



Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet



ODREĐIVANJE PROTOKA TEČNOSTI U SLOŽENIM USLOVIMA STRUJANJA PRIMENOM RAVNIH ELEKTROMAGNETNIH SENZORA

DAMJAN IVETIĆ

BEOGRAD, 2019

Sadržaj prezentacije

- Motivacija
- Ravni elektromagnetni senzori

- Ispitivanje radnih karakteristika
 - Merna neodređenost u standardnim uslovima
 - Merna neodređenost u uslovima sedimentacije
- Analiza radnog principa
 - Mapiranje magnetnog polja
 - Uprošćeni matematički model EM senzora

- Predlog postupka lokalne kalibracije
- Terenska ispitivanja

- Zaključci

Motivacija

- Voda je najkorišćeniji ~~materijal~~ na zemlji (WBCSD, 2009; Tošić, 2018)
resurs
- U opštem kontekstu, pomoću hidrotehničkih sistema omogućava se upravljanje, zaštita i zaštita od vode.



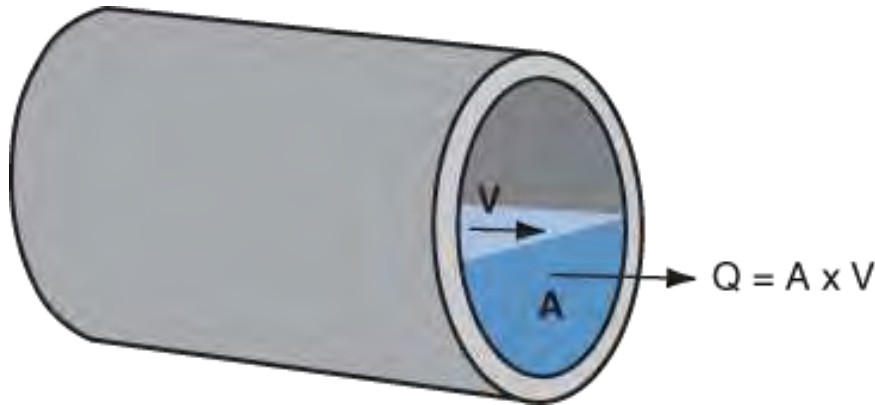
Motivacija

- Dimenzionisanje i upravljanje ovim sistemima se uglavnom vrši prema podatka o protoku (Q).
- Okvirna direktiva o vodama (EC, 2000) identifikuje ciljeve:
 1. Procena protoka vode (Q)
 2. Procena protoka mase polutanata (preko Q)
- Izbor opreme za merenje Q (Godley, 2002):
 1. Hidraulički uslovi
 2. Karakteristike fluida
 3. Fizičke karakteristike provodnika
 4. Karakteristike sredine
 5. Ekonomska kategorija



Motivacija

- Najpopularniji pristup u otvorenim tokovima je $V - A$ (Kouyi i saradnici, 2010)



Na osnovu izmerene h
računa se A

Merenjem „neke“ brzine
 V_{mer} određuje se V

- Ključan doprinos neodređenosti izmerenog Q potiče od neodređenosti izmerenog V (Bonakdari i Zinatizadeh, 2011):
 1. Neodređenost izmerene lokalne brzine V_{mer} (senzor)
 2. Neodređenost korelacije $V - V_{mer}$ (korisnik?)

Dopler, EM, Radar,
Laser...

Određivanje V

Motivacija

- U složenim uslovima strujanja, za merenje V , najčešće, se koriste **Dopler** i **ultrazvučni** senzori (Larrarte, 2008; McIntyre i Marshall, 2008).

Uslovi za rad ovih senzora često nisu ispunjeni!

I Kanalizacioni sistemi



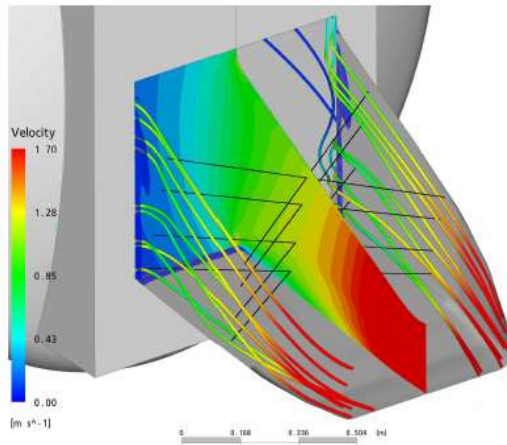
1. **Male h i male V** (Maheepala i saradnici, 2001; Aguilar i saradnici, 2016),
2. **Koncentracija suspendovanih čestica** (premao ili previše, neravnomeran raspored...) (Nord i saradnici., 2014),
3. **Sedimentacija nanosa i otpada preko kućišta senzora** (Campisano i saradnici, 2013; Aguilar i saradnici, 2016)

Posledice: Često čišćenje, gubici podataka, visoka merna neodređenost itd.

Motivacija

II Veliki provodnici i provodnici složenog poprečnog preseka

1. **Koncentracija suspendovanih čestica i vazduha** (previše) (Aakti i saradnici, 2014; Marushchenko i saradnici, 2016),
2. **Cena – desetine parova primopredajnika** (Hu i saradnici, 2016)

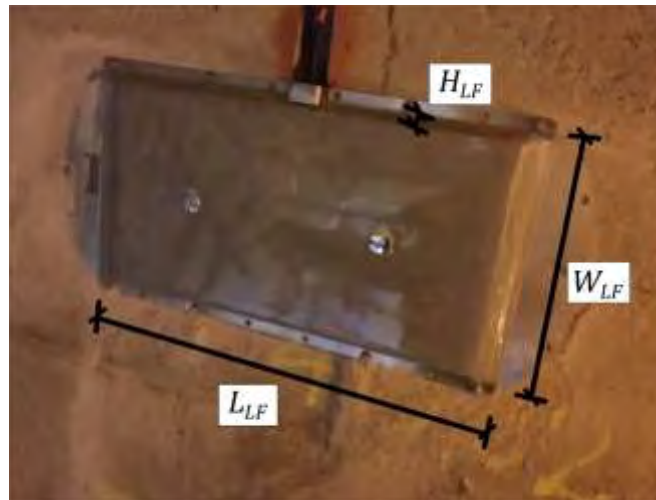
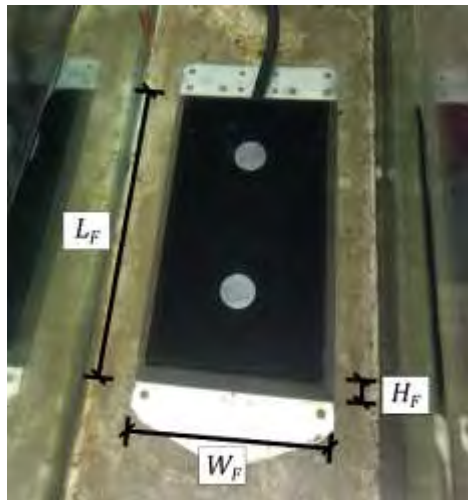


3. **Procedura za integraciju V_{mer} – radni princip senzora** (Tresch i saradnici, 2006; Luscher i saradnici, 2008)

Potencijalna alternativa: Ravni EM senzori?

Ravni elektromagnetni senzori

- Proizvođač: Svet Instrumenata d.o.o.

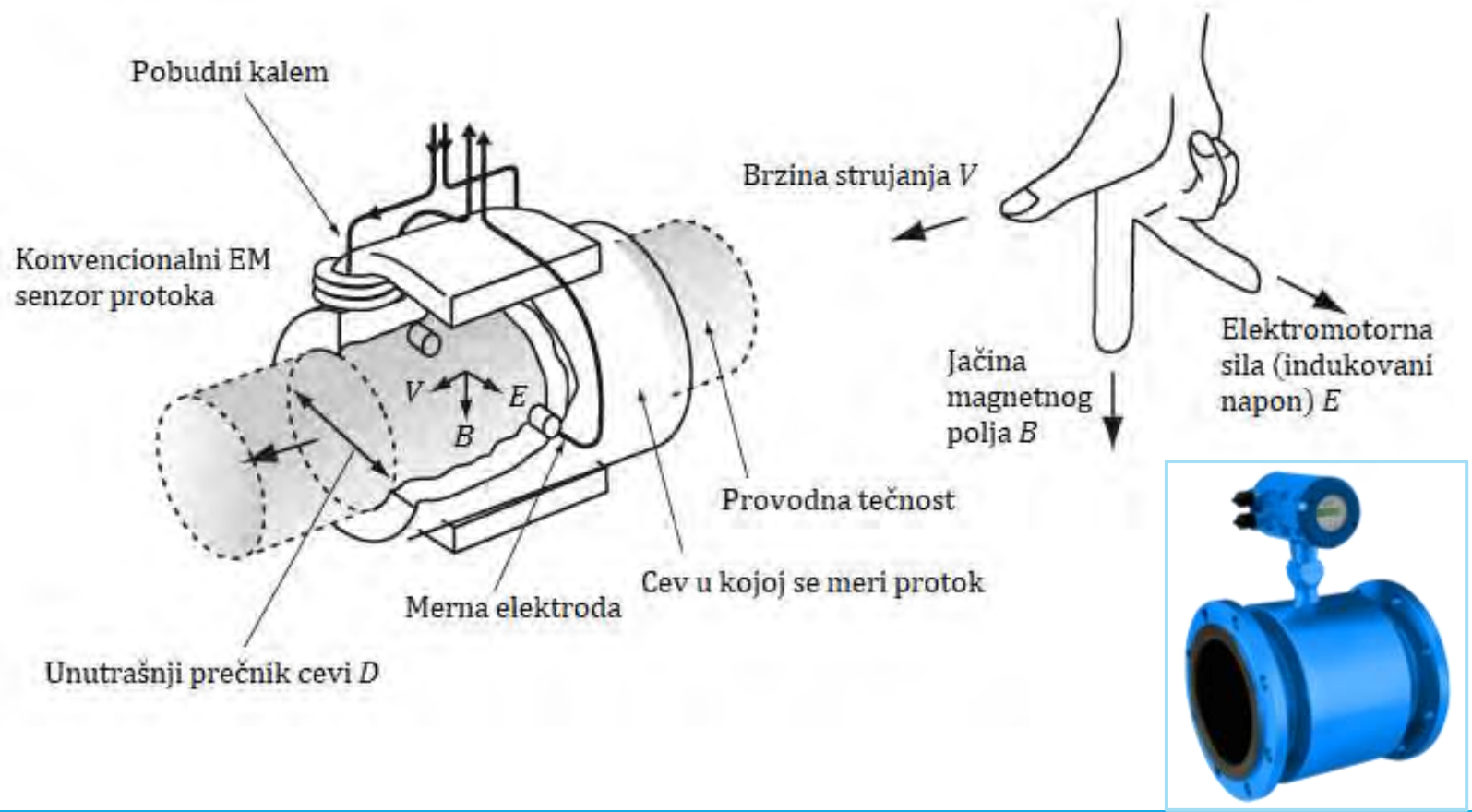


- Tri modela dostupna:
 1. Compact Flat DC-2
 2. Flat DC-2
 3. Large Flat DC-2
- Merenje podužne komponente V_x ,
- Radni princip se bazira Faradejevom zakonu indukcije.

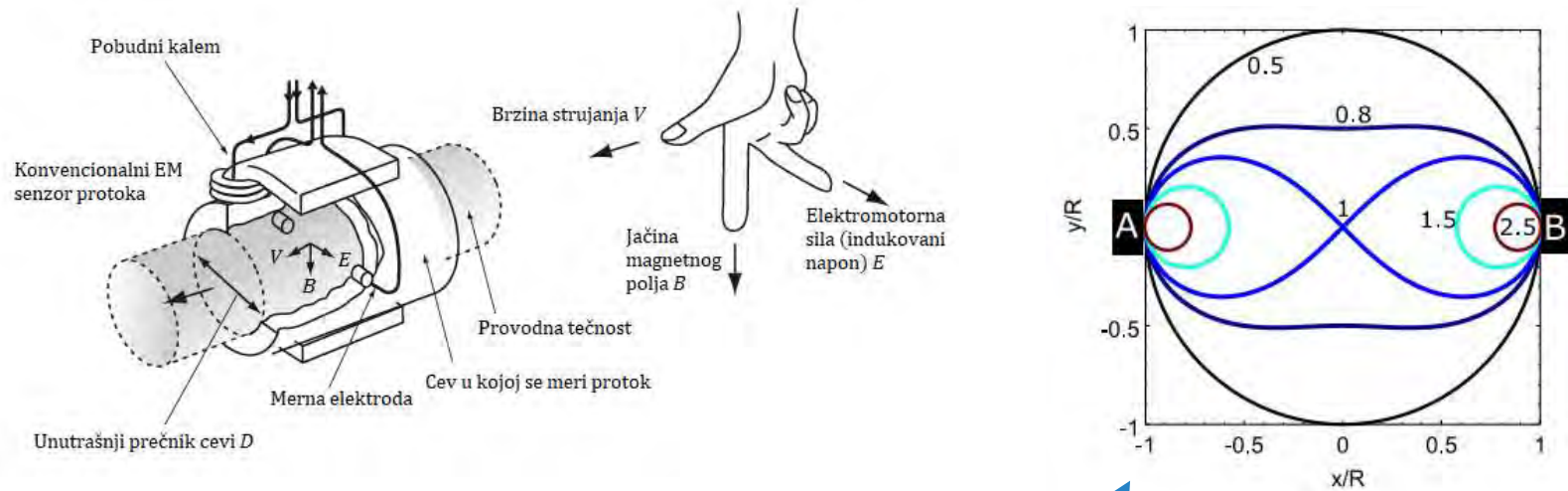
Više o radnom principu...

Ravni elektromagnetni senzori

- Teorija EM senzora brzine (primer cevnog EM senzora protoka)



Ravni elektromagnetni senzori



$$\nabla^2 U = \text{div}(\vec{V} \times \vec{B}) \quad \text{Kolin (1936)}$$

$$U_m^1 - U_m^2 = U_m = \int_{\tau} V(x, y, z) \cdot w \, d\tau \quad \text{Shercliff (1954)}$$

težinska funkcija w

$$U_m = \int_{\tau} \vec{V} \cdot (\vec{B} \times \vec{j}) \, d\tau = \int_{\tau} \vec{V} \cdot \vec{W} \, d\tau \quad \text{Bevir (1970)}$$

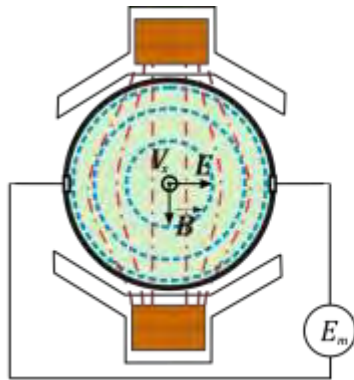
težinski vektor \vec{W}
kontrolna zapremina τ

- w za tačkaste elektrode
- $\vec{B} = \text{const}$

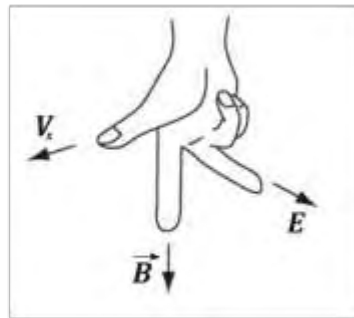
Idelan EM senzor
 $\text{rot}(\vec{B} \times \vec{j}) =$
 $\text{rot}(\vec{W}) = 0$

Ravni elektromagnetni senzori

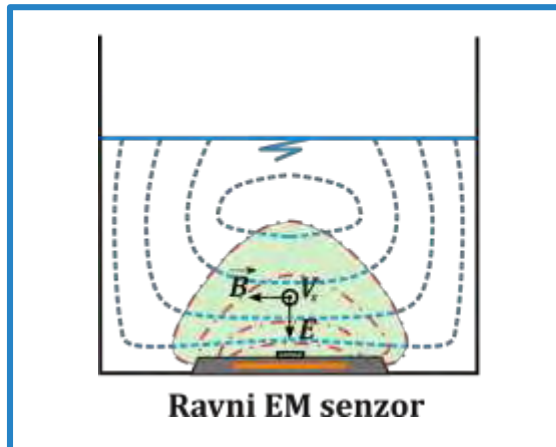
- Kako se tu uklapa ravni EM senzor:



Cevni EM senzor



- Kalibracija senzora prema standardu ISO 3445 (2007) u homogenom strujnom polju?



Ravni EM senzor

-----	Izotahe (brzina)	V_v
.....	Magnetno polje	\vec{B}
	Kontrolna zapremina τ	
	Elektrode	

~~Idelan EM senzor~~

~~$$\text{rot}(\vec{B} \times \vec{j}) =$$~~

~~$$\text{rot}(\vec{W}) = 0$$~~

Odziv senzora zavisi od rasporeda brzina!

Ravni elektromagnetni senzori

- Primena u složenim uslovima strujanja?

1. Tačnost i ponovljivost senzora?

2. Robusnost?

3. Osetljivost na promene u rasporedu brzina?

4. Matematički model rada senzora?

1. **Određivanje radnih karakteristika senzora**

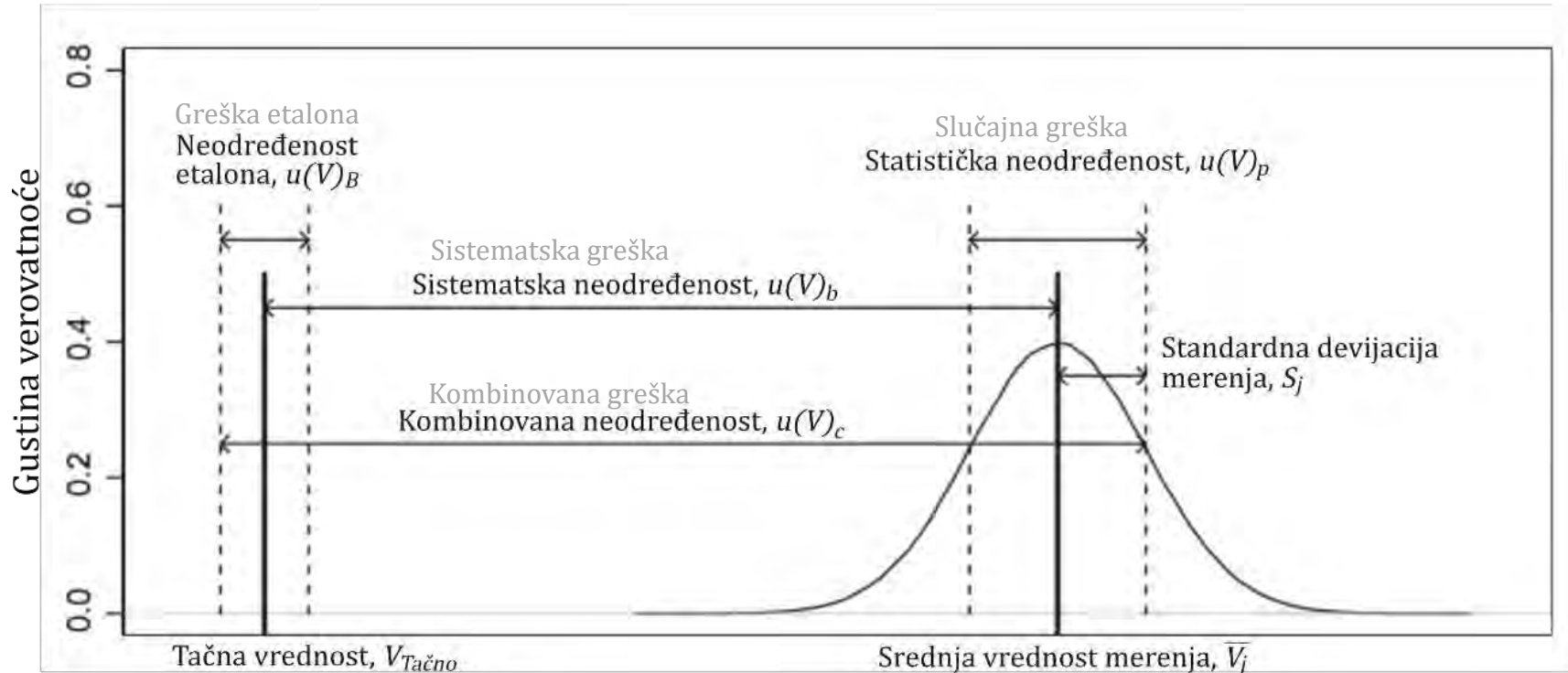
2. **Detaljna analiza operativnog principa**

5. Unapređenje tačnosti i pouzdanosti određivanja V ?

3. **Razvoj metodologije za unapređenje tačnosti**

Ispitivanje radnih karakteristika

- Umesto greške analizirana je **merna neodređenost (GUM, 2002)**



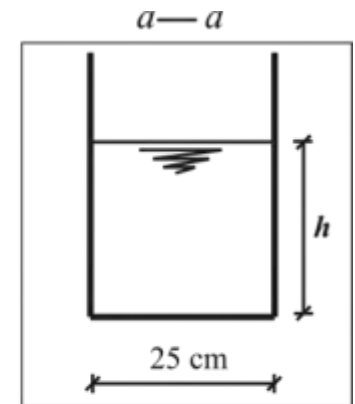
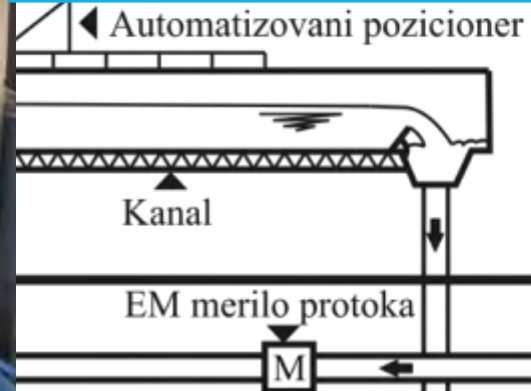
Izmerena brzina V

Minimalna merna neodređenost!

Merna neodređenost je **etalonirana u laboratorijskim uslovima.**

Ispitivanje radnih karakteristika

- Laboratorijska instalacija (ekološko inženjerstvo)



Veliki rezervoar $V = 100 \text{ m}^3$



Ispitivanje radnih karakteristika

- Dva aspekta su razmotrena:

1. Merna neodređenost u standardnim uslovima

Validacija podataka od proizvođača

Provera kalibracione krive

Mogućnost nepristrasnog poređenja sa Dopler senzorima

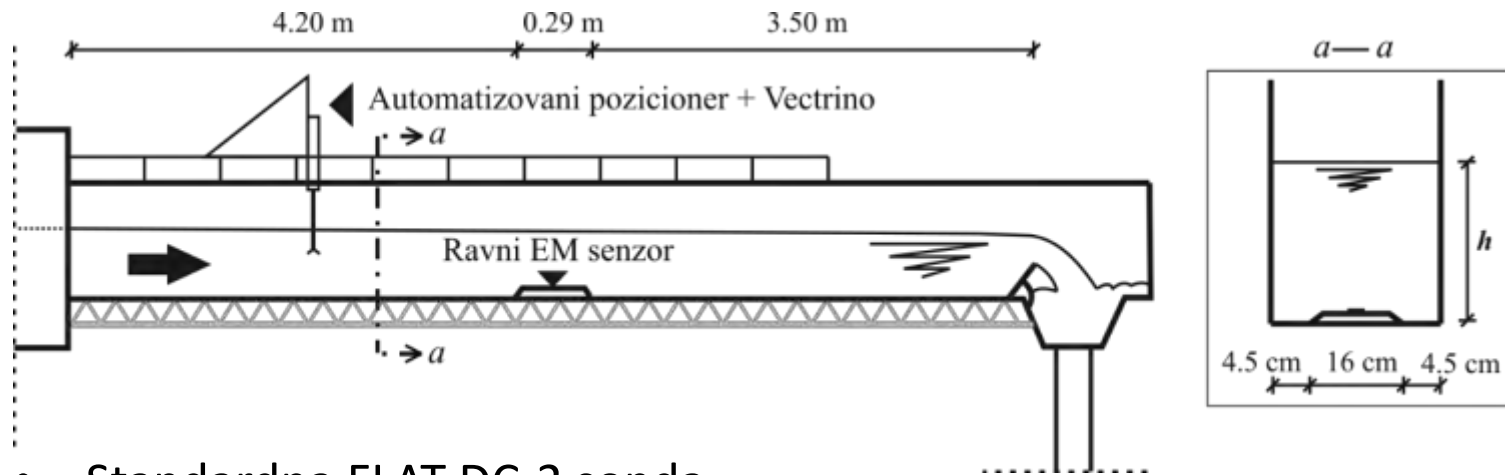
2. Merna neodređenost u uslovima sedimentacije

Sedimentacija poroznog nanosa preko kućišta senzora

Zadržavanje plastičnih kesa na kućištu senzora

Merna neodređenost u standardnim uslovima

- Laboratorijska instalacija:



- Standardna FLAT DC-2 sonda
- Konstantan izvor napajanja od 12 V
- Podaci prikupljeni preko RS-232 veze

$$V_{EMV} \text{ i } V_B = \frac{Q_{EMF}}{A(h_B)} \longrightarrow \begin{matrix} Q_{LAB} = 0 - 40 \text{ L/s} \\ h_{LAB} = 0 - 40 \text{ cm} \end{matrix}$$



Merna neodređenost u standardnim uslovima

Procedura:

For $j = 1:N$ (N = 112 mernih perioda)

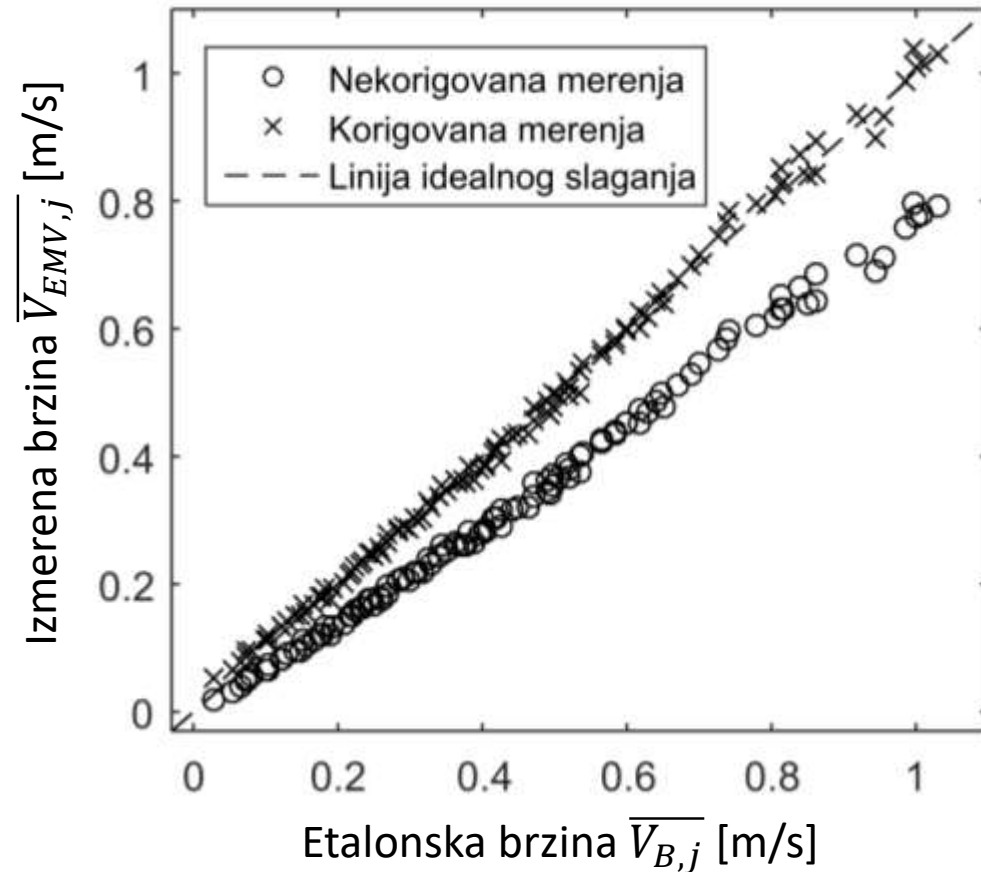
1. Za svaki merni period j uspostavljeno je, i održavano, ustaljeno tečenje u trajanju od 2 min
 - Svakih 30 s, zabeleženo je i -to merenje sa Flat DC-2 senzorom (4) $V_{EMV,i,j}$
2. Proračun Sr. Vr. i St. Dev. od i merenja u j mernom periodu $\overline{V_{EMV,j}}$, $S_{EMV,j}$
3. Etalonsko merenje brzine pomoću cevnog EM i merne igle:

$$V_{B,j} = \frac{Q_{EMF,j}}{A(h_{B,j})}$$

End

Proračun komponenata merne neodređenosti: etalonska, sistematska, statistička i kombinovana (Aguilar i sar., 2016)

Merna neodređenost u standardnim uslovima

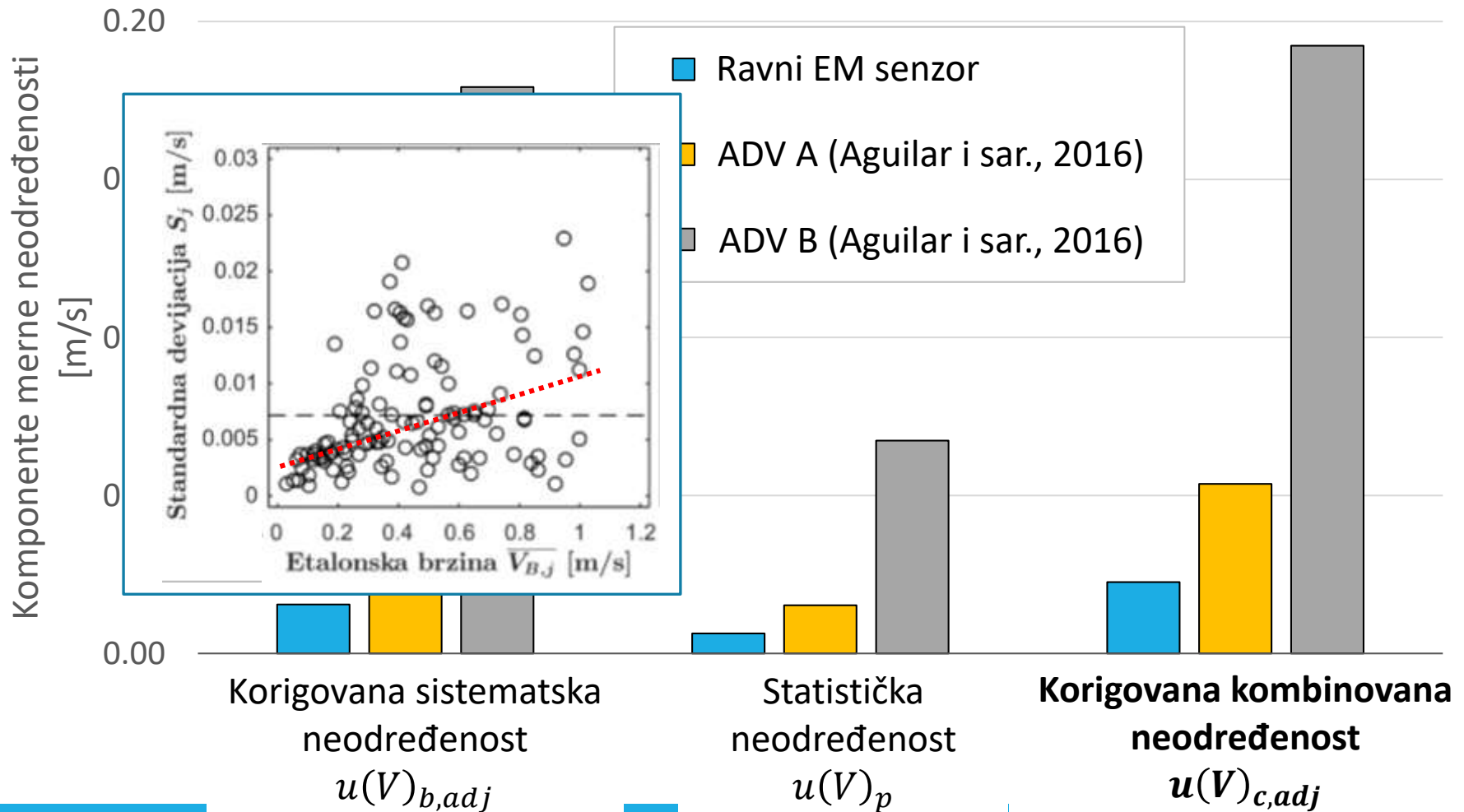


Zapažanja:

- Linearnost
- Rad pri malim dubinama (3 cm)
- Rad pri malim brzinama (3 cm/s)
- Sistematska neodređenost kao posledica kalibracije prema ISO 3455 standardu!

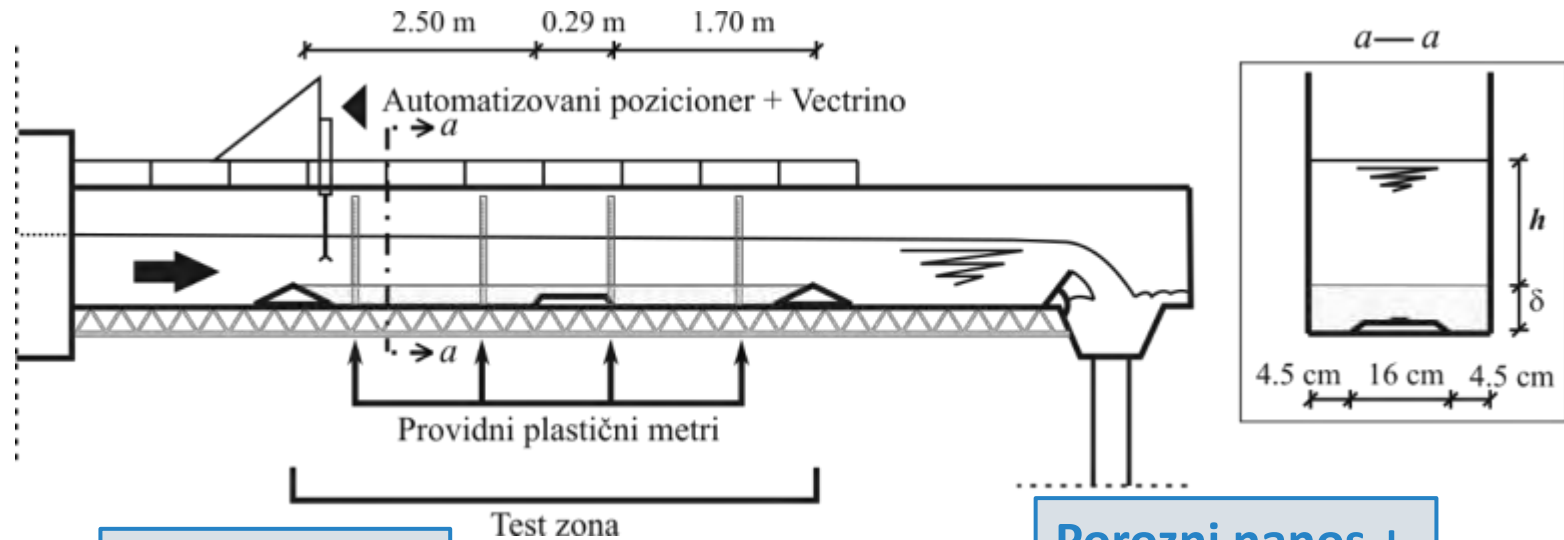
Poređenje sa Dopler senzorima

Merna neodređenost u standardnim uslovima



Merna neodređenost u uslovima sedimentacije

- Laboratorijska instalacija:



Porozni nanos



Porozni nanos + platična folija



Merna neodređenost u uslovima sedimentacije

Procedura:

For $m = 1:M$ ($M = 16$)

For $k = 1:N_{SED}$ ($N = 20 - 30$ mernih perioda)

1. Za svaki merni period k uspostavljeno je, i održavano, ustaljeno tečenje u trajanju od 2 min
 - Svakih 30 s, zabeleženo je i -to merenje sa Flat DC-2 senzorom (4) $V_{EMV,i,k}$
2. Proračun Sr. Vr. i St. Dev. od i merenja u k -tom mernom periodu $\overline{V_{EMV,k}}, S_{EMV,k}$
3. Etalonsko merenje brzine pomoću cevnog EM i merne igle:

$$V_{B,k} = \frac{Q_{EMF,k}}{A(h_{B,k})}$$

End

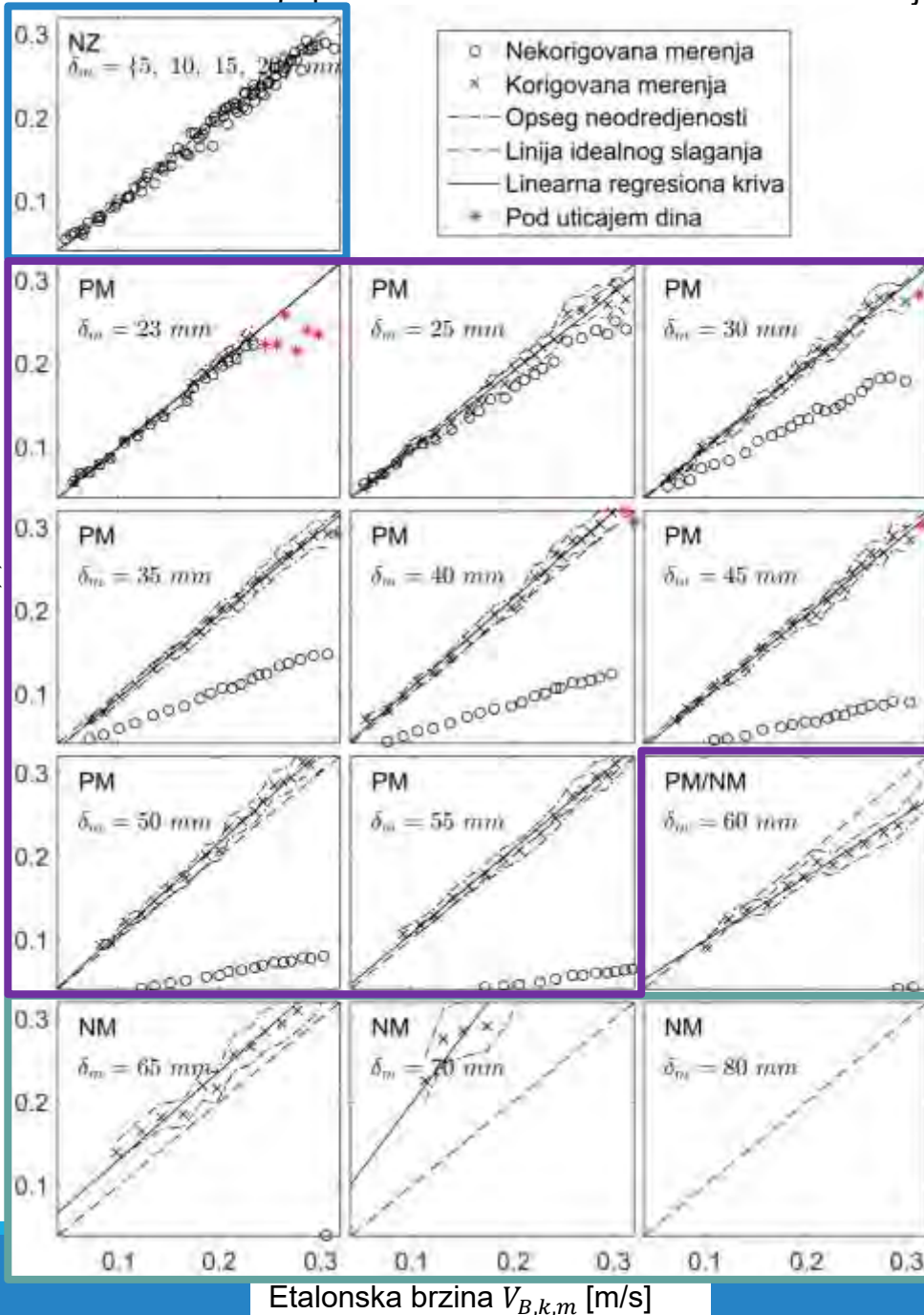
Proračun komponenata merne neodređenosti (Aguilar i sar., 2016)

End

Kriterijum upotrebljivosti:

$$< 2 * u(V)_{c,adj}$$

(u standardnim uslovima)



POROZNI NANOS

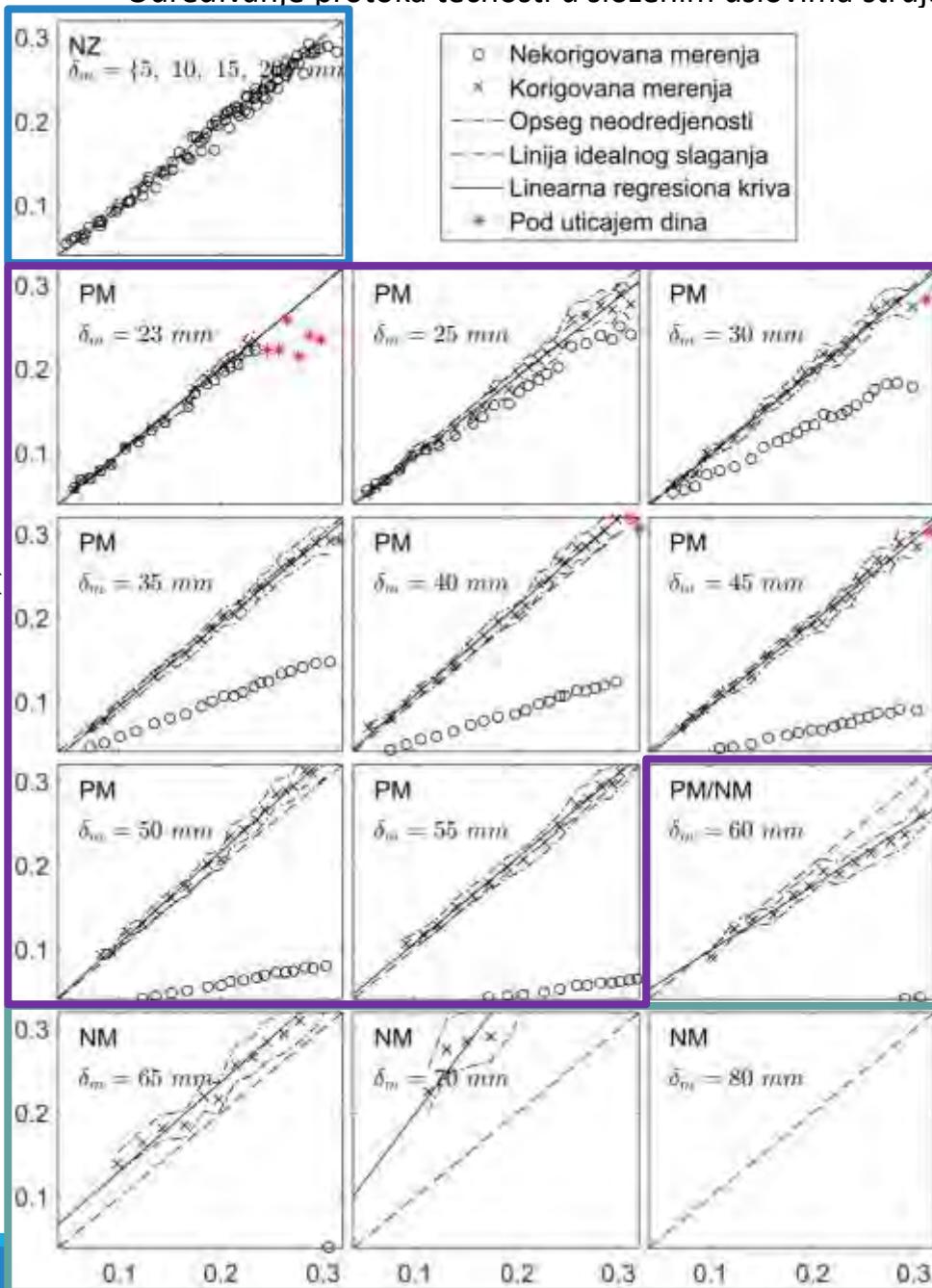
CFM

$$\overline{V_{B,k,m}} = \frac{\overline{V_{EMV,k,m}} - \beta_m}{\alpha_m}$$

NZ – Neporemećena Zona

PM – zona Primenjivosti Modela

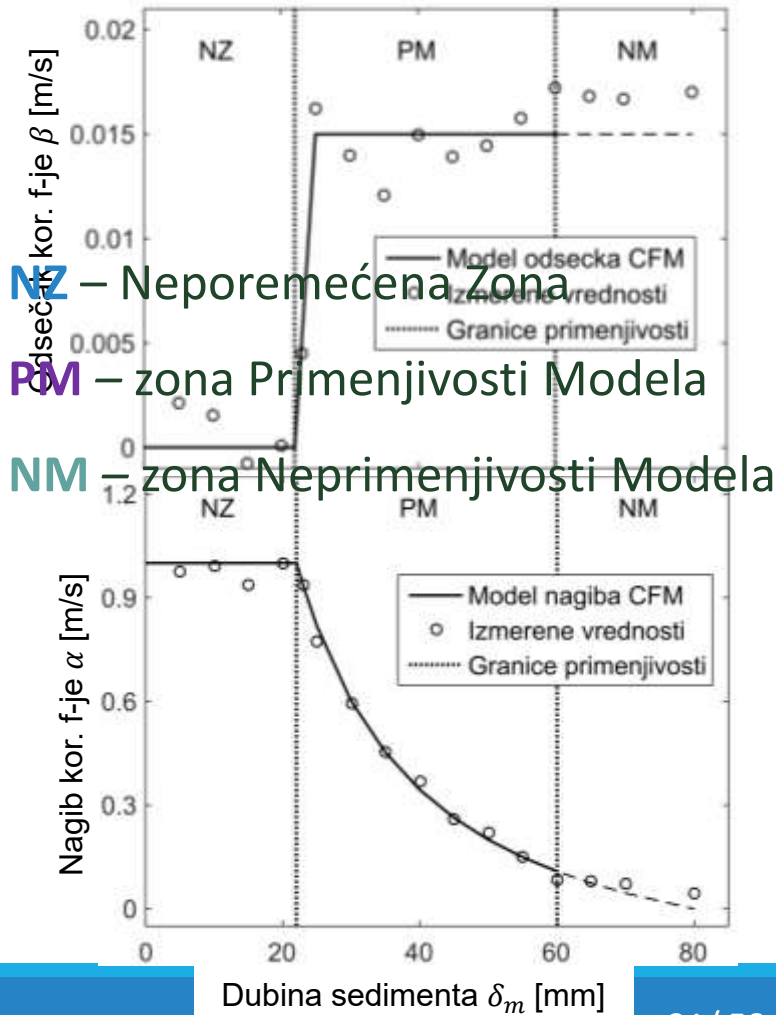
NM – zona Neprimenjivosti Modela



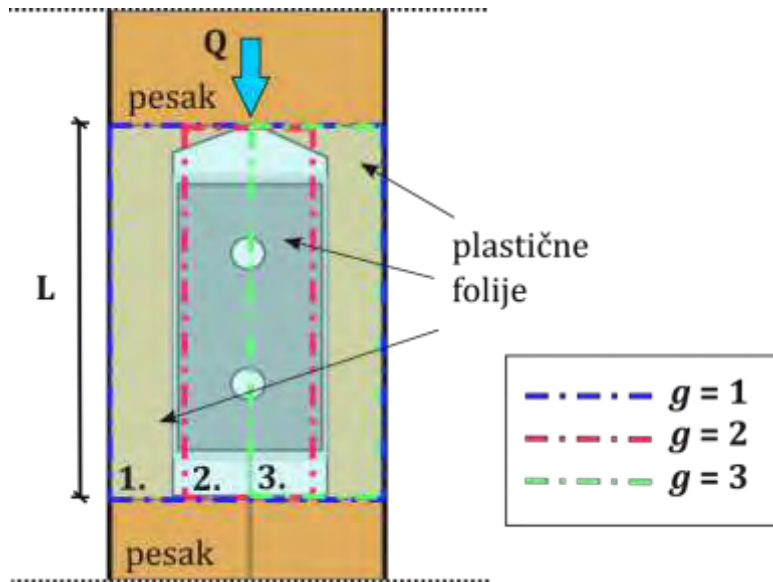
POROZNI NANOS

CFM

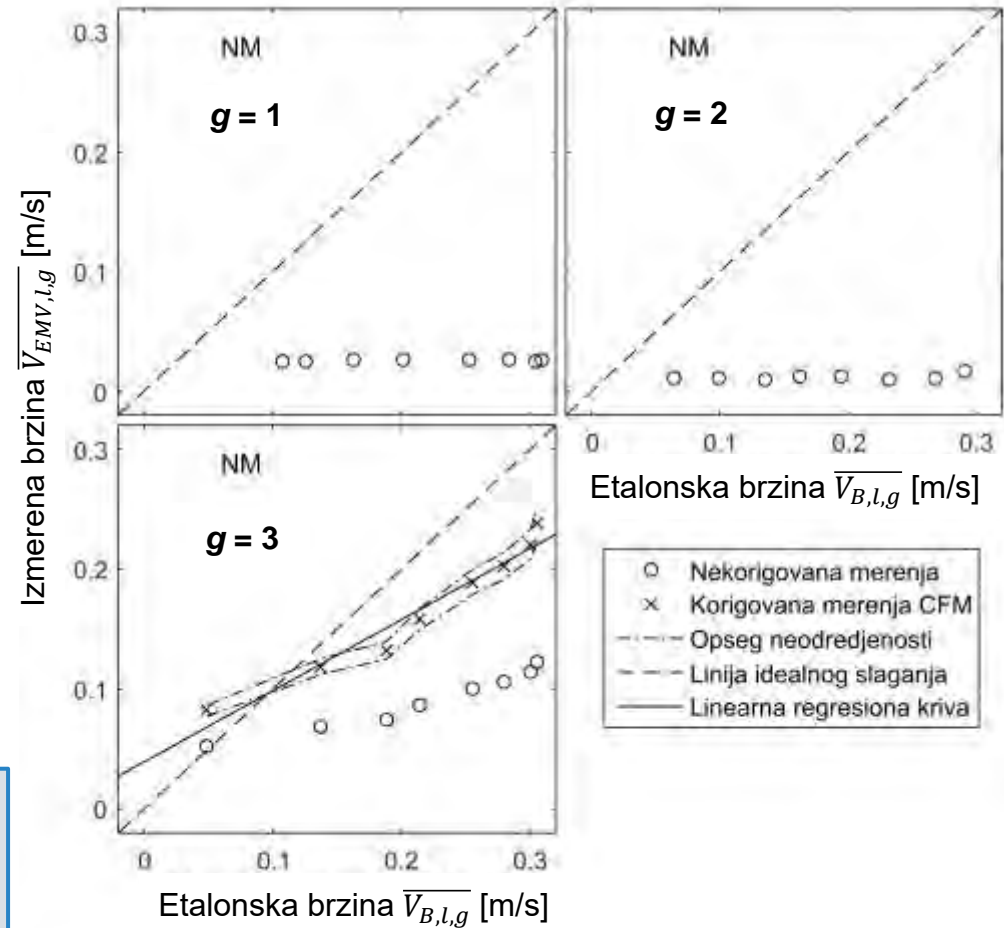
$$\overline{V}_{B,k,m} = \frac{\overline{V}_{EMV,k,m} - \beta_m}{\alpha_m}$$



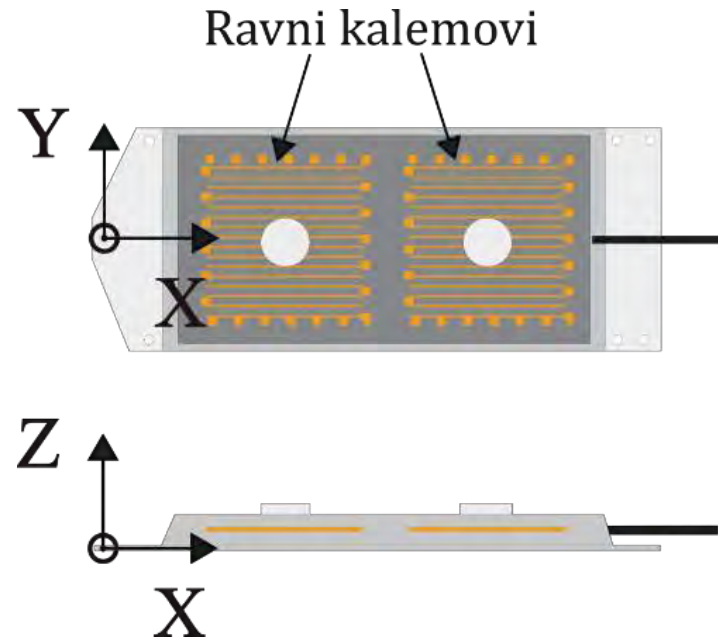
POROZNI NANOS + PLASTIČNE FOLIJE



Provodni put između tečnosti koja struji i elektroda je presečen – senzor ne može da zabeleži adekvatno brzinu!



Analiza radnog principa



- Fundamentalni model:

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

Bevir (1970)

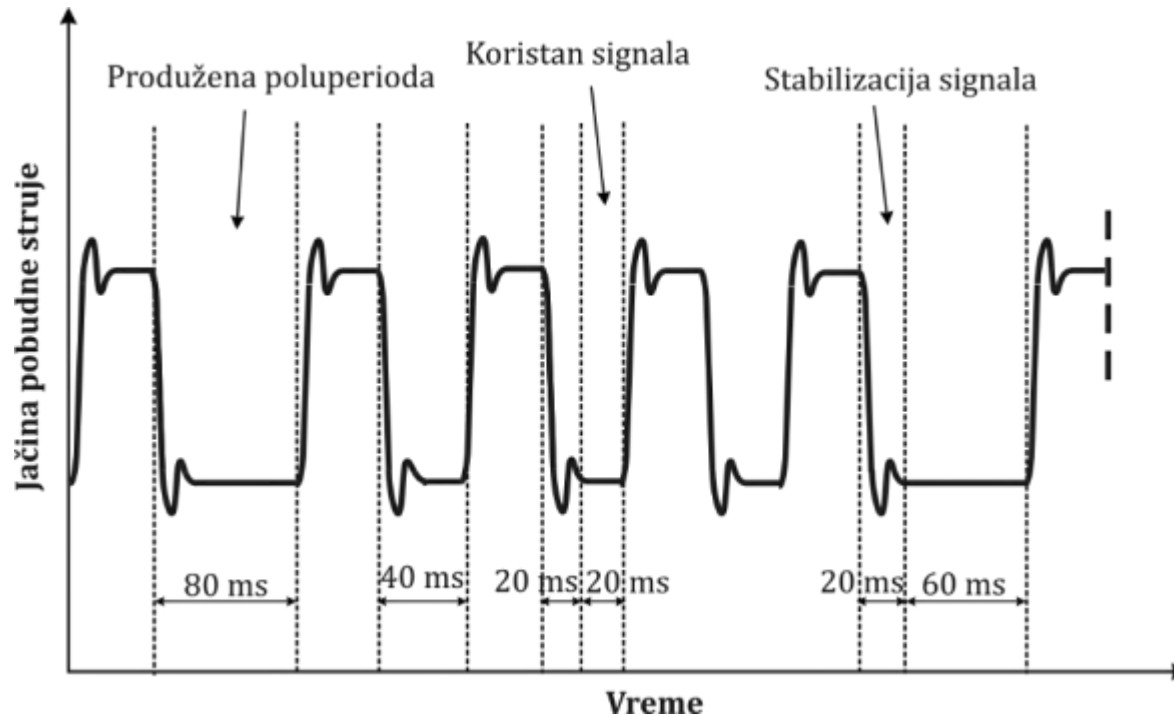
1. Mapiranje magnetnog polja



2. Uprošćeni matematički model ravnih EM senzora

Mapiranje magnetnog polja

- Impulsna bipolarna pobuda:



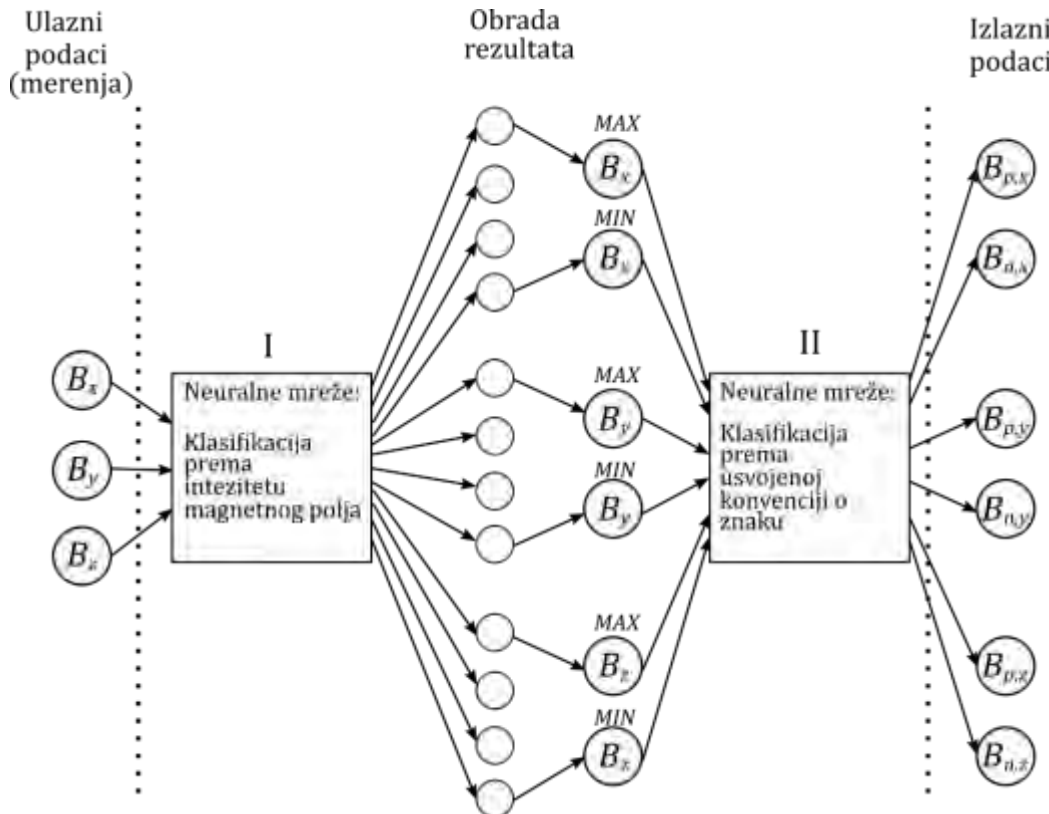
Magnetometar:

- Na bazi Halovog efekta
- $\text{Max } f_{uz} = 88 \text{ Hz}$
- Kalibrisan na Helmholtcovom kalemu (ETF).
- Postprocesiranje signala upotrebom algoritma neuralnih mreža



Mapiranje magnetnog polja

- Postprocesiranje signala primenom *neuralnih mreža* (Stojadinović i sar., 2018):



Koristan signal:

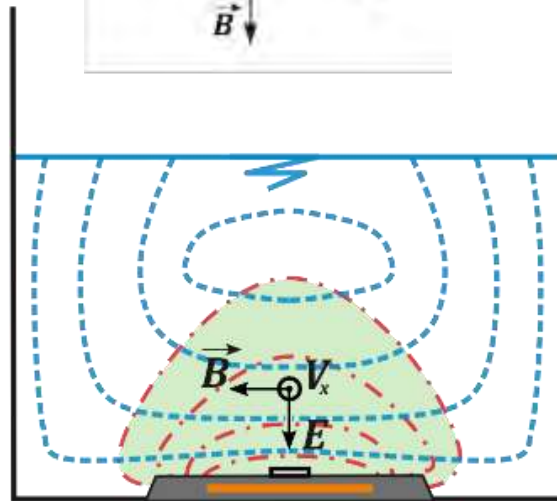
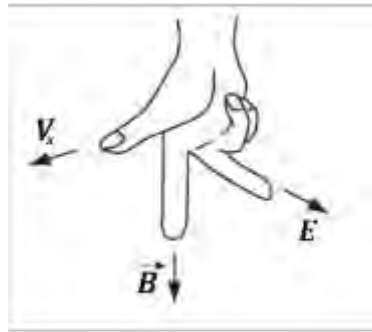
$$B_i = \frac{B_{p,i} - B_{n,i}}{2}$$

Prirodno magnetno polje:

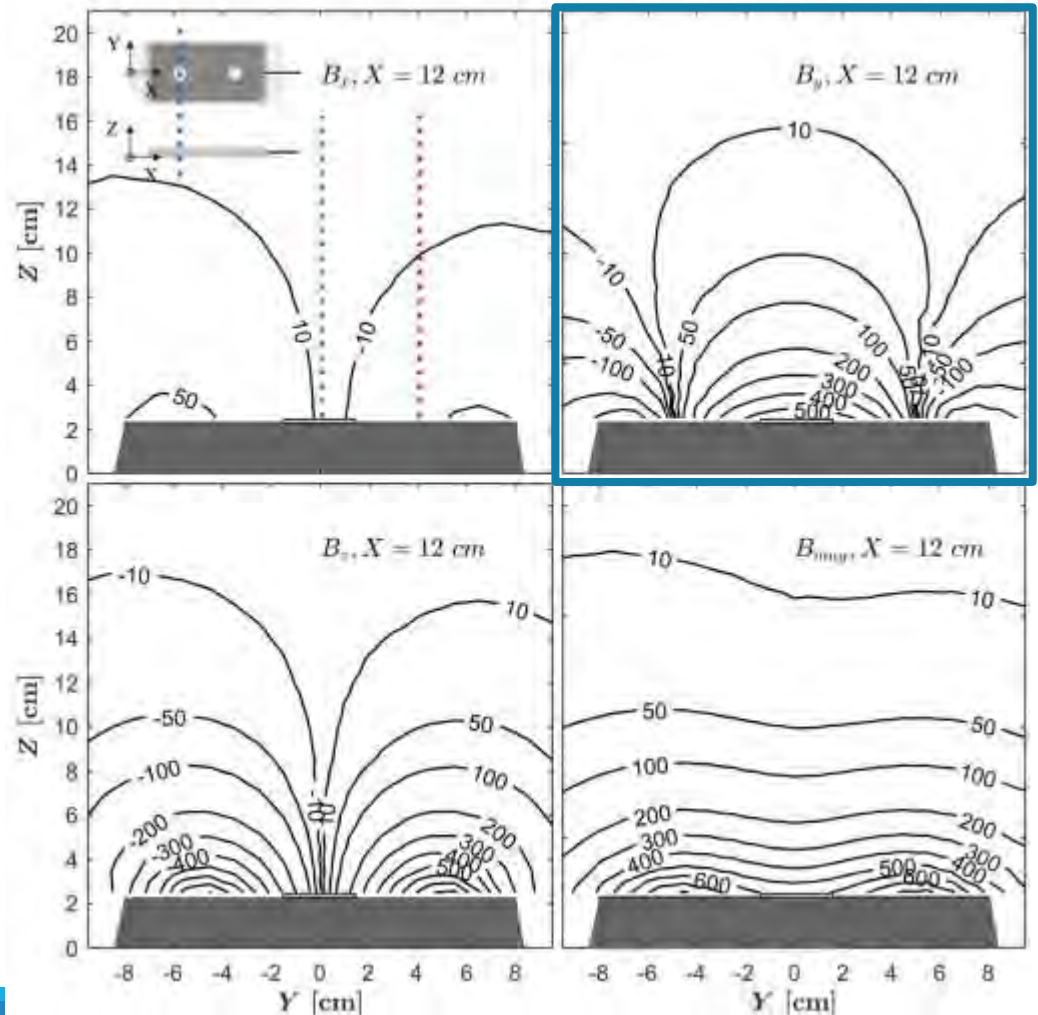
$$B_i^{Zem} = \frac{B_{p,i} + B_{n,i}}{2}$$

Mapiranje magnetnog polja

- Pravilo desne ruke:



EMV

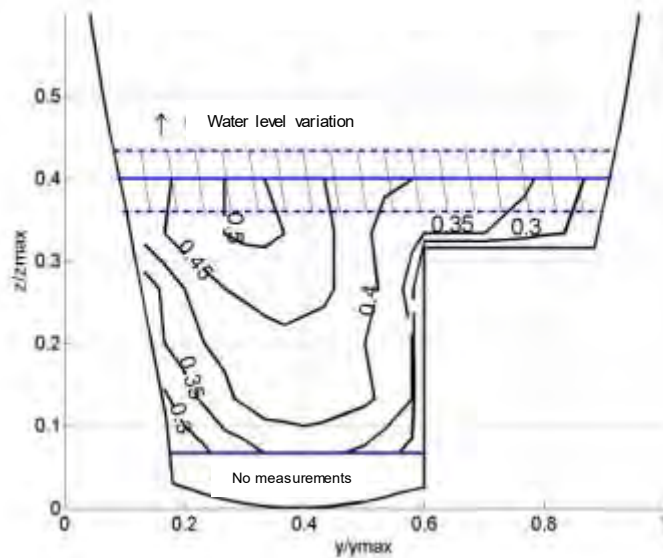


Uprošćeni matematički model ravnih EM senzora

- **Cilj:** analizirati uticaj promene hidrauličkih parametara na odziv senzora.

$$V_{mer} \propto U_m = \int_{\tau} \vec{V} \cdot (\vec{B} \times \vec{j}) d\tau = \int_{\tau} \vec{V} \cdot \vec{W} d\tau$$

Bevir (1970)



Larrarte (2006)

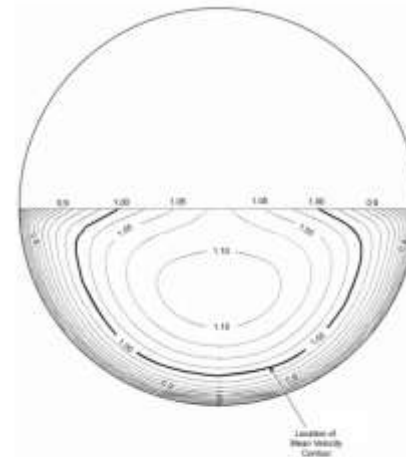


Figure 2c:
d/D= 0.50

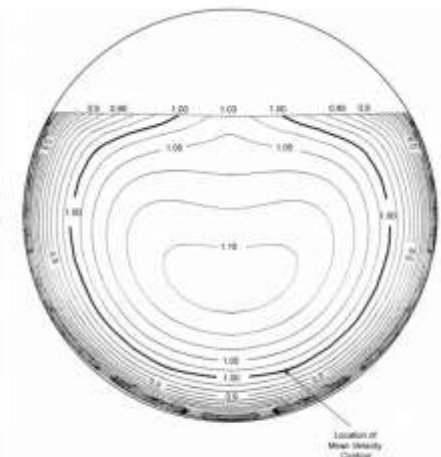


Figure 2d:
d/D= 0.75

**Fundamentalni matematički model
nema kapacitet za praktičnu primenu!**

www.hachflow.com

Uprošćeni matematički model ravnih EM senzora

- **Pretpostavke:**

1. Kontrolna zapremina je iznad kućišta senzora.
2. Samo V_x utiče na generisanje izlaznog signala (w umesto \vec{W})
3. Iznad kućišta EM senzora gradijent brzine postoji samo u upravnom (Z) pravcu.



Uprošćeni matematički model ravnih EM senzora

- **Predlog:**

$$V_{mer} \cong V_{S,mer} = \frac{1}{(Z_U - Z_L)} \int_{Z_L}^{Z_U} w(z) \cdot V_x(z) dz \quad \checkmark$$

Granice integracije:

$$Z_L = \max\{Z_{surf}, \delta\}$$

$$Z_U = \min\{Z_{surf} + \tau_{max}, h\}$$

Jednodimenzionalna
težinska funkcija

Domet kontrolne zapremine

Tehnički parametri senzora

Uprošćeni matematički model ravnih EM senzora

- Detaljnije:**

$$V_{mer} \cong V_{S,mer} = \frac{1}{(Z_U - Z_L)} \int_{Z_L}^{Z_U} w(z) \cdot V_x(z) dz$$

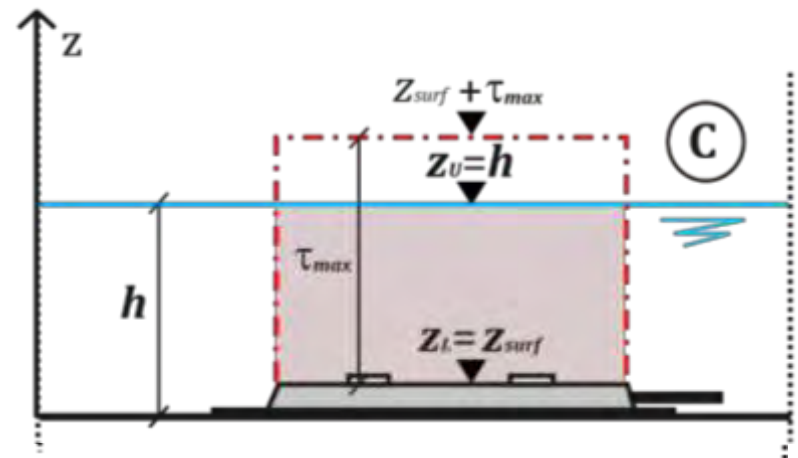
Granice integracije:

$$Z_L = \max\{Z_{surf}, \delta\}$$

$$Z_U = \min\{Z_{surf} + \tau_{max}, h\}$$

Praktični problem:

Kako odrediti tehničke parametre ravnog EM senzora?



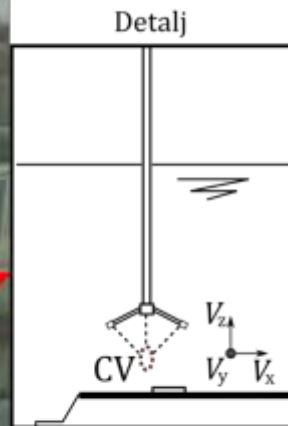
Uprošćeni matematički model ravnih EM senzora

- Eksperimentalna metodologija za određivanje $w(z)$ i τ_{max} :

$$V_{mer} \cong V_{S,mer} = \frac{1}{(Z_U - Z_L)} \int_{Z_L}^{Z_U} w(z) \cdot V_x(z) dz$$

a) Može se **izmeriti** i **modelirati** u laboratorijskom (uzanom) kanalu

ADV senzor brzine Vectrino+



Bonakdari i sar. (2008)

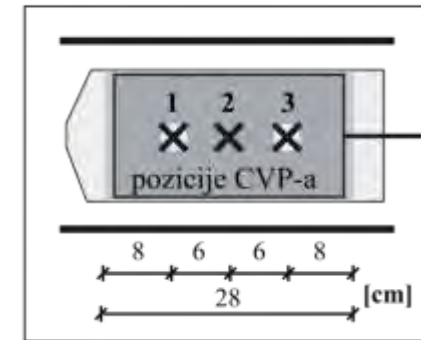
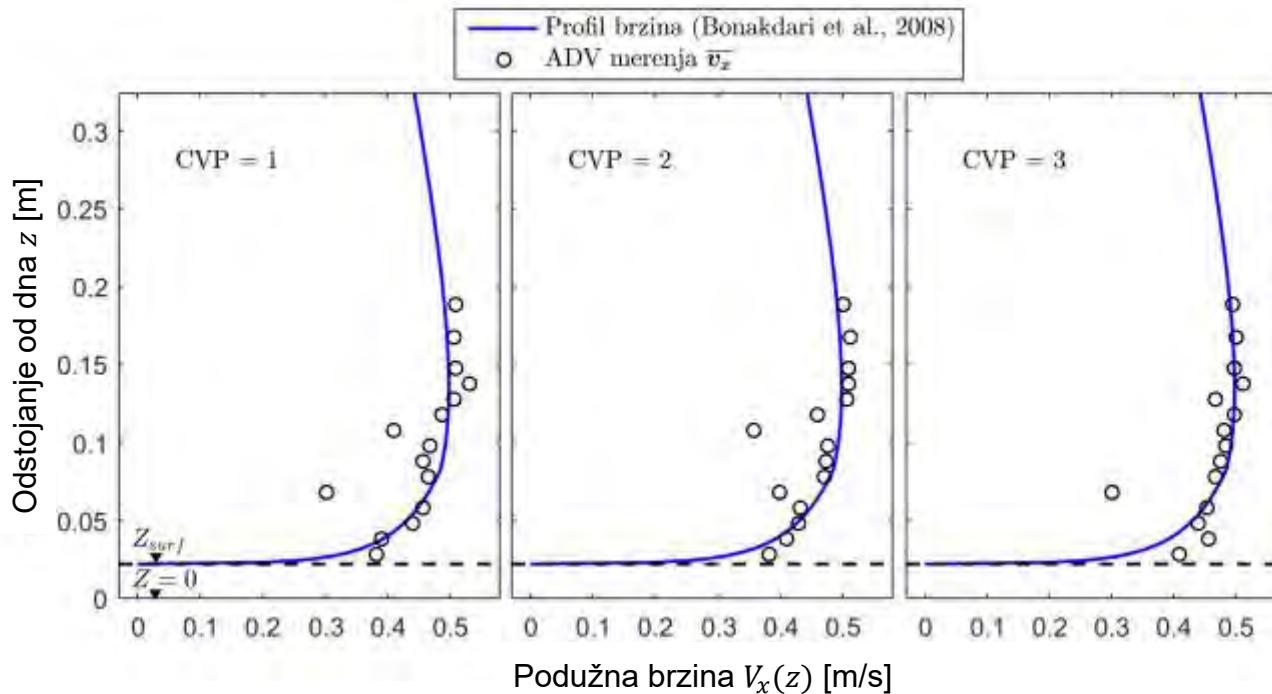
$$\frac{V_x}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{k_s} \right) + B_s$$

$$\frac{V_x(\xi)}{u_*} = \left(\frac{\frac{\xi_i^2}{2} + \xi_i + C_{Ar}}{\frac{\xi^2}{2} + \xi + C_{Ar}} \right) \left[\frac{\left(\left(\frac{\xi^2}{4} + \xi + C_{Ar} \ln(\xi) \right) - \left(\frac{\xi_i^2}{4} + \xi_i + C_{Ar} \ln(\xi_i) \right) \right)}{\frac{\xi_i^2}{2} + \xi_i + C_{Ar}} \right] \cdot \left[\frac{\left(\frac{gh \sin \theta}{u_*^2} - 1 \right)}{\kappa} + \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{0.2h}{k_s} \right) + B_s \right]$$

Uprošćeni matematički model ravnih EM senzora

- Eksperimentalna metodologija za određivanje $w(z)$ i τ_{max} :

Mapirani/modelirani rasporedi brzina:



$$Q = 33.3 \text{ L/s}$$

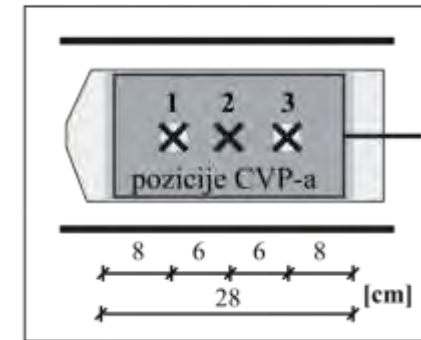
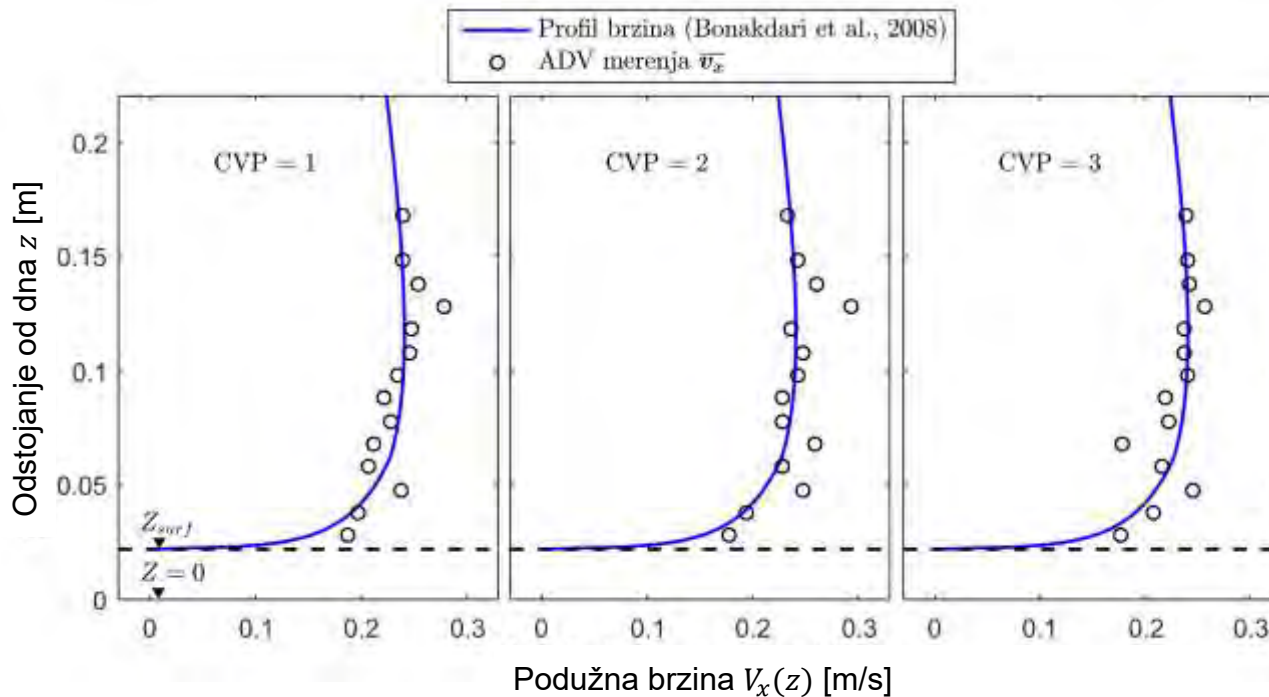
$$h = 0.324 \text{ m}$$

$$\delta = 0.0 \text{ m}$$

Uprošćeni matematički model ravnih EM senzora

- Eksperimentalna metodologija za određivanje $w(z)$ i τ_{max} na $b-b$:

Mapirani/modelirani rasporedi brzina:



$Q = 14.4 \text{ L/s}$
 $h = 0.223 \text{ m}$
 $\delta = 0.025 \text{ m}$

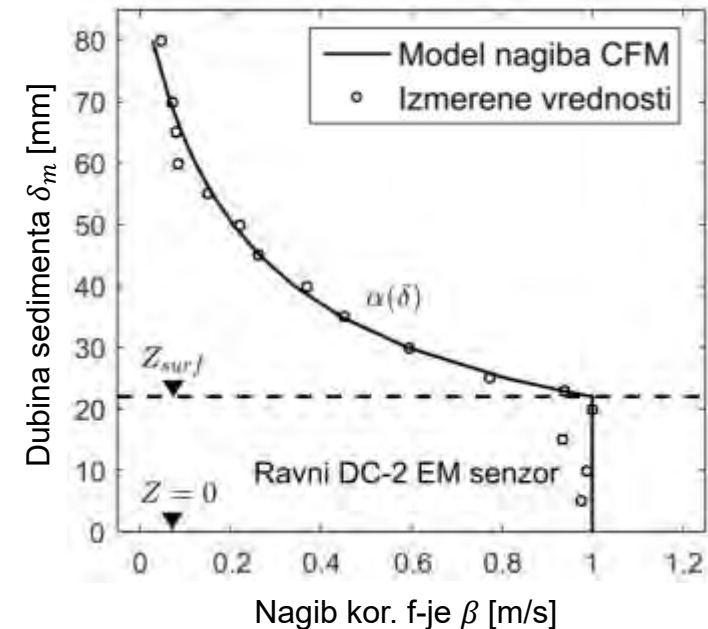
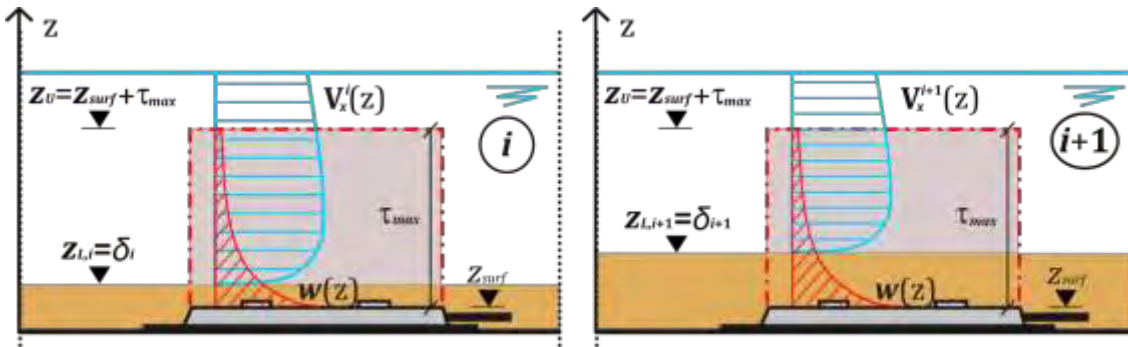
Uprošćeni matematički model ravnih EM senzora

- Eksperimentalna metodologija za određivanje $w(z)$ i τ_{max} :

$$V_{mer} \cong V_{S,mer} = \frac{1}{(Z_U - Z_L)} \int_{Z_L}^{Z_U} w(z) V_x(z) dz$$

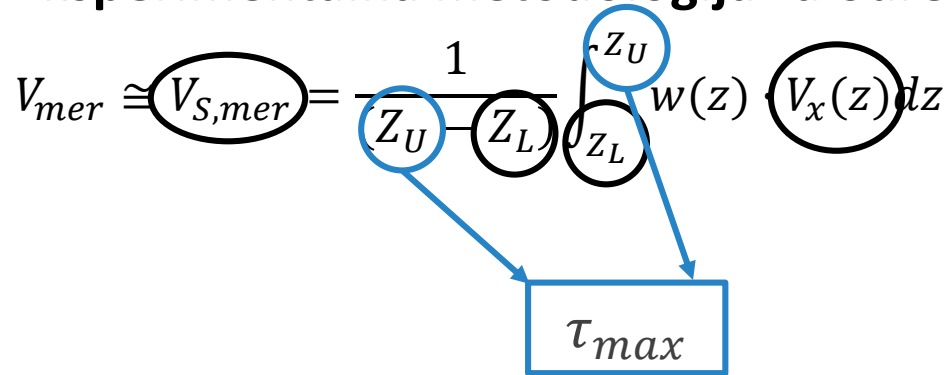
b) Pomoć od rezultata ispitivanja u uslovima sedimentacije:

$$\overline{V_{B,m}} = \frac{\overline{V_{EMV,m}} - \beta_m}{\alpha_m}$$



Uprošćeni matematički model ravnih EM senzora

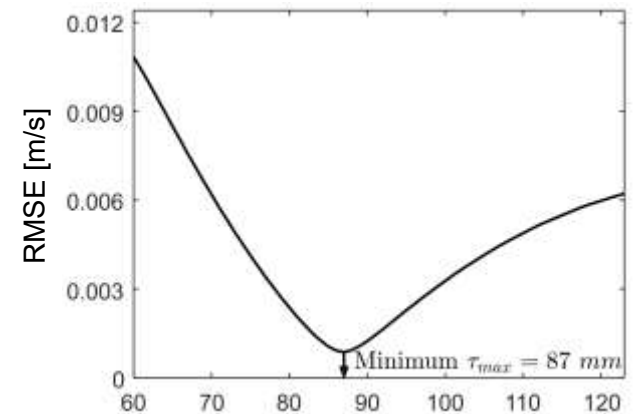
- Eksperimentalna metodologija za određivanje $w(z)$ i τ_{max} :



c) Minimizacioni problem?

Kriterijum: min (RMSE) za $V_{S,mer}(V_{mer})$

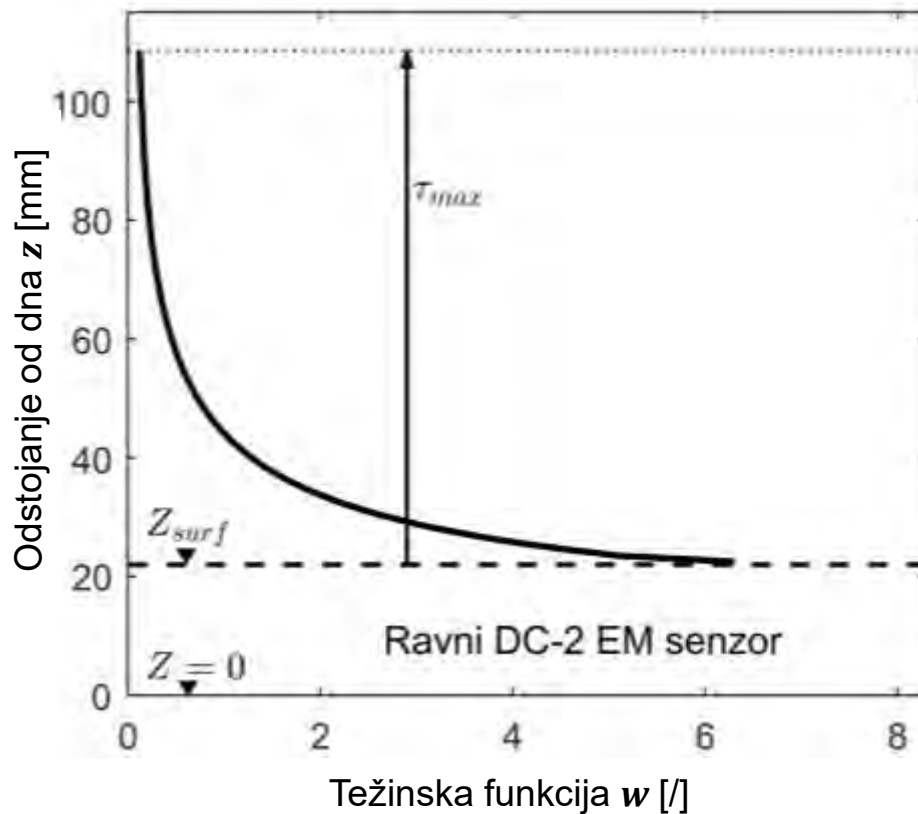
Ispitan opseg vrednosti τ_{max} : 60 – 120 mm



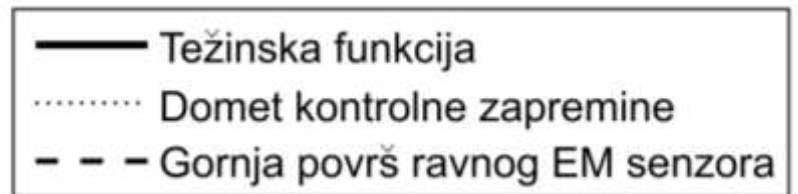
Domet kontrolne zapremine τ_{max} [m/s]

Uprošćeni matematički model ravnih EM senzora

- Eksperimentalna metodologija za određivanje $w(z)$ i τ_{max} :



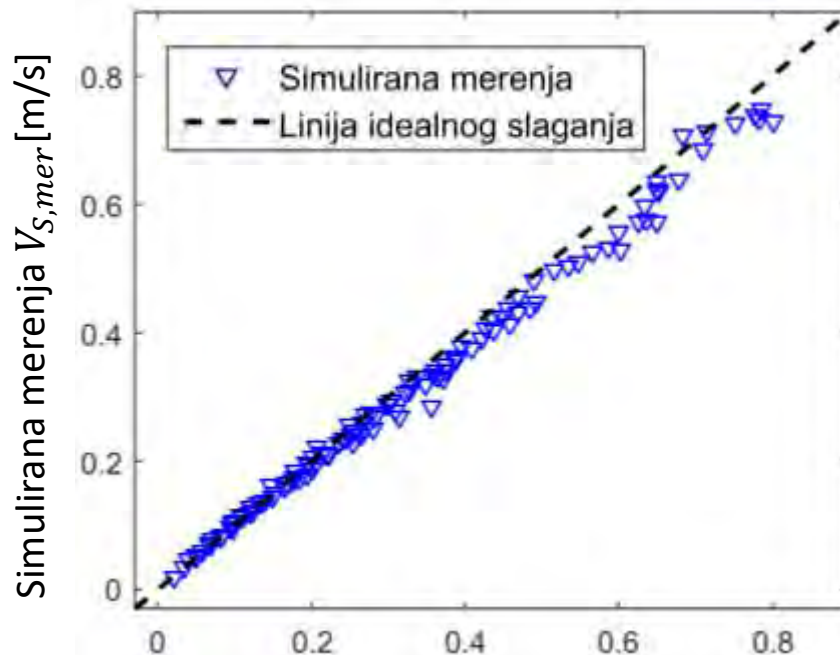
$$\tau_{max} = 87 \text{ mm}$$



Uprošćeni matematički model ravnih EM senzora

- Validacija metodologije za određivanje $w(z)$ i τ_{max} :

Da li je moguće modelirati odziv senzora korišćenjem predloženog modela, tehničkih parametara i modeliranog rasporeda brzina?



Validacija

RMSE = 0.025 m/s

Kalibrisan senzor

RMSE = 0.015 m/s

Nekorigovana merenja $\overline{V}_{EMV} = V_{mer}$ [m/s]

Uprošćeni matematički model ravnih EM senzora

- Dodatni komentari na rezultate laboratorijskog ispitivanja:
 1. Izlazni signal se dobija nelinearnom integracijom rasporeda brzina u zidnom regionu toka. ($w(z)$)
 2. Domet kontrolne zapremine τ_{max} je relativno mali.
- Iz čega sledi:
 1. Linearnost u laboratorijskom kanalu \neq linearnost u realnim provodnicima.
 2. Potrebna praktična metodologija za definisanje korelacije $V(V_{mer})$

Lokalna kalibracija senzora –
analogna postupku „prevođenja
protoka“ (El Bahlouli i Larrarte, 2018)
za Dopler senzore

Širi kontekst

Predlog postupka lokalne kalibracije

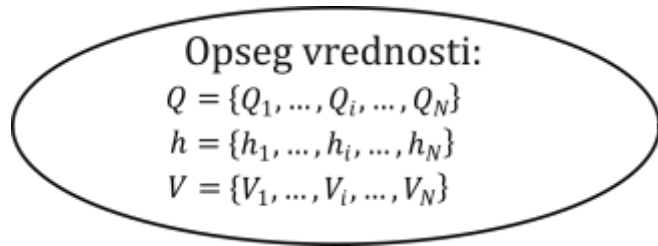
- Projektovanje mernog mesta u okviru hidrotehničkog sistema:
 1. Globalna (integralna) analiza hidrotehničkog sistema
 2. Analiza uslova na mernom mestu
 3. Odabir merne metodologije i detaljno projektovanje mernog mesta.
 4. **Lokalna kalibracija EM senzora**

Dodatni korak pri projektovanju mernog mesta u složenim uslovima strujanja!



Flowchart

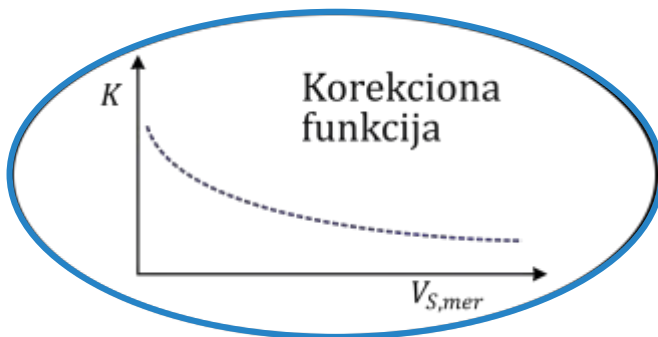
Predlog postupka lokalne kalibracije



Poznato merno mesto, izabrana oprema...

Uprošćeni matematički model

K može biti funkcija i h



$Q_i(h_i, V_i)$ for $i = 1:N$

Raspored brzina na mernom mestu:

- Opšti postupak - analitički obrazci
- Posebni postupak - CFD

$$Q_i(h_i, V_i) + V_x^i(z)$$

Simulirani odziv senzora:

$$Z_L = \max\{Z_{surf}, \delta\}$$

$$Z_U = \min\{Z_{surf} + \tau_{max}, h\}$$

$$V_{S,mer} = \frac{1}{(Z_U - Z_L)} \int_{Z_L}^{Z_U} w(z) \cdot V_x(z) dz$$

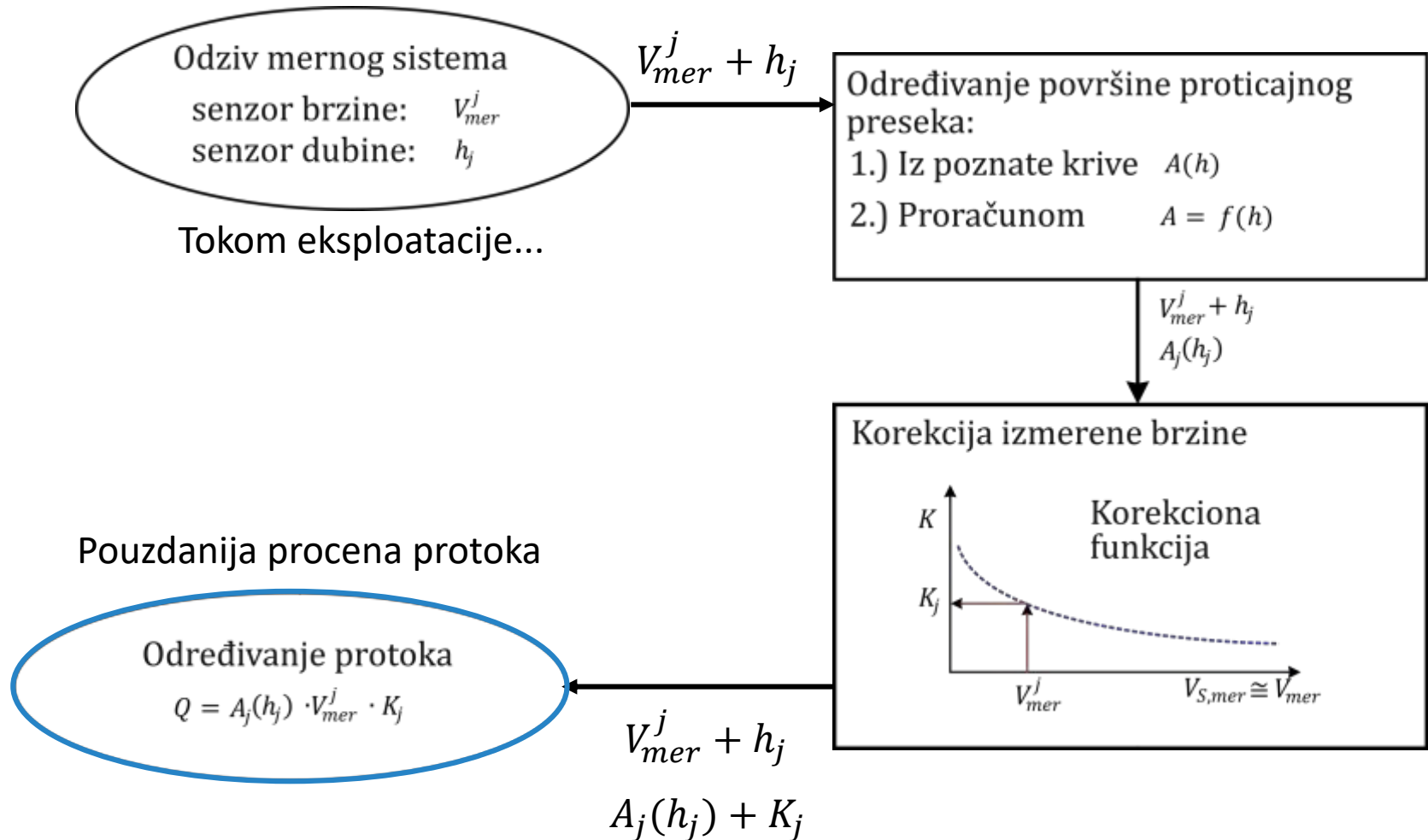
$$Q_i(h_i, V_i) + V_x^i(z)$$

$$V_{S,mer}^i$$

Definisanje korekcionih koeficijenata:

$$K = \frac{V}{V_{S,mer}}$$

Predlog postupka lokalne kalibracije



Terenska ispitivanja



- **Tri merna mesta u okviru sistema „Hidroelektrane na trebišnjici“ – podsistem „Gornji horizonti“.**

- **Nosilac poslova:**

Institut Jaroslav Černi

- **Konsultanti:**

Svet instrumenata

GRF

Terenska ispitivanja

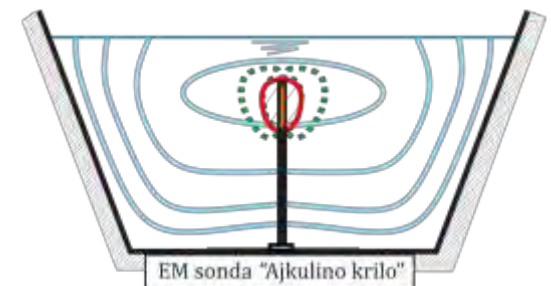
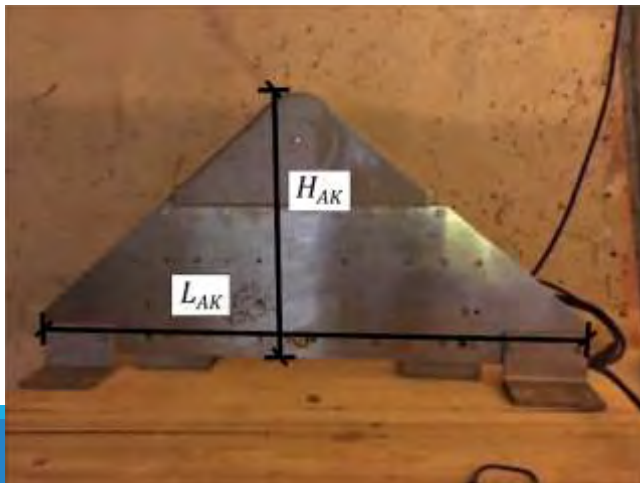
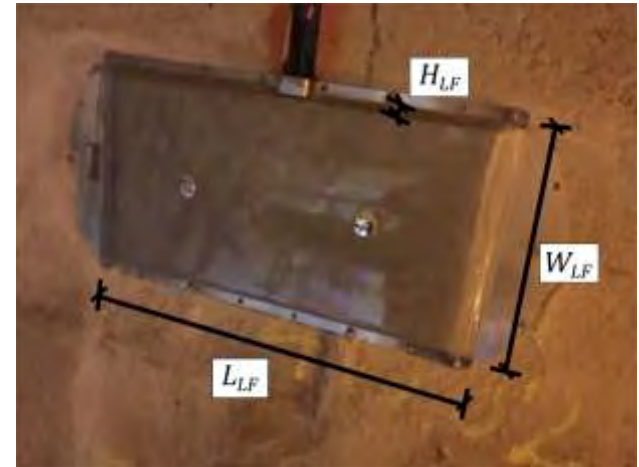
- Svako merno mesto je opremljeno sa:

1. **Osnovnim Mernim Sistemom (OMS)**

- 4 * Large FLAT DC-2 EM senzora
- 2 * Pijezorezistivni senzor pritiska

2. **Kontrolnim Mernim Sistemom (KMS)**

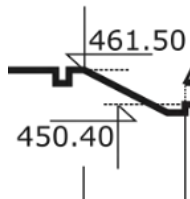
- 2 * Lokalni EM senzor brzine „Ajkulino krilo“



De

Bilečka akumulacija:

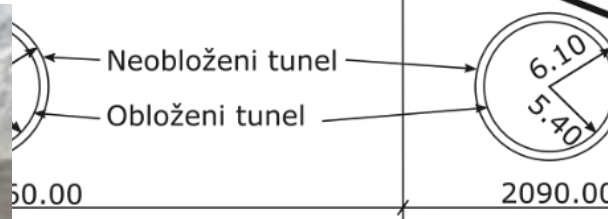
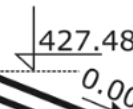
Fatničko polje



MERNI PROFIL
PAĐENI



MERNI PROFIL
ČEPELICA



Terenska ispitivanja

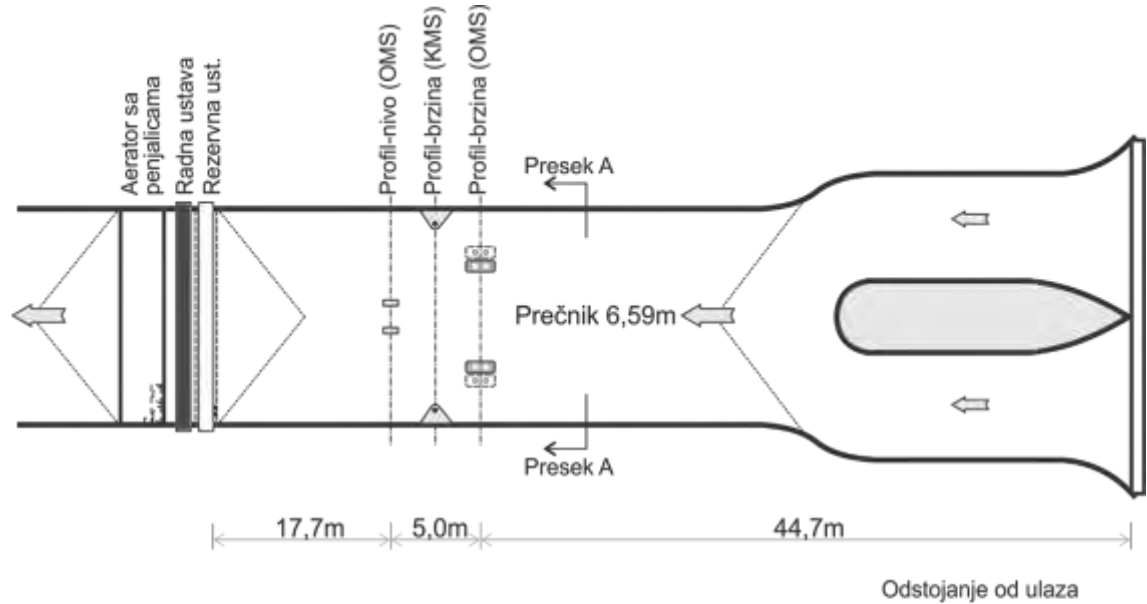
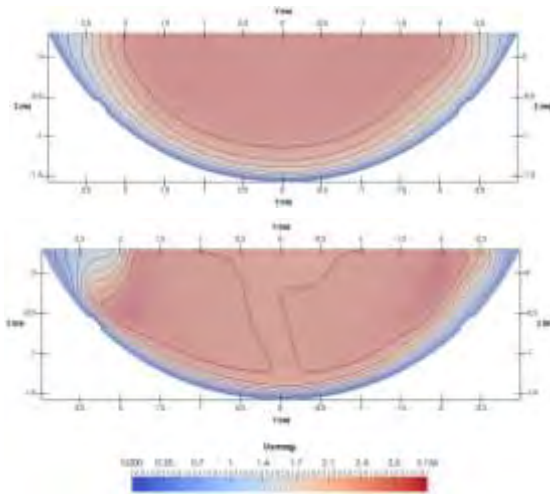
Max protok procenjen na oko $110 \text{ m}^3/\text{s}$

Kombinovani uslovi tečenja

Max Rejnoldsov broj oko $21 \cdot 10^6$

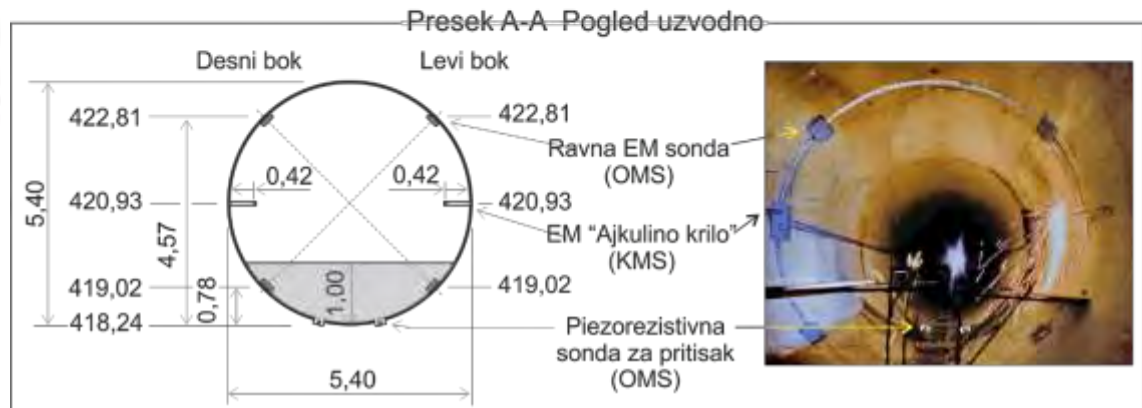
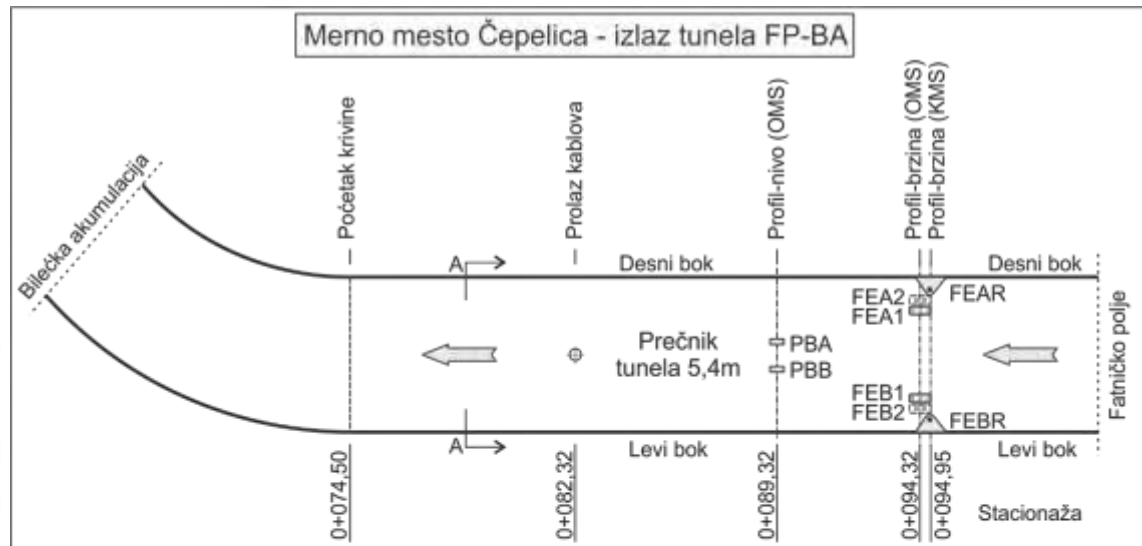
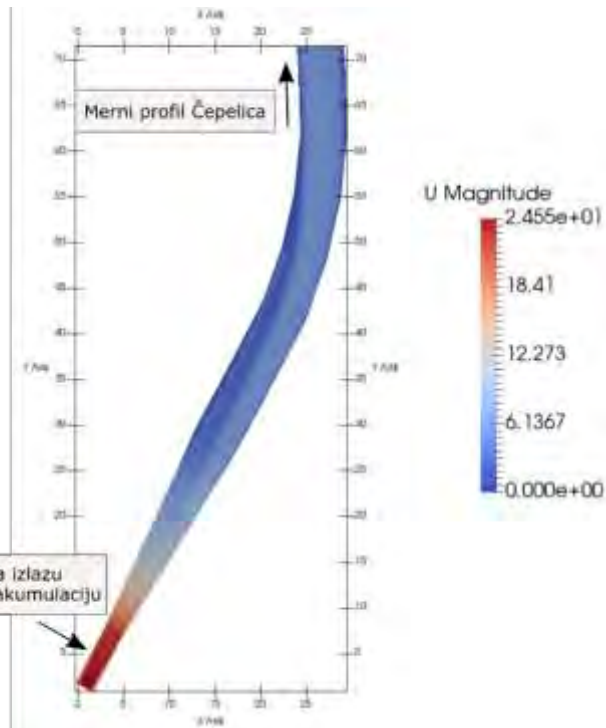
Terenska ispitivanja

- Uzvodni merni profil „Pađeni“:

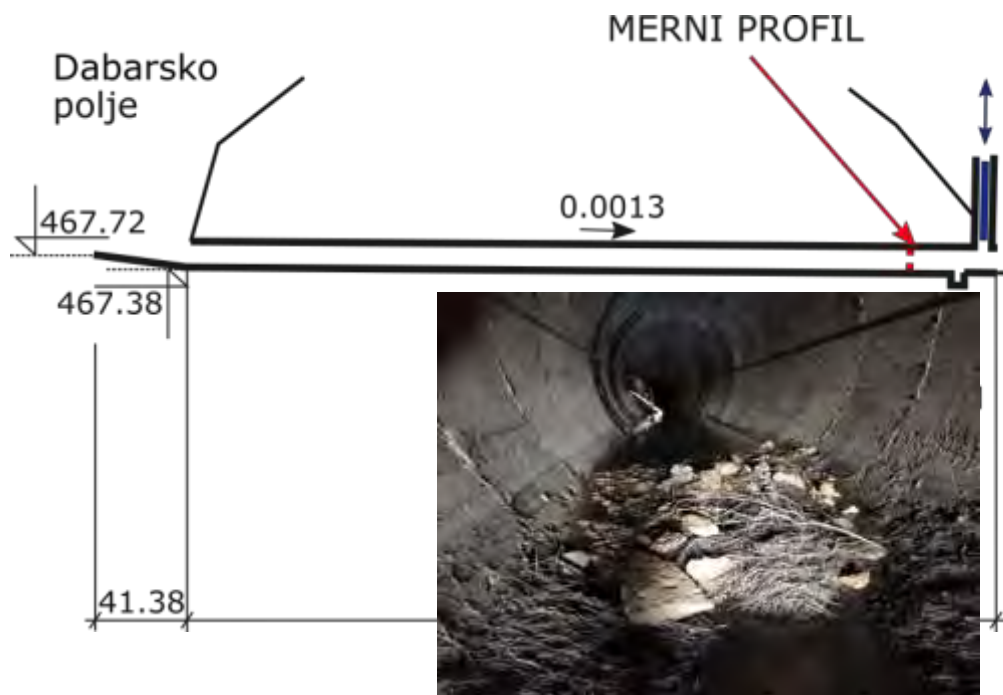


Terenska ispitivanja

- Nizvodni merni profil „Čepelica“:



Derivacioni tunel Dabarsko Polje – Fatničko Polje:



Terenska ispitivanja

Bidirekciono tečenje

Procenjen opseg protoka -30 do 40 m³/s

Kombinovani uslovi tečenja

Terenska ispitivanja

Verifikacija lokalne kalibracije

OMS

$$V_A = \frac{V'_A + V''_A}{2}; V_B = \frac{V'_B + V''_B}{2}$$

$$V_{mer} = \frac{V_A + V_B}{2}; h_{mer} = \frac{h_A + h_B}{2}$$

KMS

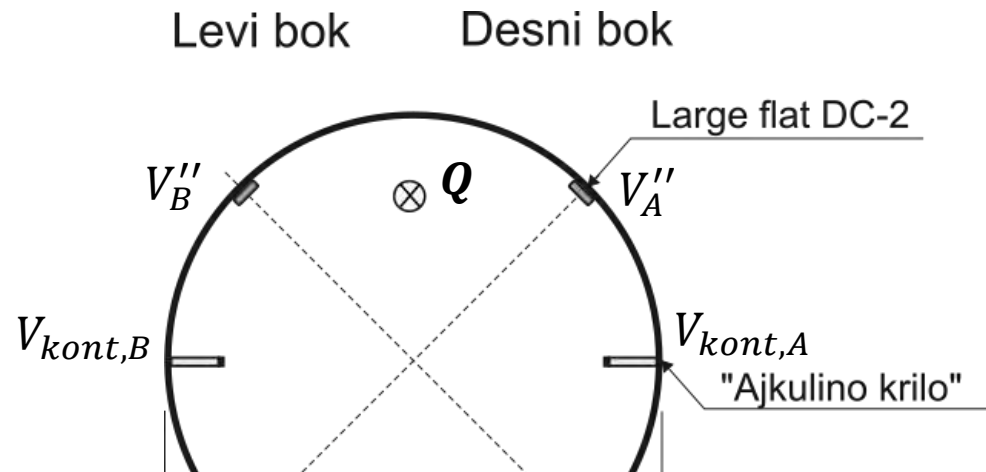
$$V_{kont,mer} = \frac{V_{kont,A} + V_{kont,B}}{2}$$

Traženo

$$V = K \cdot V_{mer} = K_{kont} \cdot V_{kont,mer}$$

Lokalna kalibracija

1. Kako je sprovedena lokalna kalibracija?



$$\frac{K}{K_{kont}} = \frac{V_{kont,mer}}{V_{mer}}$$

Verifikacija preko izmerenih podataka

2. Koji izmereni podaci su korišćeni?

Terenska ispitivanja

1. Kako je sprovedena lokalna kalibracija?

Pretpostavke:

Ustaljeno tečenje u oba smera


Potpuno razvijeno turbulentno tečenje u kružnom tunelu

Raspored brzina se može opisati eksponencijalnim zakonom:

$$V_x(z) = V \left(\frac{2z}{D} \right)^{1/n} \frac{(n+1)(2n+1)}{2n^2}$$

$n_1 = 0.5261(\log Re)^2 - 3.853 \log Re + 13.1537$
(1) Nikuradze, 1932

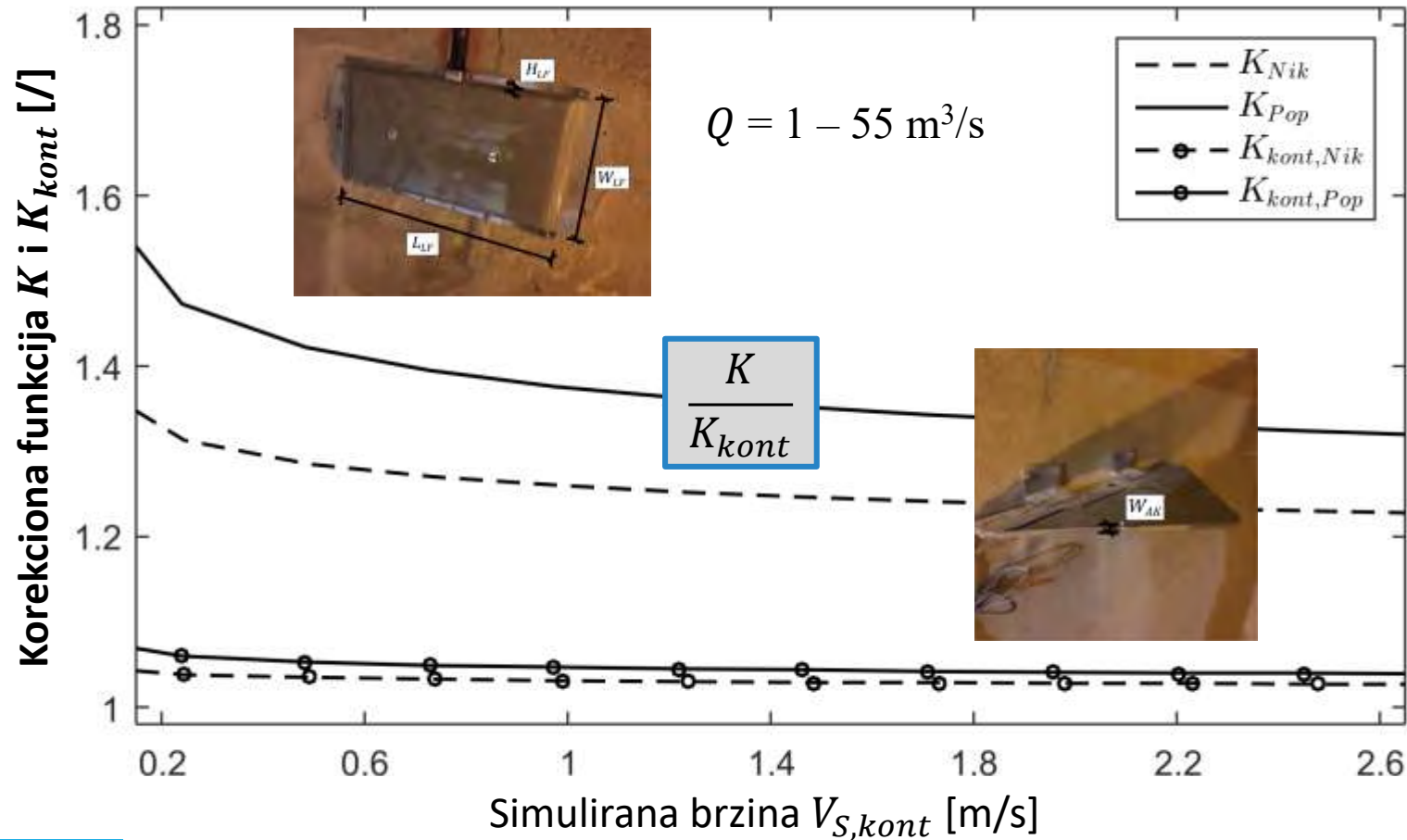
$n_2 = 1 + \sqrt[6]{\frac{Re}{60}}$ (2) Pope, 2008



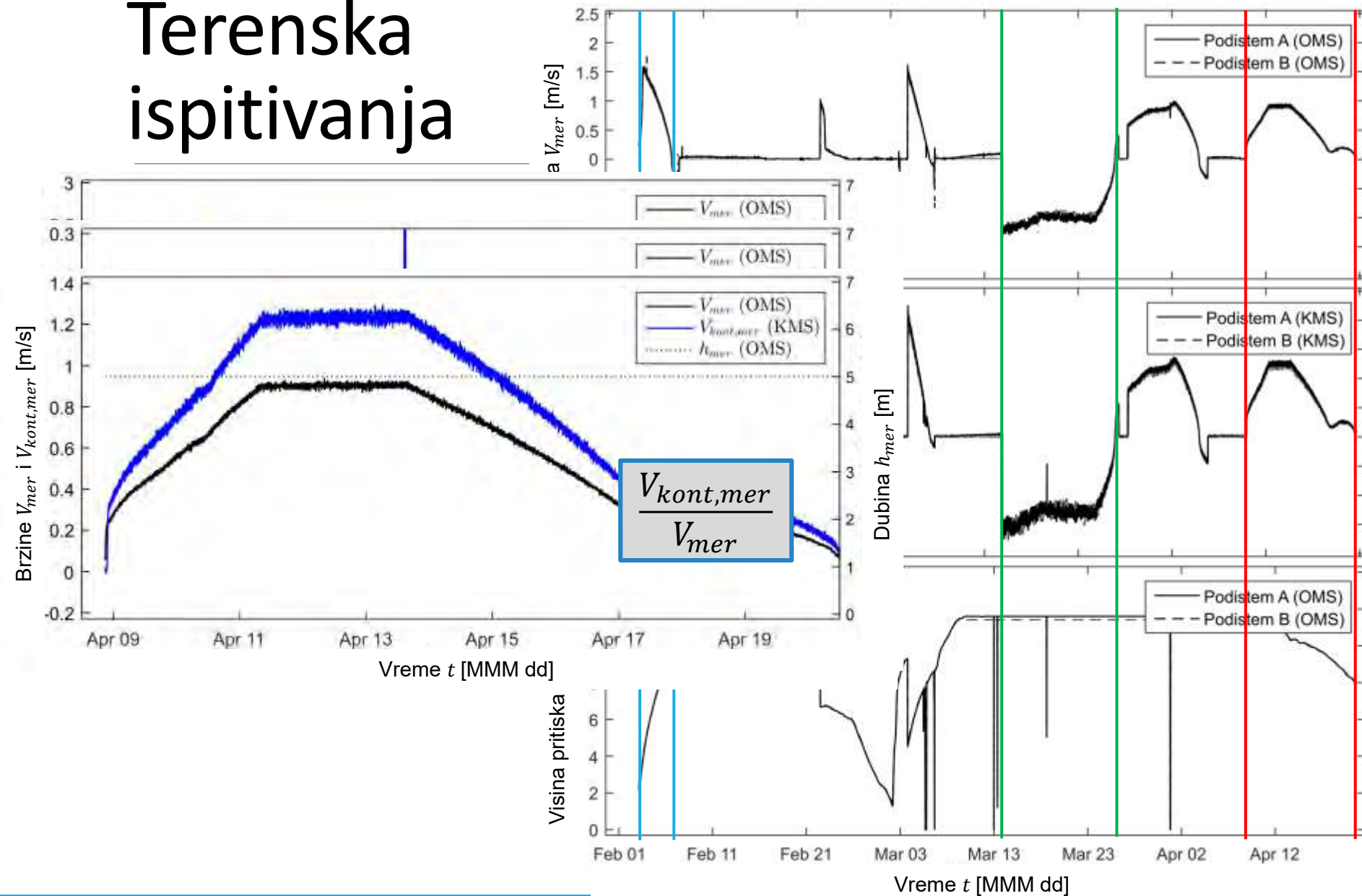
Tehnički parametri (w i τ_{max}) za oba tipa EM senzora su poznati (OMS i KMS).

Terenska ispitivanja

1. Kako je sprovedena lokalna kalibracija?

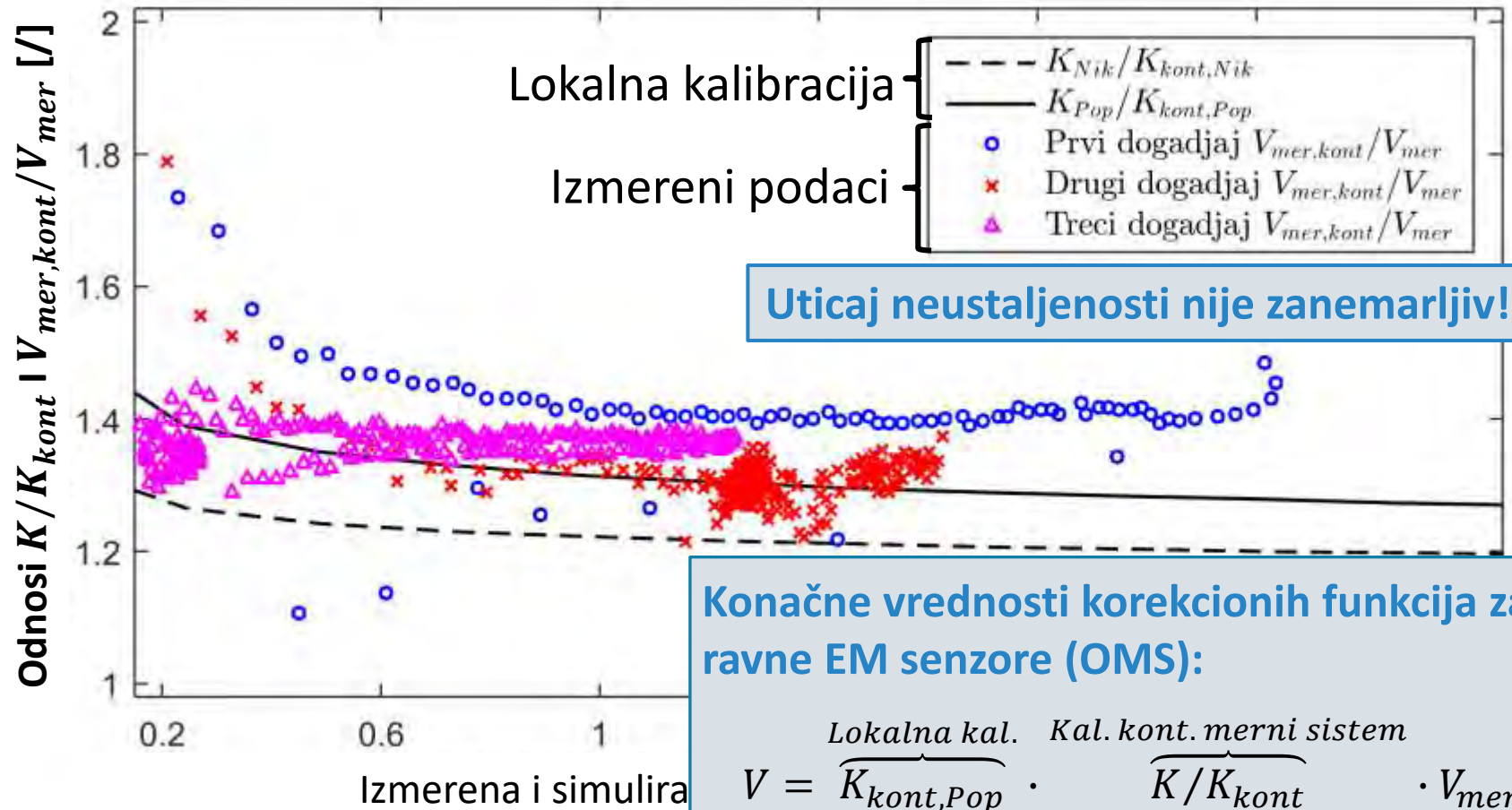


Terenska ispitivanja



Terenska ispitivanja

Verifikacija lokalne kalibracije



Zaključci

Ispitivanje radnih karakteristika

- **Ravni EM senzori vs Dopler senzori:**

1. Linearniji
2. Ponovljiviji
3. Mogu biti tačniji
4. Robusniji (mogućnost rada pod poroznim sedimentom)

Korekcija na osnovu izmerene dubine sedimenta (CFM).



- Konstatovana je **pojava sistematske neodređenosti** kao posledice kalibracije prema standardu ISO 3455,
- **Manja kontrolna zapremina** (integracija u zidnom regionu).

Zaključci

Analiza radnog principa

- Mapiranje magnetnog polja Halovim magnetometrom,
 - Primena neuralnih mreža za obradu izmerenog signala,
 - Korisna komponenta magnetnog polja B_y ,
-
- Predložen je uprošćeni matematički model ravnih EM senzora,
 1. Domet kontrolne zapremine
 2. Jednodimenzionalna težinska funkcija

+ Eksperimentalna metodologija za određivanje tehničkih parametara.

Zaključci

Terenska ispitivanja

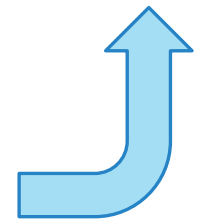
- Predložen je postupak **lokalne kalibracije ravnih EM senzora**

1. Modeliranje rasporeda brzina **Osetljiv zadatak!**
2. Proračun simuliranih odziva ravnih EM senzora
3. Proračun korekcionih funkcija **Poželjan je kontrolni merni sistem!**

Primenjen na tri izvedena merna mesta u okviru sistema „Hidroelektrane na Trebišnjici – Gornji horizonti“

Stabilan i kontinualan signal

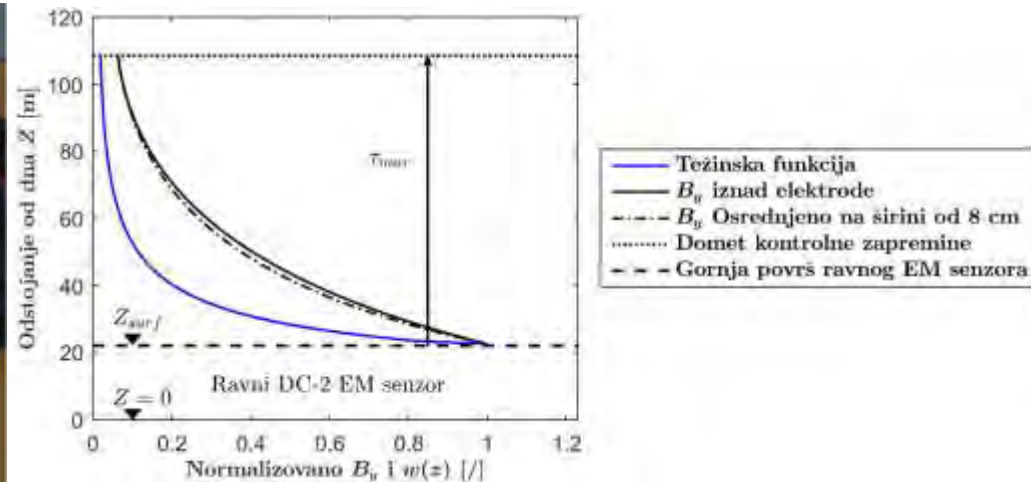
Proračun korekcionih funkcija kombinacijom primene kontrolnog mernog sistema i postupka lokalne kalibracije.



Zaključci

Predlog za buduća istraživanja

- Unapređenje ponovljivosti hidrauličkim oblikovanjem ivica ravnog EM senzora (nove serije Flat DC-2 EM senzora)



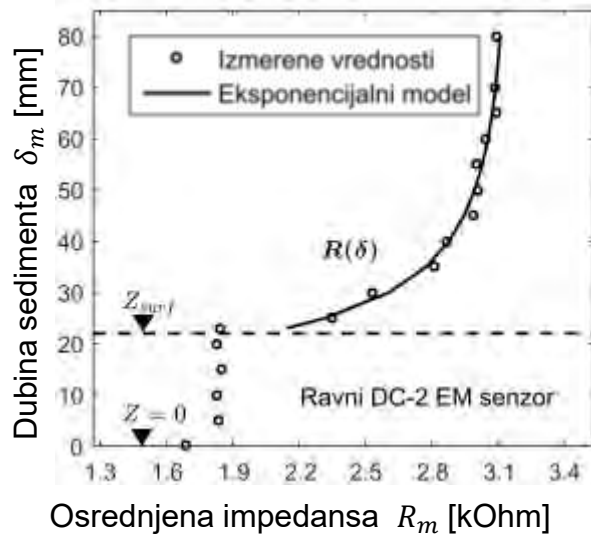
- Analiza mogućnosti definisanja tehničkih parametara na osnovu mapiranja magnetnog polja (određivanje rasporeda gustine struje \vec{j})

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

Zaključci

Predlog za buduća istraživanja

- Terenska ispitivanja ravnih EM senzora u kanalizacionim sistemima:
 1. Ispitivanje robusnosti (**merenja dubine sedimenta** i primene regresionih modela za uklanjanje odgovarajuće neodređenosti)
 2. Primena postupka lokalne kalibracije.



Compact Flat DC-2



Zaključci

Predlog za buduća istraživanja

- Dalji razvoj postupka lokalne kalibracije:
 1. Ispitivanje uticaja neustaljenosti toka i ostalih relevantnih parametara,
 2. Određivanje rasporeda brzina primenom numeričkih simulacija prostornog turbulentnog tečenja (hibridni modeli),
 3. Kalibracija numeričkih modela neustaljenog tečenja primenom osnovnog i kontrolnog mernog sistema?
 4. Unapređenje kroz primenu u praksi...



Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet



ODREĐIVANJE PROTOKA TEČNOSTI U SLOŽENIM USLOVIMA STRUJANJA PRIMENOM RAVNIH ELEKTROMAGNETNIH SENZORA

DAMJAN IVETIĆ

BEOGRAD, 2019