



Грађевински факултет у Београду

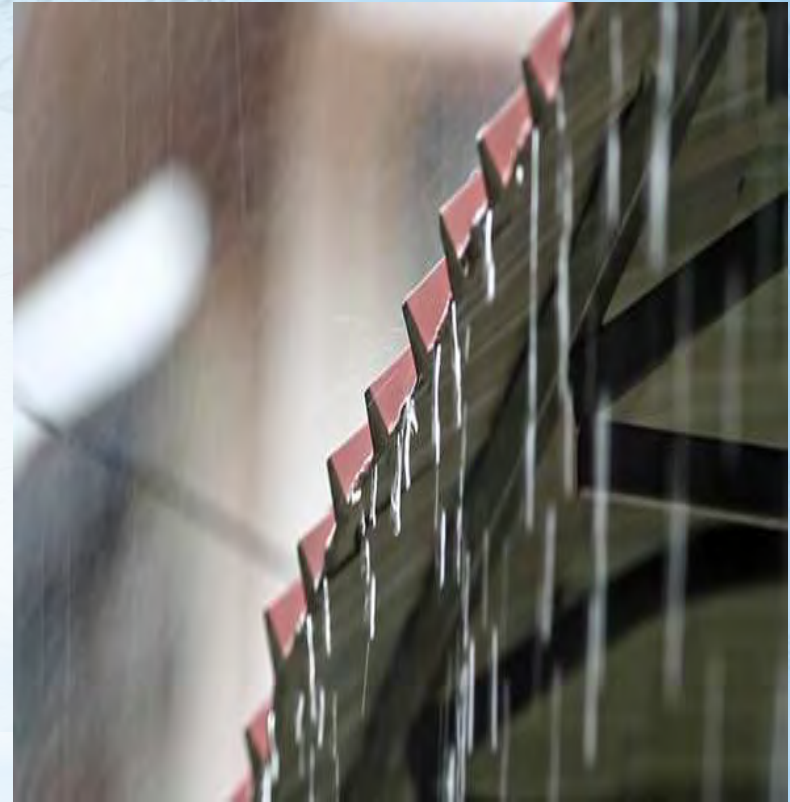
**Динамичка анализа система
за континуално мерење вода
са дела експерименталног
слива на Грађевинском
факултету у Београду**

Ментор:
Проф. др Душан Продановић

Кандидат:
Никола Јанићијевић 537/14

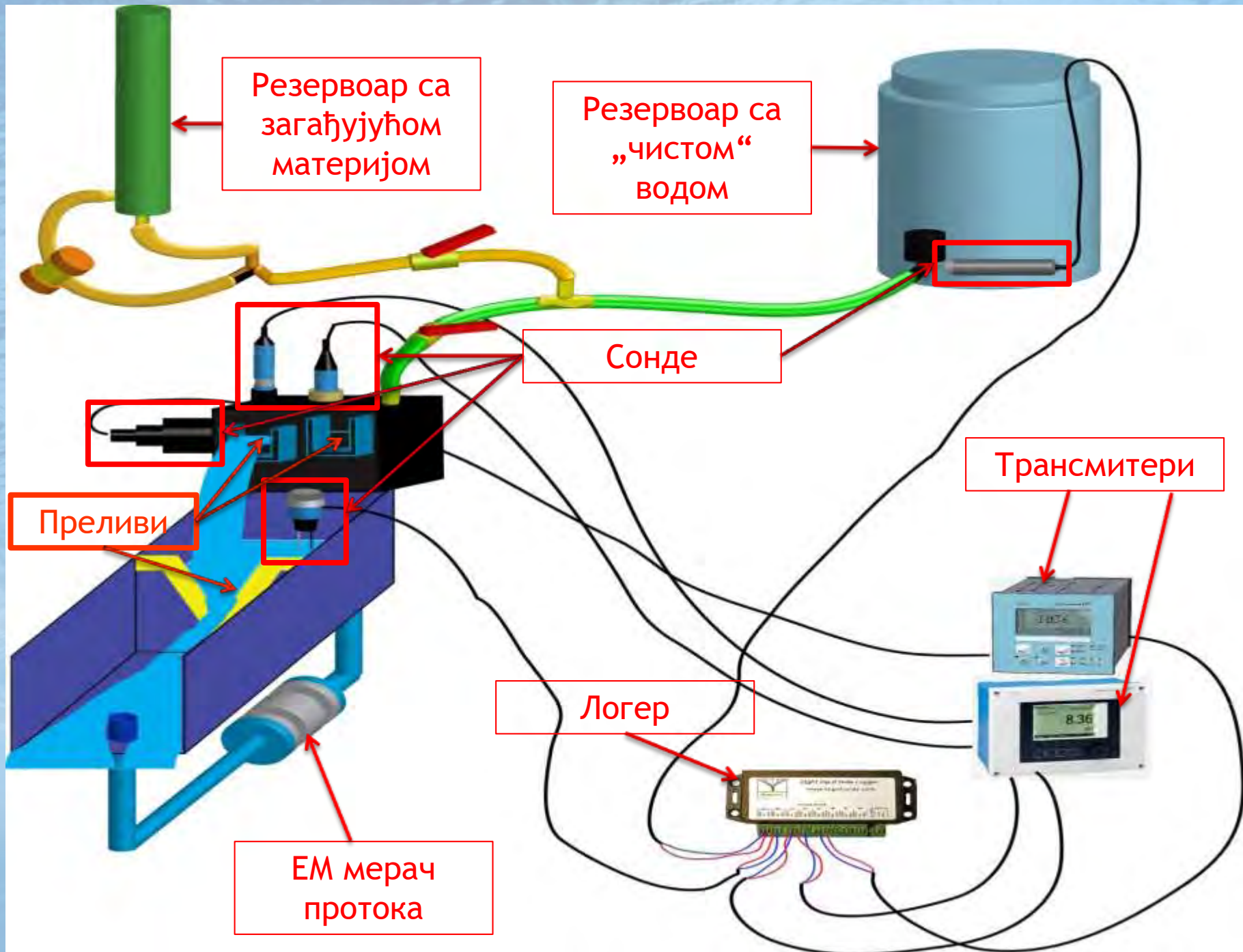
Циљ експеримента

- Испитивање система за континуално праћење параметара квалитета (електропроводљивости, рН вредности и мутноће) воде током падања кише
- Формирање математичког модела промене параметара квалитета воде у току времена



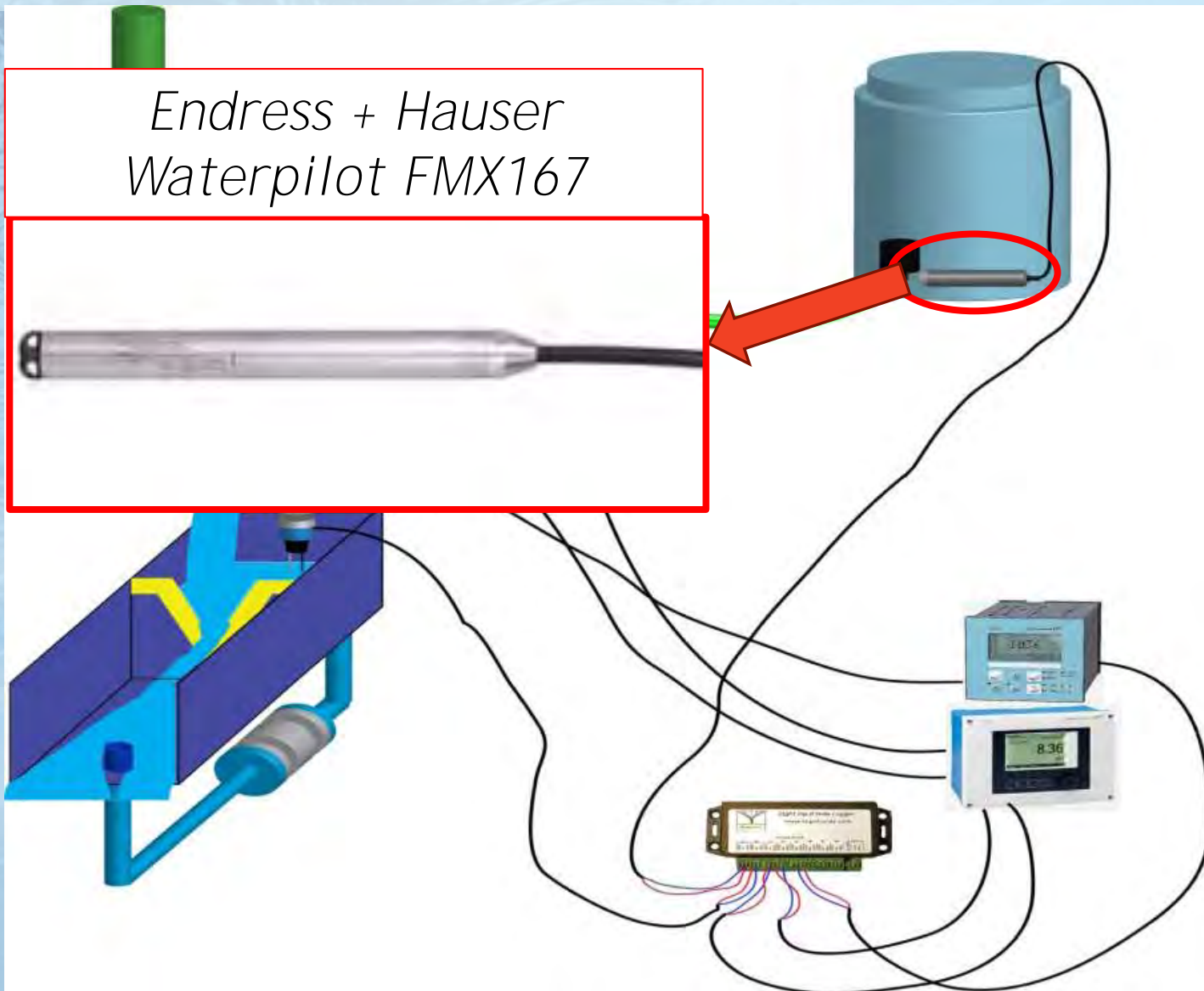
Садржај излагања

- Лабораторијска инсталација
- Принцип рада сонди
- Мерење протока на инсталацији
- Математички модел распрострањања загађујуће материје
- Резултати мерења параметара квалитета воде
- Закључак
- Предлози за даља истраживања
- Литература



Сонда ниво-притисак

*Endress + Hauser
Waterpilot FMX167*

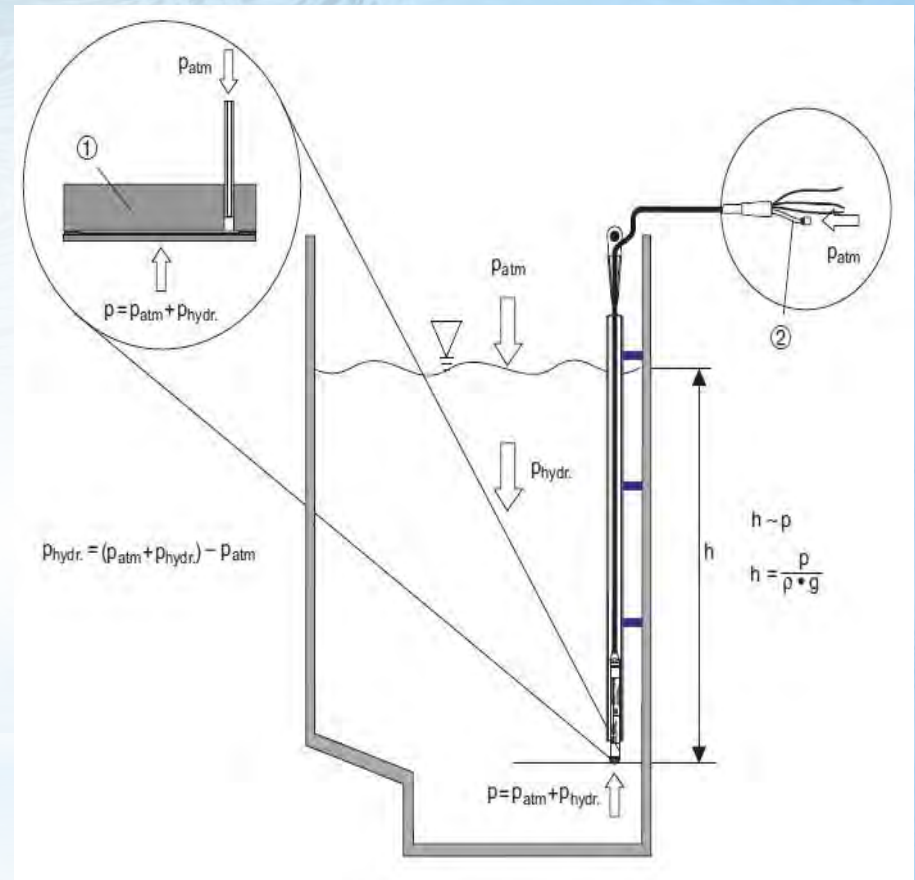


Сонда ниво-притисак

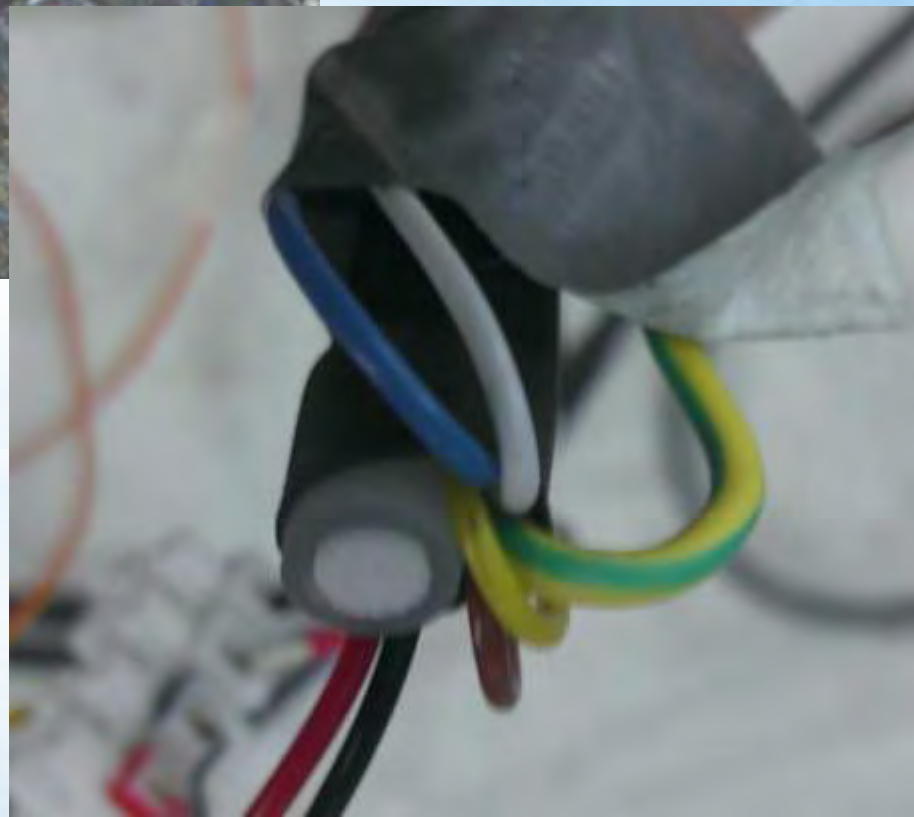
➤ Принцип рада ове сонде заснива се на регистровању промене хидростататичког притиска

$$h = \frac{p}{\rho \cdot g}$$

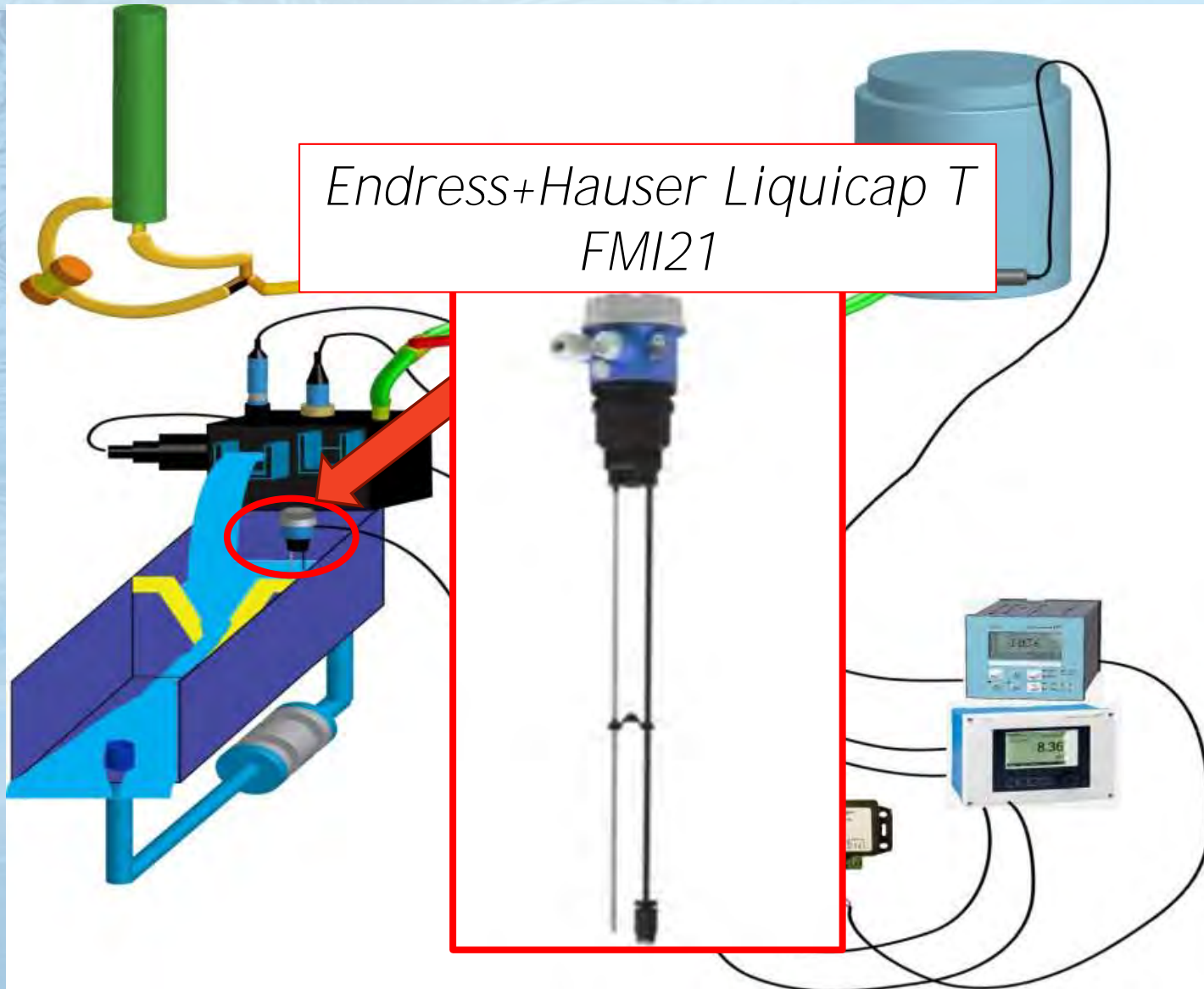
➤ Тачност сонде $\pm 0.2 \text{ cm}$



Сонда ниво-притисак

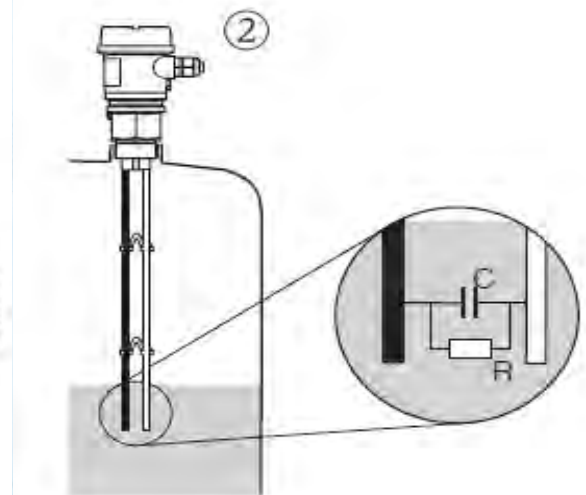
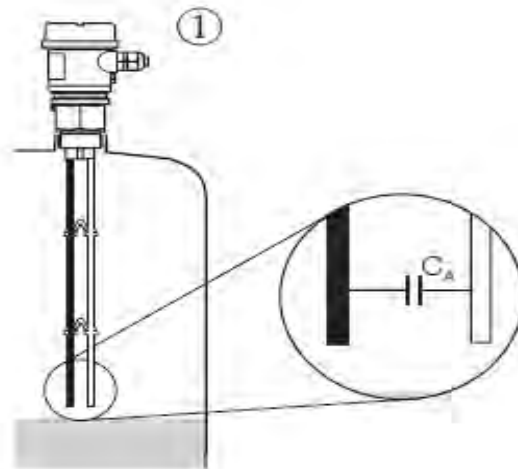


Капацитивна сонда



Капацитивна сонда

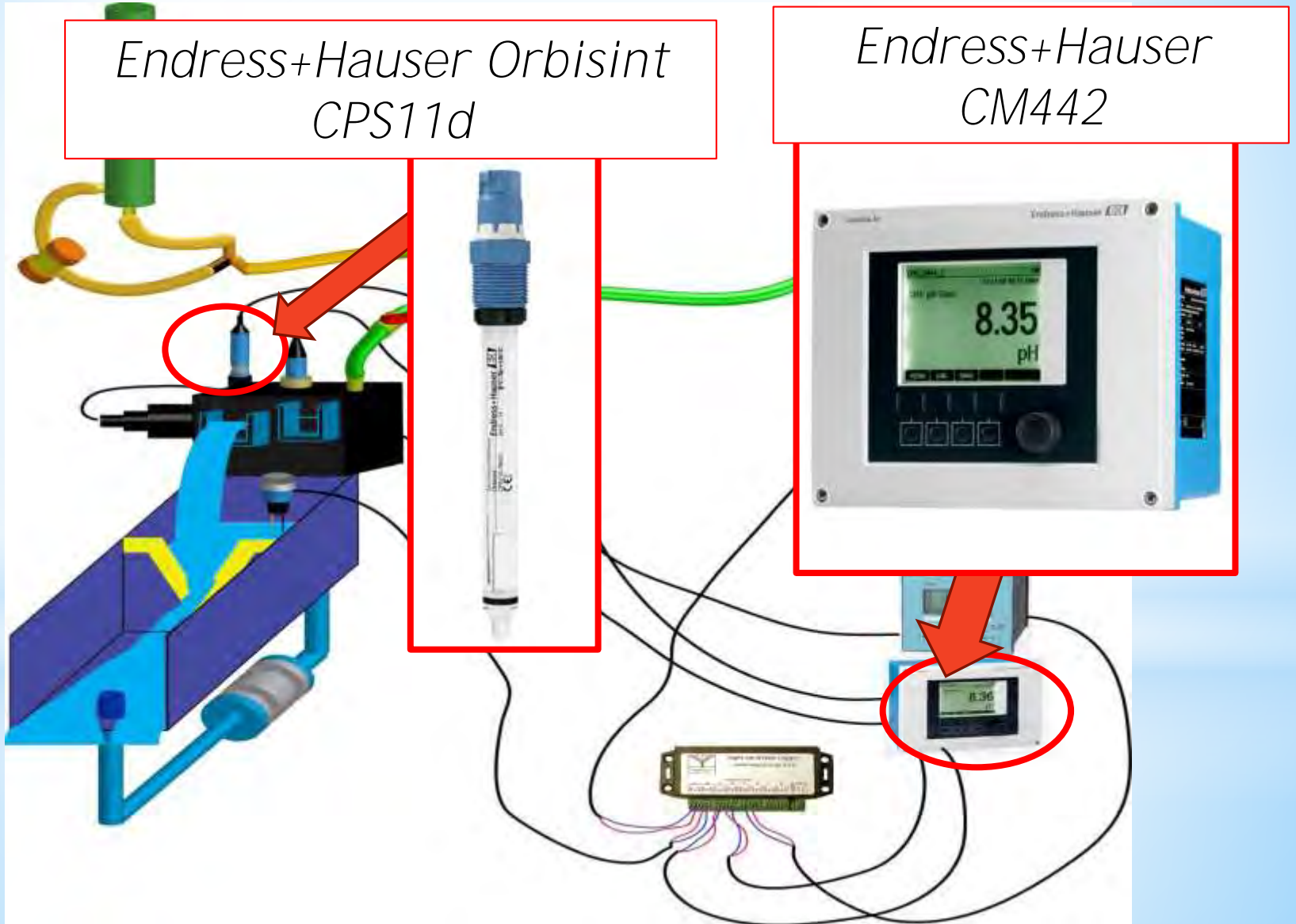
- Капацитивна сонда функционише слично као плочасти кондензатор
- У зависности од потопљености електрода мења се и јачина струје на излзу сонде
- Тачност сонде ≤ 0.2 cm
- Поновљивост 0.05 cm



Сонда за мерење рН вредности

Endress+Hauser Orbisint
CPS11d

Endress+Hauser
CM442

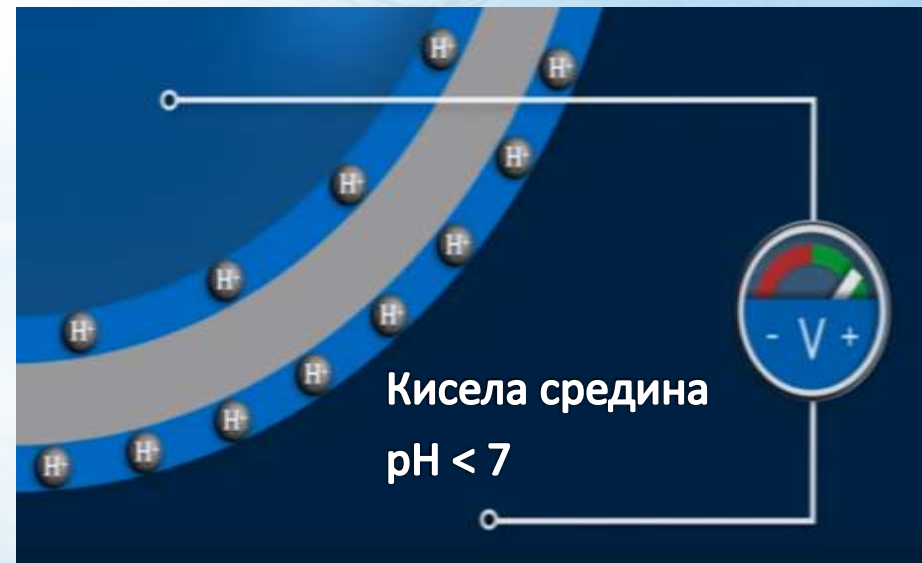
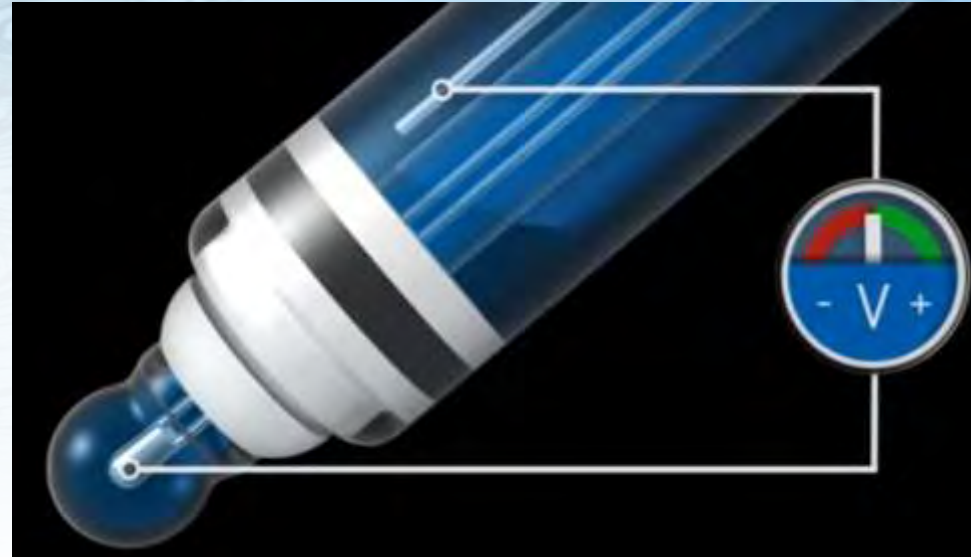


Сонда за мерење рН вредности

- рН вредност се одређује по принципу потенцијометрије
- По дефиницији рН вредност је

$$pH = -\log[H^+]$$

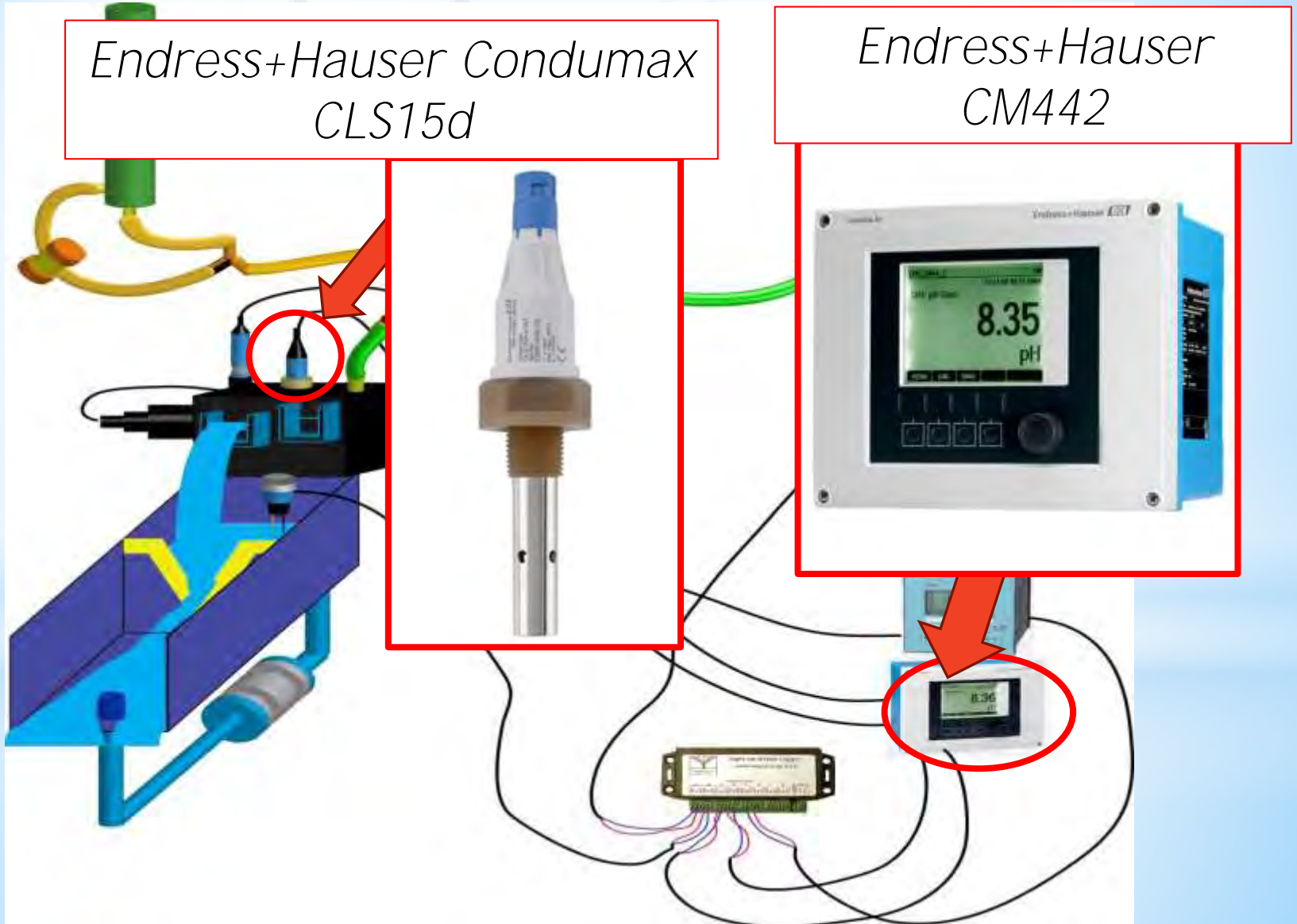
- Тачност сонде је :
 ± 0.02 рН
- Поновљивост :
 ± 0.01 рН



Сонда за мерење електропроводљивости

*Endress+Hauser Condumax
CLS15d*

*Endress+Hauser
CM442*

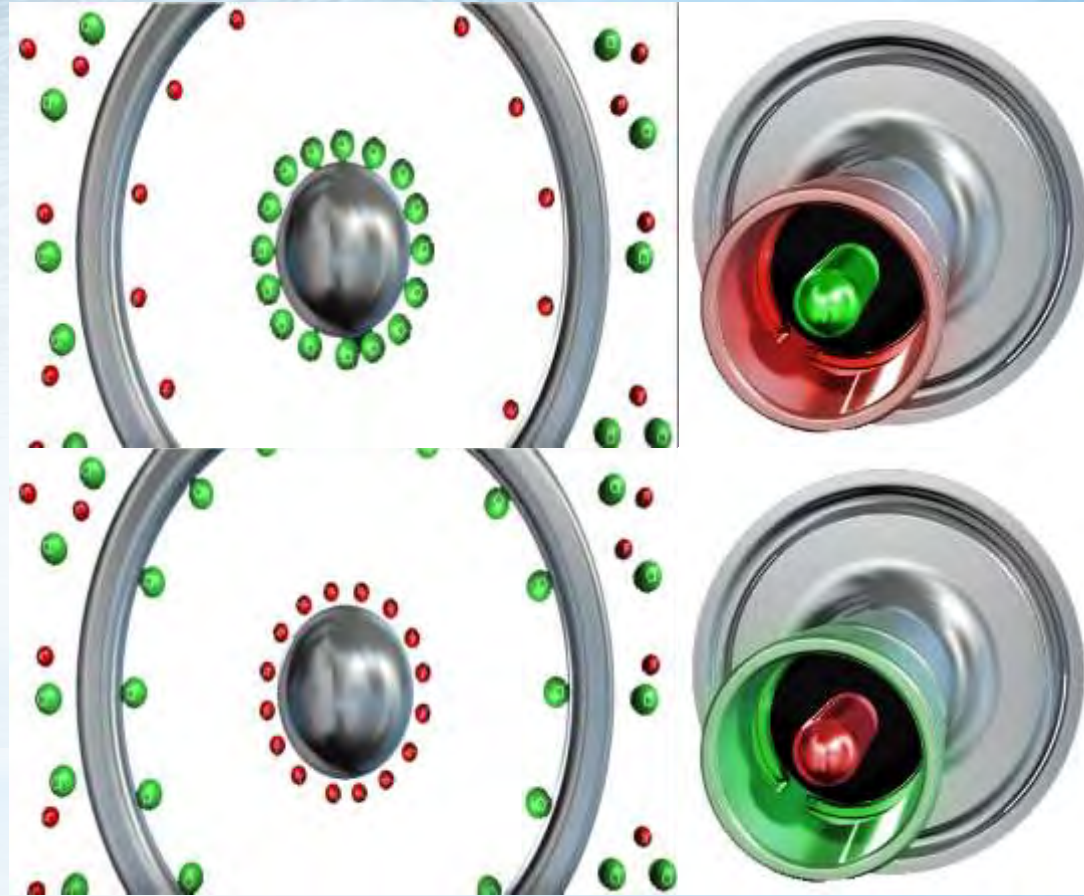


Сонда за мерење електропроводљивости

- Електропроводљивост заправо представља реципрочну вредност отпорности раствора

$$EC = \frac{1}{R}$$

- Принцип рада сонде се заснива на кретању јона под утицајем наизменичног електричног поља

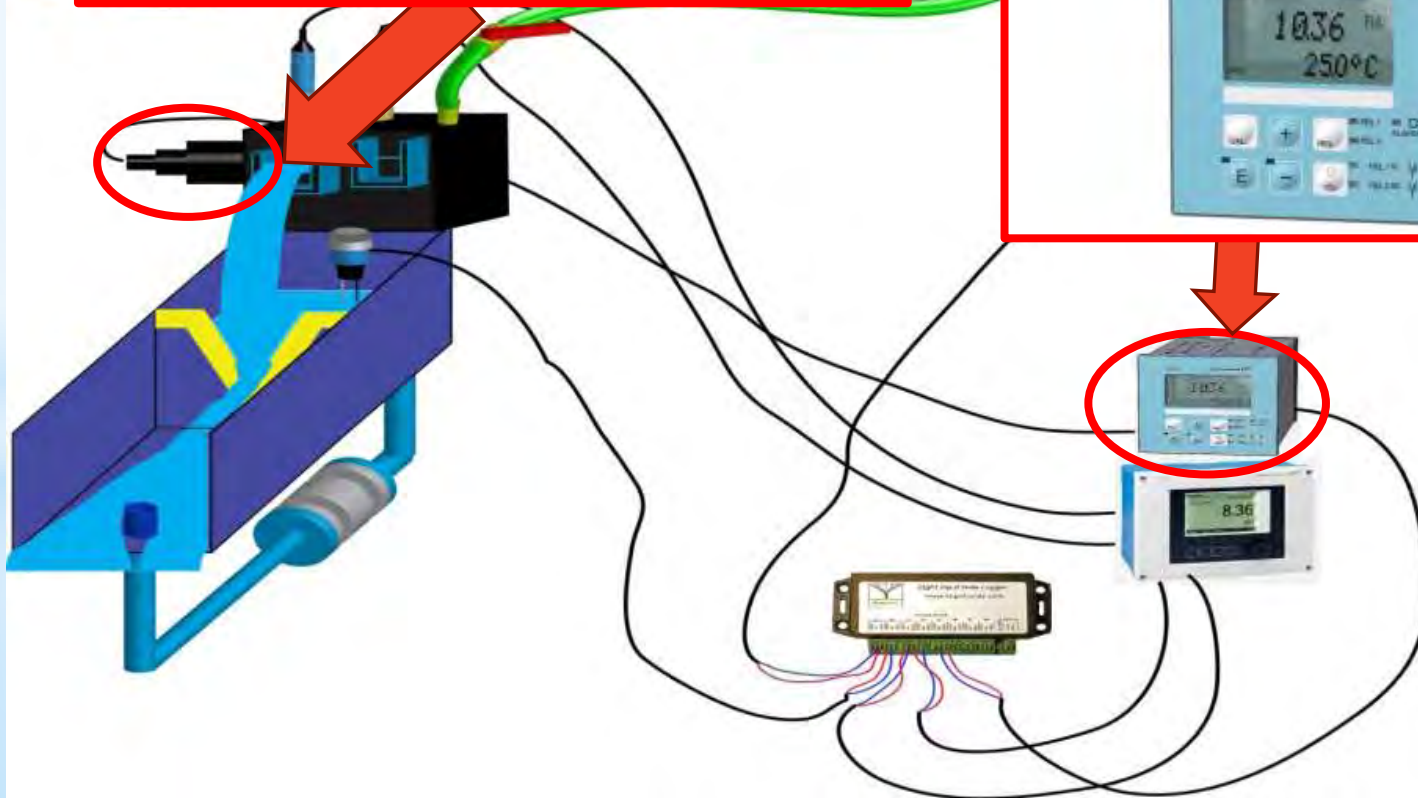


Сонда за мерење мутноће

Endress+Hauser Turbimax
CUS31



Endress+Hauser
CUM223

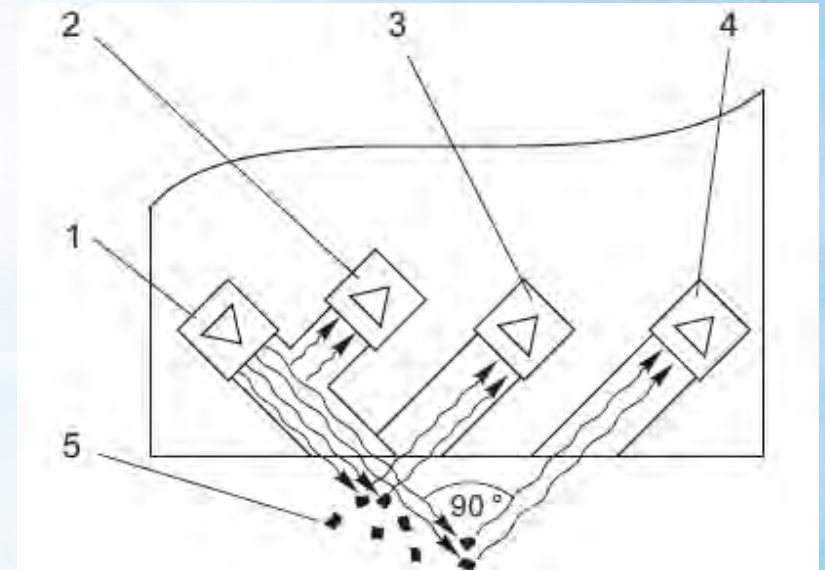


Сонда за мерење мутноће

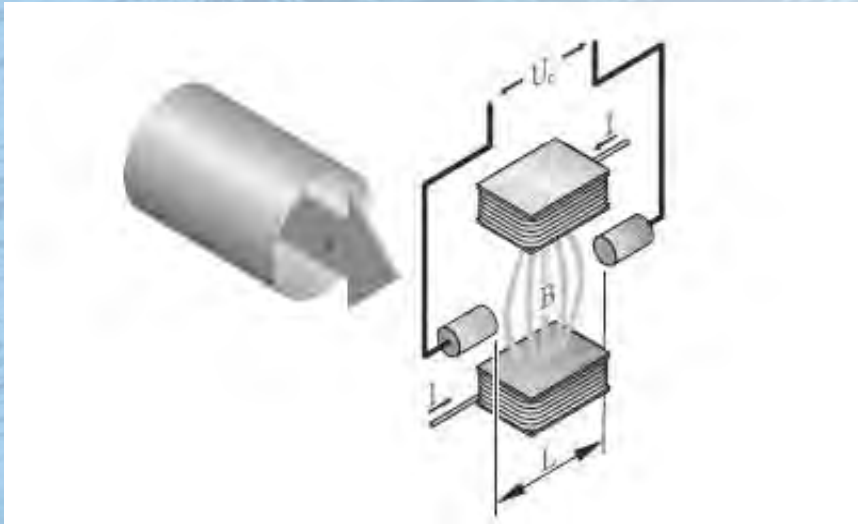


- Сонда за мерење мутноће за свој рад користи процес рефракције светлости

- Тачност инструмента је 5 % измерене вредности
- Поновљивост износи 1%



ЕМ мерач протока



- Мерење протока врши се применом Фарадејевог закона електромагнетне индукције

$$U_e = B \cdot L \cdot v$$

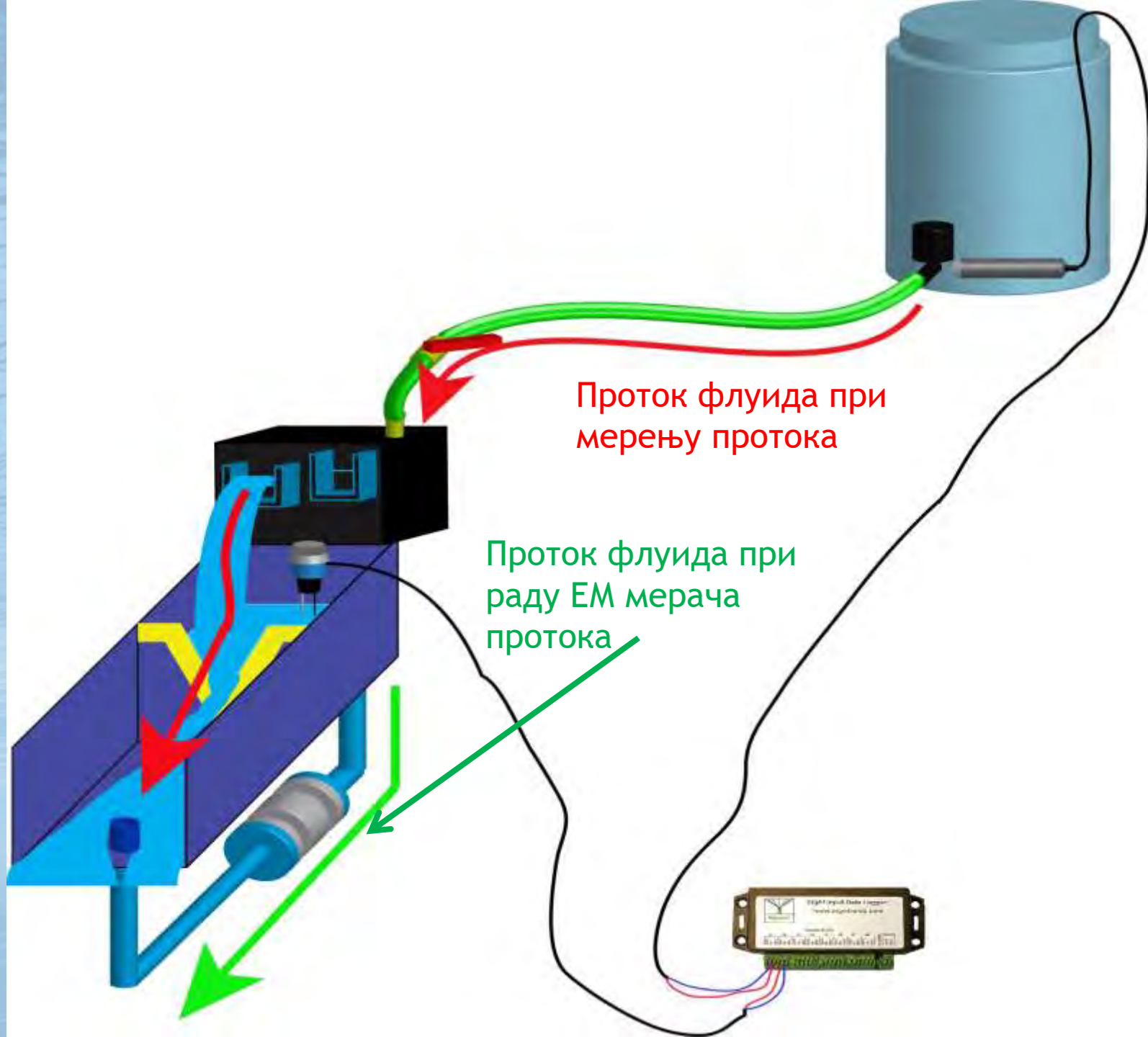


Логер и трансмитери



Мерење протока

- Мерење протока вршено је на више начина:
- Мерење времена и тежине протеклог флуида
- Мерење протока троугаоним преливом и капацитивном сондом
- Мерење протока електромагнетним мерачем протока



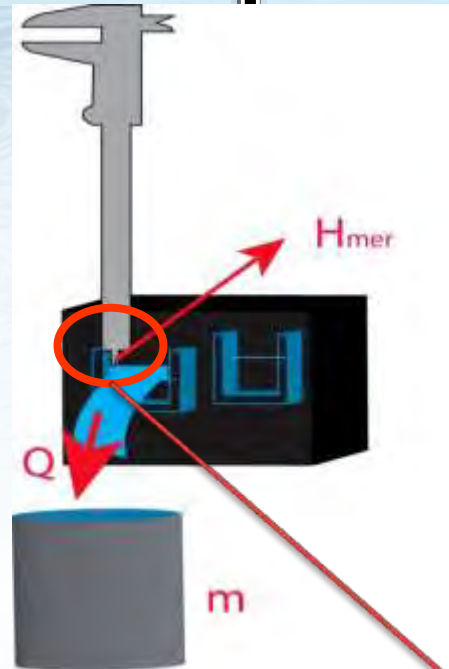
Проток флуида при
мерењу протока

Проток флуида при
раду EM мерача
протока



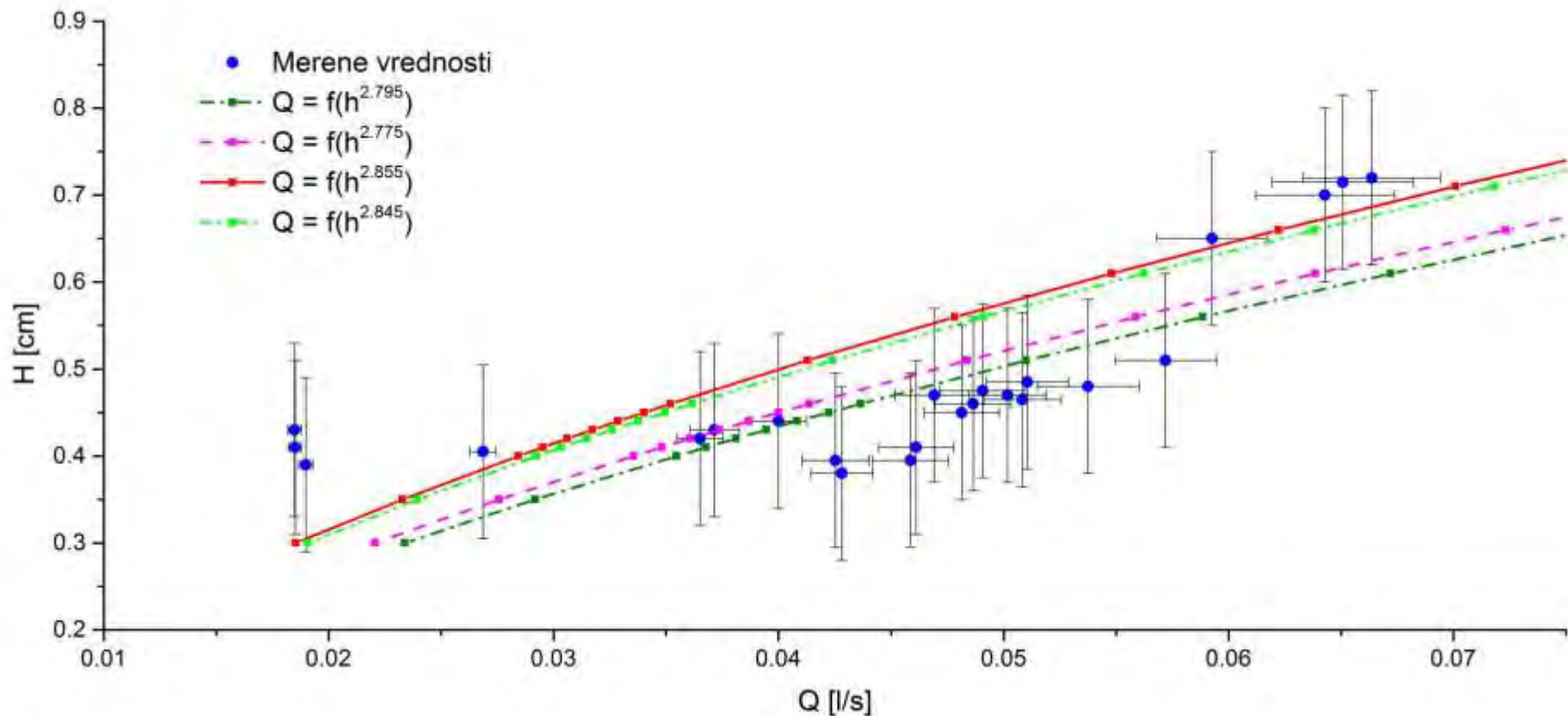
Мерење протока преко правоугаоних прелива

- Циљ мерења је формирање Q - H кривих правоугаоних прелива
- Мерење времена и тежине протеклог флуида
- Неодређености :
- Време ± 1 s
- Дебљина преливног млаза ± 1 mm
- Маса ± 10 g
- Проток 1.5 - 5 %



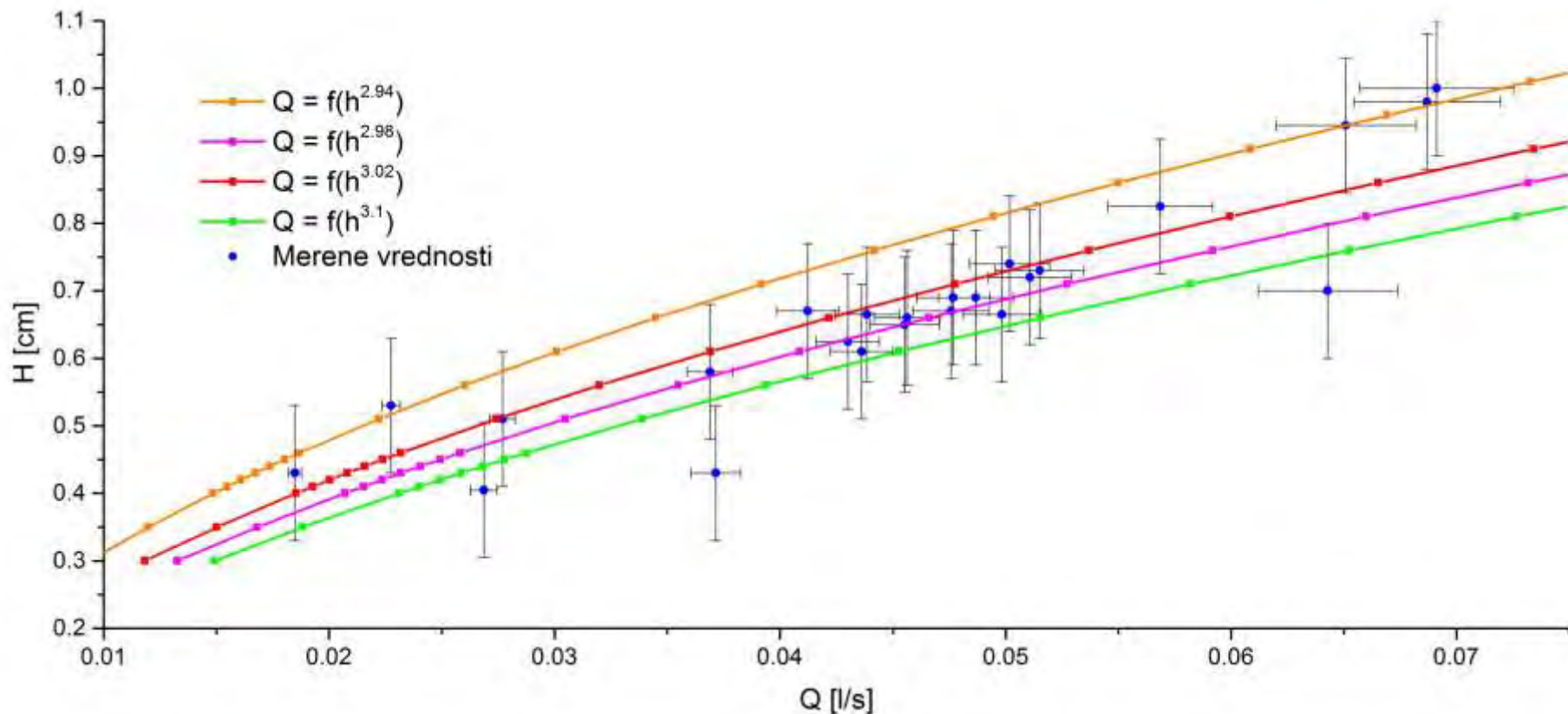
Мерење протока преко

Q-H крива прелива 1

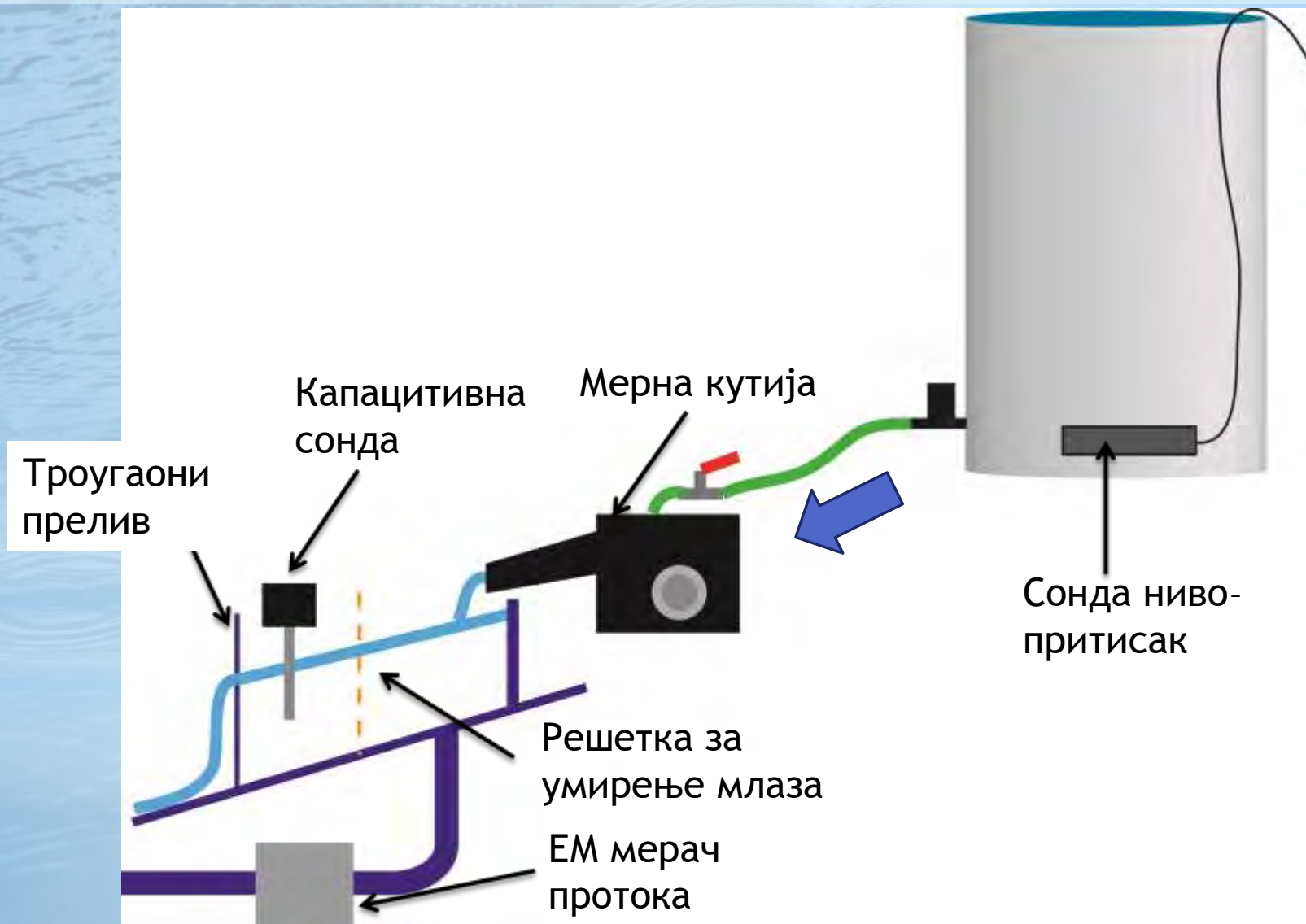


Мерење протока преко

Q-H крива прелива 2



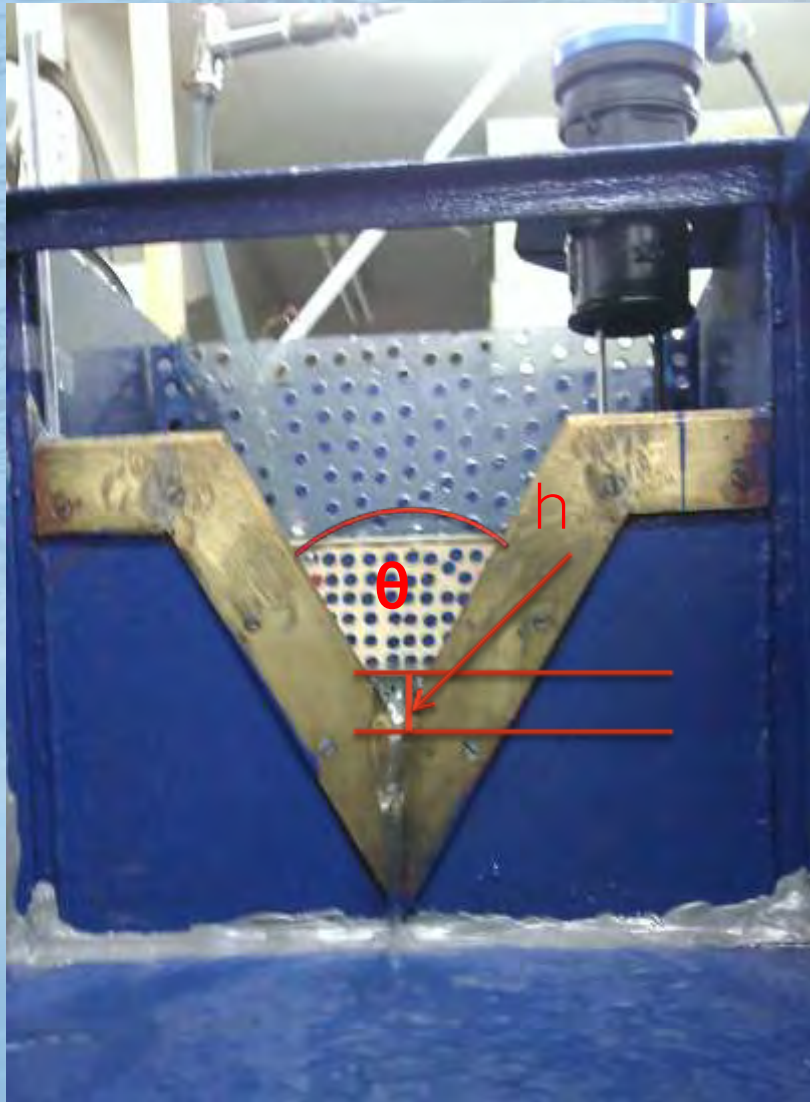
Троугаони прелив до 0.07 l/s



Троугаони прелив изнад 0.07 l/s



Мерење протока троугаони прелив



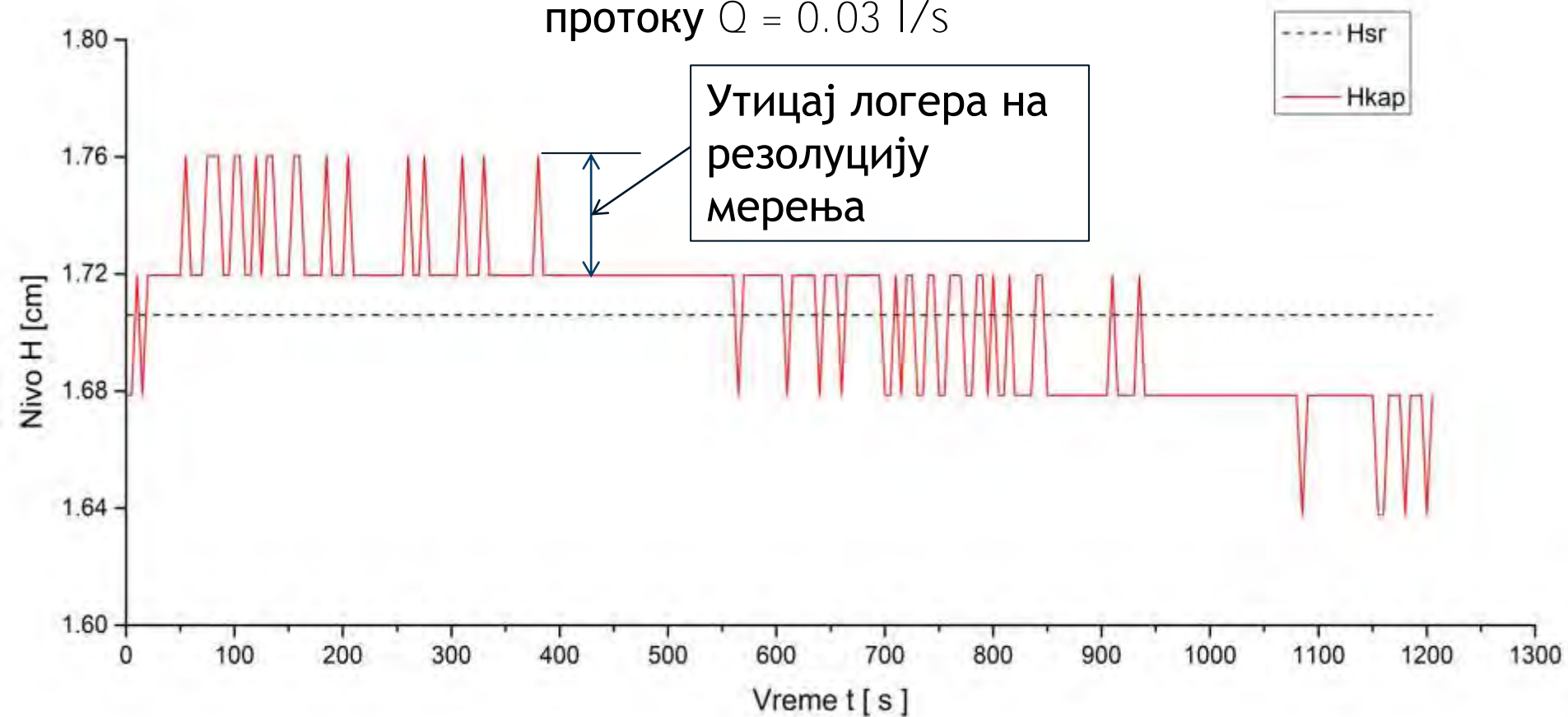
$$Q = \frac{8}{15} \cdot C_e \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h + K_h)^5}$$

Резултати мерења протока

Експеримент Бр.	Q_{mer1}	Q_{mer2}	H_{mlaz}^{len}	$Q_{preliva}^{len}$	H_{mlaz}^{kap}	$Q_{preliva}^{kap}$
	[l/s]	[l/s]	[cm]	[l/s]	[cm]	[l/s]
1	0.03		1.5	0.0261	1.706 ± 0.078	0.0353 ± 0.0001
2	0.05		2	0.0513	2.100 ± 0.108	0.0575 ± 0.0002
3	0.07		2.3	0.0714	2.183 ± 0.069	0.0630 ± 0.0001
4	2.08	2.09	9.4	2.1969	9.109 ± 0.402	2.0325 ± 0.0015
5	1.47	1.52	7.9	1.4308	8.134 ± 0.882	1.5377 ± 0.0078
6	1	1.11	6.7	0.9539	6.893 ± 0.915	1.0231 ± 0.0085

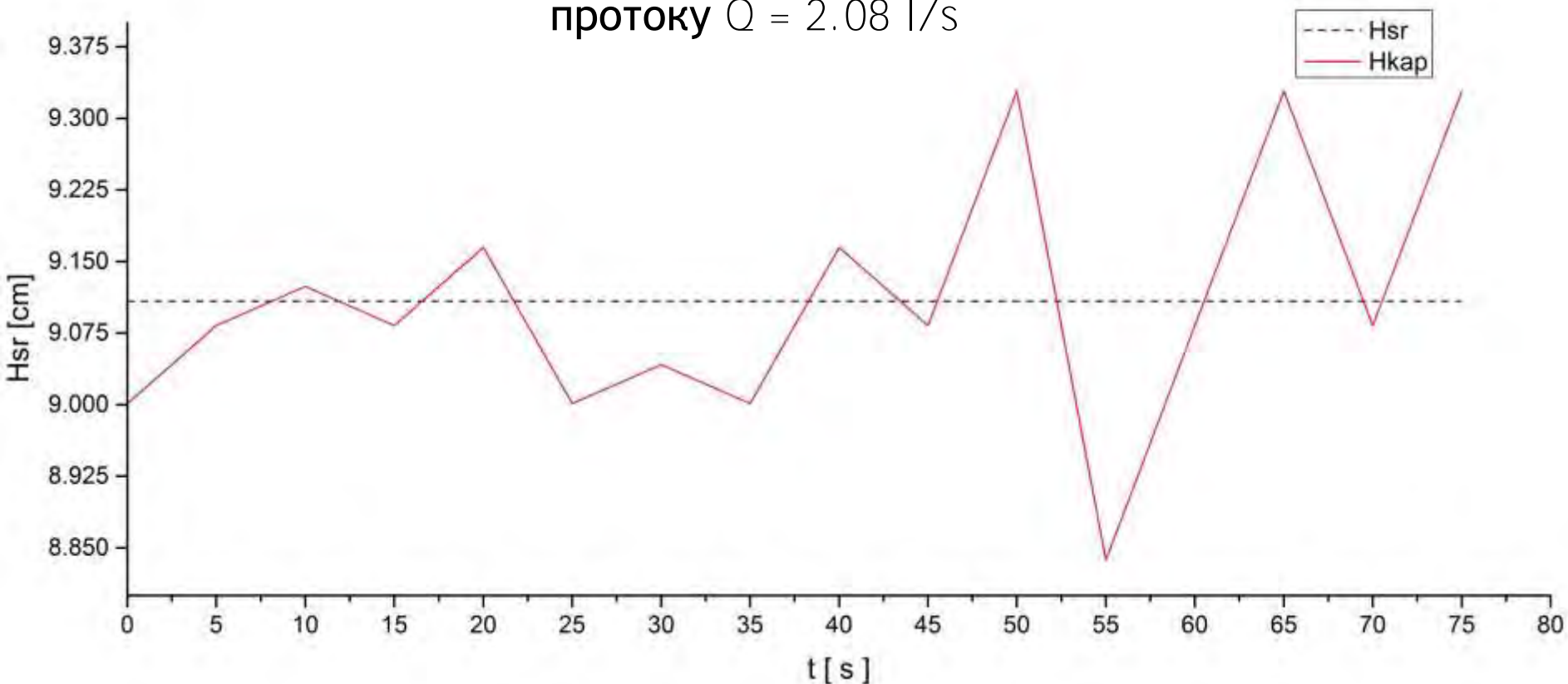
Осциловање нивоа код троугаоног прелива

Осциловање нивоа око средње вредности при
протоку $Q = 0.03 \text{ l/s}$



Осциловање нивоа код троугаоног прелива

Осциловање нивоа око средње вредности при
протоку $Q = 2.08 \text{ l/s}$



Мерење одзива рН сонде



Оглед 1

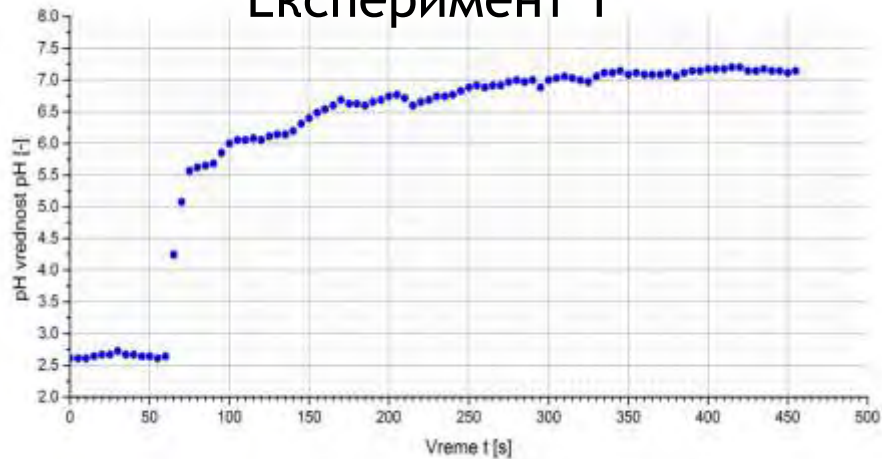
- Кисели раствор:
 $\text{pH} = 2.6$
- Вода:
 $\text{pH} = 7.14$

Оглед 2

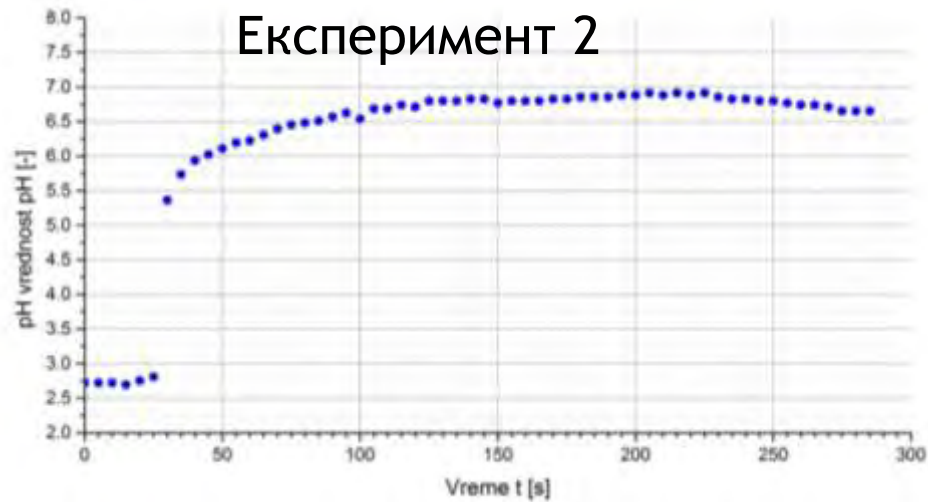
- Кисели раствор:
 $\text{pH} = 3.35$
- Вода:
 $\text{pH} = 7.05$

Тест одзива рН сонде

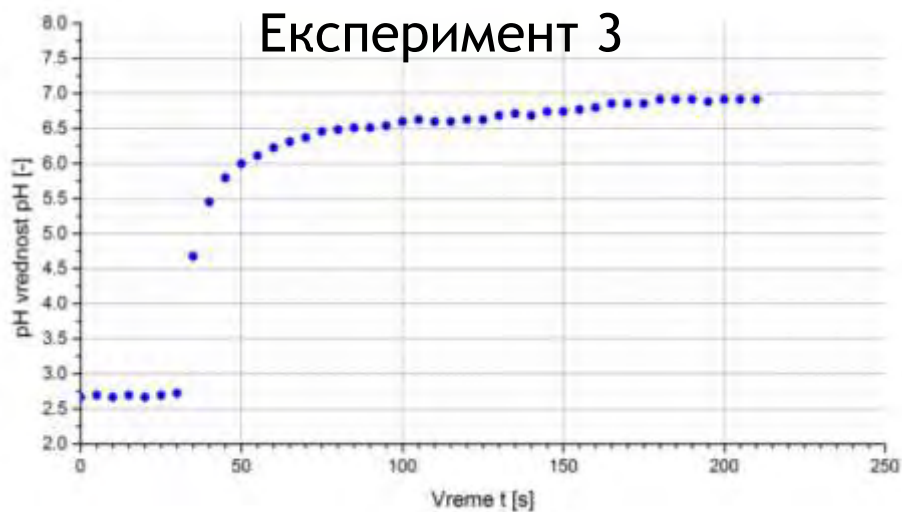
Експеримент 1



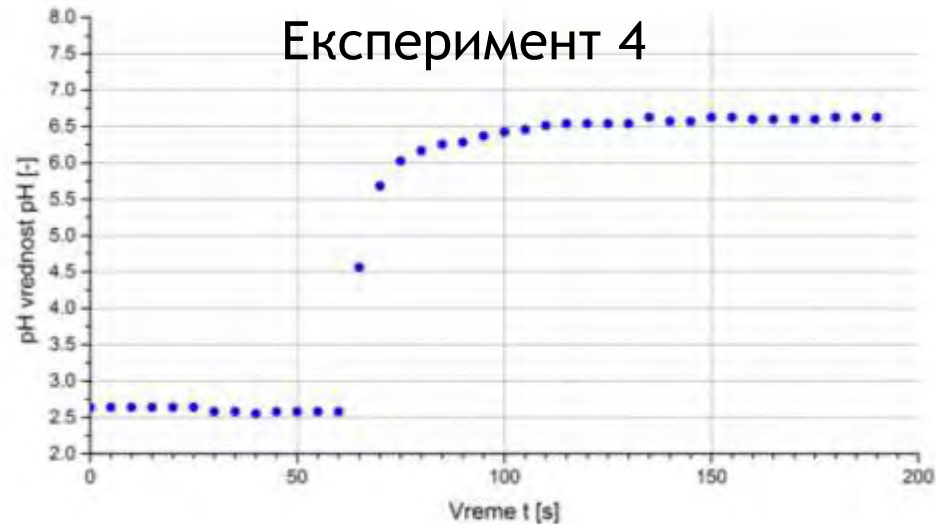
Експеримент 2



Експеримент 3

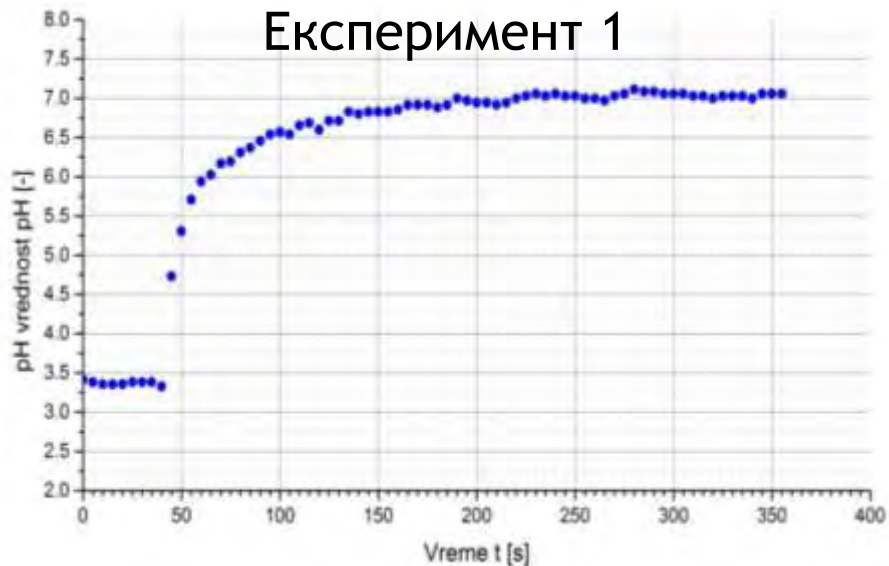


Експеримент 4

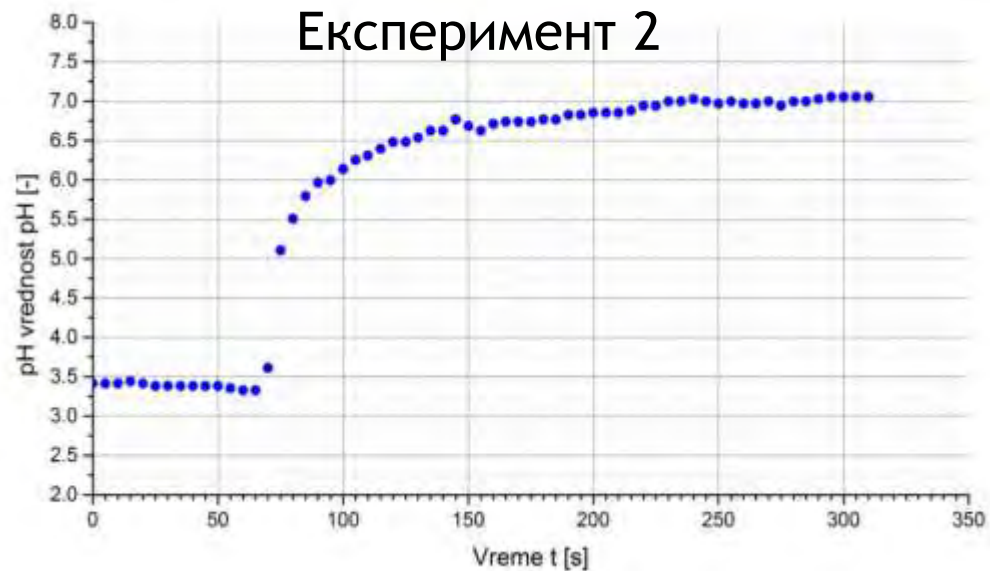


Тест одзива рН сонде

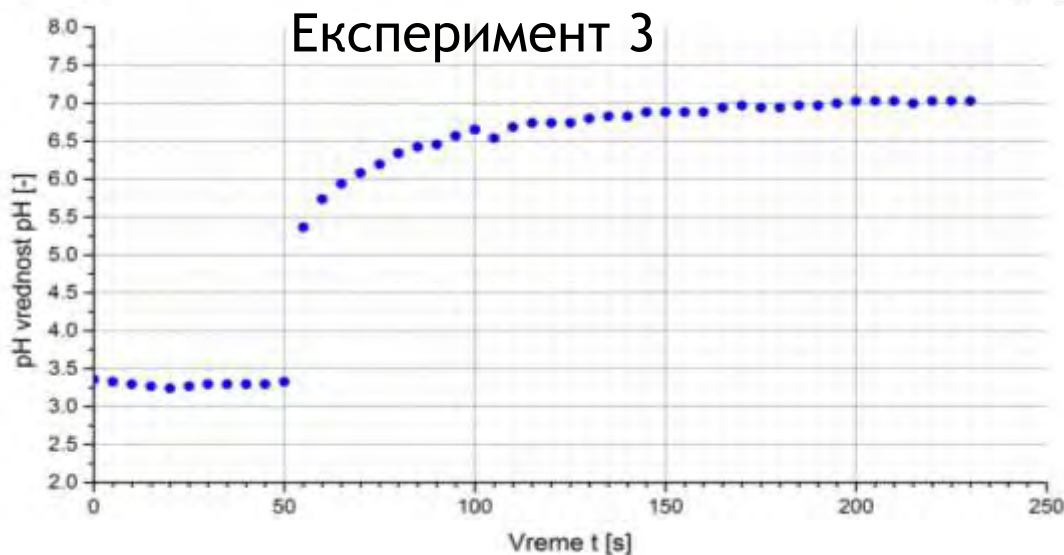
Експеримент 1



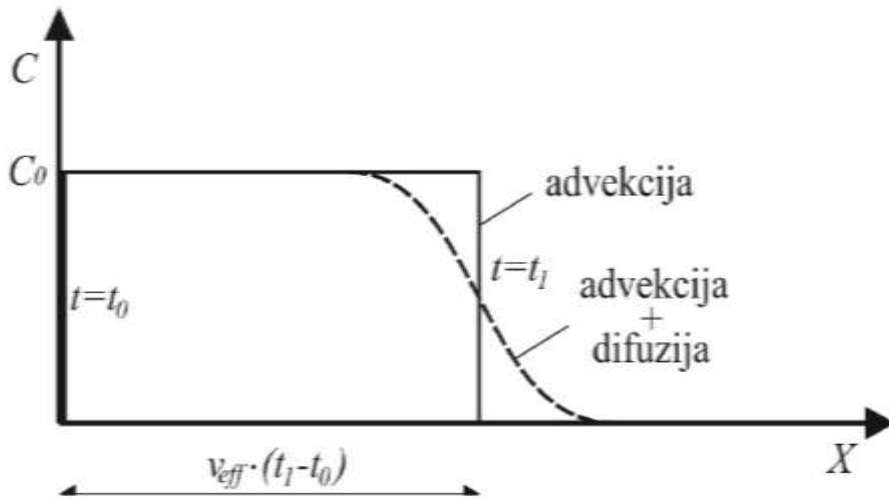
Експеримент 2



Експеримент 3



Математички модел



$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v_{eff} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

$$s = x - v_{eff} \cdot t$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial s^2}$$

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - v_{eff} \cdot t}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}} \right) + e^{\left(\frac{v_{eff} \cdot t}{D} \right)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - v_{eff} \cdot t}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}} \right) \right]$$

Математички модел

- Концентрација раствора који се мери:

$$C = C_{izl} = C_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{L - v_{eff} \cdot t}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}} \right)$$

- Коефицијент дисперзивности:

$$D = \frac{1}{8} \left[\frac{v_{eff} \cdot t_{0.84} - L}{\sqrt{2D \cdot t_{0.84}}} - \frac{v_{eff} \cdot t_{0.16} - L}{\sqrt{2D \cdot t_{0.16}}} \right]^2$$

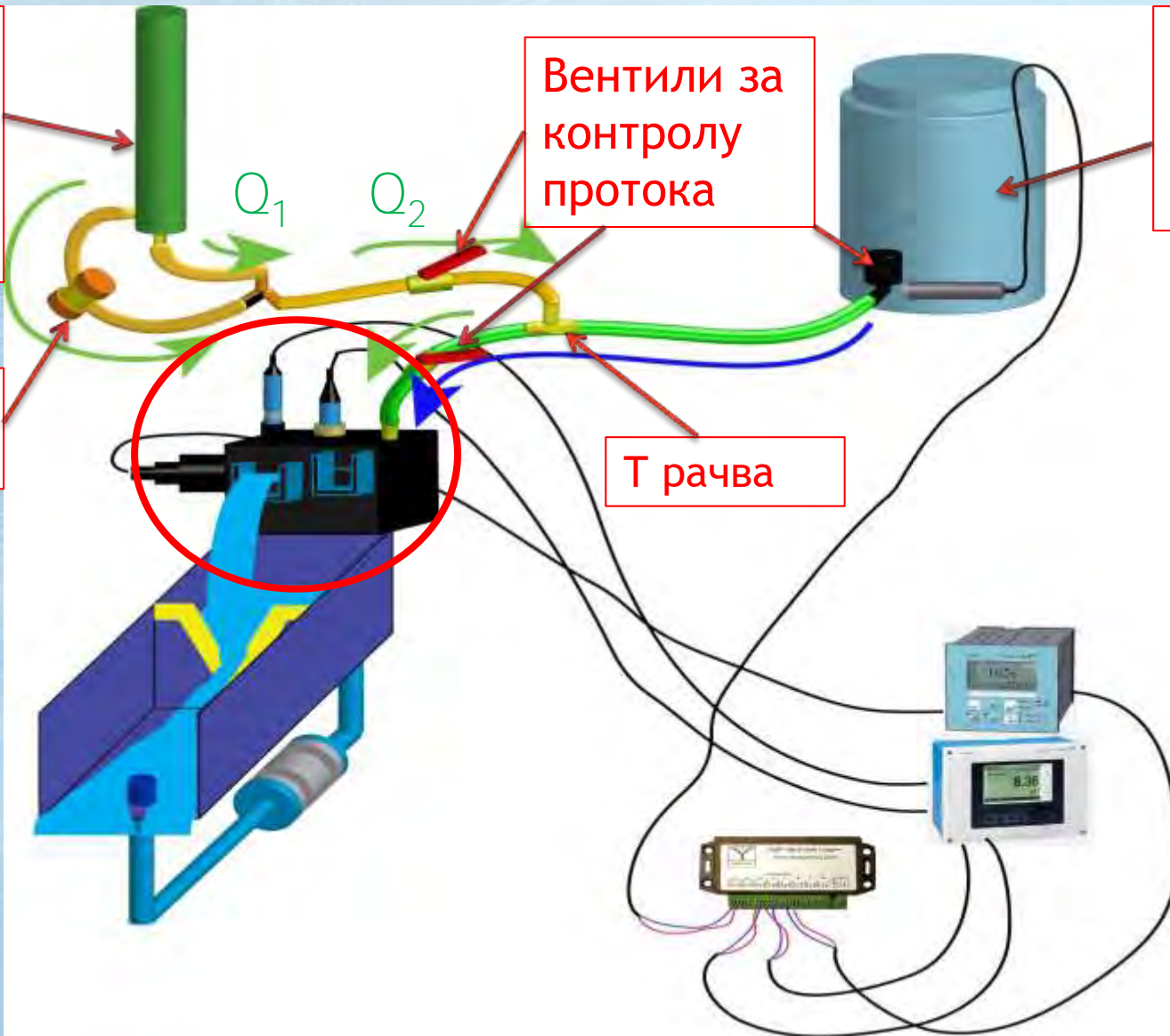
- Концентрација раствора који улази у кутију:

$$C_{ul} = C_0 = \frac{C_{mereno}}{\frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{L - v_{eff} \cdot t}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}} \right)}$$

Принцип симулације кише

Резервоар за загађујућом материјом
 $V = 1.4 \text{ l/s}$

Месингана стега



Вентили за контролу протока

Резервоар са „чистом“ водом
 $V = 100 \text{ l/s}$

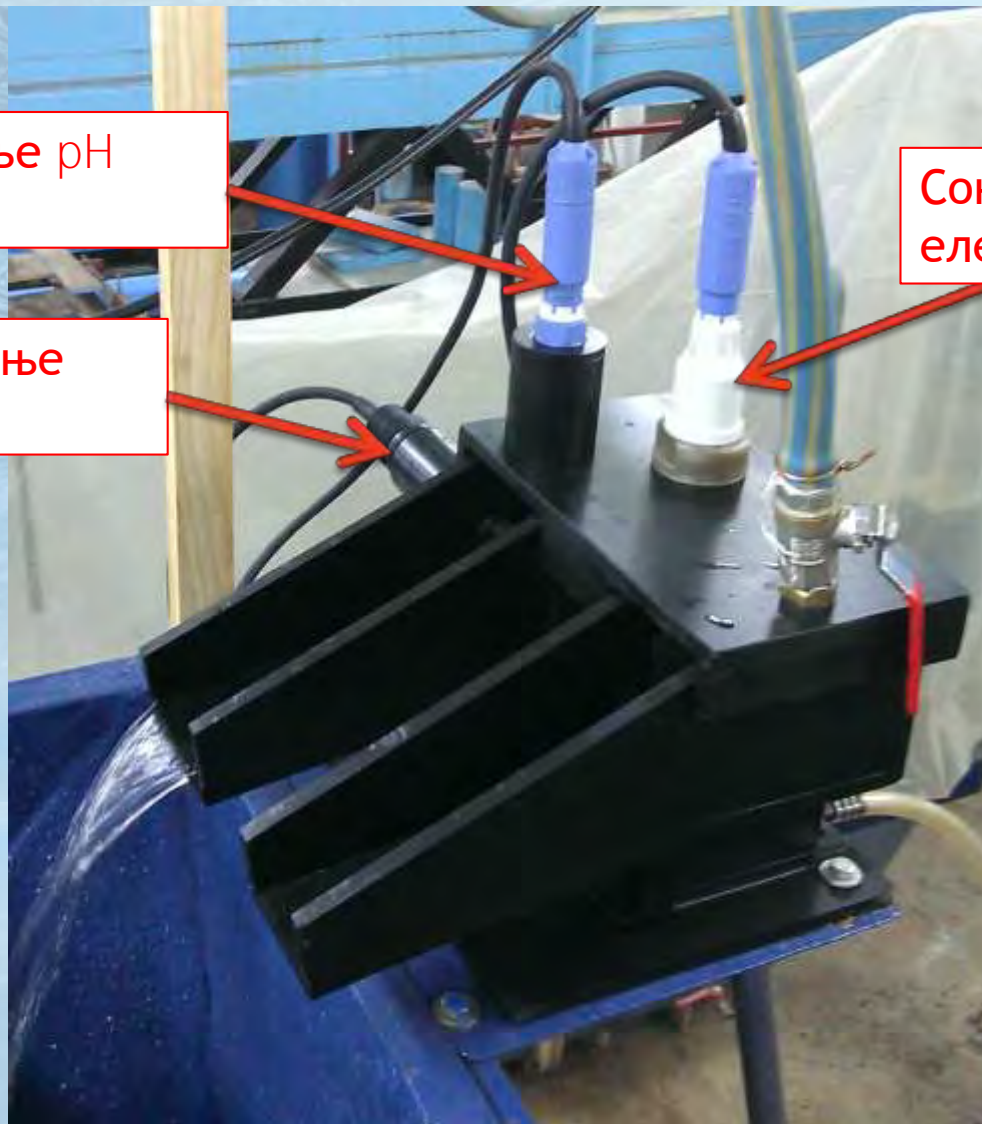
Т рачва

Мерна кутија

Сонда за мерење рН
вредности

Сонда за мерење
мутноће

Сонда за мерење
електропроводљивости



Симулација загађења киселим растворима

- Вршена су 3 експеримента симулације загађења киселим раствором
- Проток загађујуће материје:
 - $Q_1 = 0.0013 \text{ l/s}$
 - $Q_2 = 0.0058 \text{ l/s}$
- Експерименти 1 и 2
 - Вода : $\text{pH} = 7.45$
 - Загађујућа материја : $\text{pH} = 5$ (Водени раствор HNO_3)
- Очекиване вредности максимума таласа
 - Талас 1 : $\text{pH} = 4.42$
 - Талас 2 : $\text{pH} = 3.80$

Симулација загађења киселим растворима

➤ Експеримент 3

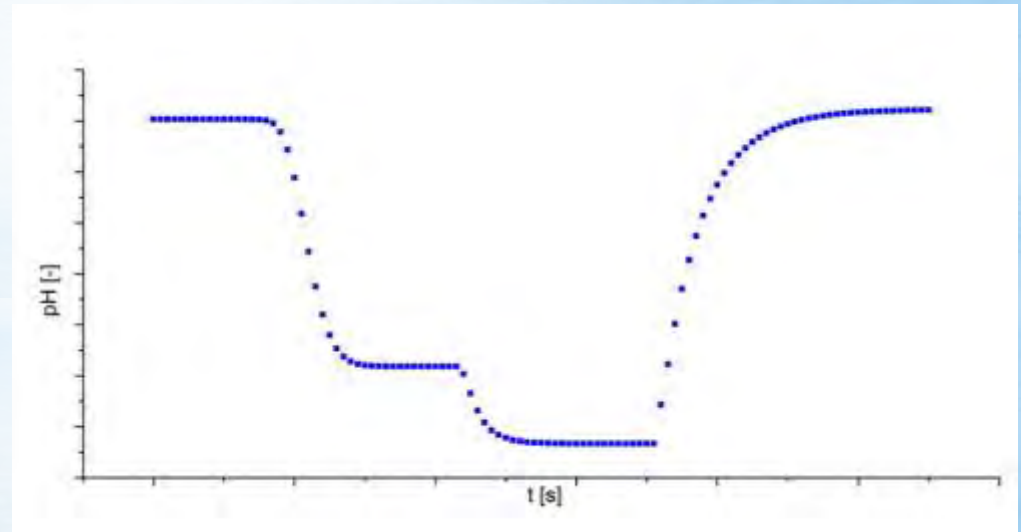
Вода : $\text{pH} = 7.82$

Загађујућа материја: $\text{pH} = 2.75$ (Водени раствор HCl)

➤ Очекиване вредности максимума таласа

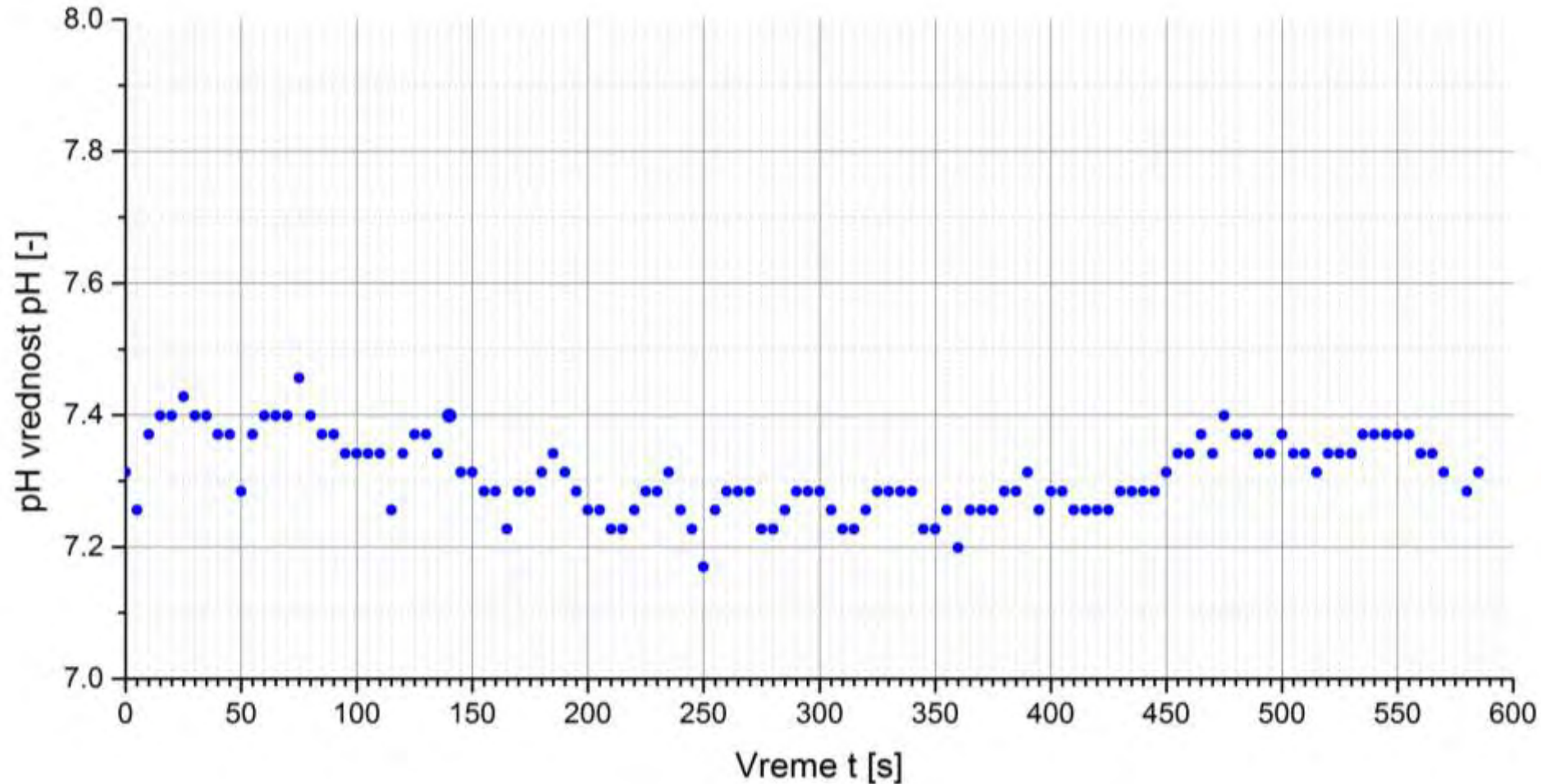
Талас 1 : $\text{pH} = 6.61$

Талас 2 : $\text{pH} = 6.04$



Симулација загађења киселим растворима

Резултати мерења промене рН вредности експеримент 3



Симулација загађења повећањем електропроводљивости

Експеримент 1

➤ Загађујућа материја

$$EC_{\text{ras}} = 2470 \mu\text{S/cm}$$

$$Q_1 = 0.0013 \text{ l/s}$$

$$Q_2 = 0.0058 \text{ l/s}$$

➤ Проток из резервоара са ЧИСТОМ ВОДОМ

$$Q_{\text{sr}} = 0.04 \text{ l/s}$$

Очекиване вредности

➤ Електропроводљивост воде

$$EC_{\text{vode}} = 434.22 \mu\text{S/cm}$$

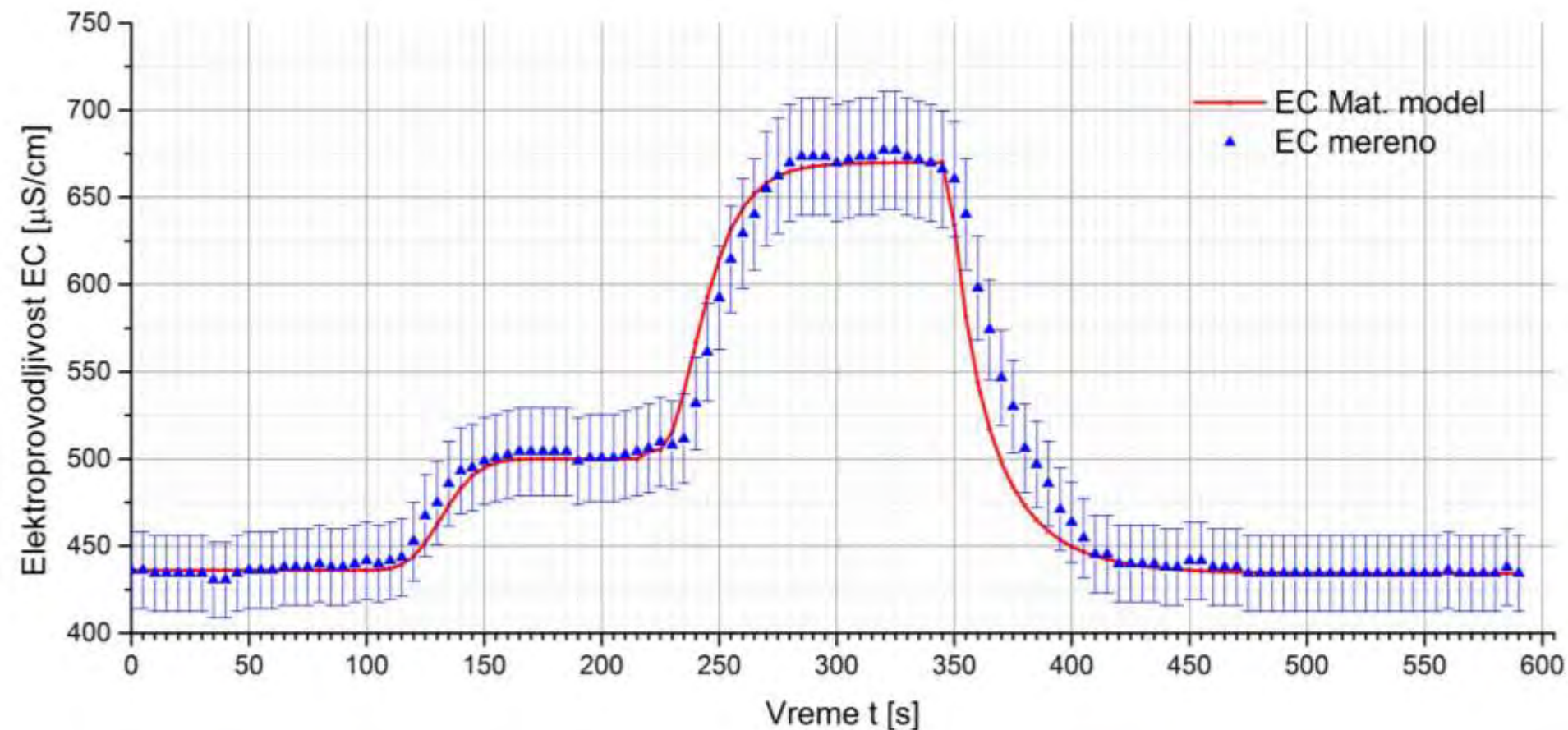
➤ Талас 1

$$EC_1 = 500 \mu\text{S/cm}$$

➤ Талас 2

$$EC_2 = 670 \mu\text{S/cm}$$

Электропроводљивост експеримент 1 ($Q = 0.04 \text{ l/s}$)



Симулација загађења повећањем електропроводљивости

Експеримент 2

➤ Загађујућа материја

$$EC_{\text{ras}} = 3830 \mu\text{S/cm}$$

$$Q_1 = 0.0011 \text{ l/s}$$

$$Q_2 = 0.0055 \text{ l/s}$$

➤ Проток из резервоара са ЧИСТОМ ВОДОМ

$$Q_{\text{sr}} = 0.033 \text{ l/s}$$

Очекиване вредности

➤ Електропроводљивост воде

$$EC_{\text{vode}} = 434.22 \mu\text{S/cm}$$

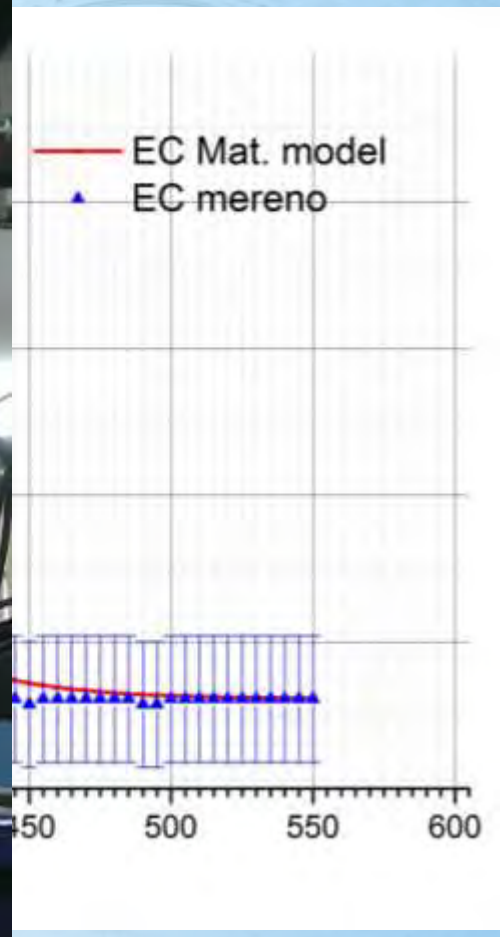
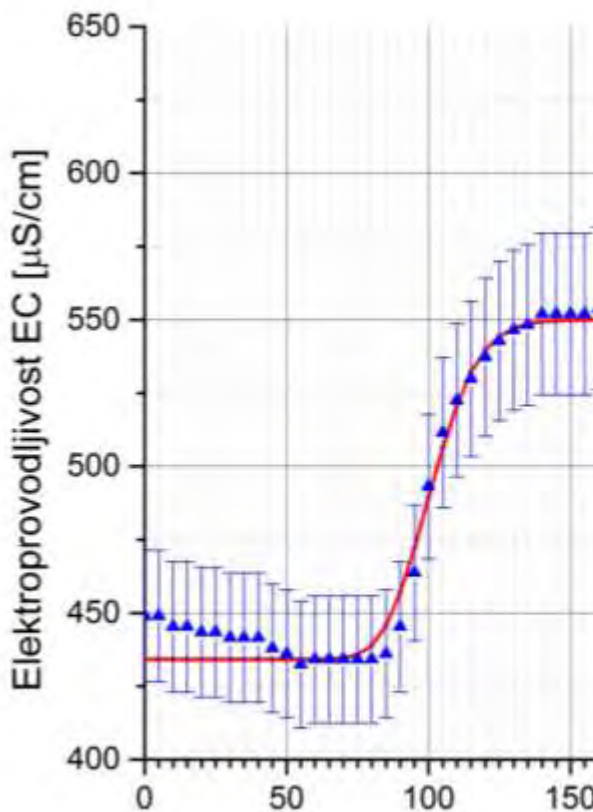
➤ Талас 1

$$EC_1 = 550 \mu\text{S/cm}$$

➤ Талас 2

$$EC_2 = 600 \mu\text{S/cm}$$

Електропроводљивост експеримент (0.33 l/s)



Симулација загађења повећањем електропроводљивости

Експеримент 3

➤ Загађујућа материја

$$EC_{\text{ras}} = 6032 \mu\text{S/cm}$$

$$Q_1 = 0.0011 \text{ l/s}$$

$$Q_2 = 0.0055 \text{ l/s}$$

➤ Проток из резервоара са ЧИСТОМ ВОДОМ

$$Q_{\text{sr}} = 0.054 \text{ l/s}$$

Очекиване вредности

➤ Електропроводљивост воде

$$EC_{\text{vode}} = 434.22 \mu\text{S/cm}$$

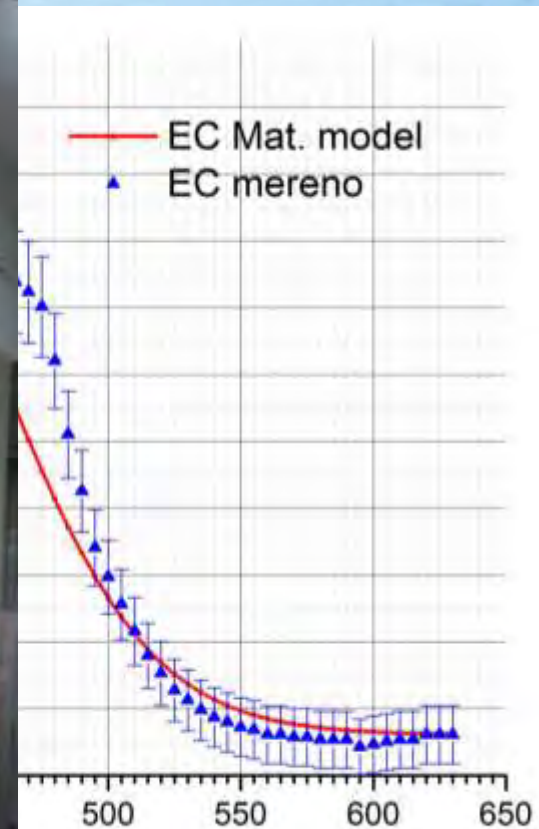
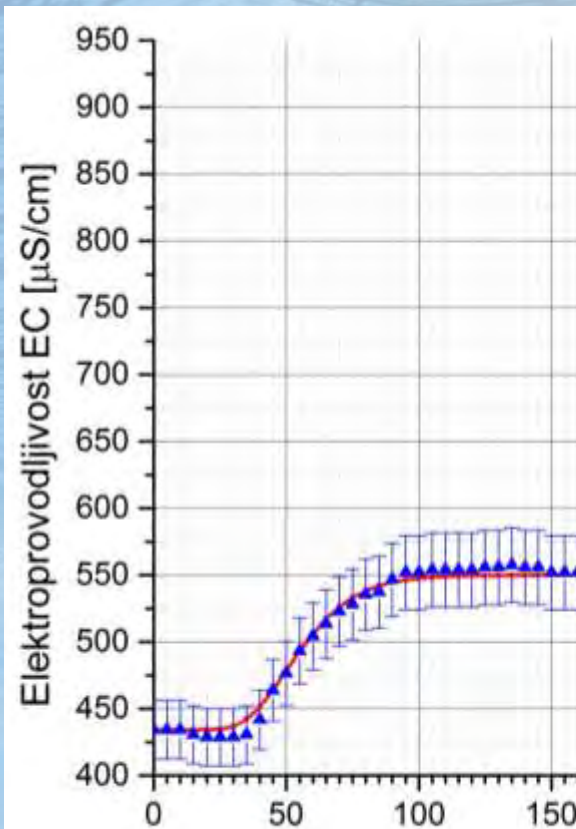
➤ Талас 1

$$EC_1 = 550 \mu\text{S/cm}$$

➤ Талас 2

$$EC_2 = 860 \mu\text{S/cm}$$

Электропроводљивост експеримент 3 ($Q = 0.054 \text{ l/s}$)



Симулација загађења повећањем мутноће

Експеримент 1

➤ Загађујућа материја

$$T = 150 \text{ FNU}$$
$$Q_2 = 0.0057 \text{ l/s}$$

➤ Проток из резервоара са чистом водом

$$Q_{sr} = 0.052 \text{ l/s}$$

Очекиване вредности

➤ Електропроводљивост воде

$$T_{\text{vode}} = 0.97 \text{ FNU}$$

➤ Талас 1

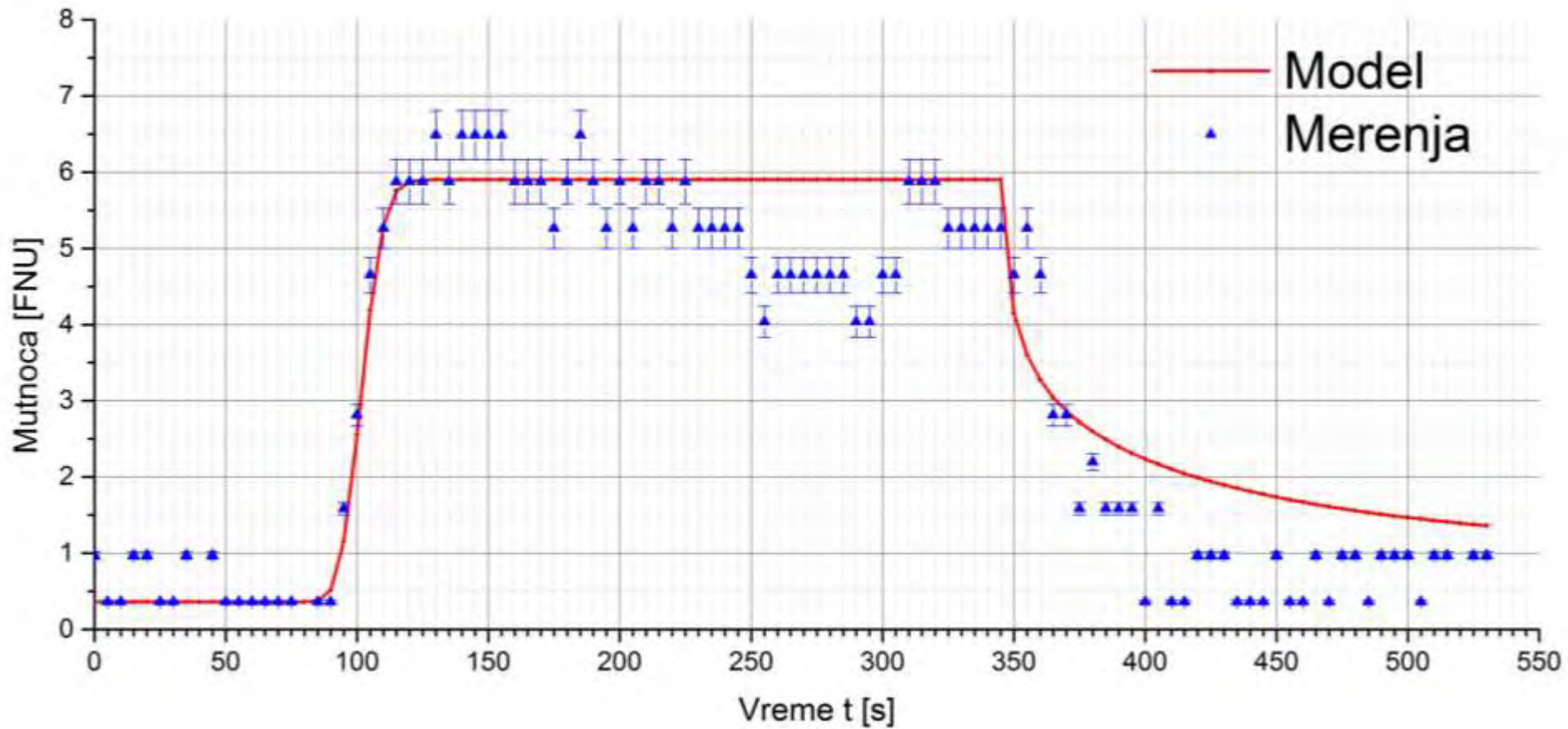
$$T_1 = 15.5 \text{ FNU}$$

➤ Добијена вредност мерењем

$$T_1 = 5.9 \text{ FNU}$$

Мутноћа експеримент 1

($Q = 0.052 \text{ l/s}$)



Симулација загађења повећањем мутноће

Експеримент 2

➤ Загађујућа материја

$$T = 250 \text{ FNU}$$
$$Q_2 = 0.0058 \text{ l/s}$$

➤ Проток из резервоара са чистом водом

$$Q_{sr} = 0.047 \text{ l/s}$$

Очекиване вредности

➤ Електропроводљивост воде

$$T_{\text{vode}} = 0.97 \text{ FNU}$$

➤ Талас 1

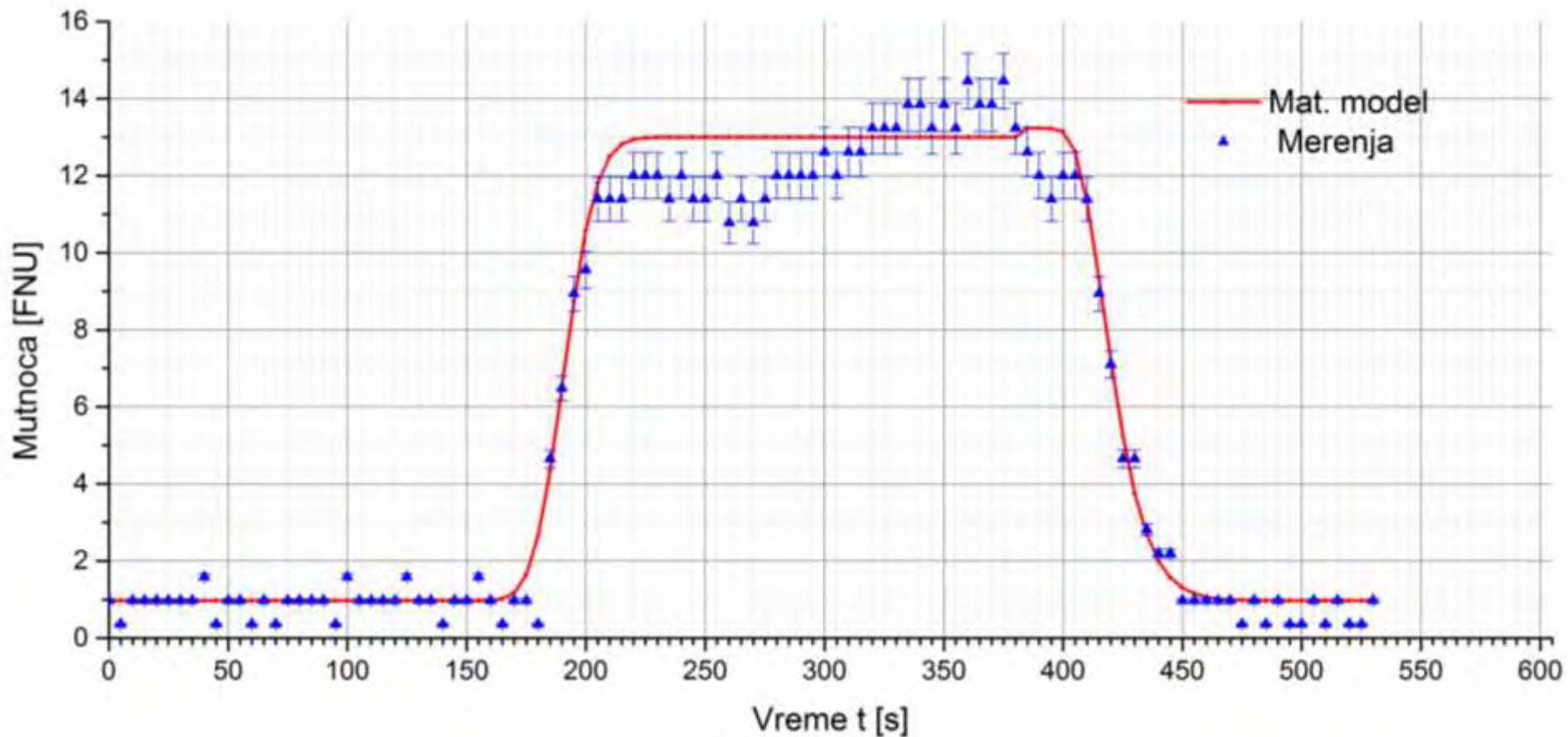
$$T_1 = 28 \text{ FNU}$$

➤ Добијена вредност мерењем

$$T_1 = 13 \text{ FNU}$$

Мутноћа експеримент 2

($Q = 0.047 \text{ l/s}$)



Симулација загађења повећањем мутноће

Експеримент 3

➤ Загађујућа материја

$$T = 253 \text{ FNU}$$
$$Q_2 = 0.0058 \text{ l/s}$$

➤ Проток из резервоара са чистом водом

$$Q_{sr} = 0.041 \text{ l/s}$$

Очекиване вредности

➤ Електропроводљивост воде

$$T_{\text{vode}} = 0.97 \text{ FNU}$$

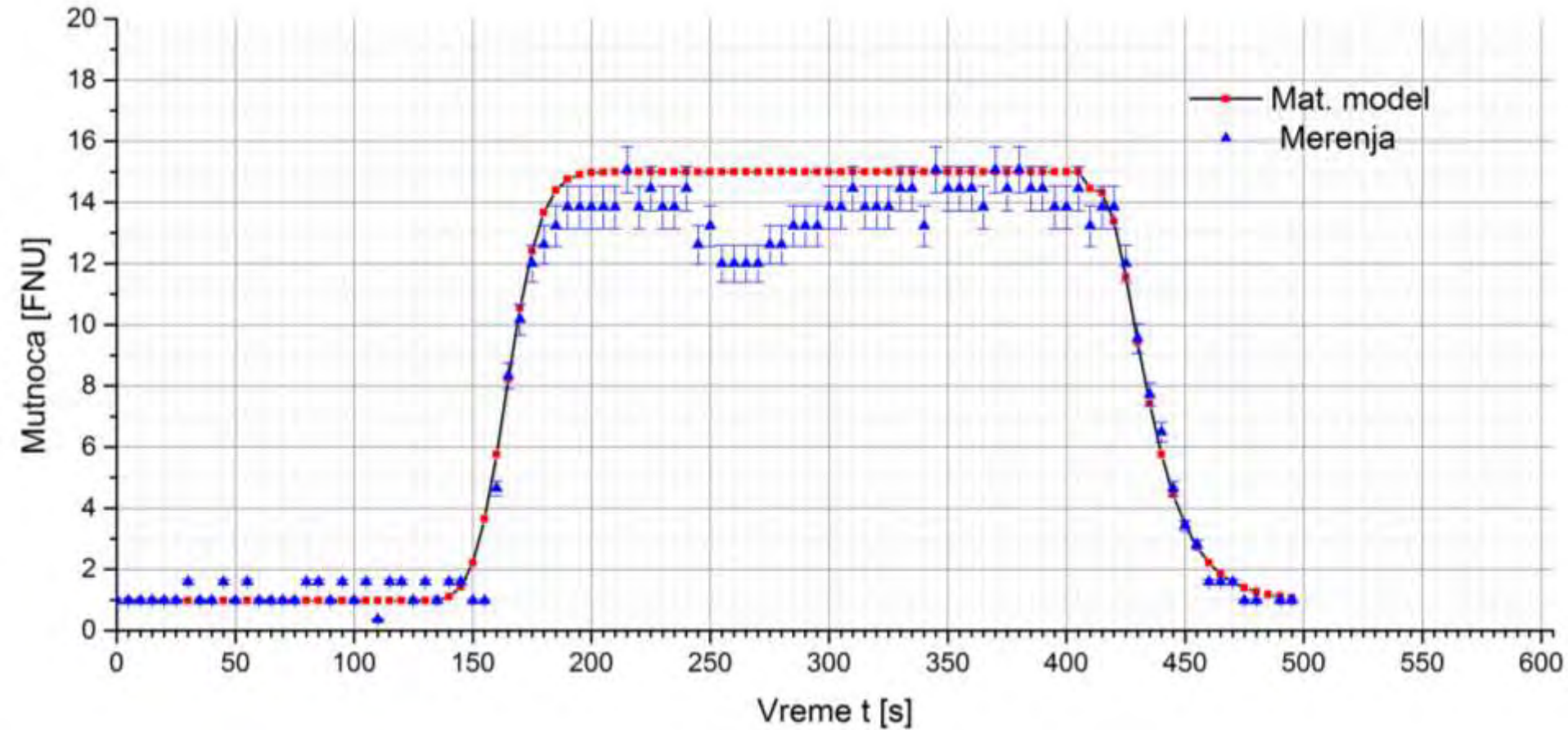
➤ Талас 1

$$T_1 = 25 \text{ FNU}$$

➤ Добијена вредност мерењем

$$T_1 = 15 \text{ FNU}$$

Мутноћа експеримент 3 ($Q = 0.041 \text{ l/s}$)



Симулација загађења повећањем мутноће

Експеримент 4

➤ Загађујућа материја

$$T = 300 \text{ FNU}$$
$$Q_2 = 0.0058 \text{ l/s}$$

➤ Проток из резервоара са чистом водом

$$Q_{sr} = 0.040 \text{ l/s}$$

Очекиване вредности

➤ Електропроводљивост воде

$$T_{\text{vode}} = 0.36 \text{ FNU}$$

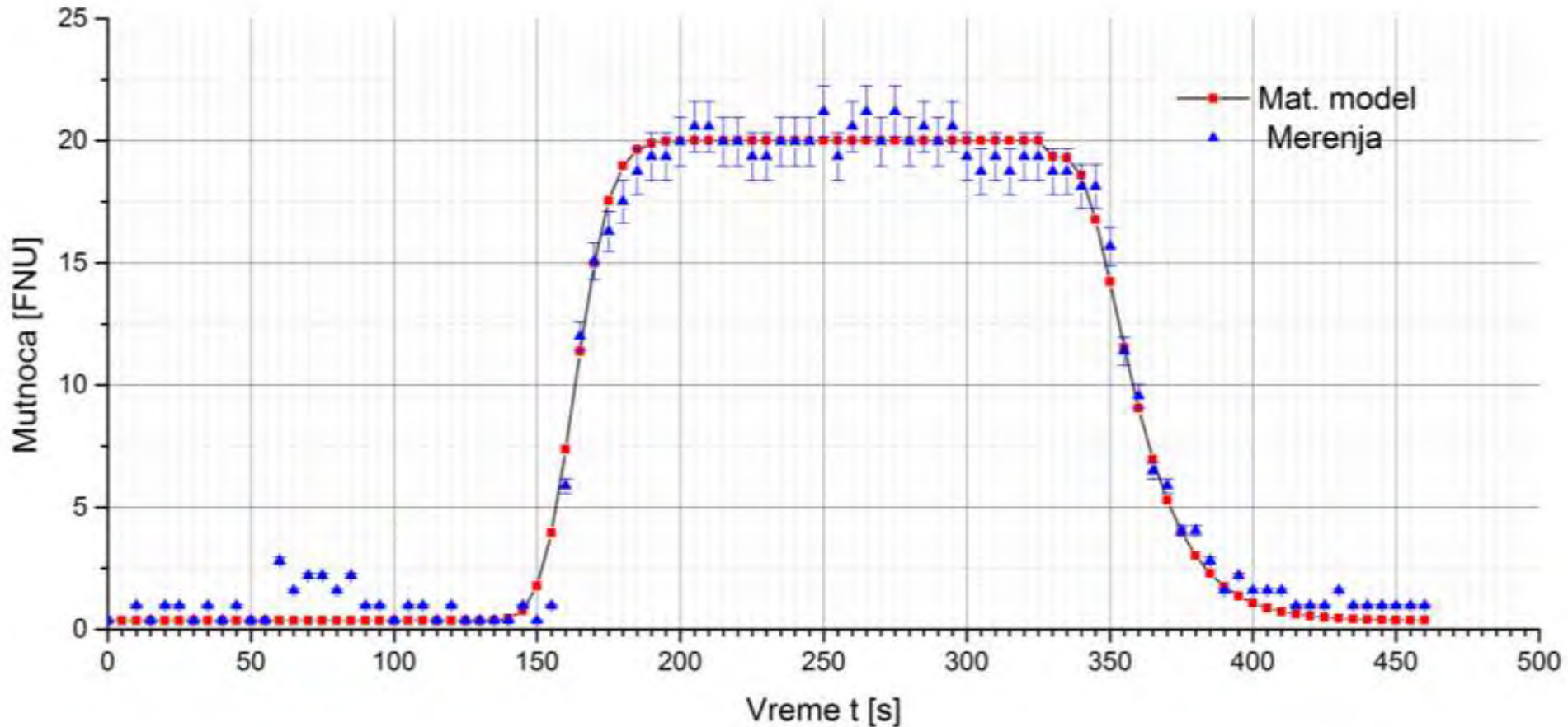
➤ Талас 1

$$T_1 = 33 \text{ FNU}$$

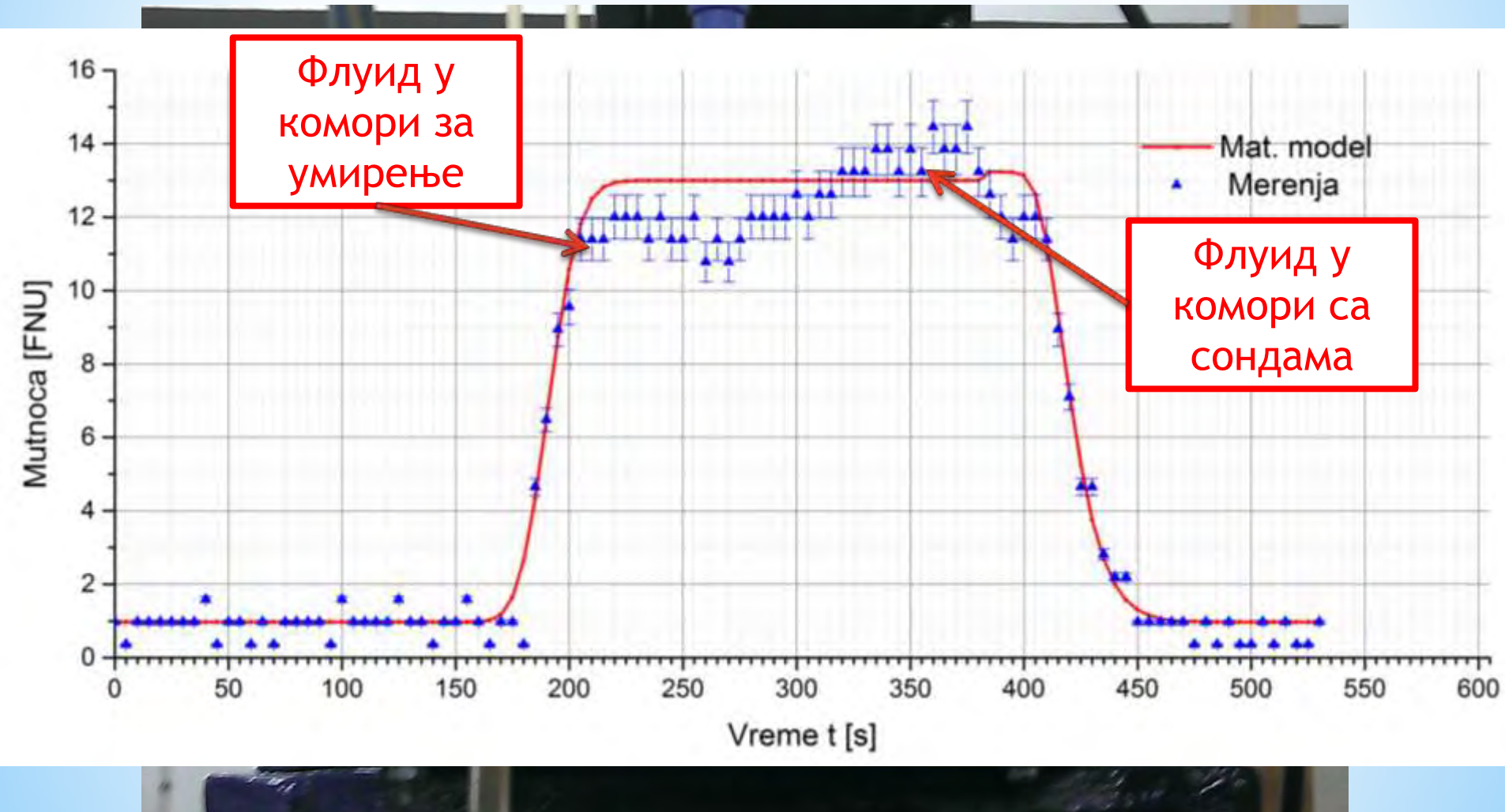
➤ Добијена вредност мерењем

$$T_1 = 20 \text{ FNU}$$

Мутноћа експеримент 4 ($Q = 0.040 \text{ l/s}$)



Зашто се јавља раст и опадање код врха таласа ?



Закључак

- Мерење протока преко троугаоног прелива показује завидне резултате
- Логер утиче на смањење резолуције сонди
- Код систем за симулацију промене рН вредности не долази до интензивног мешања
- Измерене вредности електропроводљивости и мутноће показују изванредна поклапања са моделом при порасту концентрације, док за испирање мерне кутије треба извршити модификацију математичког модела
- У систему за мерење мутноће долази до великог исталожавања честица

Предлози за даља истраживања

- Извршити нова мерења дебљине преливног млаза и протока преко правоугаоних прелива на мерној кутији, посебно у зони са протоцима око 0.02 l/s и 0.06 l/s , како би се одредио коначан облик $Q-H$ криве.
- Одредити путању флуида трасерском методом, како би се могла узети у обзир и дисперзивност у другим правцима осим правца главног тока
- Кориговати инсталацију за мерење pH вредности и мутноће, па извршити мерења и проверити поклапања са математичким моделом
- Постављање система за континуално мерење параметара квалитета у спољну средину и провера применљивости математичког модела у реалним условима

Захвалност

- проф. др Душану Продановићу
- асист. Ањи Ранђеловић
- проф. др Владани Рајковић- Огњановић,
- дипл. инж. технол. Маји Ђолић
- дипл. инж. технол. Милици Каранац
- Милану Метикошу
- Институту за хидротехнику и водно - еколошко инжењерство

Литература

1. Endress+Hauser. *Memosens Technology Makes Liquid Analysis Easy, Safe and Efficient.*; 2015. <https://www.youtube.com/watch?v=fI7DyeGMas4>.
2. Endress+Hauser. Orbisint CPS11 and CPS11D.
3. Springer EK. *pH MEASUREMENT GUIDE*. Hamilton
4. Endress+Hauser. *Potentiometric pH Measurement (Endress Hauser)*.
<https://www.youtube.com/watch?v=4PLdkMxxDDU>.
5. Manual of Electrochemical Analysis Part 2 Measuring the pH.
6. Bolf N, Dorić H. **Mjerenje i regulacija pH (I . dio)**. 2015;**64:578**-580.
7. Mettler Toledo. pH Theory Guide. 2013:99. http://www.mt.com/dam/non-indexed/po/pro/Brochures/IB_pH_Theory_Guide_EN_230113.pdf.
8. Manual of Electrochemical Analysis Part 3 Electric Conductivity. *Sartorius*.
9. Endress+Hauser. *Principle of Electrical Conductivity Measurement.*; 2014.
<https://www.youtube.com/watch?v=5qxenj3NpE0>.
10. Bahl A, Bahl B., Tuli GD. *Essentials of Physical Chemistry*. New Delhi, India: S. Chand & Co Ltd; 2000.
11. EmersonProcessManagement. Theory and Application of Conductivity. 2010.
12. Mettler Toledo. Conductivity Guide.
13. RadiometerAnalytical. Conductivity-theory and practice. 2004:1-50.

15. **Rajković V.** Kvalitet voda - **laboratorijski priručnik.** In: **Beograd: Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu;** 2010:11-15.
16. Daly J. What is Turbidity? *South Fork Instruments, Inc.* 2007.
http://www.isanorcal.org/download/tech2007_presentations/turbidity.pdf.
17. Endress+Hauser. Turbimax CUS31 Turbidity sensor.
18. Anderson CW. Turbidity. *Natl F Man Collect Water-Quality Data (TWRI B 9).* 2005;1:1-55.
19. Omar AF Bin, Matjafri MZ Bin. Turbidimeter design and analysis: a review on optical fiber sensors for the measurement of water turbidity. *Sensors.* 2009;9(10):8311-8335.
20. Endress+Hauser. Waterpilot FMX167.
21. Resistance Temperature Detectors (RTDs). <http://precisionsensors.meas-spec.com/pdfs/rtd.pdf>.
22. Endress+Hauser. Liquicap T FMI21 Capacitive.
23. Bos MG. *Discharge Measurement Structures.* Wageningen, Netherland: International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI; 1989.
24. Zchoval **Z, Knéblová M, Roušar L, Rumann J, Šulc J.** Discharge coefficient of a rectangular sharp-edged broad-crested weir. *J Hydrol Hydromechanics.* 2014;62(2):145-149.
25. **Jaćimović N.** **Hidraulika podzemnih voda za studente Građevinskog fakulteta.** 2015.
26. Ogata A, Banks RBR. A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media. *U S Geol Surv Prof Pap 411-A.* 1961.

Хвала на пажњи!

