

**MODELSKO
ISPITIVANJE
MLAZNIKA
NA
SKRETAČU
MLAZA**

**Danijela
Vukanović**



1. Uvod

- Forma ovog diplomskog rada je zamišljena kao sinteza teorijske razrade metode za merenje protoka i njene praktične primene na odgovarajućem opitnom postrojenju.
- Akcenat je stavljen na samu metodu, konstrukcijsko rešenje izlaznog dela instalacije i na formiranje modela izlaznog dela instalacije po Frudovoj sličnosti.
- U izradi je vođeno računa da instalacija kao takva zadovoljava standarde za primenu težinske metode. Instalacija će se dodati na postojeću instalaciju Instituta za Hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Beogradu. Pogodnost instalacije je u tome, da je moguća laka i brza njena izmena, kao i da njene komponente mogu biti pojedinačno ili kao celine upotrebljeni u drugim opitnim instalacijama.

-Volumetrijska metoda za merenje protoka tečnosti

-Težinska metoda za merenje protoka tečnosti

2. Metode za merenje protekle zapremine



2.1. Merenje protoka tečnosti u zatvorenim cevovodima-Volumetriška metoda

- Uslovi primene

- pritisak na kojoj tečnost isparava treba da je nizak da količina tečnosti koja pri isparavanju napusti proces ne utiče na preciznost merenja

- Da tečnost koja se koristi nije toksična i korozivna

- Izračunavanje volumetrijskog protoka

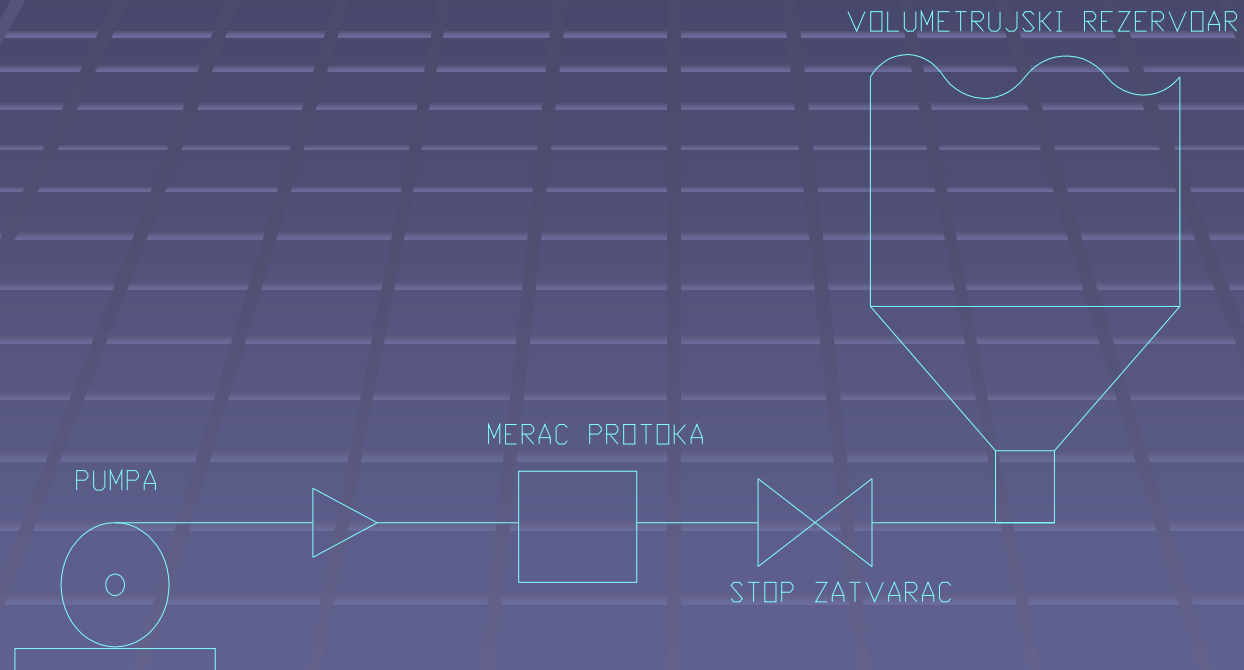
$$q_v = \frac{V_1 - V_0}{t}$$

- Provera trenutnog i srednjeg protoka

■ Tačnost volumetričkog merenja

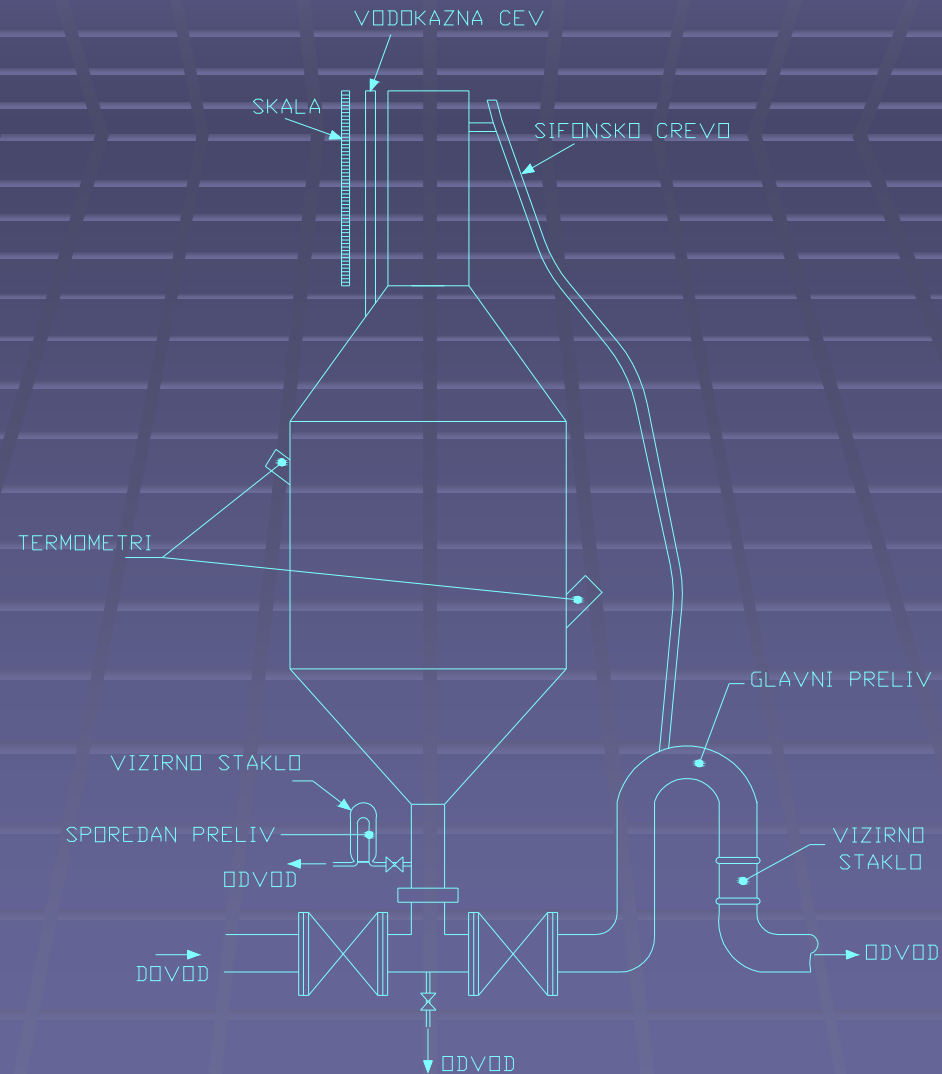
- da nema curenja u instalacionom protočnom krugu;
- da cevovod radi u potpunosti, odnosno da ne postoje vazdušni čepovi;
- da nema akumulacije (trošenja) tečnosti unutar toka usled toplotnih kompresija (ili ekspanzija) i da nema akumulacija (trošenja) usled promene praznina ili zapremine gasa sadržanog bez našeg znanja u kružnom toku;
- da se spreči curenje spoljne tečnosti u mernu instalaciju, preko zaštitnog sloja ili usled deformacije cevovoda;
- da je veza između nivoa i zapremine u rezervoaru uspostavljena na osnovu poznate zapremine, ili na osnovu računanja unutrašnjih dimenzija rezervoara;
- merači nivoa i značaj starta i zaustavljanja tečenja veoma utiču na zahtevanu preciznost;
- temperatura tečnosti koja teče kroz merač protoka za vreme testa je ista kao i ona u volumetrijskom rezervoaru i jednaka propisanoj temperaturi pri kojoj je određena zapremina rezervoara (obično je to 20°C), ili je prema tome prilagođena.

2.1.1. Statička volumetrijska metoda



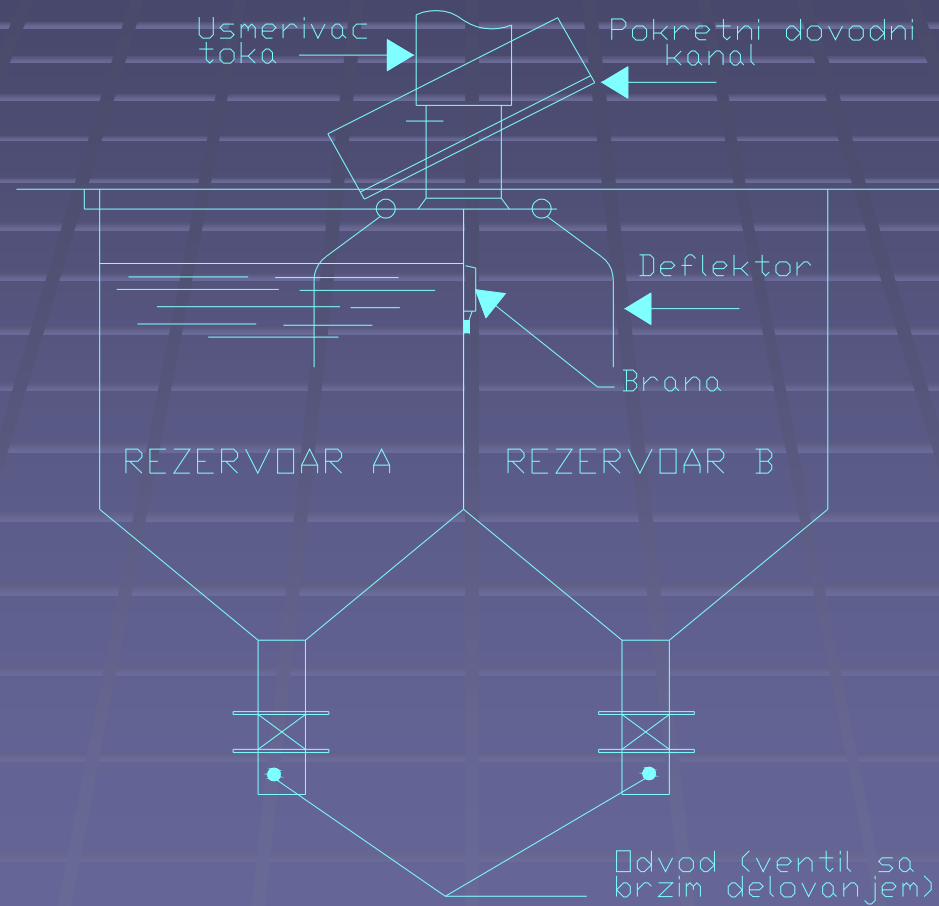
- Princip rada statičke volumetrijske metode

2.1.1.1. Volumetrijski rezervoar



- Nacrt volumetrijskog rezervoara

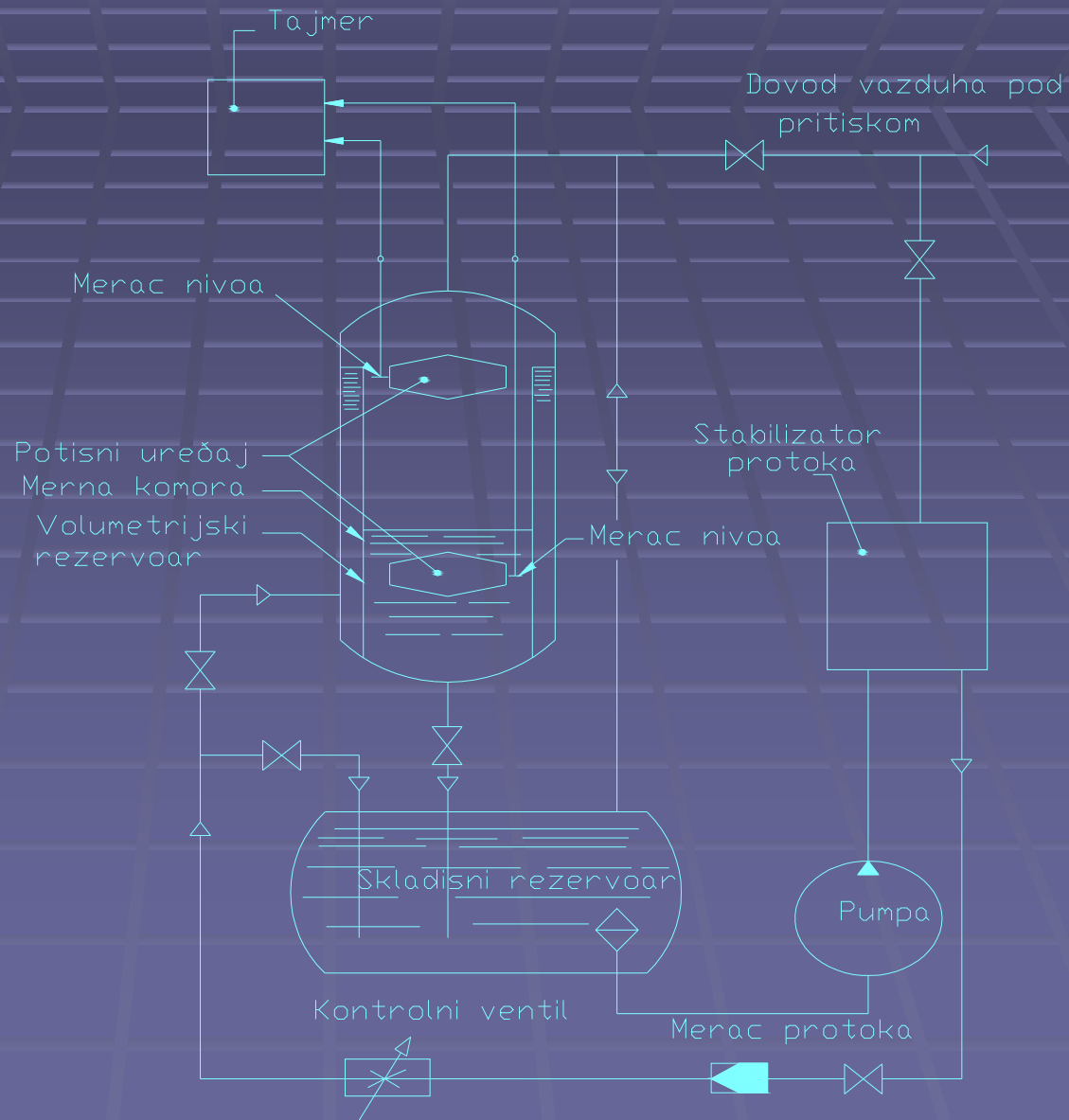
2.1.1.2. Metoda sličnih rezervoara- rezervoara blizanaca



- Skica rezervoara blizanaca

2.1.2. Dinamička volumetrijska metoda

-Princip merenja



2.2. Merenje protoka tečnosti u zatvorenim cevovodima- Težinska metoda

- Težina vode:

$$G=m \cdot g=\rho \cdot V \cdot g$$

- Srednja vrednost masenog protoka :

$$q_m=\rho \cdot q_v=\rho(V_1-V_0)/t$$

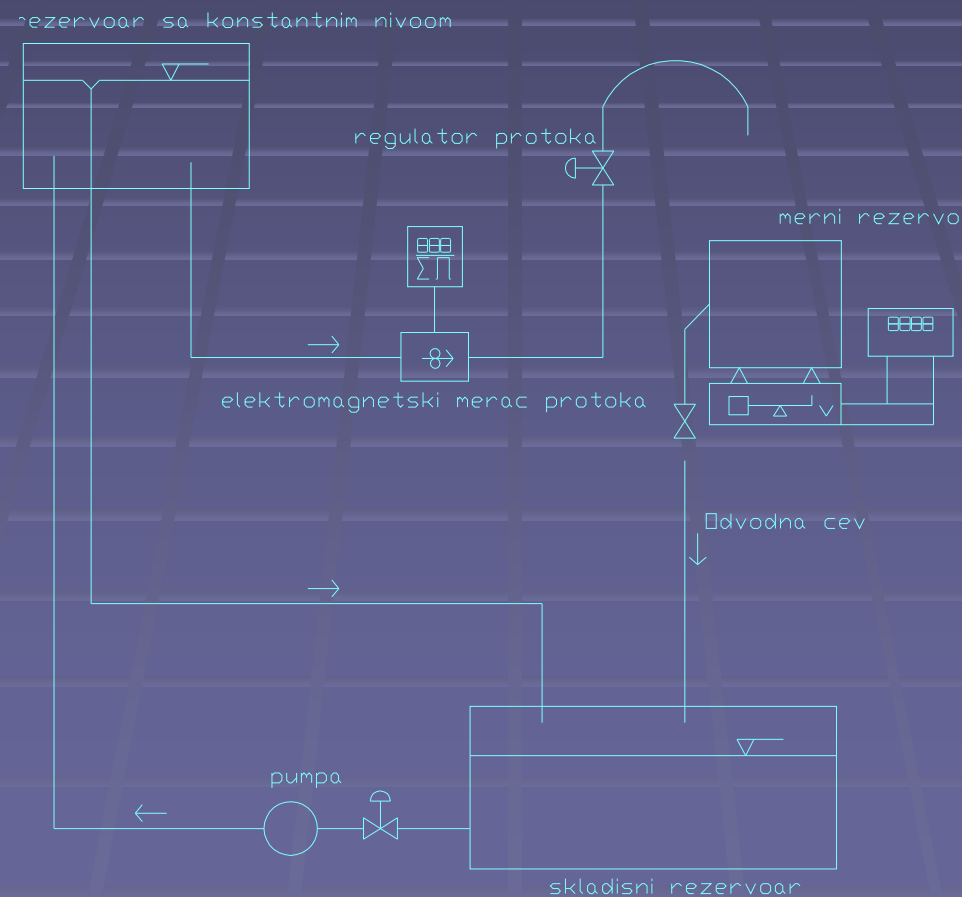
- Tačnost težinske metode zavisi od dva faktora :

-Tačnosti-rezolucije vage. Za merenja od 0.05 % potrebna je vaga od 5000 podeoka- prave se i vage od 10000 podeoka (maksimalna težina GMAX se deli na 10000 delova pa je minimalno ΔG koje vaga razlikuje $\Delta G=gMAX \cdot 1/10000$),

-poznavanja gustine fluida.

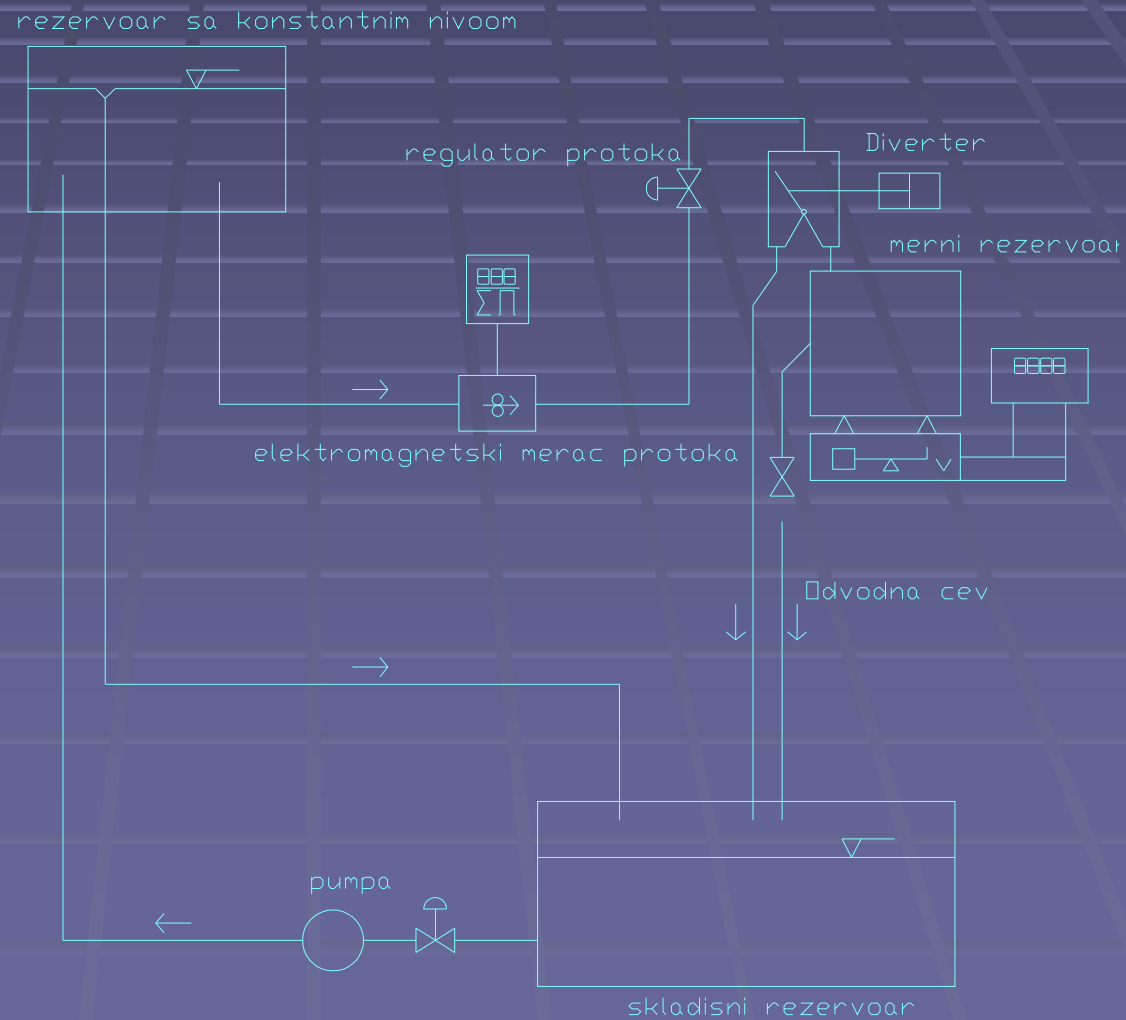
2.2.1. Statička težinska metoda sa prekidnim protokom

-Ova metoda zahteva da se protok skroz zaustavi na kraju merenja.



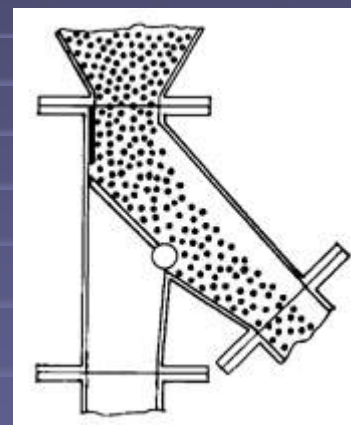
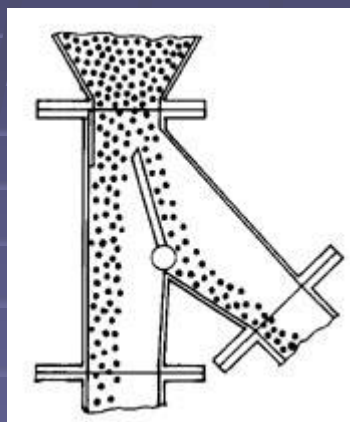
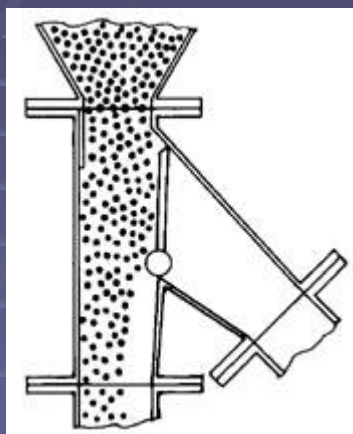
2.2.2. Statička težinska metoda sa stalnim protokom

-Princip merenja



2.2.2.1. Diverter

Diverter je pokretni uređaj koji usmerava mlaz naizmenično prema rezervoaru (vagi) ili ka odvodnom levku.

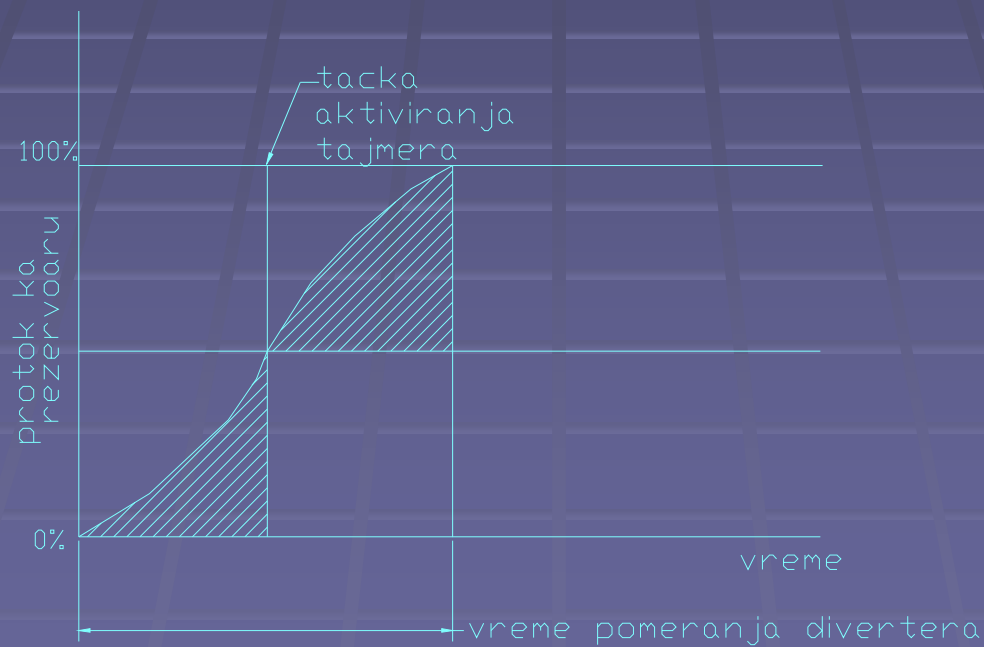


Princip rada divertera: slika levo-faza punjenja rezervoara na vagi, slika u sredini-faza prebacivanja mlaza vode sa vage na odvodnu cev, i slika desno-punjenje rezervoara na vagi je završeno

2.2.2.2. Aparatura za merenje vremena

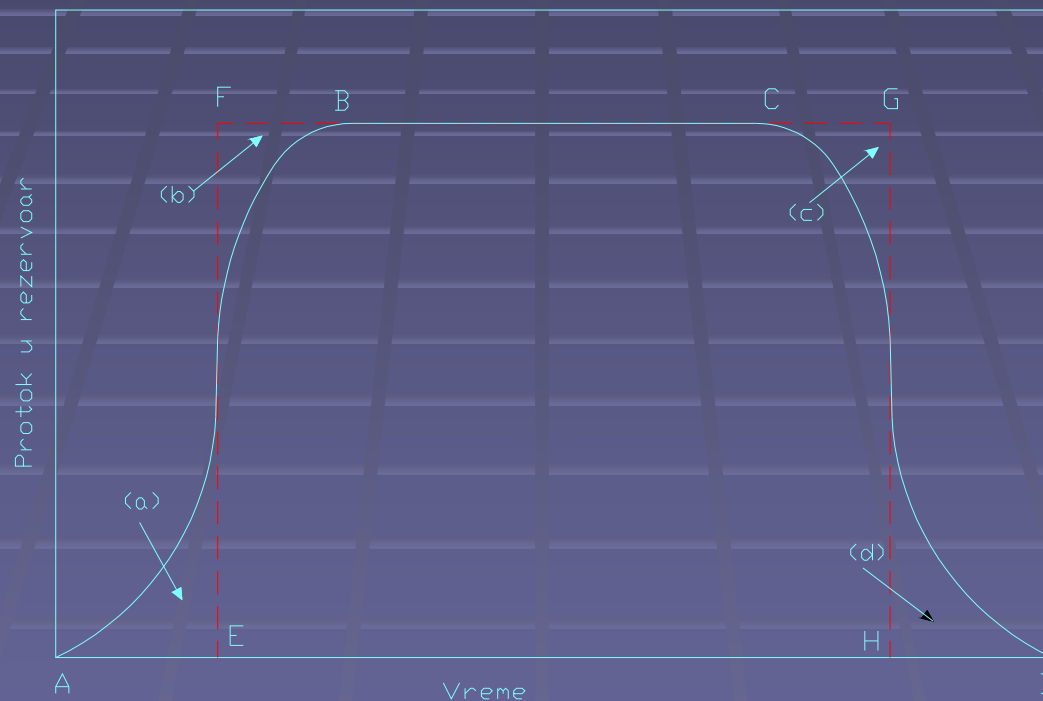
-precizni elektronski tajmeri

- Period rada aparature može da bude pročitao do 0,01 s ili još bolje preciznosti.



Funkcija pomeranja levka

- Karakteristike varijacija protoka pri ulazu u rezervoar pri statičkoj težinskoj metodi sa stalnim protokom

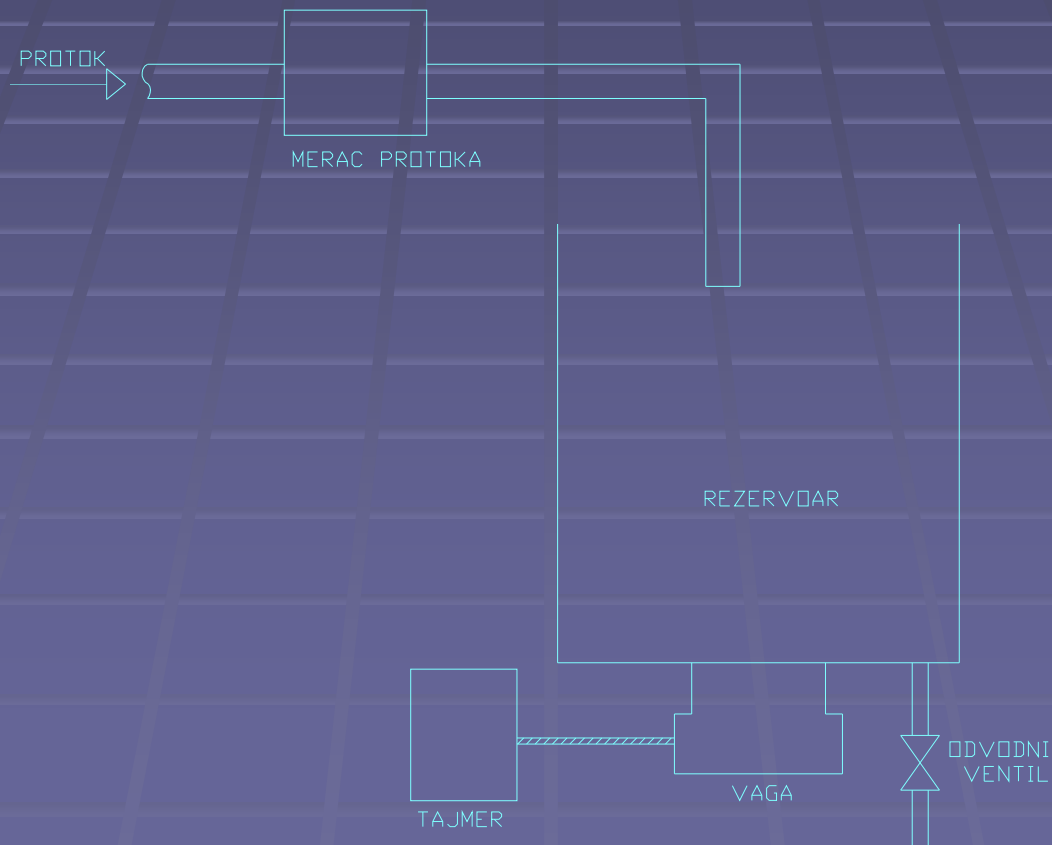


Stvarna zapremina koja uđe u rezervoar-određena tačkama ABCD

Nominalna zapremina (ona koju merač pokaže)-određena tačkama EFGH

2.2.3 Dinamička težinska metoda sa stalnim protokom

-Meri se težina fluida istovremeno dok voda pada u rezervoar.



- Način korekcije uticaja inercijalne sile od mlaza vode koji ulazi u posudu

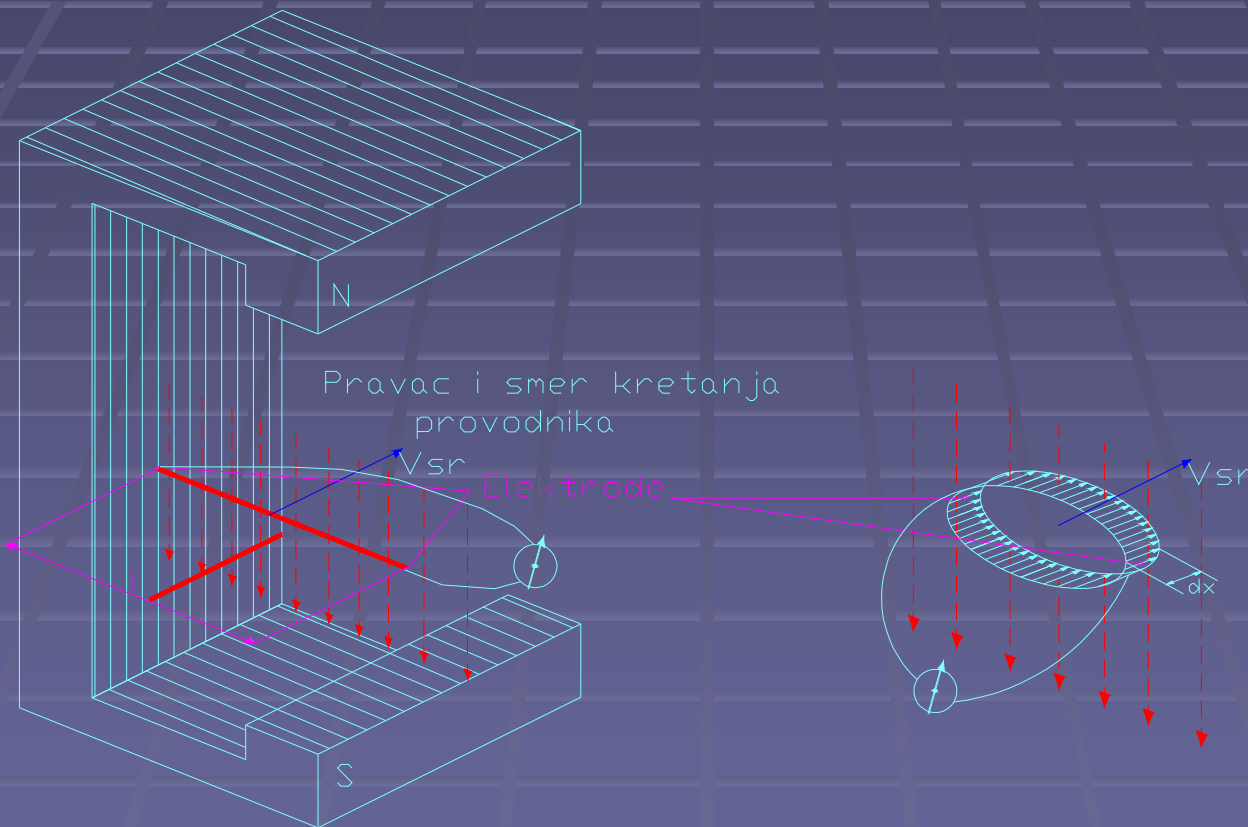
-Vaga treba da je što manje osetljiva na dinamičke promene, pa se primenjuje sistem kompenzacije.



3. Merenje protoka tečnosti u zatvorenim cevovodima-kalibracija merila volumetrijskom metodom

- Faktori koji utiču na izbor merača protoka:
 - raspoloživost na tržištu;
 - cena osnovne opreme, rezervnih delova i održavanja;
 - tačnost;
 - pouzdanost;
 - opseg promene protoka;
 - energetski gubici;
 - dimenzije cevovoda;
 - postojanje merača istog tipa u sopstvenoj praksi.

3.1 Elektromagnetni merač protoka-princip rada



Generisanje elektromotorne sile u provodniku koji se kreće kroz elektromagnetno polje: slika levo-provodnik je žica dužine l , slika desno-provodnik je element struje dužine dx ($l=D$ =prečnik cevi)

-Elektromotorna sila koja se generiše na elektodama:

$$e = c \cdot B \cdot d \cdot V_{sr}$$

B-jednačina elektromagnetnog polja

d-prečnik cevi

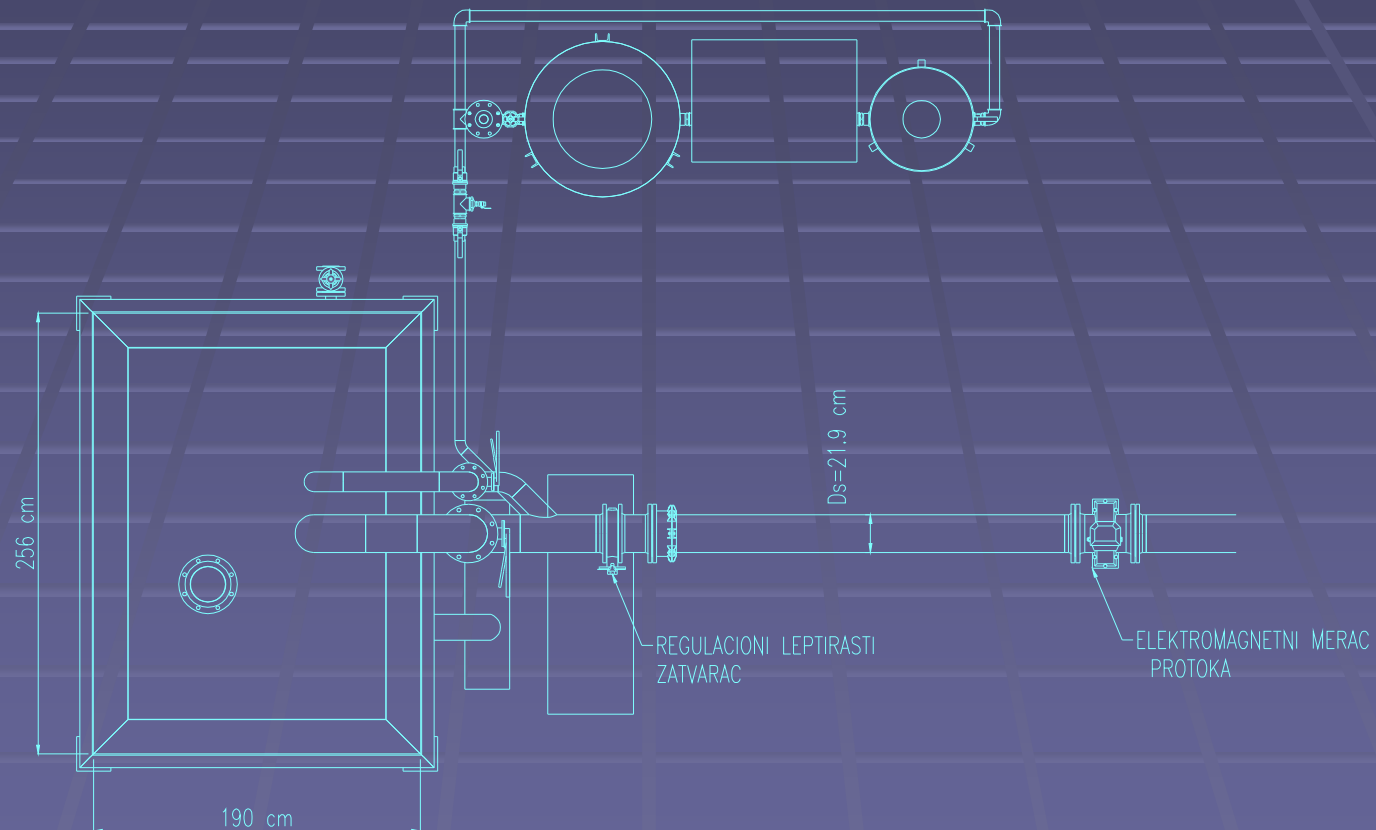
c-faktor proporcionalnosti

Kada se srednja brzina zameni protokom $V_{sr} = Q/A$ dobija se:

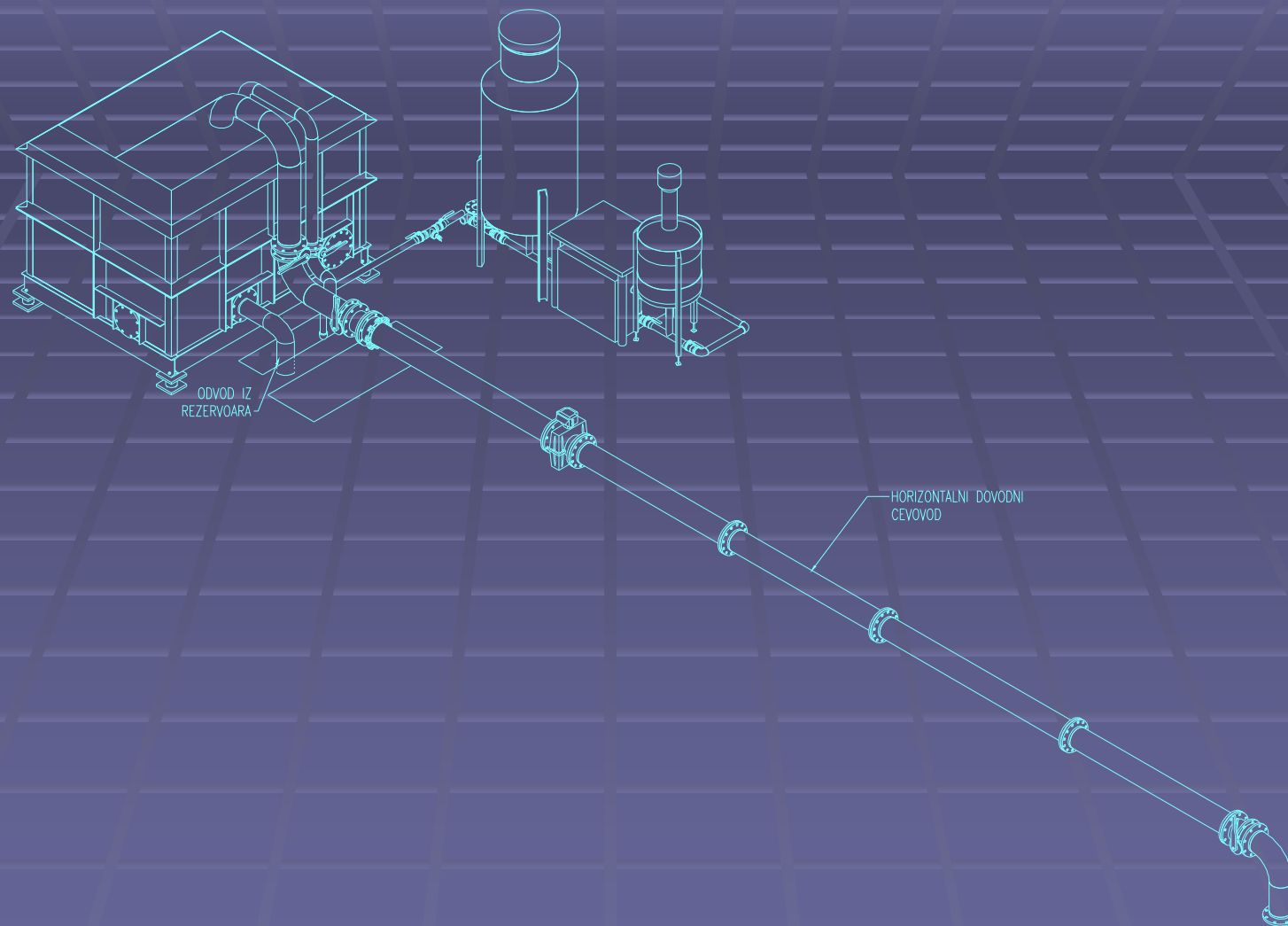
$$e = 4c \cdot B \cdot d \cdot Q / d^2 \cdot \pi, \text{ odnosno}$$

$$Q = e \cdot d \cdot \pi / 4 \cdot B \cdot c$$

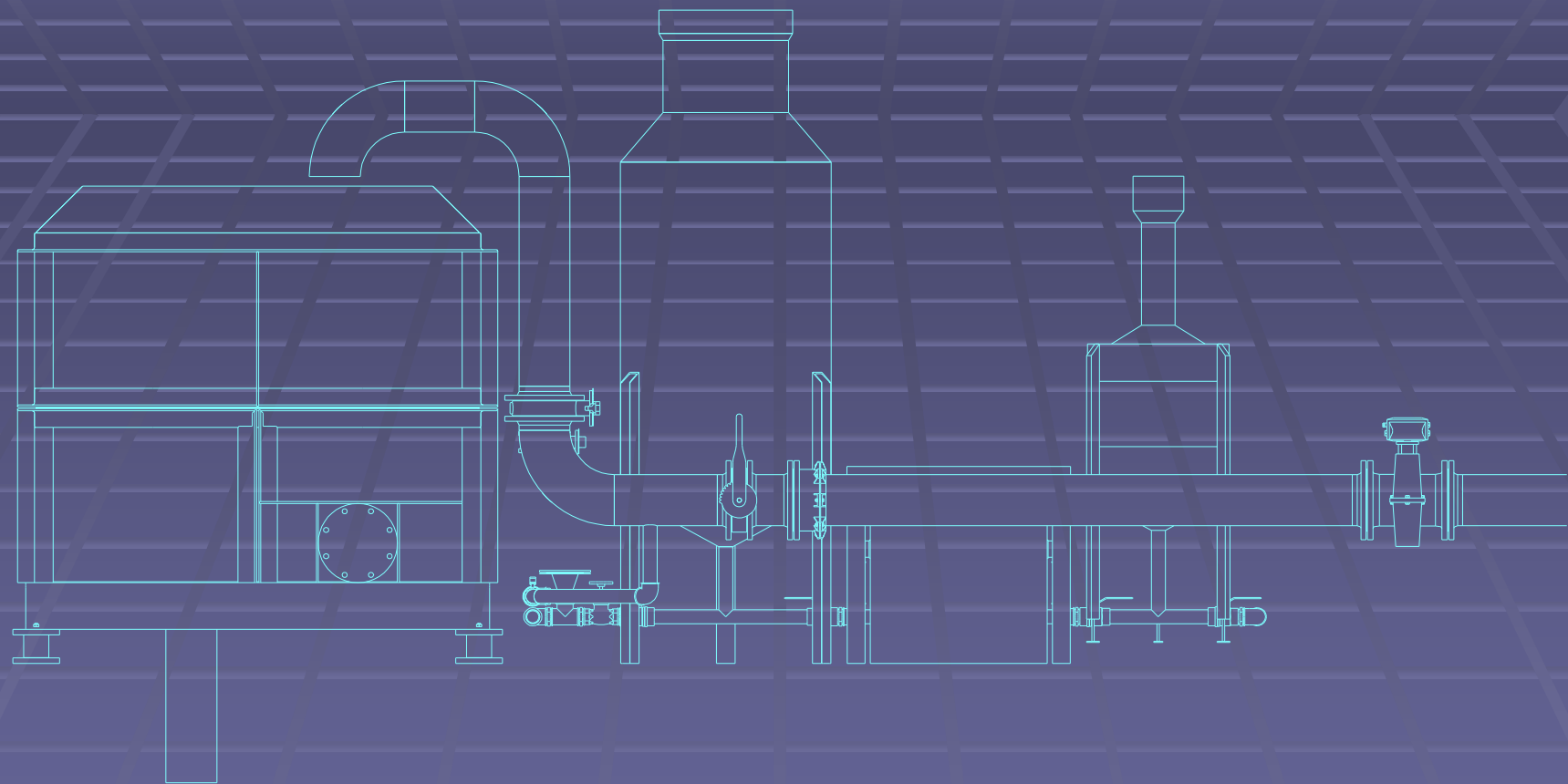
-U laboratoriji je zatečeno stanje ilustrovano na sledećim priložima.



-Pogled odozgo na rezervoar i deo instalacije



-Izometrijski prikaz postojeće instalacije



-Bočni pogled na postojeću instalaciju

5. Izračunavanje opšte greške u merenju protoka-analiza grešaka

- Greške i neodređenost
- Statistička analiza slučajnih neodređenosti

Greške nastale u toku merenja mogu biti:

- Grube,
- Sistematske,
- Slučajne.

Sistematske greške

- Greške nastale zbog volumetrijskog rezervoara
- Greške nastale zbog merača nivoa
- Greške nastale zbog uređaja za merenje vremena
- Greške nastale zbog sistema divertera
- Greške nastale zbog merenja gustine

5.4. Slučajne greške

- Greške u određivanju sakupljene zapremine
- Greške nastale zbog sistema divertera
- Greške nastale zbog dinamičkog merenja

6. Hidraulički proračun opitne instalacije

- Analiza tečenja i koeficijenti trenja

-Kinematski koeficijent viskoznosti:

$$\nu(t) = \exp(-16.921 + 369.16 / (107.4 + t)) \text{ (m}^2/\text{s)}$$

-Brzina strujanja vode kroz cevne deonice različitih prečnika:

$$V_i = 4 \cdot Q / D_i^2 \cdot \pi \text{ (m/s)}$$

-Reynolds-ovi brojevi za $\nu(t=20^\circ \text{C})$:

$$Re_i = V_i \cdot D_i / \nu_t$$

-Debljina graničnog sloja:

$$K_{gsi} = 62.7 \cdot D_i / Re^{0.875} \text{ (mm)}$$

-Koeficijent trenja se računa po Kolbukovoj formuli:

$$\lambda = 0.185 \cdot (K/D + 40/Re)^{1/3}$$

za $1/20 > K/D > 1/1000$

■ Proračun koeficijenata lokalnih otpora

-Koeficijent lokalnog otpora pri strujanju kroz leptirasti zatvarač u otvorenom položaju

$$\xi_{zat}=2.5$$

-Koeficijent lokalnog otpora račve

$$\xi_{rac}=0.5$$

-Koeficijent lokalnog otpora pri strujanju kroz koleno od 90°

$$\xi_{kol}=0.25$$

-Koeficijent lokalnog otpora pri strujanju kroz koleno od 45°

$$\xi_{kol}=0.5$$

■ Određivanje potrebne visine dizanja pumpe

-Prečnici cevi:

$$D_1=0,207 \text{ m}$$

$$D_2=0,2 \text{ m}$$

$$D_3=0,15 \text{ m}$$

$$D_4=0,25 \text{ m}$$

-Dužine cevni deonica:

$$l_{0-1}=44,57 \text{ m (za prečnik } D_1)$$

$$l_{1-2}=14,168 \text{ m (za prečnik } D_2)$$

Izmereni protok kroz instalaciju:

$$Q=0,1 \text{ m}^3/\text{s}$$

Kinematska viskoznost:

$$\nu=8,12\text{E-}07 \text{ m}^2/\text{s}$$

	1	2	3	4
V (m/s)	2,97	3,18	5,66	1,6
Re	757194,2	783696	1044928	492410,7
Kgs (m)	9,3096E-05	8,7281E-05	5,0893E-05	0,000164
λ	0,039474	0,039925	0,04391	0,037125

- $\xi_{0-1}=8,4993671$ ukupni gubici na cevima prečnika D1
- $\xi_{1-2}=2,82826838$ ukupni gubici na cevima prečnika D2
- $\xi_{ik}=0,03$

-Gubici:

$$\Delta E = \sum \lambda_i \cdot L_i / D_i \cdot V_i^2 / 2 \cdot g + \sum \xi_j \cdot V_i^2 / 2 \cdot g$$
$$\Delta E = 12,0744 \text{ m}$$

-Bernulijeva jednačina:

$$H_p + z_p + V^2 / 2 \cdot g = H + z + V^2 / 2 \cdot g + \Delta E$$

- $z_p = 0,7 \text{ m}$
- $H = 20 \text{ m}$
- $z = 4,548 \text{ m}$

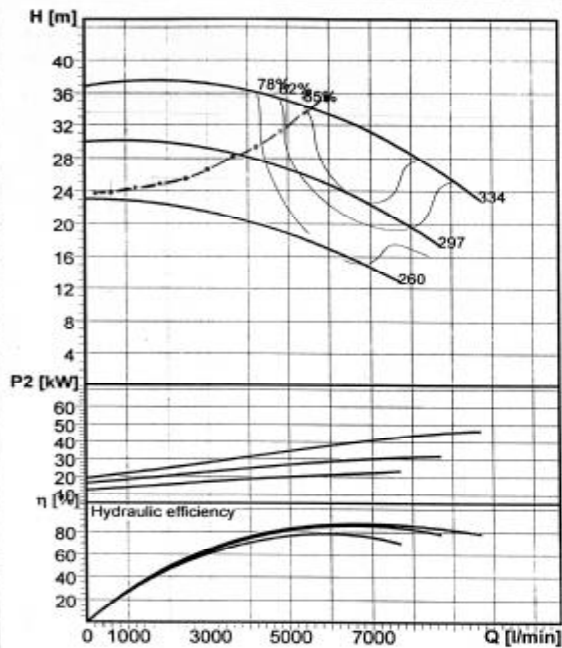
$H_p = 35,603 \text{ m}$ (za protok $Q = 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$) potrebna visina pumpanja za maxQ.

• Pompa



EBARA PUMPS EUROPE S.p.A.
 Via Pacinotti, 32
 36042 Brendola (VI) - Italia
 Tel. +39 - 0444 - 706811
 Fax. +39 - 0444 - 706950

EBARA-EN



EN 150-315/4P

Operating data specification

Fluid	Wasser
Temperature	20 °C
Density	1 kg/dm ³
Viscosity	1 mm ² /s
Nature of system	Single head pump
Nos. of pumps	1

Pump data

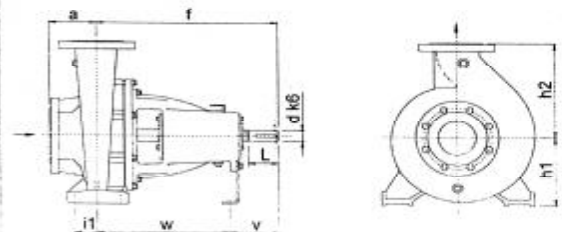
Name	EN 150-315/4P
Series	EBARA-EN
Material combination	W-ENORM
Suction size	DN200
Discharge size	DN150
Pressure rating (suction port)	PN 10
Pressure rating (discharge port)	PN 10
Mounting	D-ENORM

Motor data

Name	225 M - 45
Rated power P2	45 kW
Rated speed	1450 1/rmin
Motor type	3- Motor
Rated voltage	400 V
Frequency	50 Hz
Frame size	225
Degree of protection [IP]	IP55

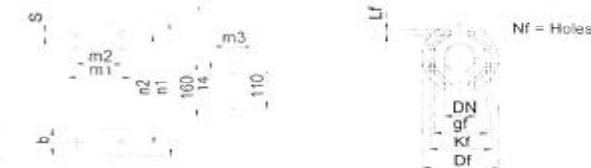
Materials W-ENORM

Pump casing	Cast iron (GG 25)
Shaft	AISI 420
Mechanical seal	Ceramic/Carbon/NBR
O-Ring	NBR
Impeller	Cast iron (GG 25)
Motor support	Cast iron (GG 25)



Dimensions [mm]

a	f	h1	h2
160	530	280	400
m2	s	n2	i1
150	23	450	75
v	w	dk6	l
160	370	42	110



7. Projekat izlaznog mlaznika za diverter protoka

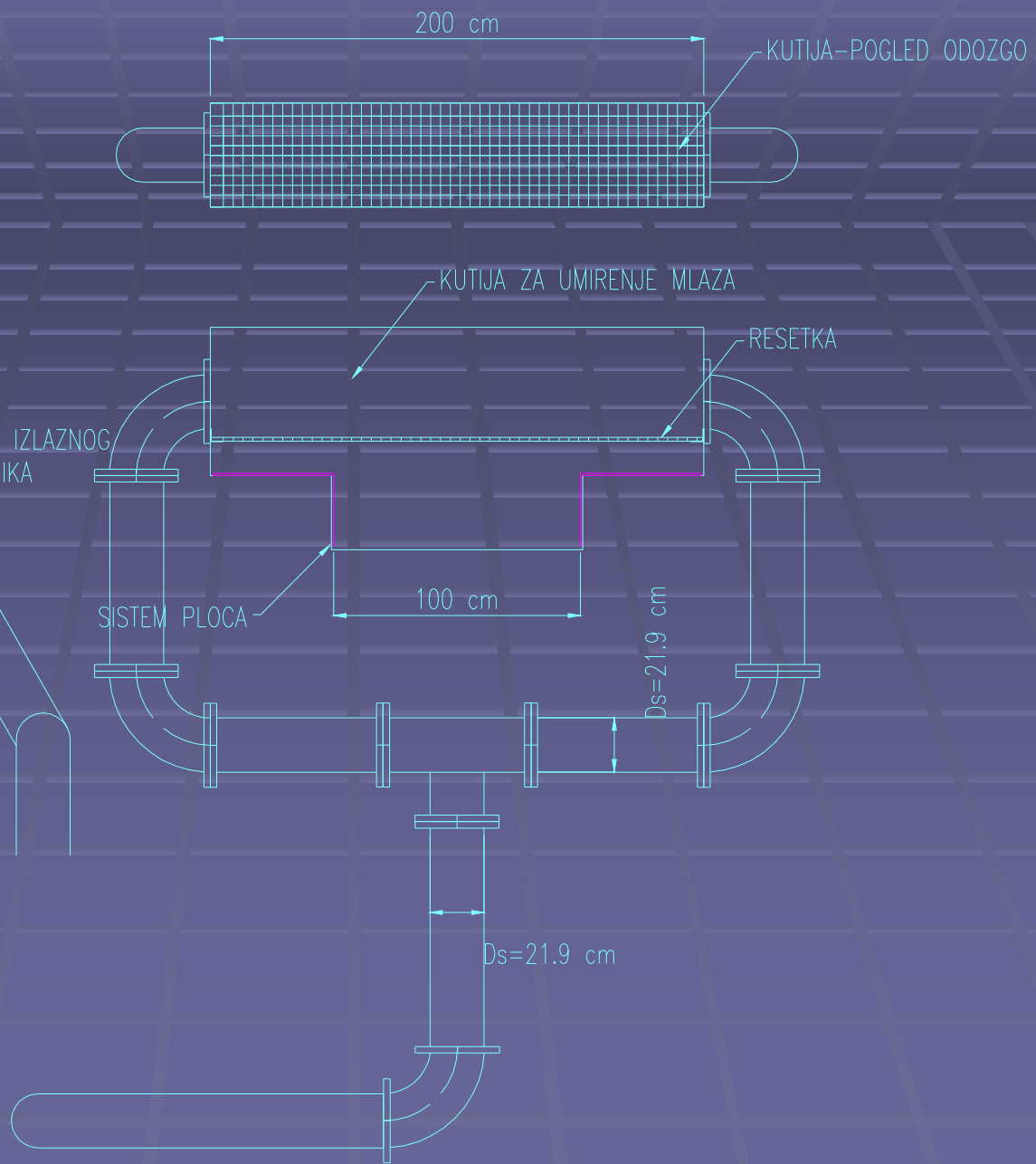
- Uslovi modeliranja

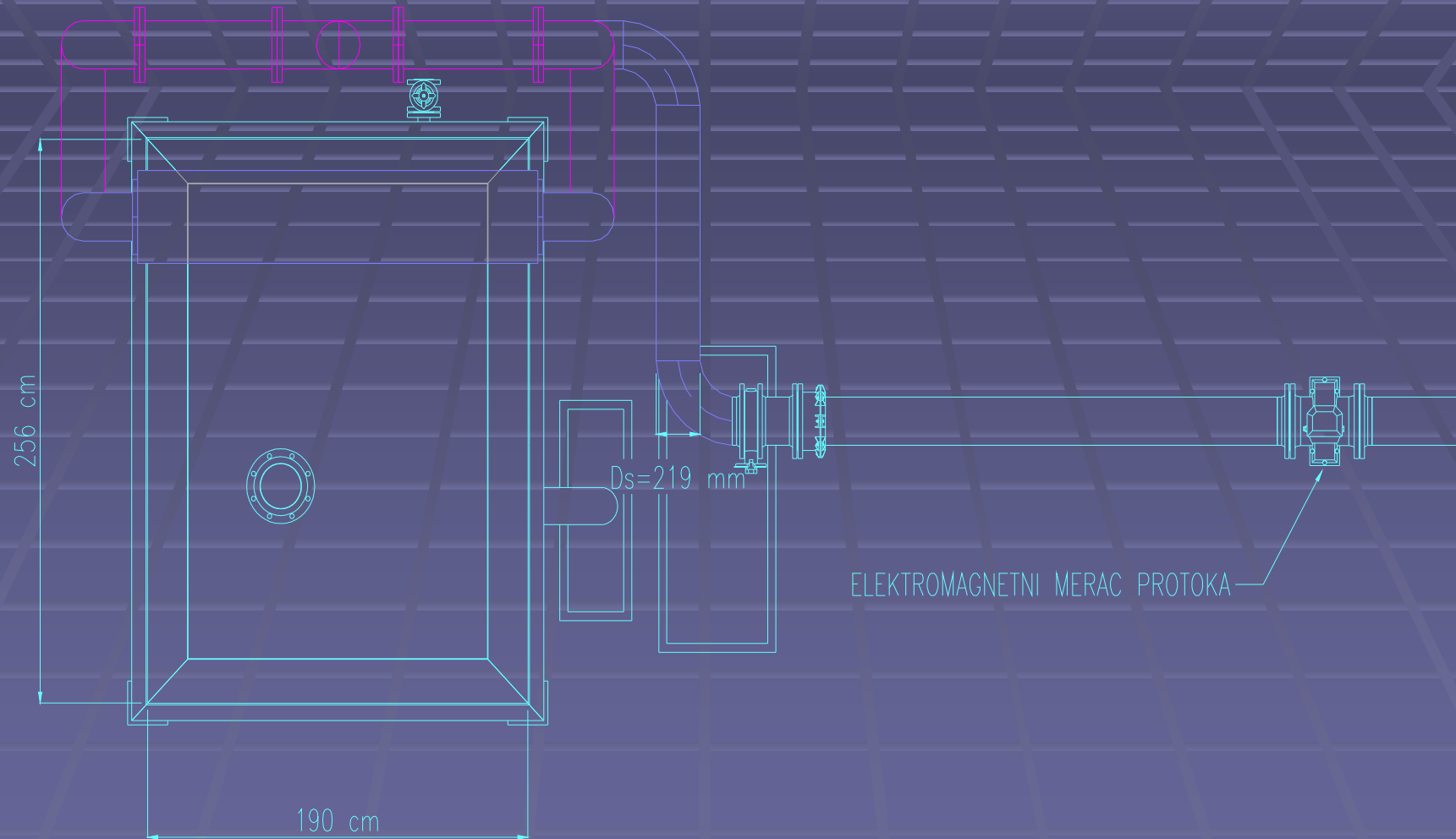
- Prvo varijantno rešenje

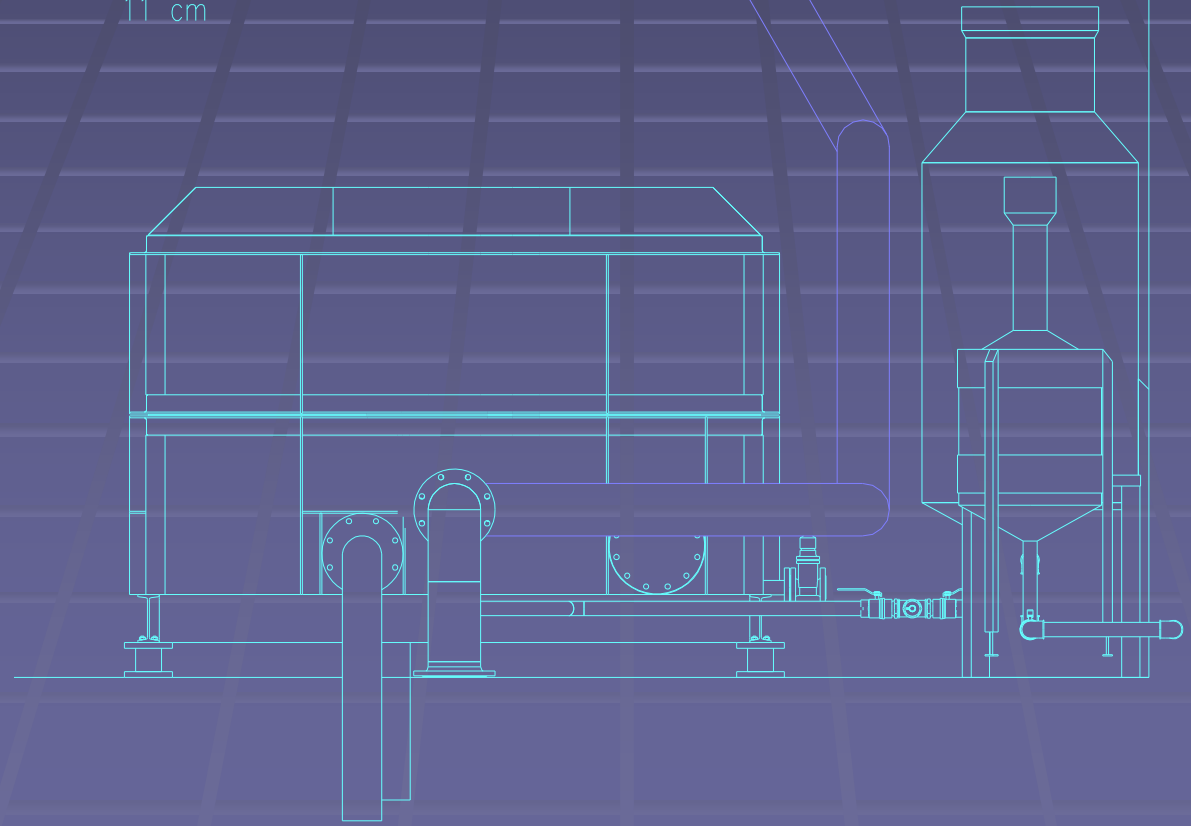
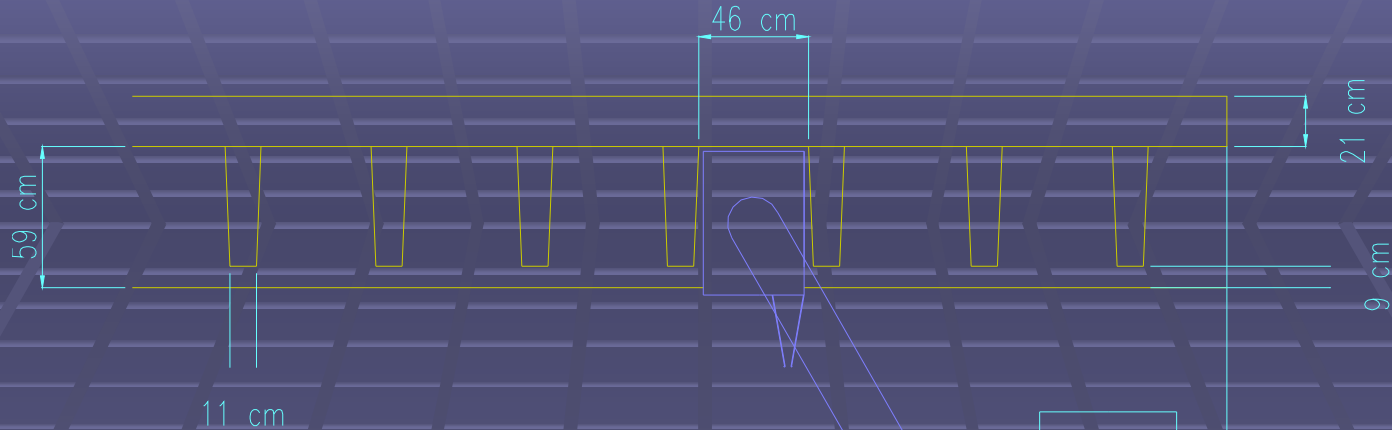
 - kutija za umirenje mlaza

 - opseg protoka Q (5l/s-100l/s)

 - brzina na izlazu iz mlaznika $V \sim 2.5$ m/s







21 cm

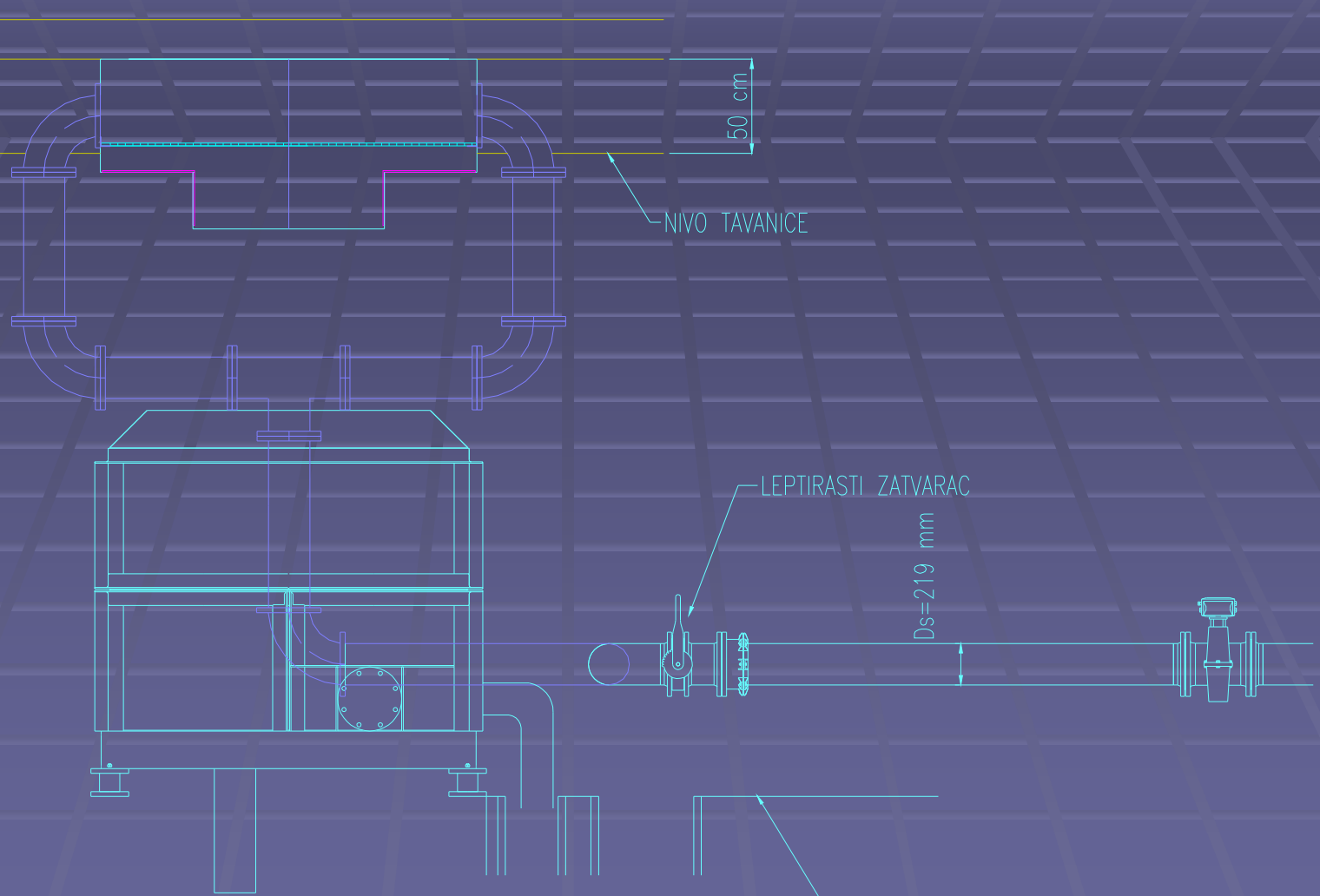
50 cm

NIVO TAVANICE

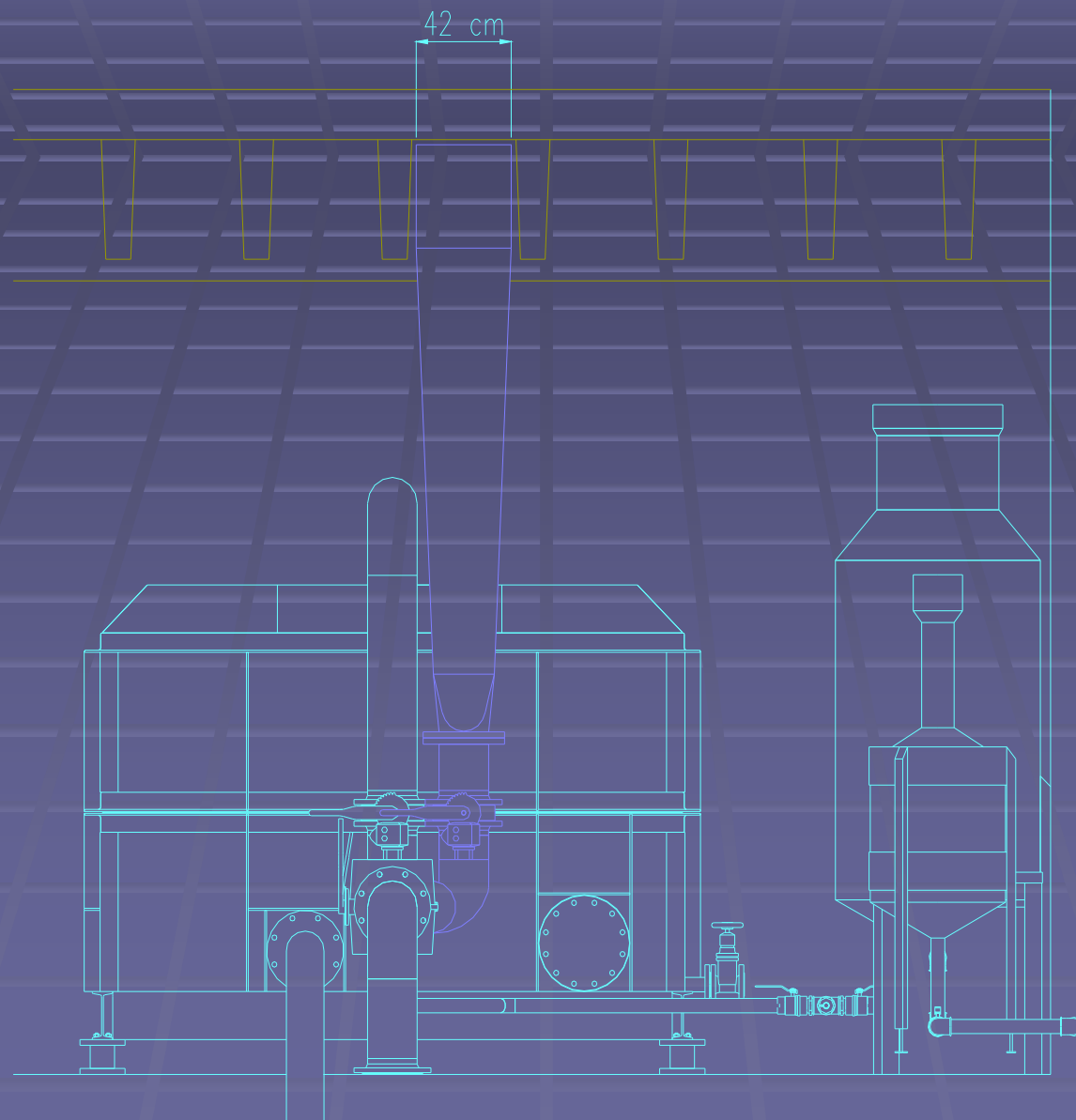
LEPTIRASTI ZATVARAC

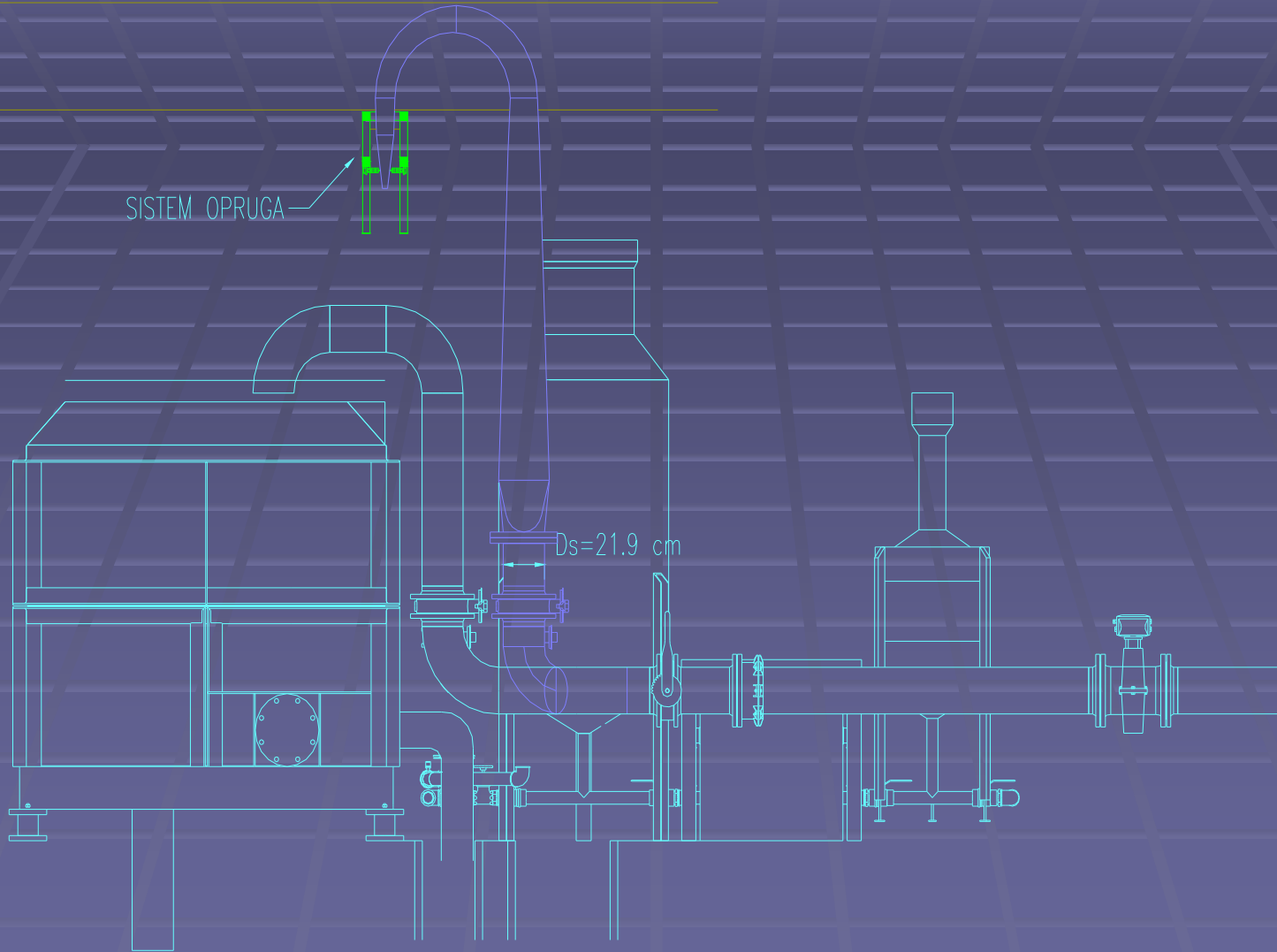
$D_s = 219$ mm

NIVO PODA



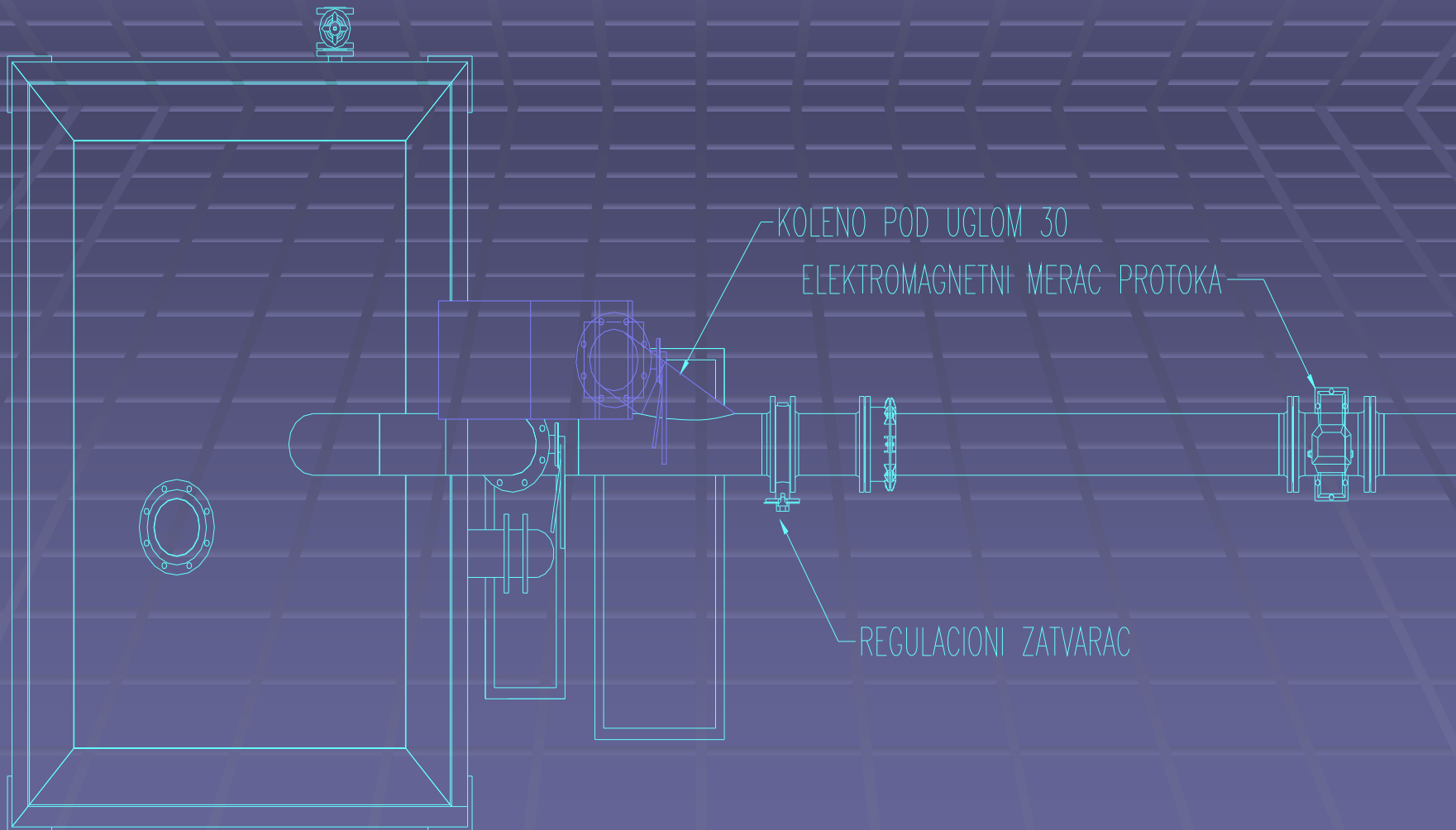
■ Drugo varijantno rešenje



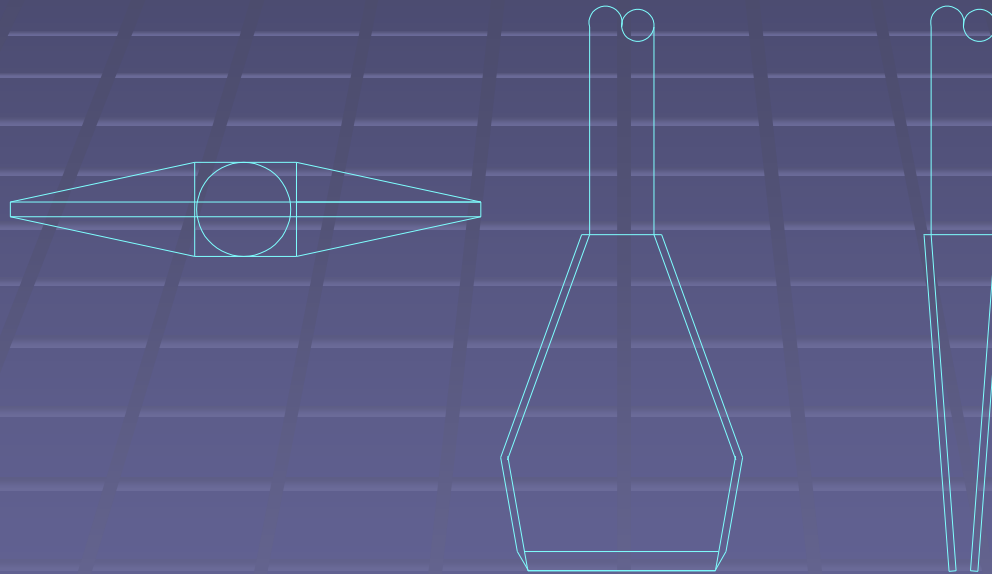


SISTEM OPRUGA

$D_s = 21.9 \text{ cm}$



- Mogući oblici mlaznika



8. Izrada fizičkog modela

$$X_{ob}/X_{mod}=X_*$$

Pr. Brzina i njena razmera V_* koja zavisi od razmere za dužinu i vreme
(L_*, T_*)

$$V_* = V_{ob}/V_{mod} = L_{ob}/T_{ob} / L_{mod}/T_{mod} = L_*/T_*$$

$$[V] = [L/T]$$

-Uslovi sličnosti (zakoni sličnosti)

-Bezdimenzionalne veličine se prenose nepromenljive sa modela na objekat, razmera za njih je jedinica.

-Reynoldsov broj

$$Re = idem \quad tj. \quad Re_* = V_* \cdot L_* \cdot \rho_* / \mu_* = 1$$

"Idem" označava istovetnost, nepromenljivost pri prenošenju sa modela na objekat.

■ Izbor dimenzija modela

Frudova sličnost:

$$Fr = V^2 / g \cdot L$$

V- brzina tečenja vode,

g -ubrzanje zemljine teže

L- izabrana karakteristična dužina

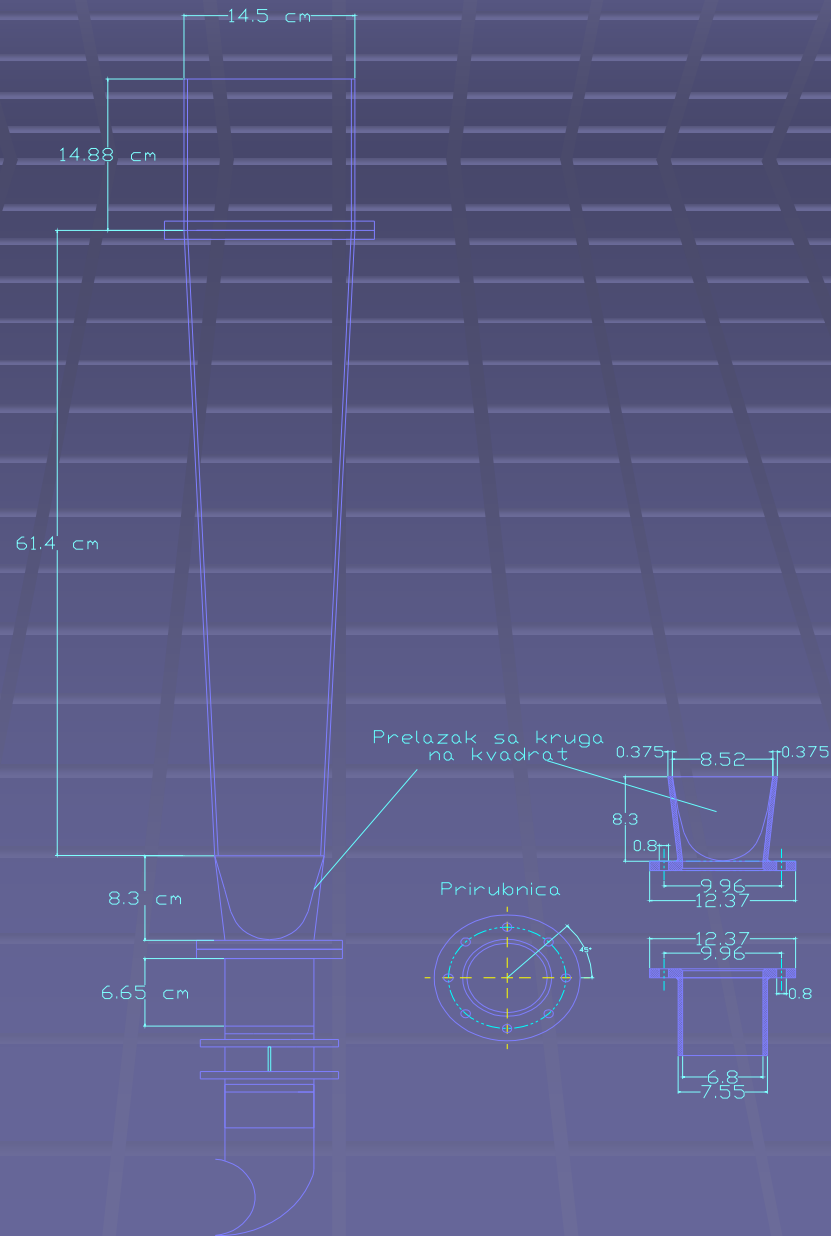
Model je izgrađen sa razmerom za dužine $L_* = 3$

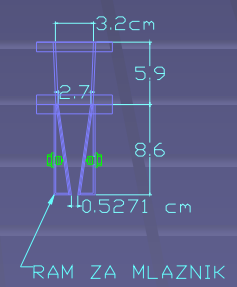
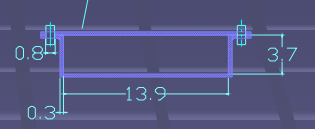
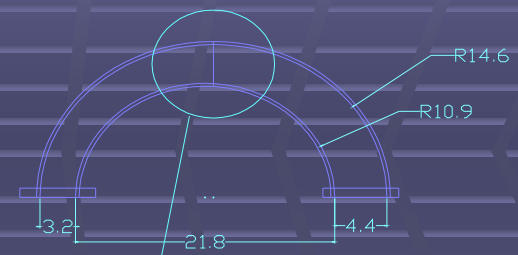
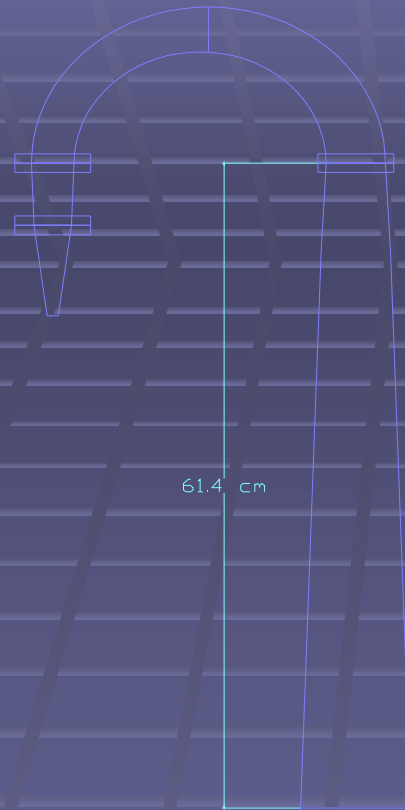
brzina $V_* = L_*^{1/2} = 1,732$

vreme $t_* = L_*^{1/2} = 1,732$

protok $Q_* = L_*^{5/2} = 15,5885$

■ Projekat modela

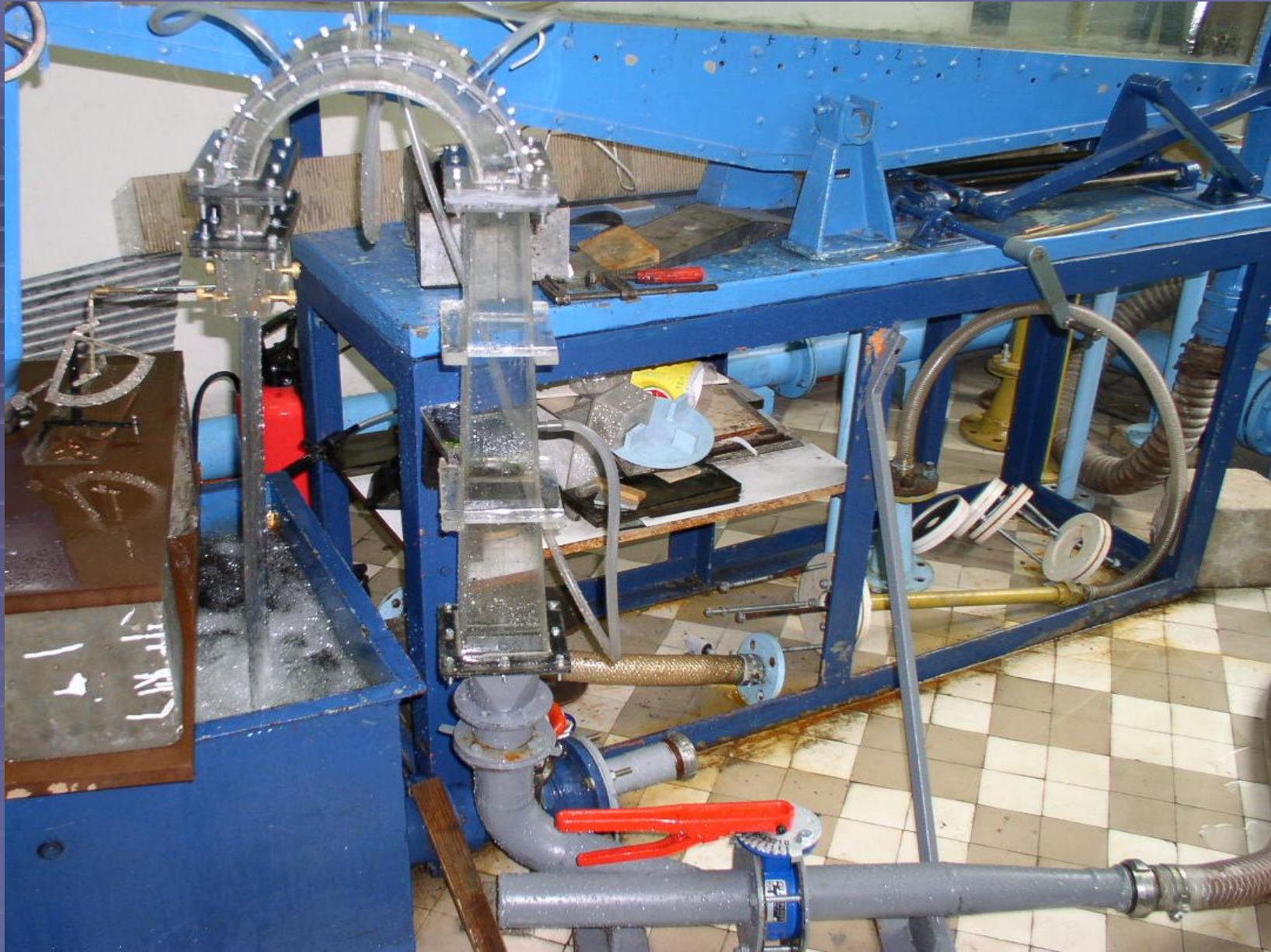


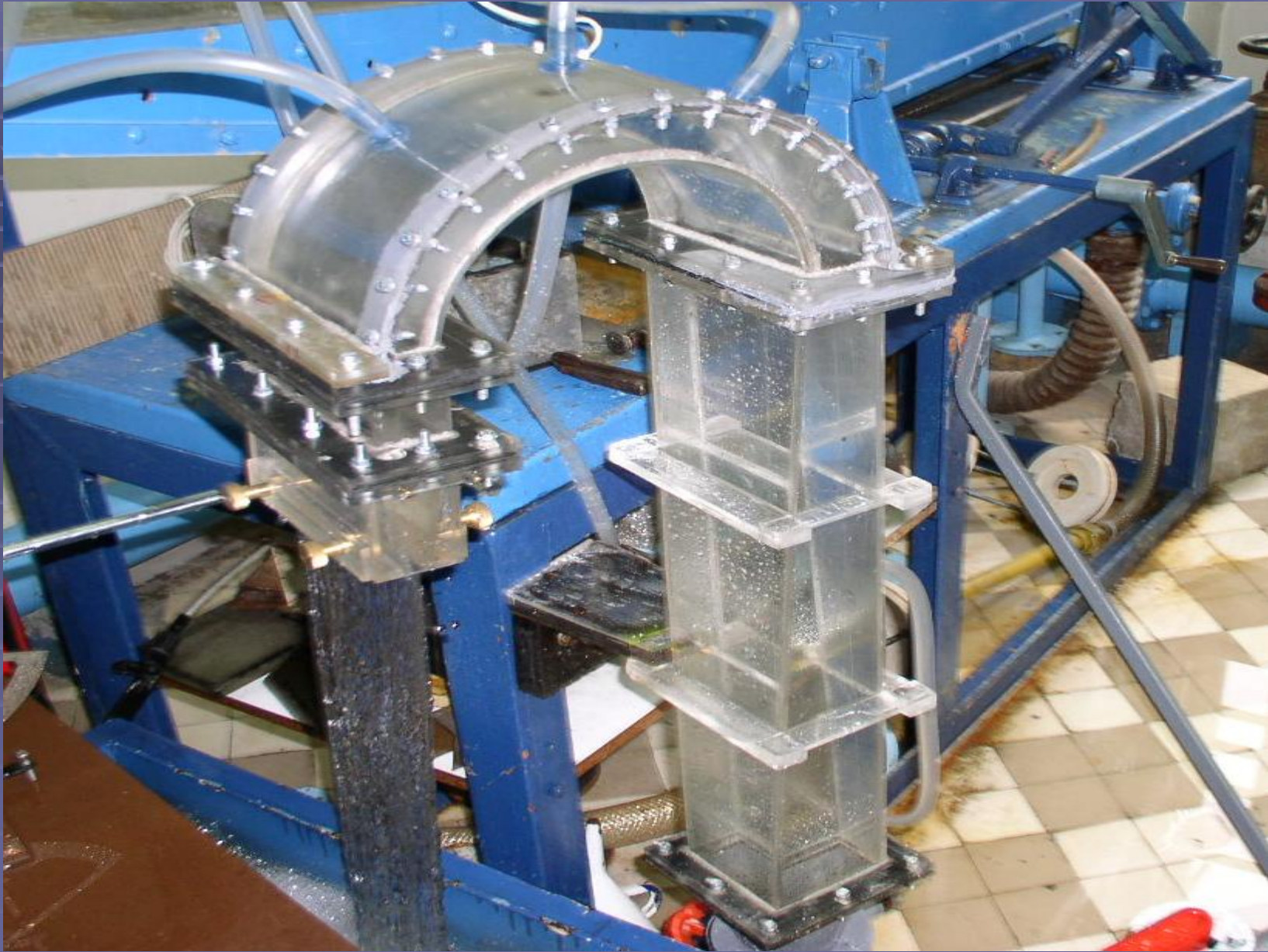


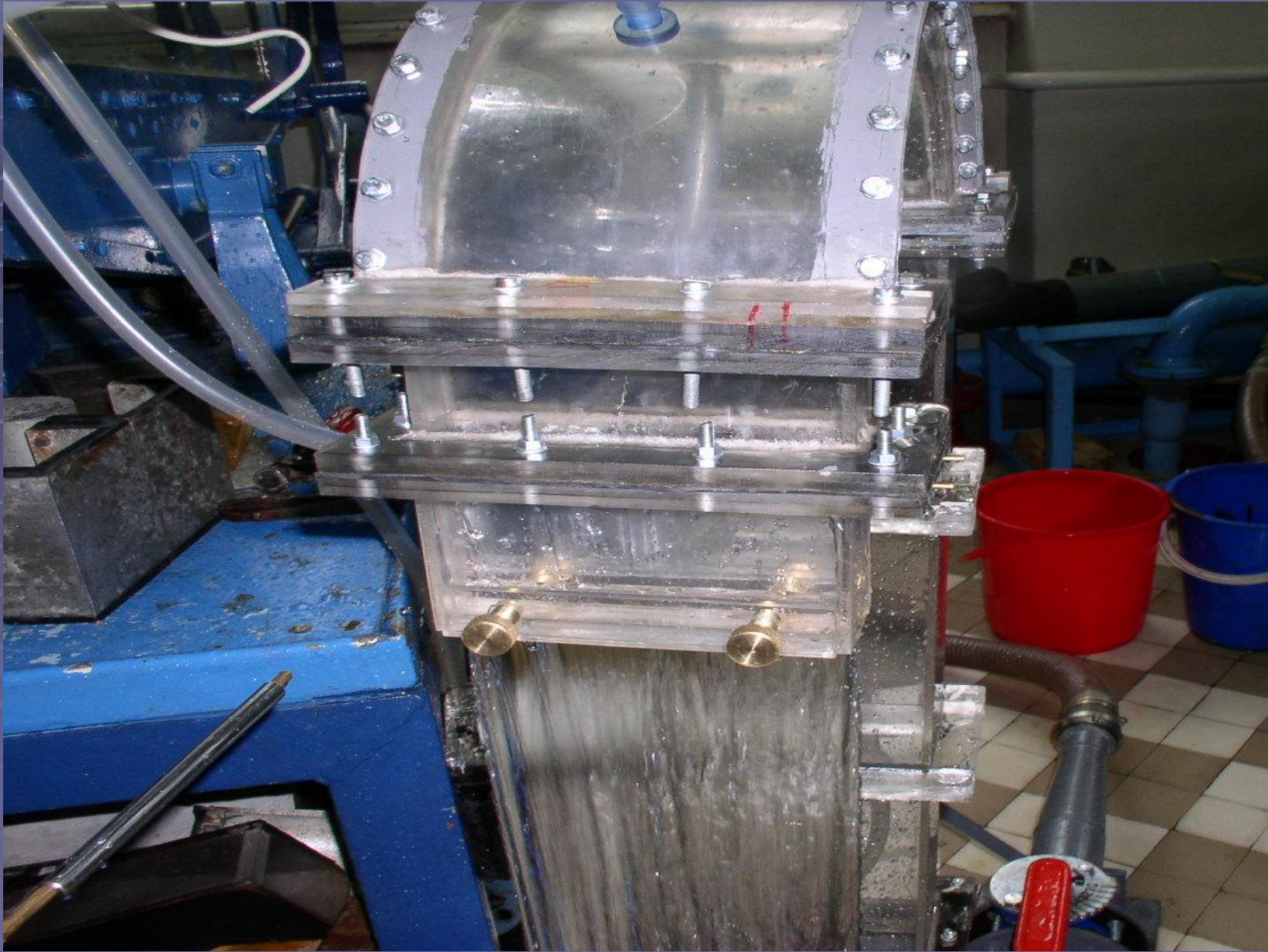
9. Rezultati prvih merenja

- Fotografije modela







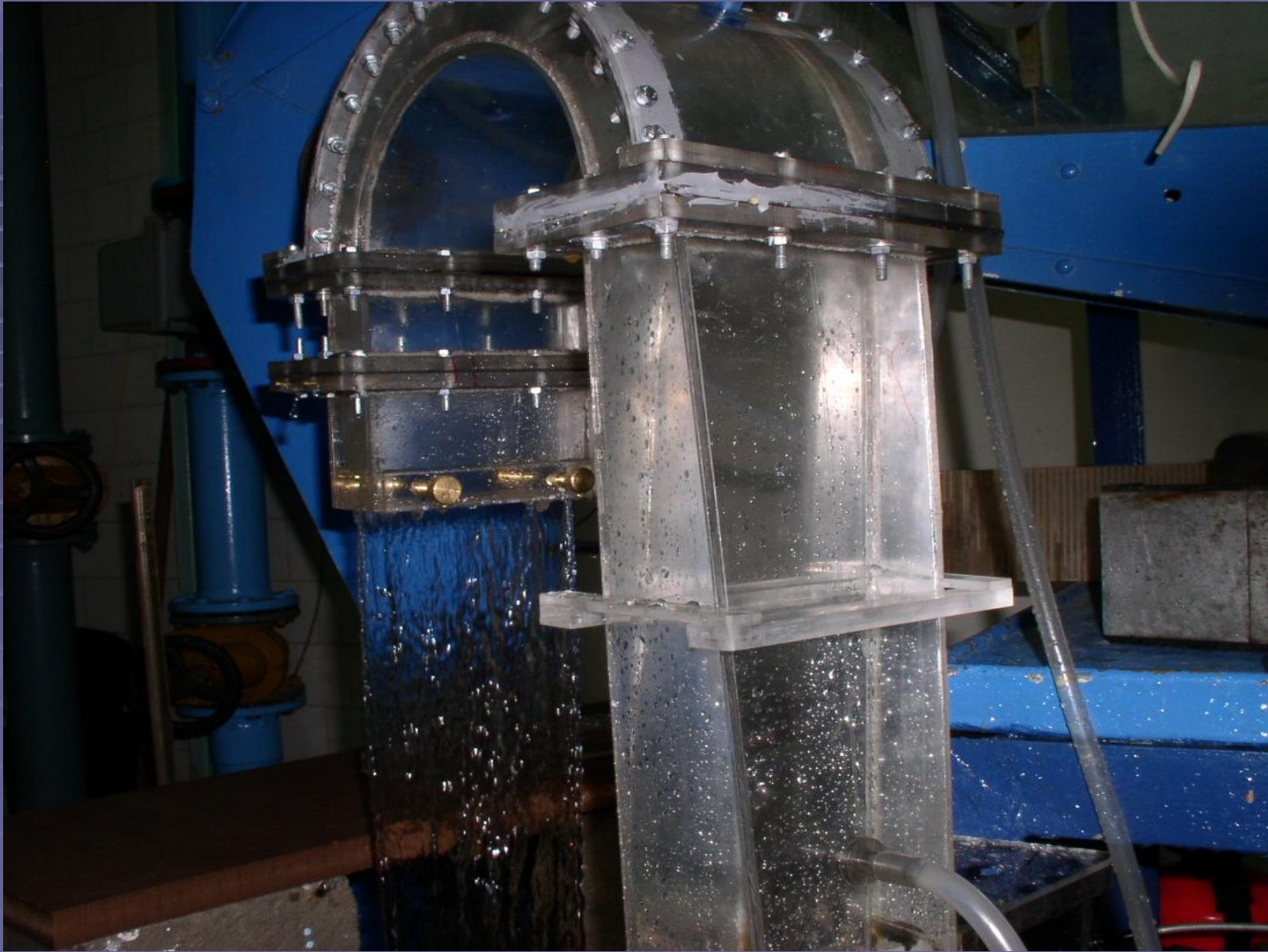












- Rezultati merenja visina pritisaka po konturi mlaza

$b = 5,271 \text{ mm}$

Q (l/s)	H1 (cm)	H2 (cm)	H3 (cm)	H4 (cm)	H5 (cm)
6,4	239,8	241,6	242,8	240,2	245,2
4,14	109,9	111,4	112,1	110,5	113,4
3,8	90,9	92,8	93,4	91,2	94,35
3,47	72,5	73,3	73,6	71,8	74,5
3,17	60,2	61	61,4	59,7	62,3
2,86	39,4	39,9	40,3	39	41,5
2,36	19,3	19	20,2	19,2	20,4
2,15	11,3	10,2	12,4	12,9	13,6

Pri protoku $Q = 1,8 \text{ l/s}$ a pri otvorenosti izlaznog mlaznika $b = 5,271 \text{ mm}$ počinje uvlačenje vazduha u model

$b = 4,0 \text{ mm}$

Q (l/s)	H1 (cm)	H2 (cm)	H3 (cm)	H4 (cm)	H5 (cm)
5,13	274,3	275,6	276,2	274,2	277,1
3,04	151,4	152,1	152,9	150,7	153,4
2,26	89,2	89,9	93,2	89	90,3
2	65,2	65,8	66,1	71,8	66,3
1,9	56,2	56,7	56,9	55,9	57,1
1,785	46,6	47,1	47,3	46,5	47,7
1,29	12,2	12	12,9	13,9	14,4

Pri protoku $Q = 1,2 \text{ l/s}$ a pri otvorenosti izlaznog mlaznika $b = 4,0 \text{ mm}$ počinje uvlačenje vazduha u model

$b = 3,0 \text{ mm}$

Q (l/s)	H1 (cm)	H2 (cm)	H3 (cm)	H4 (cm)	H5 (cm)
4,94	416,8	417,7	418,2	416,5	419,7
3,42	264,2	265,5	265,8	264,1	266,3
2,14	89,7	90,5	90,9	89,6	91,2
2,02	76,8	77,4	77,7	76,6	78,1
1,46	26,2	26,4	26,7	27,1	27,5
1,14	7,6	7	7,5	7,7	8,6

Pri protoku $Q = 1,13 \text{ l/s}$ a pri otvorenosti izlaznog mlaznika $b = 3,0 \text{ mm}$ počinje uvlačenje vazduha u model

b= 2,0 mm

Q (l/s)	H1 (cm)	H2 (cm)	H3 (cm)	H4 (cm)	H5 (cm)
3,84	382,7	383,2	383,9	382	384,3
2,57	231,4	231,7	232,2	231,1	232,5
1,27	69,3	69,4	69,6	69	69,7
1,19	58,7	58,9	59,1	58,4	59,3
1,14	51,6	51,8	52	47,3	52,1
1,09	46,7	46,9	47,1	42,5	47,3
0,79	12,4	12	12,8	11,7	13,4

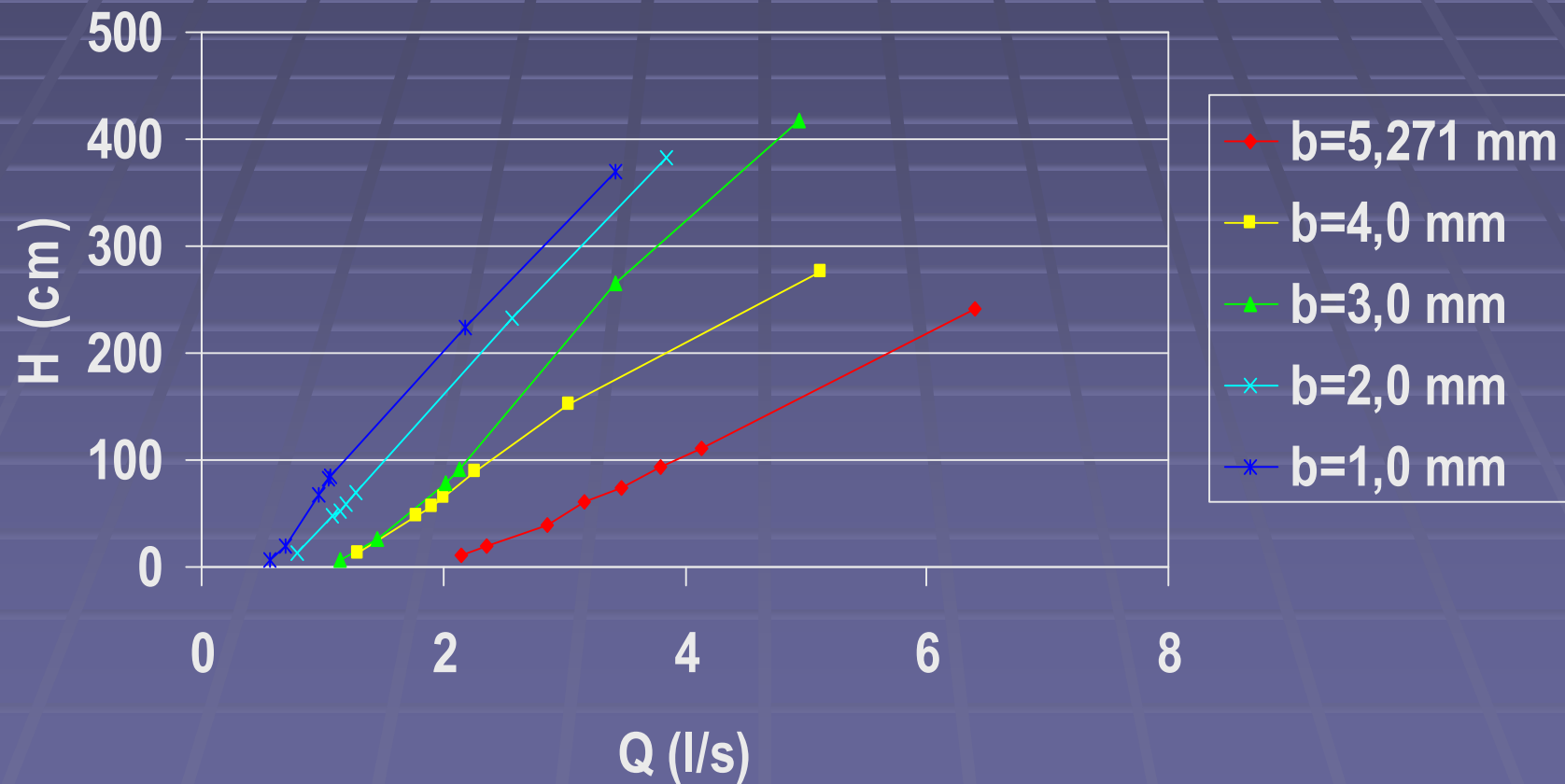
Pri protoku $Q = 0,78$ l/s a pri otvorenosti izlaznog mlaznika $b = 2,0$ mm počinje uvlačenje vazduha u model

$b = 1,0 \text{ mm}$

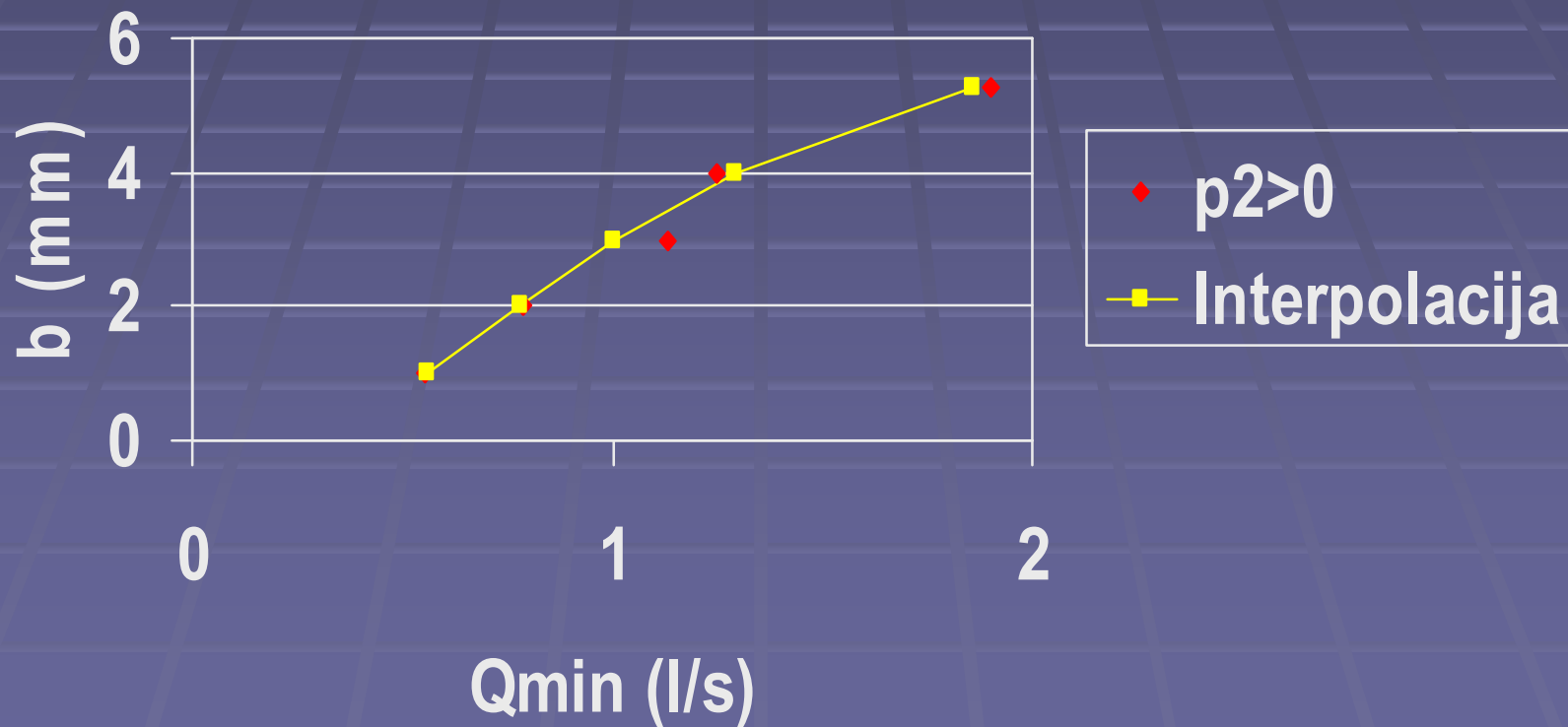
Q (l/s)	H1 (cm)	H2 (cm)	H3 (cm)	H4 (cm)	H5 (cm)
3,42	368,2	368,5	368,7	368,1	369,3
2,18	224,2	224,6	224,7	224,2	224,9
1,065	84,9	85,1	85,15	84,8	85,2
1,045	81,7	81,9	82,1	81,6	81,9
0,97	68,2	68,4	68,7	68,1	68,9
0,69	20,3	20	20,2	22,8	23
0,56	6,1	5,9	6,6	7,1	7,4

Pri protoku $Q = 0,55 \text{ l/s}$ a pri otvorenosti izlaznog mlaznika $b = 1,0 \text{ mm}$ počinje uvlačenje vazduha u model

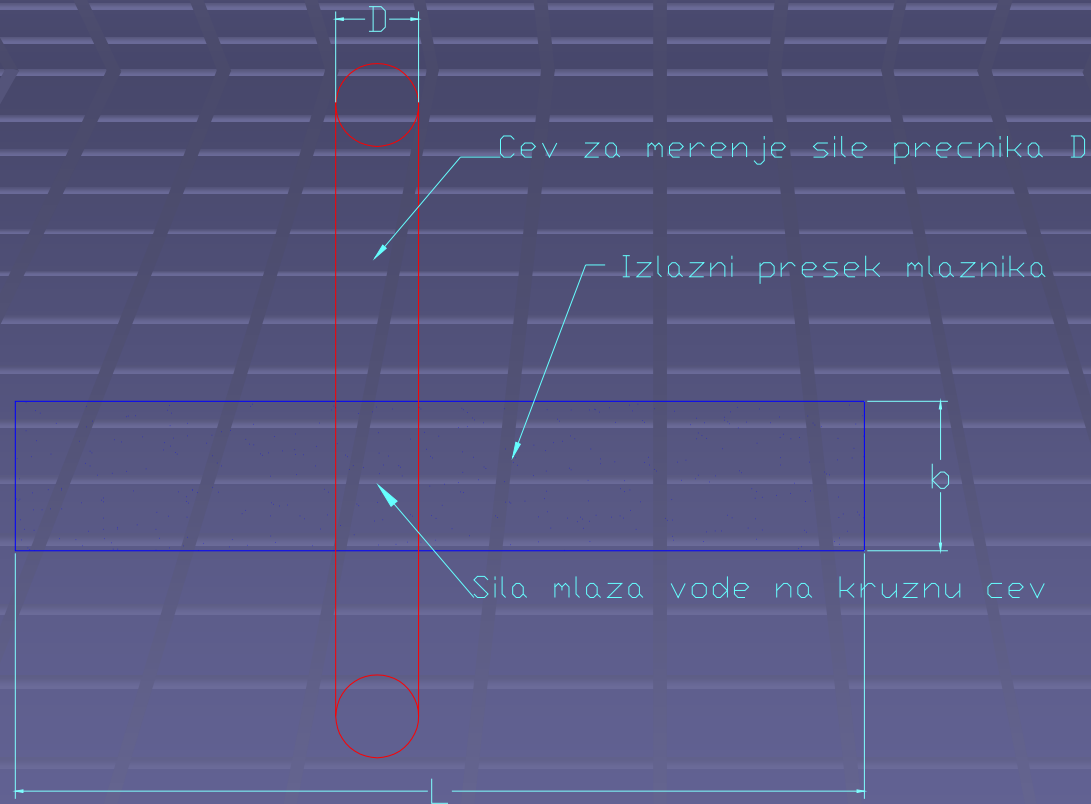
Vrednosti pritiska za različite sirine izlaznog mlaznika



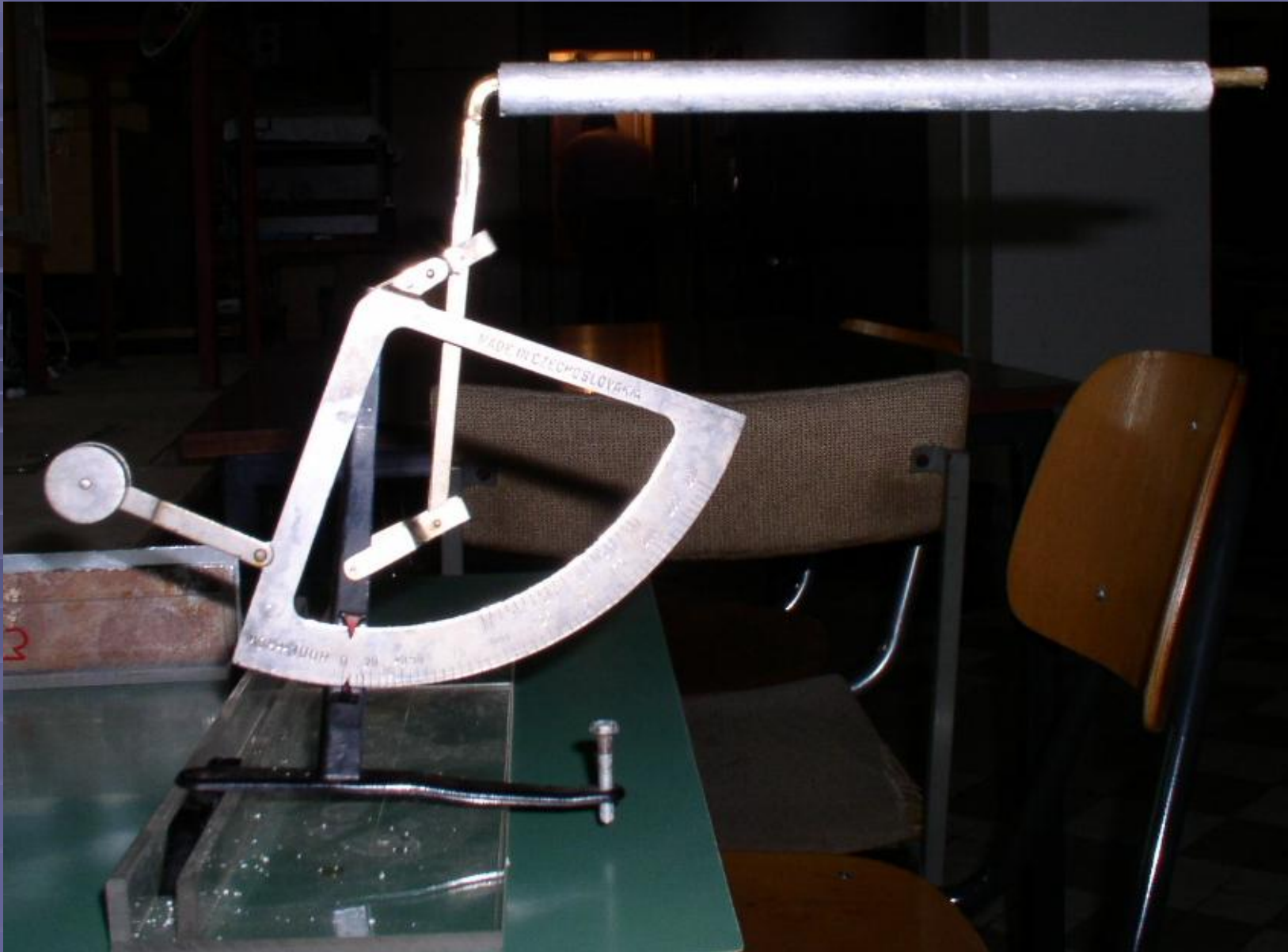
Minimalne dozvoljene vrednosti protoka za različite širine izlaznog mlaznika



■ Rezultati merenja rasporeda brzina na izlazu



Pogled odozgo na otvor izlaznog mlaznika i cevi prečnika D za prihvatanje sile



Vaga za merenje sile na izlazu iz mlaznika



-Izmerene vrednosti sile na izlazu iz mlaznika:

b= 5,271 mm

Q (l/s)	3,8	3,46	2,27
V (m/s)	5,197	4,732	3,104
D (mm)		F (N)	
10	0,678	0,539	0,27
12	0,834	0,735	0,342
14	0,957	0,784	0,39

-Sila mlaza tečnosti zavisi od D, V i ρ

$$F=F(D,V,\rho)$$

$$[F]=[D^2V^2\rho]$$

$$F=1/2 \cdot C_F \cdot D^2 \cdot V^2 \cdot \rho$$

C_F - bezdimenzionalna veličina, koefijent sile

$A=D^2$ površina cevi na koju deluje mlaz, može da se usvoji da je površina $A=D \cdot b$

$$V=Q/A_{ml}$$

$$A_{ml}=L \cdot b$$

$$\rho=1000 \text{ kg/m}^3$$

$$L=13.873 \text{ cm}$$

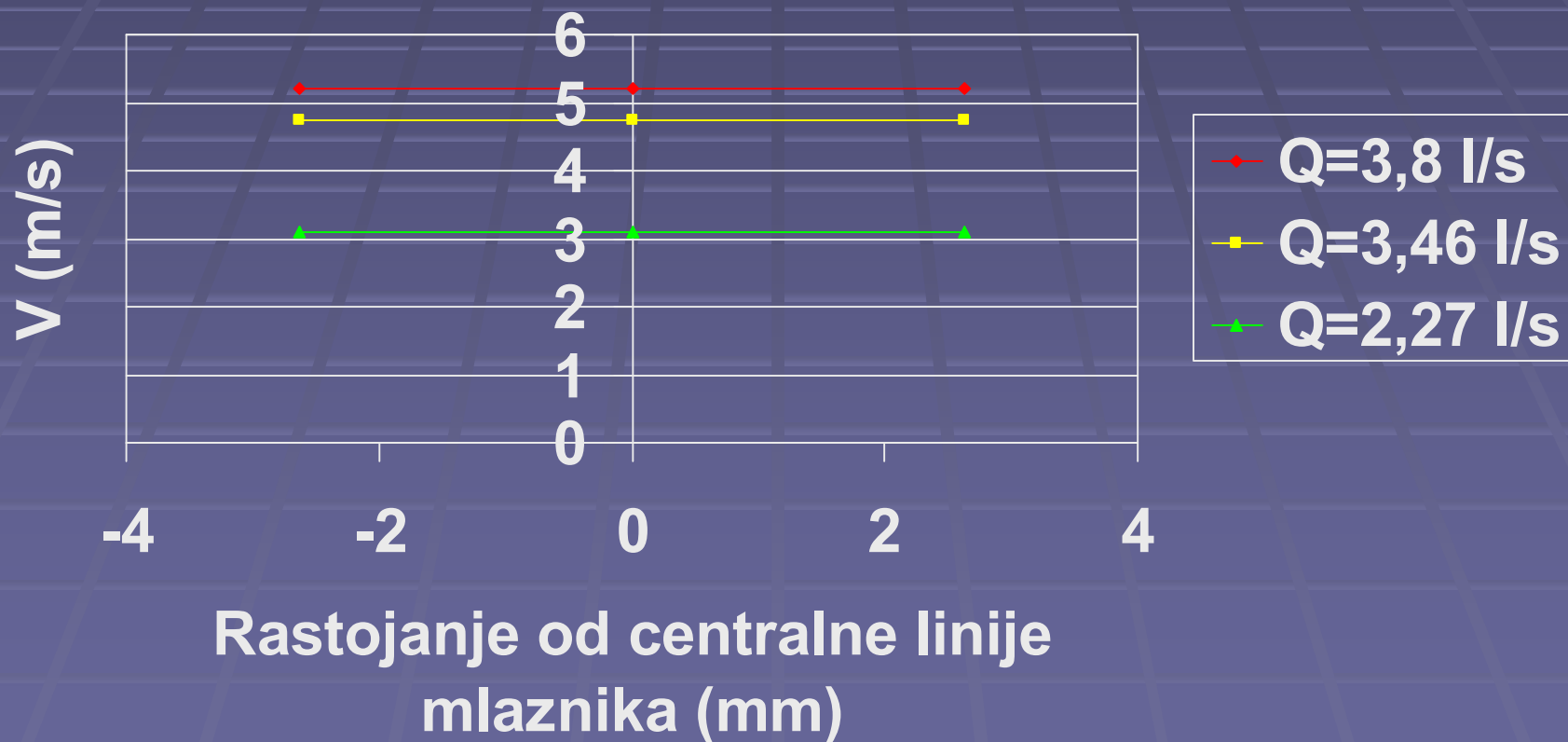
Q (l/s)	3,8	3,46	2,27
V (m/s)	5,197	4,732	3,104
D (mm)		C_F	
10	0,953	0,913	1,063
12	0,976	1,038	1,122
14	0,960	0,949	1,097

Vrednosti koeficijenta C_F za površinu $A=D \cdot b$

Q (l/s)	3,8	3,46	2,27
V (m/s)	5,197	4,732	3,104
D (mm)		C_F	
10	0,502	0,481	0,560
12	0,429	0,456	0,493
14	0,362	0,357	0,413

Vrednosti koeficijenta C_F za površinu $A=D^2$

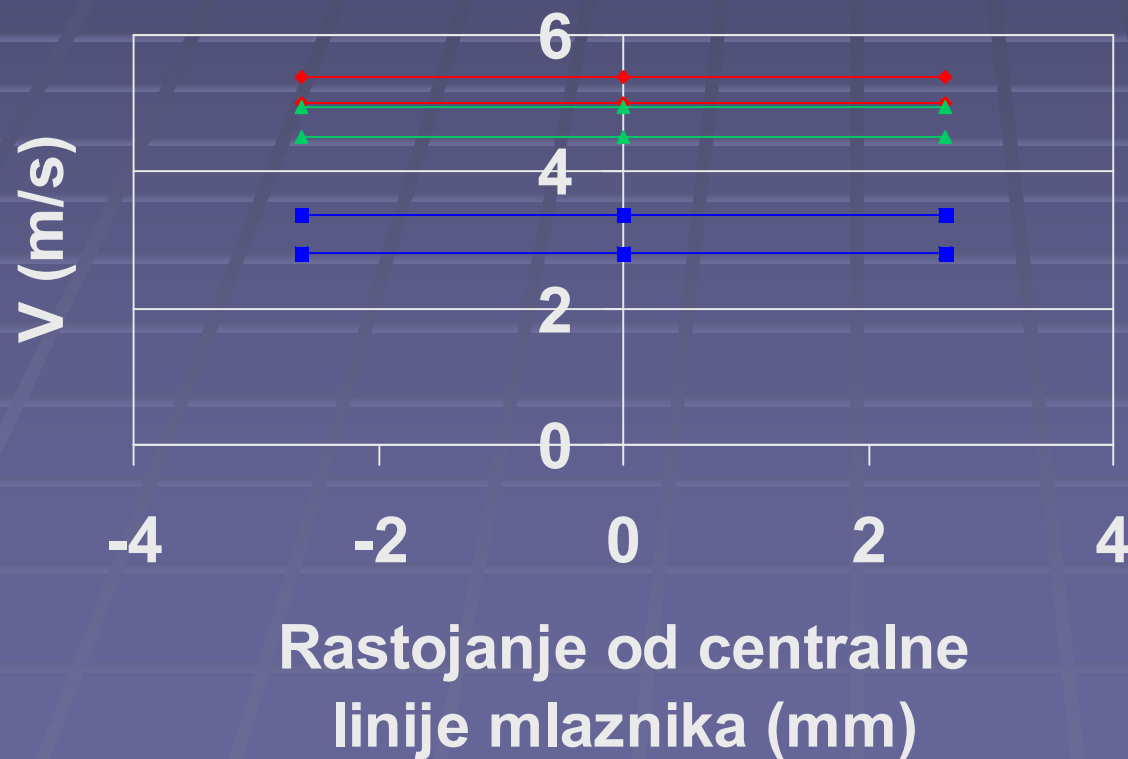
Profil brzina tečnosti blizu izlaza mlaza za širinu izlaznog mlaznika $b=5,271$ mm



-Osetljivost vage:

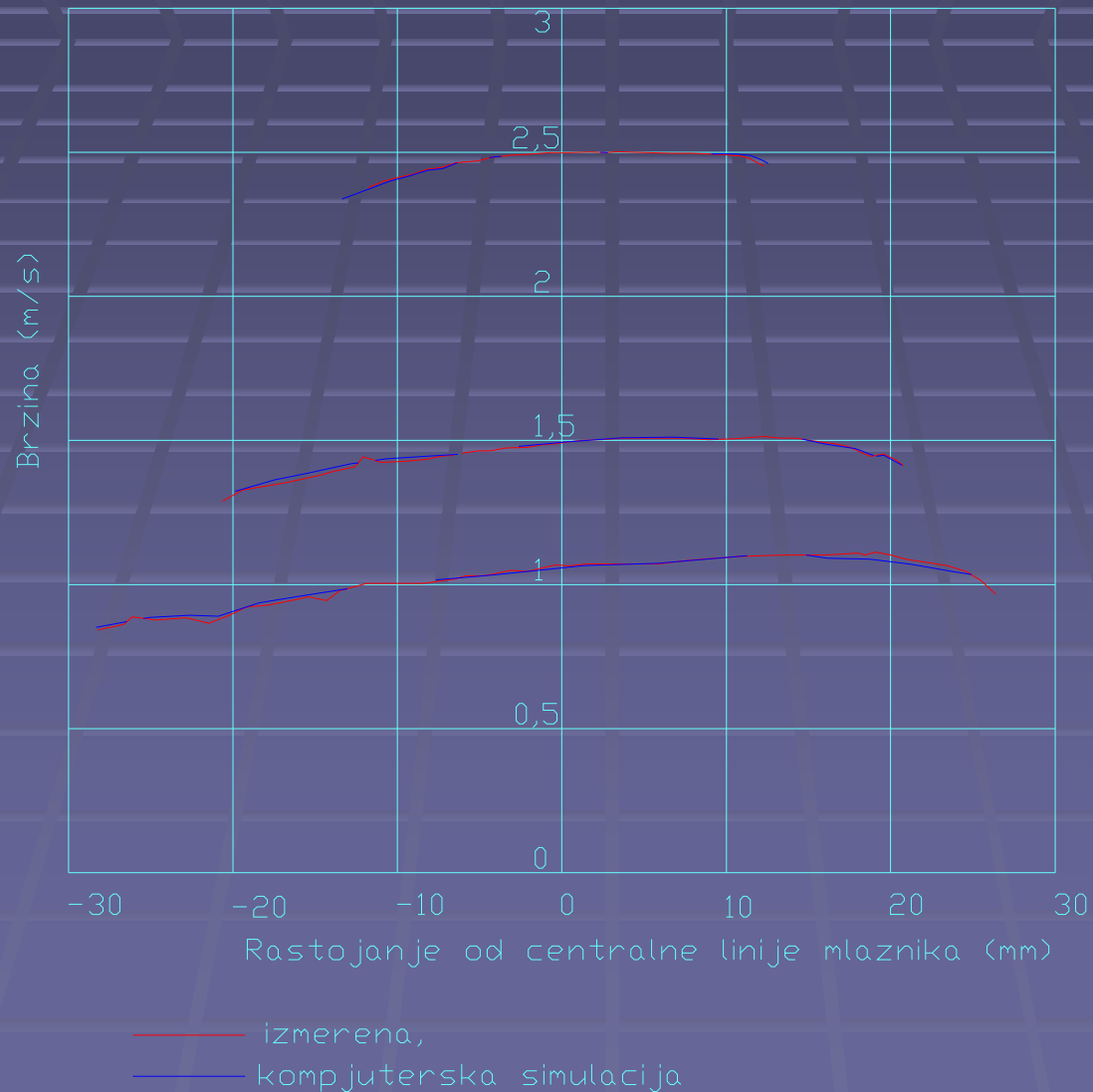
$$F \pm \Delta F = F \pm 5g = F \pm 0,05 \text{ N}$$

Mogući opseg za različite brzine tečnosti blizu izlaza mlaza



- $F(Q=3,8)+0,05 \text{ N}$
- ▲ $F(Q=3,8)-0,05 \text{ N}$
- $F(Q=3,46)+0,05 \text{ N}$
- ▲ $F(Q=3,46)-0,05 \text{ N}$
- $F(Q=2,27)+0,05 \text{ N}$
- $F(Q=2,27)-0,05 \text{ N}$

- Stvarni profil brzina na izlaznom mlazniku za tri različite širine izlaznog mlaznika



10. Zaključak

- Ovaj diplomski rad pokazuje inženjersku primenu standardnih metoda u praksi. Kao takav predstavlja dobar primer primene standardizovanih metoda i njihovim povezivanjem sa inženjerskim projektovanjem.
- U nastavku ispitivanja modela izlaznog mlaznika treba obratiti više pažnje na razne položaje regulacionog leptirastog ventila i videti kako svaki položaj pojedinačno utiče na mlaz tečnosti, kako će se tečnost ponašati pri prolasku kroz opitnu instalaciju i da li će različiti položaji ventila uticati na izlazni mlaz.
- Preporuka za dalje ispitivanje:
Trebalo bi obezbediti veću površinu poprečnog preseka izlaznog mlaznika, povećati širinu, da bi se dobile manje brzine tečnosti blizu izlaza mlaza. Optimalan opseg ovih brzina je do 2m/s - 2.5 m/s.
- U nastavku treba dati konstrukcijsko rešenje za diverter-skretač mlaza koji treba da obezbedi što brže prebacivanje vode iz rezervoara na vagi u odvodnu posudu. Pokretanje divertera treba da bude dovoljno brzo da se izbegne mogućnost pravljenja grešaka tokom merenja vremena punjenja.
- Instalacija razmatrana ovim diplomskim obogaćuje obim i kvalitet rada u laboratoriji Instituta za Hidrotehniku.

11. Spisak korišćene literature

- [1] Raus H. (1969) Tehnička hidraulika
- [2] Maksimović C. (1993) Merenja u hidrotehnici
- [3] Idelchik I.E. (1975) Handbook of Hydraulic Resistance
- [4] Batinić B. (1994) Hidraulika
- [5] Hajdin G. (1980) Mehanika Fluida
- [6] Hayward T.J.A. (1977) Flowmeters
- [7] Poeschel W., Engel R., Dopheide D. A unique fluid diverter design for water flow calibration facilities
- [8] Prodanović D. (2002) Merenja u hidrotehnici