u pitanju uticaj metalnog zida i drugih okolnih smetnji sa leve strane hidrauličkog kanala.



Slika 9. EM polje na mernom mestu u kanalu,  $Y = 0$ . Crvenom linijom na skici EM senzora je obeležen presek za koji su prikazani rezultati.



Slika 10. EM polje na mernom mestu van kanala,  $X = 12$  cm. Crvenom linijom na skici EM senzora je obeležen presek za koji su prikazani rezultati.

### 3.3 Rezultati merenja uticaja feromagnetnih objekata i vode koja teče

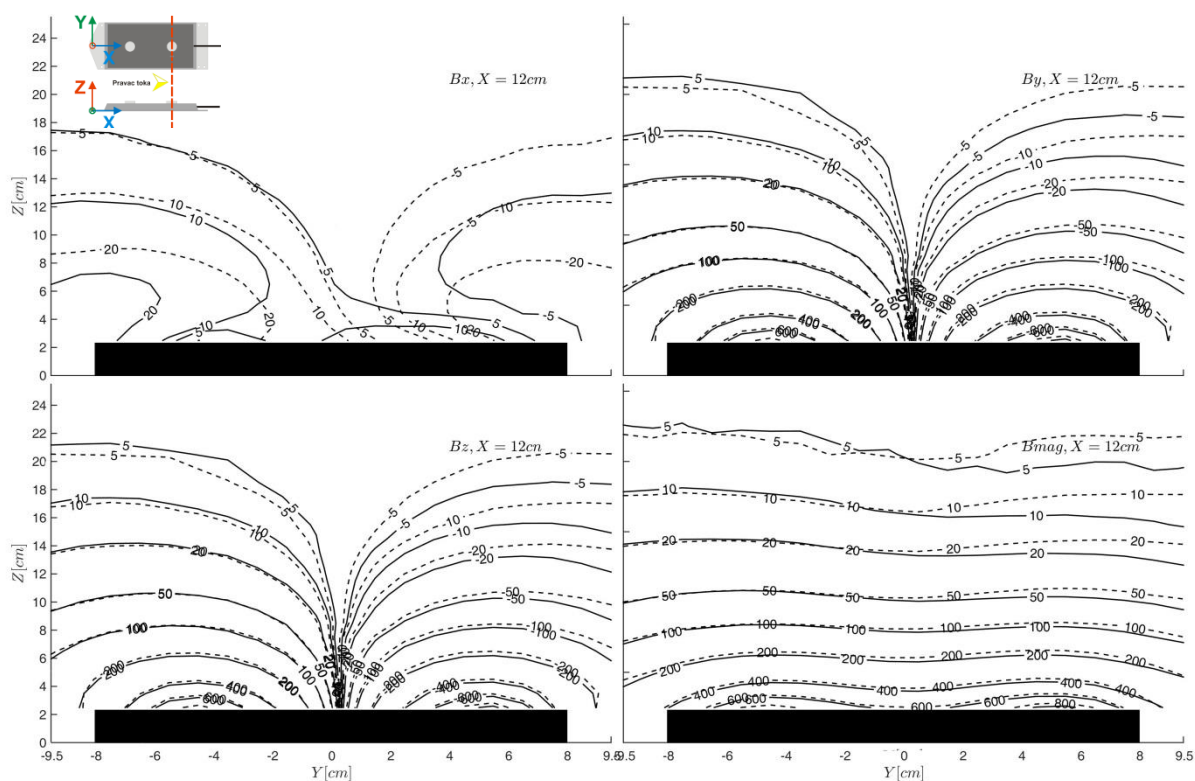
#### 3.3.1 Uticaj feromagnetnih objekata na EM polje

S obzirom na uočenu nesimetričnost elektromagnetnog polja u hidrauličkom kanalu, merenje je ponovljeno u dva karakteristična preseka,  $X = 12$  cm i  $X = 26$  cm (merenja iznad elektroda). Ravni EM senzor za merenje brzine je sada pomeren u deo kanala gde su oba zida od stakla. Na Slici 11 prikazani su rezultati ovog merenja. Punom linijom su prikazani rezultati iz gustog merenja elektromagnetnog polja gde se metalni zid nalazio sa leve strane ravne sonde ( $Y > 0$ ), dok je isprekidanom linijom prikazano ponovljeno merenje. Kod ovog merenja, elektromagnetno polje je simetrično. Takođe, ovo merenje se u desnoj zoni poklapa sa prethodnim gustim merenjem. Iz ovoga se može zaključiti da feromagnetni objekti imaju uticaj na jačinu i oblik elektromagnetnog polja.

#### 3.3.2 Uticaj vode koja teče na EM polje

Rezultati merenja uticaja vode koja teče na jačinu i oblik elektromagnetnog polja pokazali su da je jačina svih vektora elektromagnetnog polja u 4 tačke snimanja praktično ista za slučajeve kada voda ne teče kroz hidraulički kanal kao i za slučajeve kada voda teče sa kontrolisanim protokom. Rezultati merenja prikazani su u Tabeli 1, kao i grafički na Slici 12. Iz ovog se može zaključiti da voda koja teče nema uticaj na elektromagnetno polje, tako da se izmerene jačine elektromagnetnog polja mogu smatrati za jačine koje će se javiti u eksploataciji EM senzora. Ovakvi rezultati su očekivani ukoliko se uzme u obzir Hartmanov broj koji predstavlja odnos elektromagnetnih i viskoznih sila u fluidu. Jednačina za Hartmanov broj glasi:

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



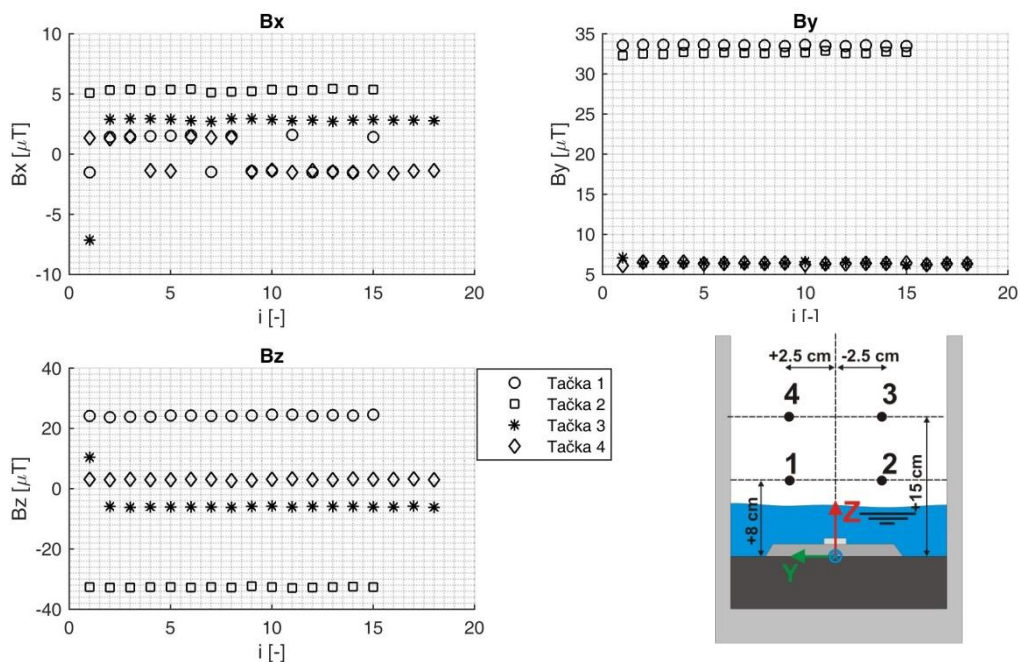
Slika 11. Merenje uticaja feromagnetnih objekata u zoni zidova od stakla za presek  $X = 26$  cm. Crvenom linijom na skici EM senzora je obeležen presek za koji su prikazani rezultati.

$$Ha^2 = \frac{\sigma L B^2}{\rho \nu} \quad (3)$$

gde  $B$  predstavlja intenzitet magnetnog polja,  $L$  – hidraulički radijus,  $\sigma$  – električnu konduktivnost vode,  $\nu$  – kinematički koeficijent viskoznosti i  $\rho$  – gustinu vode. Za vrednosti  $B = 1000 \mu\text{T}$ ,  $\sigma = 0.05 \text{ S/m}$ ,  $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $L = 0.1 \text{ m}$ , prema jednačini (3) dobija se da je Hartmanov broj manji od  $1 \cdot 10^{-4}$  što je za nekoliko reda veličine manje od vrednosti pri kojoj bi se pokazao uticaj elektromagnetnog polja [12].

Tabela 1. Rezultati merenja magnetnog polja sa i bez vode u 4 tačaka.

Tačka merenja	Pravac	Merenje bez vode ( $\mu\text{T}$ )	Srednja vrednost merenja sa vodom ( $\mu\text{T}$ )	Apsolutna razlika merenja bez vode i sa vodom ( $\mu\text{T}$ )
1	$B_x$	-1.53	0.23	-1.75
	$B_y$	33.58	33.56	0.02
	$B_z$	24.09	24.22	-0.13
2	$B_x$	5.09	5.31	-0.22
	$B_y$	32.29	32.63	-0.34
	$B_z$	-32.66	-32.69	0.03
3	$B_x$	-7.14	2.84	-9.98
	$B_y$	7.08	6.40	0.68
	$B_z$	10.34	-5.99	16.33
4	$B_x$	1.35	-0.61	1.96
	$B_y$	6.14	6.40	-0.26
	$B_z$	3.12	3.04	0.07



Slika 12. Uticaj vode koja teče na magnetno polje. Na X osi su predstavljena različita merenja. Na skici desno su prikazane merne tačke u hidrauličkom kanalu.

## 4 Zaključak

Merenje elektromagnetnog polja koje generišu kalemovi ravne EM sonde za merenje brzine moguće je senzorom Melexis MLX-90363 nakon njegove kalibracije. Magnetometar zajedno sa filterom klasifikujuće neuralne mreže može da izmeri i veoma male promene elektromagnetnog polja koje su za red veličine manje od ambijentalnog magnetnog polja, (promena znaka u opsegu od 4  $\mu T$  u odnosu na magnitudu ambijentalnog polja od 60  $\mu T$ ). Filtriranje podataka klasifikujućim neuralnim mrežama daje prihvatljive rezultate, jer se pri vrednostima većim od standardne devijacije šuma magnetometra (2  $\mu T$ ) ni u jednoj tački (od 11000 u kanalu i skoro 2500 van kanala) nije primetilo pogrešno određivanje „znaka“ elektromagnetnog polja u odnosu na okolne tačke. Takođe, konturne linije su čak i pri jako niskim vrednostima kontinualne, tj. prate oblik kakav bi se i očekivao bez „testerastih“ delova koji bi ukazivao na loše rezultate.

GUI za snimanje EM polja van kanala je dosta olakšalo i ubrzalo ovo zamorno i dugo merenje. Zahvaljujući GUI, na 2500 ručno merenih tačaka napravljena je samo jedna gruba greška pogrešnog pozicioniranja. Ono što je značajnije unapredilo merenje EM polja je korišćenje automatizovanog pozicionera. Uz pomoć pozicionera, praktično jedini koraci u merenju su ručno pomeranje pozicionera duž kanala i ponovno pokretanje algoritma kretanja nakon obavljenog snimanja u jednom preseku, što se grubo svodi na par minuta posla na svakih dva sata za jedan presek.

Analizom rezultata utvrđeno je da feromagnetni objekti imaju uticaj na izgled i jačinu elektromagnetnog polja. Takođe, utvrđeno je da voda ne utiče na izgled i jačinu elektromagnetnog polja.

Nakon što je oblik i jačina elektromagnetnog polja ravnog EM senzora izmerena, sledeći korak istraživanja predstavljao bi merenje polja brzina i izlaznog signala ravnog EM senzora za različite protoke u hidrauličkom kanalu. Kombinovanjem ovih merenja i izmerenog elektromagnetnog polja mogla bi se uspostaviti metodologija za lokalnu kalibraciju ravnog EM senzora uz pomoć numeričkih simulacija polja brzina za lokaciju mernog mesta.

## Literatura

1. 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*.
2. Michalski, A. (2000). Flow measurements in open irrigation channels. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 3(1), 12-16.
3. Shercliff, J. A. (1962). The theory of electromagnetic flow measurement. Cambridge University Press.
4. Bevir, M. K. (1970). The theory of induced voltage electromagnetic flowmeters. *Journal of Fluid Mechanics*, 43(3), 577-590.
5. Ivetić, D., Prodanović, D., & Stojadinović, L. (2018). Bed-mounted Electro Magnetic meters: Implications for robust velocity measurement in Urban Drainage systems. *Journal of Hydrology*, 566, 455-469.
6. 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.
7. Hemp, J., & Versteeg, H. K. (1986). Prediction of electromagnetic flowmeter characteristics. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 19(8), 1459.
8. 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.
9. Cvitkovic, M. (2013). DC.2.34 Univerzalni industrijski merni instrument REV 1.17
10. Demuth, H. B., Beale, M. H., De Jess, O., & Hagan, M. T. (2014). Neural network design. Martin Hagan.
11. Kohonen, T. (2012). Self-organization and associative memory(Vol. 8). Springer Science & Business Media.
12. Vantiegheem, S., Albets-Chico, X., & Knaepen, B. (2009). The velocity profile of laminar MHD flows in circular conducting pipes. *Theoretical and computational fluid dynamics*, 23(6), 525.